

Innowacje techniczne i technologiczne w naukach inżynieryjnych

Redakcja: Kamil Maciąg, Iwona Domina

Lublin 2023

**Innowacje techniczne
i technologiczne w naukach
inżynierskich**

Innowacje techniczne i technologiczne w naukach inżynierskich

Redakcja:
Kamil Maciąg
Iwona Domina

Lublin 2023

**Wydawnictwo Naukowe TYGIEL składa serdeczne podziękowania
zespółowi Recenzentów za zaangażowanie w dokonane recenzje
oraz merytoryczne wskazówki dla Autorów.**

Recenzentami niniejszej monografii byli:

- prof. dr hab. inż. Józef Jonak
- prof. dr hab. inż. Jarosław Mizera
- dr hab. Agnieszka Królicka
- dr hab. Grzegorz Mazurek, prof. PŚk
- dr inż. Bartłomiej Ambrożkiewicz
- dr Ewa Baier
- dr inż. Tomasz Bury
- dr Ewa Chrzumnicka
- dr inż. Dorota Dardas
- dr inż. Wojciech Filipowski
- dr inż. Grzegorz Kinal
- dr inż. Julita Krassowska
- dr inż. Daniel Lichoń
- dr inż. Krzysztof Nepelski
- dr inż. Piotr Palimąka
- dr inż. Radosław Patyk
- dr inż. Marta Sybis

Wszystkie opublikowane rozdziały otrzymały pozytywne recenzje.

Skład i łamanie:

Monika Maciąg

Projekt okładki:

Marcin Szklarczyk

Korekta:

© Copyright by Wydawnictwo Naukowe TYGIEL sp. z o.o.

ISBN 978-83-67881-18-0

Wydawca:

Wydawnictwo Naukowe TYGIEL sp. z o.o.

ul. Głowackiego 35/341, 20-060 Lublin

www.wydawnictwo-tygiel.pl

Spis treści

Stanisław Kachel, Robert Rogólski, Paweł Czerniszewski Problematyka i perspektywy projektowania struktur nośnych lekkich samolotów klasy General Aviation w aspekcie optymalizacji wielokryterialnej	7
Ewelina Stężycka, Krzysztof Kęćik Badania numeryczne współczynnika sprzęgnięcia w elektromagnetycznym układzie do odzyskiwania energii elektrycznej	23
Justyna Waśniowska Badania irradiancji promieniowania elektromagnetycznego w zależności od wielkości piksela na matrycy sensorów	33
Mikołaj Cielibała, Natalia Skrzyniarz, Michał Osełka, Piotr Ramiączek Wpływ rodzaju destruktu asfaltowego na właściwości mieszanki mastyksu grysowego SMA JENA 16.....	44
Marcin Lijewski, Krzysztof Plewa Zautomatyzowane stanowisko wytwarzania katod do baterii termicznych bazujące na nowoczesnym układzie dozowania materiałów proszkowych	61
Stanisław Andrzej Różański Kierunki i perspektywy zastosowania ciekłych kryształów w ogniwach fotowoltaicznych.....	81
Leszek Majkut Zastosowanie falki Laplace'a do identyfikacji współczynnika tłumienia modalnego.....	96
Rafał Kostro Nośność na ścinanie belek z betonu z mikrobrojeniem włóknistym w świetle norm	106
Robert Sołtysiak, Sławomir Cieślak, Piotr Wronkowski Wpływ zastosowania elementów konstrukcyjnych o zmiennej grubości na wyniki doświadczalne odkształceń/naprężeń przykładowych mebli metalowych.....	116
Mateusz Miksza, Łukasz Bohdal, Katarzyna Kośka Algorytm automatycznej analizy obrazu struktury na zglądach metalograficznych stopów z wyraźną granicą ziaren	131
Dariusz Tomkiewicz System monitorowania transportu ciepła i pary wodnej w przegrodach budowlanych.....	150

Elżbieta Pietrzykowska, Witold Łojkowski	
Degradacja bioresorbowalnych kompozytów z hydroksyapatytu i poliestrów stosowanych na implanty kostne	158
Iwona Dobosz	
Elektrochemiczna metoda otrzymywania bimetalicznych nanodrutów Ni-X w membranach anodowego tlenku glinu	169
Tomasz Gądek, Marcin Hojny, Jarosław Mac, Daniel Andrzejewski	
Opracowanie technologii wytwarzania aluminiowych słupów oświetleniowych, charakteryzujących się bezpieczeństwem biernym	186
Monika Gwóźdź-Lasoń, Wojciech Błaszczuk	
Analiza systemu ochrony konstrukcji inżynierskich przed spadającymi odłamkami skalnymi na przykładzie elastycznej bariery GeobruGG GBE500A.....	199
Stanisław Rawicki, Jerzy Podhajecki	
Nowe algorytmy jazdy tramwaju z minimalnym zużyciem energii	227
Waldemar Łasica	
Wpływ dodatku odpadowych wiórów stalowych na wartość współczynnika Poissona eko-fibrokompozytów cementowo-szklanych	239
Indeks Autorów	263

Problematyka i perspektywy projektowania struktur nośnych lekkich samolotów klasy General Aviation w aspekcie optymalizacji wielokryterialnej

1. Wprowadzenie

Projektowanie statków powietrznych stanowi czasochłonny proces polegający na nieustannym doskonaleniu użytkowanych metod oraz implementacji coraz bardziej zaawansowanego oprogramowania inżynierskiego. Zaprzestanie doskonalenia własnych algorytmów oraz narzędzi projektowania może doprowadzić do spadku wydajności względem podmiotów konkurencyjnych. W konsekwencji takiego stanu rzeczy można doprowadzić to do utraty znaczenia danego biura konstrukcyjnego na obszarze danego rynku. Przeciwdziałaniem stosowanym w tym przypadku są przede wszystkim nieustanne prace rozwojowe oraz podążanie za wyznaczonymi światowymi trendami konstrukcyjnymi w celu osiągnięcia założonego celu. Działanie powinno być nakierunkowane na cele najbardziej pożądane dla potencjalnych odbiorców oraz możliwe do zrealizowania z wykorzystaniem posiadanej technologii. Zgodnie z zasadami projektowania nowych konstrukcji zabieg ten powinien być podyktowany zauważalną potrzebą na innowacje w danej dziedzinie, w przeciwnym razie opracowanie nowej konstrukcji może nie przynieść oczekiwanego zwrotu z inwestycji. Ponadto w projektowaniu konstrukcji mających znaleźć zastosowanie przez długi czas niezbędne jest dostosowanie projektu do możliwości implementacji zmian do niego wprowadzanych tak by z czasem eksploatacji oraz rozwojem technologii istniała możliwość dopracowania konstrukcji w oparciu o nowe rozwiązania.

Celem pracy jest zaprezentowanie perspektywy rozwoju zagadnień optymalizacji wielokryterialnej struktur nośnych lekkich samolotów klasy General Aviation. W tym celu przedstawiono charakterystykę reprezentatywnego rynku lotniczego, a także podział podstawowych kategorii samolotów klasy General Aviation z wyszczególnieniem cech szczególnych. Drugim poruszonym zagadnieniem jest omówienie klasycznego oraz optymalnego modelu projektowania płatowca wraz z cyklem kompleksowego projektowania statków powietrznych. Główną częścią pracy jest przedstawienie propozycji modelu optymalizacji statków powietrznych.

2. Sektor General Aviation w Polsce

2.1. Perspektywy sektora General Aviation w Polsce

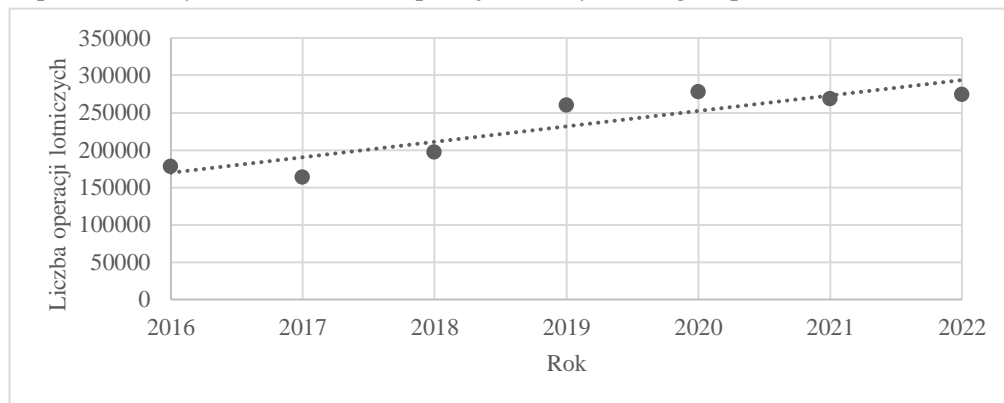
Termin *General Aviation* (GA) określa tzw. ogólny ruch lotniczy, czyli wszelkie operacje lotnicze realizowane z wykorzystaniem statków powietrznych (raczej małej wiel-

¹ stanislaw.kachel@wat.edu.pl, Zakład Budowy i Eksploatacji Statków Powietrznych, Instytut Techniki Lotniczej, Wydział Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna, www.wat.edu.pl.

² robert.rogolski@wat.edu.pl, Zakład Budowy i Eksploatacji Statków Powietrznych, Instytut Techniki Lotniczej, Wydział Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna, www.wat.edu.pl.

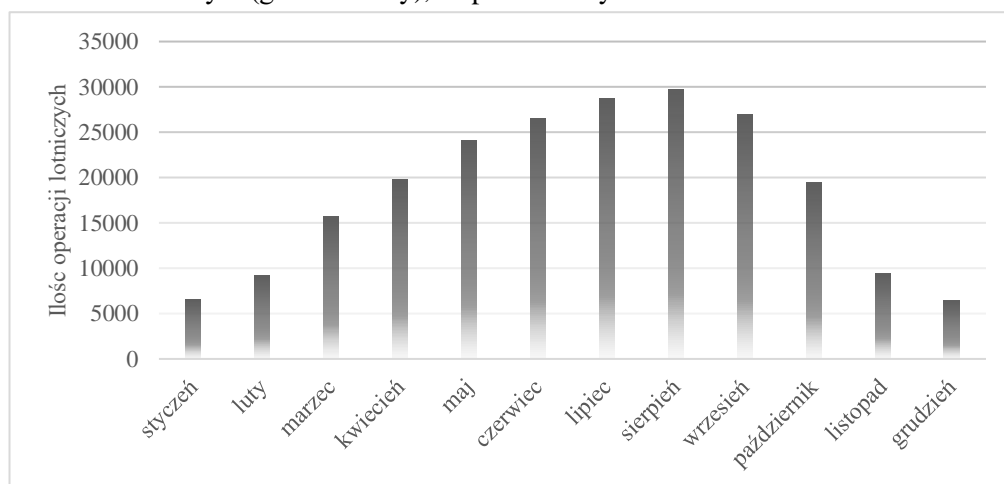
³ pawel.czerniszewski@wat.edu.pl, Szkoła Doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna, www.wat.edu.pl.

kości) inne niż te wykonywane w ramach regularnego transportu lotniczego lub masowych usług lotniczych. Według podsumowania ruchu lotniczego GA w Polsce w 2022 roku [1] opublikowanego przez Polską Agencję Żeglugi Powietrznej (PAŻP) informatorzy FIS (ang. *Flight Information Service*) odnotowali wykonanie 274 805 operacji lotniczych sektora GA w 2022 roku na terenie Polski. Jak wskazują autorzy ilość ta stanowi wzrost w stosunku do roku 2021 o 3,3% (268 582 operacje), jednocześnie notując spadek względem rekordowego roku 2020 o 1,1% (277 805 operacji). Uzupełniając omawiany raport o dane statystyczne ruchu GA w Polsce za lata 2016-2021 [2], można zauważyć gwałtowny wzrost operacji lotniczych omawianego sektora w ostatnich latach. Na rysunku 1 znajduje się graficznie zobrazowana dynamika rozwoju sektora w latach 2016-2022, w prezentowanym okresie wzrost operacji lotniczych osiągnął poziom 35%.



Rysunek 1. Liczba operacji lotniczych sektora General Aviation w Polsce w latach 2016-2022, opracowanie własne na podstawie [1, 2]

Według wskazań ww. raportu największa ilość operacji lotnictwa ogólnego odnotowywana jest w miesiącach letnich (czerwiec-sierpień), natomiast znacząco mniejsza w okresie zimowym (grudzień-luty), co pokazano rysunku 2.



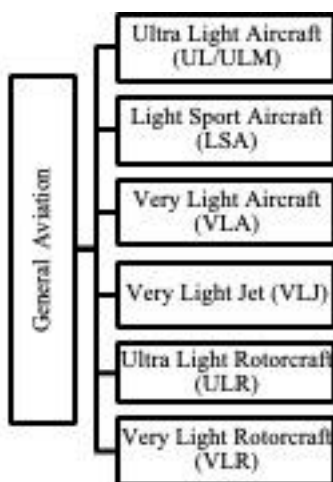
Rysunek 2. Średnia miesięczna liczba wykonywanych operacji lotniczych klasy General Aviation w Polsce w latach 2016-2022 opracowanie własne na podstawie [1, 2]

Tak duża rozbieżność wynika z sezonowości rynku w Polsce i jest zbieżna z europejskimi trendami w tej dziedzinie. Sytuacja inaczej prezentuje się w Stanach Zjednoczonych Ameryki (USA), jednak sektor GA w USA podlega znacząco mniejszym regulacją ze strony władz centralnych, wpływ na to ma przede wszystkim wielkość obszaru oraz zagęszczenie ruchu lotniczego, który w Polsce oraz Europie osiąga wartości wyższego rzędu.

2.2. Charakterystyka samolotów klasy General Aviation

Klasa samolotów lekkich GA w Polsce jak i w Europie podlega ścisłym regulacją ze strony jednostek władzy centralnej. W Polsce podmiotem odpowiedzialnym do spraw wyznaczania wymagań dla statków powietrznych danej kategorii jest Urząd Lotnictwa Cywilnego (ULC) działający w ramach Ministerstwa właściwego do spraw Infrastruktury. Na szczeblu europejskim odpowiedzialnym za wdrażanie procedur jest Europejska Agencja Bezpieczeństwa Lotniczego (EASA, ang. *European Union Aviation Safety Agency*) działająca w ramach Unii Europejskiej.

Samoloty klasy GA są to konstrukcje głównie utożsamiane z niedużymi statkami powietrznymi służącymi przede wszystkim do szkolenia podstawowego pilotów do uprawnień PPL (ang. *Private Pilote Licence*), a więc pierwszej licencji zdobywanej na drodze uzyskania uprawnień lotniczych. Sama kategoria definiuje się o wiele szerzej, przede wszystkim w ramach sektora mamy do czynienia z samolotami turystycznymi oraz sportowymi umożliwiającymi transport nawet do kilkunastu pasażerów. Jednak klasę GA nie definiują jedynie samoloty ale również śmigłowce, poglądowy sposób podziału sektora pokazano na rysunku 3. Porównując rynek europejski z amerykańskim występuje różnica pomiędzy nazewnictwem poszczególnych kategorii oraz wymaganiami stawianym dla konstrukcji. Różnica ta wynika z innego stopnia regulacji wprowadzanych przez FAA (ang. *Federal Aviation Administration*), organizacją odpowiedzialną za bezpieczeństwo lotnicze na terenie Stanów Zjednoczonych Ameryki. Jednocześnie w ostatnich latach można zaobserwować procesy mające na celu ujednoczenie wymagań w obrębie ustalenia wspólnych przepisów.



Rysunek 3. Poglądowe przedstawienie kategorii wchodzących w skład sektora General Aviation [opracowanie własne]

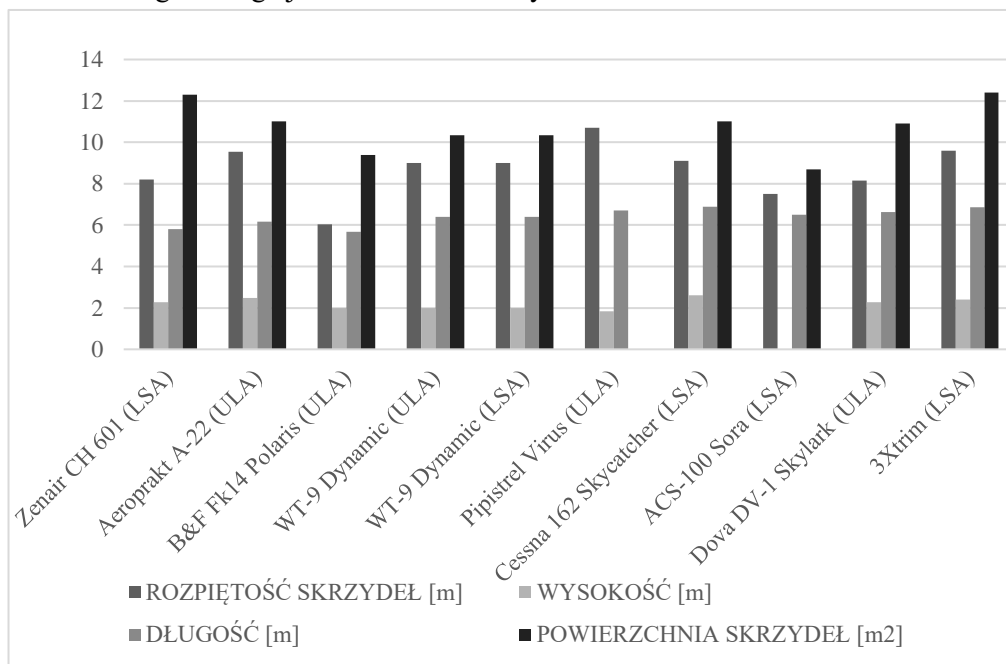
Wymagania konstrukcyjne, a w szczególności różnice dla podstawowych kategorii sektora GA (UL, LSA, VLA) zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie parametrów różnicujących wybrane kategorie UL/ULM, LSA i VLA

	UL/ULM	LSA	VLA
Maksymalna masa startowa (MTOW) [kg]	450,0/475,5	600,0/650,0	750,0/850,0
Maksymalna prędkość przeciągnięcia (CAS) [km/h]	63,0	83,0	83,0

Źródło: opracowanie własne na podstawie [3-6]

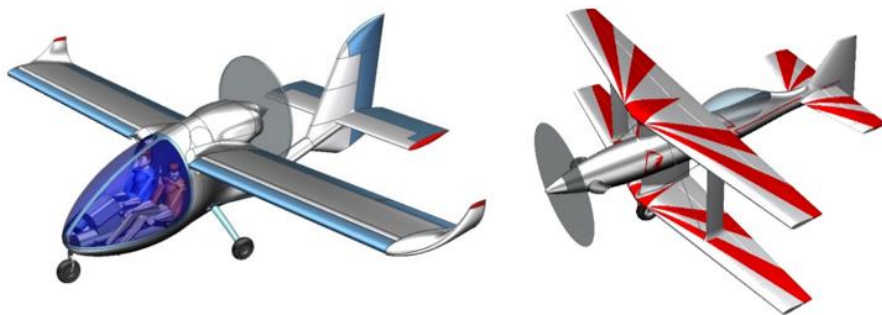
Zaprezentowana w tabeli 1 maksymalna masa startowa (MTOW, ang. *Maximum Take-off Weight*) jest podana w dwóch wariantach ze względu na możliwość przystosowania konstrukcji statków powietrznych do wykonywania operacji lotniczych z powierzchni zbiorników wodnych, oraz wyposażenia ich w system ratunkowy. W przypadku decyzji o wyposażeniu statku powietrznego w wyżej wymienione systemy dopuszczalna jest masa o większej wartości. Użyty termin maksymalnej prędkości przeciągnięcia (CAS, ang. *calibrated air speed*), oznacza także wskazywaną minimalną prędkość w locie ustalonym w konfiguracji do lądowania poprawioną o błąd przyrządu [6]. Samoloty prezentowanej klasy nie różnią się od siebie w ujęciu geometrycznym w znaczący sposób. Tłumaczy się to dostosowaniem konstrukcji statku powietrznego w taki sposób aby z niewielkimi modyfikacjami konstrukcyjnymi dane rozwiązanie mogło reprezentować kilka kategorii. Dla konstruktora jest to korzystne ponieważ dobrze zoptymalizowana konstrukcja może posłużyć za bazę rozwojową kolejnych konstrukcji. Dobrym przykładem takiego zabiegu jest samolot WT-9 Dynamic.



Rysunek 4. Porównanie parametrów geometrycznych wybranych samolotów klasy General Aviation [opracowanie własne]

Statystyka podstawowych wymiarów przedstawiona graficznie na rysunku 4 wskazuje, że rozpiętość skrzydeł samolotów klasy GA mieści się zwykle w przedziale od 6 do 9 m, z kolei długość kadłuba wynosi zazwyczaj od 6 do 7 m. Powierzchnia nośna to zwykle nieco ponad 10 m².

Samolotem lekkim najpopularniejszym w świecie i zbudowanym w największej ilości egzemplarzy jest amerykańska Cessna w wersjach 150/ 152/ 172. Inne popularne samoloty tej kategorii napędzane silnikami tłokowymi to również amerykańskie: Beechcraft Bonanza, Piper PA-24 Comanche, Cessna 210 Centurion, Mooney M20, Piper PA-32, czy wreszcie bardziej zaawansowany technologicznie Cirrus SR22. Najbardziej charakterystyczne konstrukcje pochodzące z Europy to austriackie Diamond DA20 i DA40, słoweński Pipistrel Virus, czy wreszcie ultralekki kompozytowy dwuosobowy samolot WT-9 Dynamic produkowany na Słowacji. Jeżeli chodzi o nowoczesne konstrukcje polskie to należałoby wymienić na pewno ultralekkie samoloty MP-02 Czajka, EKOlot JK-05L Junior, 3Xtrim. Prowadzone są aktualnie intensywne badania kwalifikacyjne i rozwojowe dotyczące prawdopodobnie najlepszej na świecie konstrukcji klasy VLJ, jaką ma szansę stać się samolot Flaris Lar-1. W realizację programu rozwojowego Flarisa zaangażowany jest zespół badawczy z Instytutu Techniki Lotniczej WML WAT. Inne oryginalne konstrukcje GA zaprojektowane, zbudowane i aktualnie badane w laboratoriach ITL WAT to dyspozycyjno-rozpoznawczy lekki samolot OSA oraz wycynowy samolot akrobacyjny Harnaś. Modele wirtualne tychże samolotów pokazano na rysunku 5.



Rysunek 5. Modele geometryczne samolotu dyspozycyjno-rozpoznawczego OSA oraz samolotu akrobacyjnego Harnaś [opracowanie własne]

Przepisy i rozporządzenia [3-6] dotyczące wymagań stawianych konstrukcją danej kategorii precyzują także dane dla prezentowanych samolotów. Jako wspólne cechy wspólne należy przyjąć ponadto:

- dostosowanie kabiny do konfiguracji 1+1, umożliwiającej lot dla pilota oraz pasażera;
- jako dopuszczalny napęd przewidziany jest pojedynczy silnik, nie będący silnikiem odrzutowym;
- maksymalna droga startowa nie powinna przekraczać 500 m;
- samoloty omawianych klas nie są przystosowane do wykonywania akrobacji lotniczych;
- zadania jakie mogą wykonywać w powietrzu ograniczają się do wszystkich manewrów umożliwiających lot.

Samoloty klasy UL/ULM, LSA oraz VLA mają swoją nieskomplikowaną konstrukcją umożliwić zapoznanie się pilota z warunkami panującymi w powietrzu, podtrzymywać podstawowe nawyki pilotażowe oraz popularyzować lotnictwo.

Perspektywą rozwoju samolotów kategorii GA z wykorzystaniem nowych rozwiązań jest zastosowanie przede wszystkim bardziej wytrzymałych materiałów konstrukcyjnych przy jednoczesnej redukcji masy własnej. Jednocześnie coraz częściej wykorzystywanym rozwiązaniem jest wytwarzanie komponentów lotniczych przy zastosowaniu technologii druku 3D [7] oraz zastosowanie napędów elektrycznych dla samolotów omawianych kategorii.

3. Problematyka projektowania statków powietrznych

3.1. Cykl kompleksowego projektowania samolotu

Cykl projektowania nowego statku powietrznego podzielony jest na trzy etapy postępujące kolejno po sobie:

1. Projekt koncepcyjny.
2. Projekt wstępny.
3. Projekt szczegółowy.

Podczas wykonywania projektu koncepcyjnego dokonuje się analizy potrzeb rynkowych oraz posiadanych możliwości rozwojowych. W celu odpowiedniego ukierunkowania analizy na samym początku należy wybrać typ analizowanych konstrukcji lotniczych oraz rodzaj wykonywanej misji. W fazie tej niezbędne jest ukazanie ewolucji jakie konstrukcje o danym zastosowaniu przechodziły wraz z upływem czasu, a także oszacowanie potencjalnych zagrożeń dla nowo projektowanej konstrukcji. Dokonanie weryfikacji współczesnych rozwiązań w danej dziedzinie umożliwi określenie potencjalnych kierunków rozwoju. Zebrane w wyniku analizy dane pozwolą także na uniknięcie popełnianych w przeszłości błędów przez innych konstruktorów. Poprawnie zrealizowany projekt koncepcyjny skutkuje w późniejszym czasie szybszym tempem dalszych prac projektowych oraz redukcją kosztów związanych z uniknięciem rozpatrywania zagadnień nieperspektywicznych. Efektem finalnym są opracowane założenia techniczno-operacyjne [8].

Projekt wstępny jest rozwinięciem wcześniej wspomnianych zagadnień. Jej celem jest opracowanie pierwszych propozycji nowo projektowanego statku powietrznego. W zagadnieniu tym dokonuje się analizy różnych układów aerodynamicznych statków powietrznych w celu określenia odpowiednich parametrów. Kolejnym krokiem jest oszacowanie całkowitej masy obliczeniowej statku powietrznego zgodnie z wzorem (1). Niezbędne w tym celu jest dobranie materiałów konstrukcyjnych oraz technologii wytwarzania dla projektowanej konstrukcji [9].

$$W_0 = \frac{W_{cr} + W_p}{1 - \frac{W_f}{W_0} - \frac{W_e}{W_0}} \quad (1)$$

gdzie: W_0 – maksymalna masa projektowa, W_{cr} – masa załogi, W_p – udźwignie, W_f – masa paliwa integralnego, W_e – masa własna [9].

Następnym elementem koniecznym do uwzględnienia jest wstępne wyznaczenie optymalnego obciążenia ciągu (2), oraz obciążenia powierzchni nośnej (3). Ustalenia te pozwolą na wybranie właściwej konfiguracji zespołu napędowego.

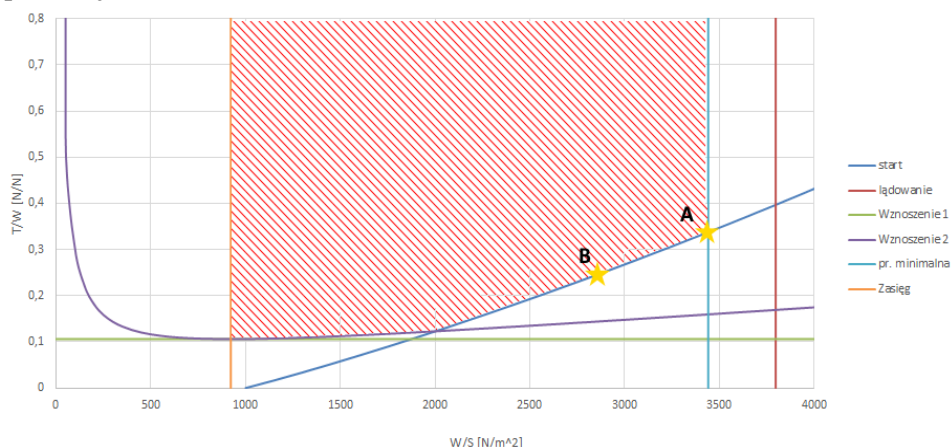
$$\bar{T} = \frac{T}{W} \quad (2)$$

gdzie: \bar{T} – obciążenie ciągu, T – ciąg, W – ciężar statku powietrznego [8].

$$\bar{P} = \frac{W}{S} \quad (3)$$

gdzie: \bar{P} – obciążenie powierzchni nośnej, S – powierzchnia nośna, W – ciężar statku powietrznego [9].

Ze względu na wzajemne powiązanie obu współczynników aby odpowiednio dobrać parametry statku powietrznego wykorzystuje się metodę graficzną zwaną obwiednią dopuszczalnych wartości parametrów względnych (rys. 6). Zadaniem wizualizacji jest określenie punktów optymalnych nowo projektowanej konstrukcji lotniczej w zależności od przyjętych współczynników. Wszystkie punkty spełniające przyjęte warunki znajdują się w zaznaczonym polu, natomiast punkty optymalne A oraz B (rys. 6) odpowiadają wartością dla których konstrukcja lotnicza będzie wymagała słabszego układu napędowego przy takim samym zastosowaniu co jednocześnie będzie czyniło konstrukcję tańszą w produkcji [10].



Rysunek 6. Obwiednia dopuszczalnych wartości parametrów względnych samolotu
[opracowanie własne]

Rozpatrzenie zachowania statku powietrznego w locie, będące kolejnym zagadnieniem fazy wstępnej wiąże się z wyznaczeniem współczynników aerodynamicznych, charakterystycznych wartości oraz biegunowej samolotu, w wyniku czego uzyskuje się wartości:

- współczynnika siły nośnej dla konfiguracji gładkiej;
- współczynnika siły nośnej dla konfiguracji z wysuniętą mechanizacją skrzydła;
- współczynnika oporu przy zerowym kącie natarcia;
- krytycznego kąta natarcia;
- optymalnego kąta natarcia;
- maksymalnej doskonałości aerodynamicznej [11].

Po wykonaniu powyższych czynności należy przystąpić do analizy masowej, wyważenia aerodynamicznego oraz oceny odporności aerosprężystej. Oszacowanie to pozwoli zrównoważyć siły i momenty działające na samolot w czasie lotu, a także umożliwi przejście do ostatniego etapu projektowania wstępnego jakim jest analiza obciążeń

w locie. W zagadnieniu tym w sposób analityczny dokonuje się wyznaczenia wartości działających sił i momentów wzdłuż rozpiętości: skrzydeł, kadłuba oraz usterzenia. Celem analizy jest uzyskanie danych odnośnie:

- obciążenia masowego konstrukcji;
- rozkładów sił poprzecznych;
- rozkładów momentów zginających;
- rozkładów momentów skręcających.

Projekt wstępny kończy się porównaniem opracowanych wariantów nowo projektowanego statku powietrznego oraz wyborem rozwiązania najlepszego. W rezultacie należy przeprowadzić także studium wykonalności danego projektu oraz zdecydować o jego kontynuowaniu w dalszej części cyklu projektowania statku powietrznego, bądź zdecydować o zaprzestaniu dalszych prac rozwojowych.

Projekt szczegółowy zaczyna się od formułowania wymagań dotyczących optymalizacji projektowanego statku powietrznego, a kończy zadaniami testowymi konstrukcji w locie. W trakcie procesu dokonuje się szczegółowego projektowania wszystkich elementów konstrukcyjnych statku powietrznego, takich jak:

- skrzydła;
- usterzenia;
- kadłuba;
- zespołu napędowego;
- układ podwoziowy;
- system sterowania i mechanizmy wykonawcze do uruchamiania elementów mechanizacji płatowca;
- energetyczne systemy pokładowe (hydrauliczny, pneumatyczny, paliwowy, inne).

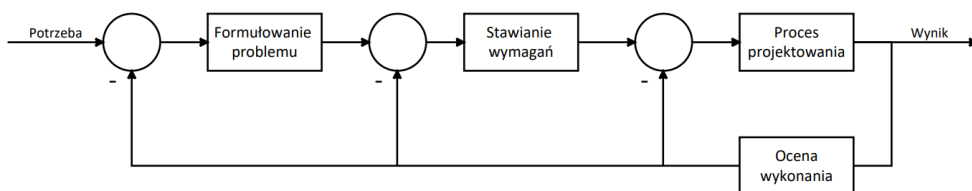
W trakcie projektowania szczegółowego samolotu wykonuje się techniczne projekty wykonawcze zespołów konstrukcyjnych, które zostały wstępnie zaprojektowane z zastosowaniem dedykowanych kryteriów optymalizacji. Optymalizacja realizowana za pomocą narzędzi numerycznych polega najczęściej na iteracyjnym powtarzaniu procesu obliczeniowego w zakresie dopuszczalnych wartości określonych zmiennych projektowych w celu osiągnięcia optymalnego rozwiązania. Rozwiązania ostatecznie akceptowalne mogą być określane na podstawie lokalnego kryterium zadaniowego (np. optymalizacja aerodynamiczna, osiągową, masowa, wytrzymałościowa, w zakresie aerospężystości). Jeżeli natomiast iteracyjne obliczenia dla poszczególnych zadań realizowane są z uwzględnieniem nadrzędnego kryterium globalnego, wówczas proces ma charakter optymalizacji wielokryterialnej i w tym wydaniu jest najbardziej zaawansowaną formą kompleksowego projektowania.

Po opracowaniu elementów konstrukcyjnych następuje budowa skalowanego modelu testowego w celu sprawdzenia poprawności uzyskanych wyników. W przypadku uzyskania zgodności wyników przeprowadzany jest montaż modelu prototypowego niezbędnego do wykonania badań doświadczalnych. Końcowym elementem projektu szczegółowego są badania przeprowadzane w czasie lotu [12, 13].

3.2. Koncepcja projektowania optymalnego

Proces projektowania statku powietrznego zaczyna się na etapie formułowania wymagań wstępnych oraz podstawowych kryteriów jakie nowa konstrukcja lotnicza powinna spełniać. Oswald zauważa, że projektowanie jest odpowiedzią na zaspokajanie potrzeb

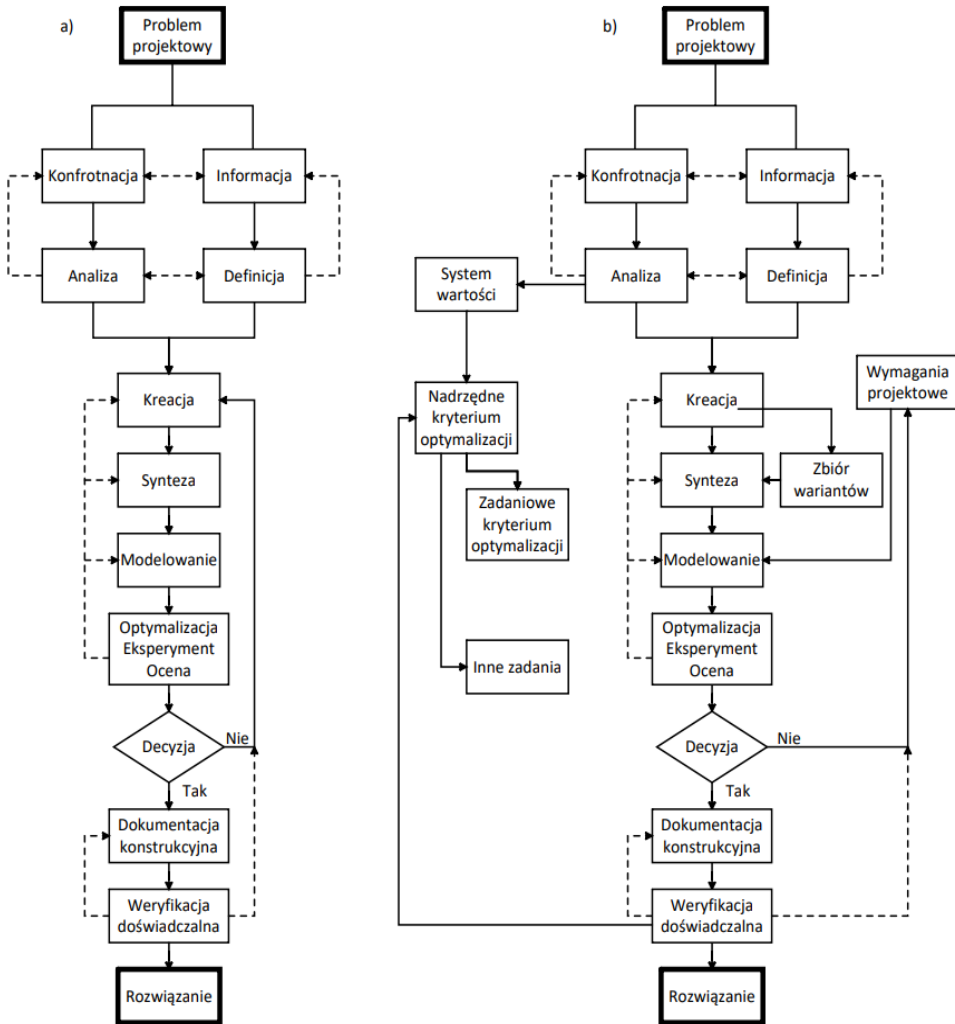
zarówno ekonomicznych jak i technicznych [12]. Obecnie podejście do projektowania jest zagadnieniem ulegającym ciągłemu przeobrażaniu na skutek rozwoju dziedziny nauki jaki reprezentuje. Rozwój oraz różnice występujące pomiędzy kolejnymi podejściami są efektem między innymi: zasobów jakie posiadamy, technologii jakie opanowaliśmy, reprezentowanych potrzeb oraz przede wszystkim wiedzy i doświadczenia, zdobywanych wraz z kolejno rozwijanymi projektami. Proces projektowania najłatwiej prezentować w postaci algorytmów, które uszeregowują poszczególne etapy ułatwiając analizę posiadanych danych oraz umożliwiając łatwą identyfikację popełnianych błędów. Ogólny schemat algorytmu procesu projektowania została przedstawiona na rysunku 7.



Rysunek 7. Schemat ideowy algorytmu projektowania statku powietrznego, opracowanie własne na podstawie [15]

Sam proces skupia się na znalezieniu rozwiązania optymalnego dla poszukiwanego problemu, a więc możliwie najbardziej użytecznego dla potencjalnego użytkownika. Szukanie najlepszego rozwiązania nie jest niczym nowym, jednak proces projektowania reprezentowany obecnie i traktowany jako projektowanie optymalne znacząco różni się od projektowania klasycznego. W projektowaniu metodą klasyczną zagadnienie optymalizacji używane jest do rozwiązywania lokalnych problemów metodą iteracyjną oraz empiryczną, a dokładność metody w dużej mierze zależy od posiadanego doświadczenia. Obecnie stosowanie tej metody wiąże się z dużą czasochłonnością oraz znaczną niepewnością uzyskanego efektu końcowego. Optymalne podejście z kolei skupia się na traktowaniu problemu globalnie poprzez odgórnie dobrane konkretne kryteria jakościowe. W przypadku projektowania optymalnego stosowane jest nadrzędne kryterium optymalizacji, które definiowane jest jako globalna funkcja celu dla danej konstrukcji. W procesie stosuje się kilka funkcji celu zgodnie z dobranym modelem optymalizacyjnym.

Zastosowanie wariantu projektowania optymalnego z nadrzędną funkcją celu skutkuje równoległą pracą nad kilkoma aspektami konstrukcji lotniczej. Pozytywną stroną takiego rozwiązania jest nie tylko poprawa własności projektowych, ale także zmniejszenie nakładów finansowych ponoszonych w fazie projektowej oraz jej skrócenie. Jako kolejny krok w doskonaleniu procesów projektowania konstrukcji lotniczych wymienia się przede wszystkim zastosowanie narzędzi sztucznej inteligencji dedykowanych do tzw. uczenia maszynowego. Porównanie struktury algorytmów projektowania klasycznego (tradycyjnego) oraz projektowania optymalnego (z nadrzędnym kryterium jakości) zostało przedstawione na rysunku 8 [14, 16-19].



Rysunek 8. Porównanie struktury modelu projektowania metodą klasyczną (a) i metodą optymalną (b) [14]

3.3. Metody optymalizacji konstrukcji lotniczych

Problemem spotykanym podczas optymalizacji struktury nowo projektowanego statku powietrznego jest właściwy dobór cech konstrukcji przewidzianych do możliwej modyfikacji. Ilość zmiennych decyzyjnych oraz dopuszczalne zakresy ich wartości determinują stopień skomplikowania danego projektu. W lotnictwie naturalnym problemem jest konflikt przeciwstawnych założeń. Z jednej strony celem dążeniem konstruktora jest, aby zaprojektowana konstrukcja była możliwie jak najlżejsza, jednak konieczność utrzymania odpowiednich wskaźników bezpieczeństwa wymusza ograniczenia poprzez zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości oraz sztywności struktury. Zasadniczym podziałem spotykanym w przypadku zadań optymalizacyjnych jest podział na modele skalarnie – zależne od jednej zmiennej decyzyjnej, a także modele wielokryterialne – zależne od wielu zmiennych. [14] W celu połączenia wielu przeciwstawnych założeń optymaliza-

cyjnych zagadnieniem stosowanym dla konstrukcji lotniczych jest użycie optymalizacji metodą wielokryterialną. Zaletą prezentowanego rozwiązania jest możliwość stosowania wielu kryteriów optymalizacyjnych jednak o zróżnicowanym wpływie na konstrukcję. Utrudnieniem takiego założenia jest konieczność doboru odpowiednich wartości parametrów do tworzonej wielokryterialnej funkcji optymalizacji. W celu doboru odpowiednich parametrów oraz ich stopnia wkładu w konstrukcję należy sformułować problem optymalizacji, który powinien zawierać:

- określenie cząstkowych kryteriów optymalizacji, które będą wyrażać cele do zrealizowania;
- określenie zakresu optymalizacji na konstrukcji, a więc określenie czy optymalizacja danego parametru będzie skupiać się tylko na danym elemencie bądź na całej konstrukcji;
- nałożenie ograniczeń optymalizacyjnych, a więc zakresu wartości minimum oraz maksimum jakie dane kryterium musi spełnić [16].

W funkcji wielokryterialnej, każdy aspekt optymalizacji przypisaną ma odpowiednią wartość wagową oznaczający jest stopień znaczenia dla optymalizowanej konstrukcji. Wartość funkcji jest sumą iloczynów funkcji jednokryterialnych oraz ich wartości wagowych (4). Suma wszystkich współczynników musi osiągnąć wartość 1. Poszukiwanym rozwiązaniem funkcji w zależności od przyjętego kryterium oraz zadanego ograniczenia jest wartość maksimum lub minimum funkcji.

$$F(x) = \sum_i^k w_i f_i(x) \quad (4)$$

gdzie: $F(x)$ – funkcja wielokryterialna, w_i – wartość wagowa, $f_i(x)$ – jednokryterialna funkcja celu, k – ilość funkcji celu [20].

W lotnictwie najczęściej spotykanymi kryteriami optymalizacji są:

- kryterium kosztów produkcji oraz eksploatacji;
- kryterium aerodynamiczne;
- kryterium wytrzymałościowe;
- kryterium masowe;
- kryterium minimalnego zużycia paliwa. [12]

4. Propozycja własnego modelu optymalizacji statków powietrznych

Podążanie za potrzebami odbiorców wymaga stałego rozwoju własnych zdolności projektowych. W tym celu niezbędne jest opracowywanie własnych metod optymalizacyjnych oraz strukturalnych algorytmów optymalizacji opartych na własnych doświadczeniach na bazie obecnie użytkowanych konstrukcji. Konsekwencją wyżej wymienionych działań będzie ponadto środowisko optymalizacyjne stworzone na podstawie komercyjnych środowisk komputerowego wspomagania projektowania oraz optymalizacji.

4.1. Proponowana metodyka optymalnego projektowania struktur nośnych lekkich samolotów

Proponowanym rozwiązaniem w dziedzinie optymalizacji struktur nośnych lekkich statków powietrznych jest zastosowanie modelu optymalnego w aspekcie wymagań:

- aerodynamicznych;
- wytrzymałościowych;
- aeroprężystych.

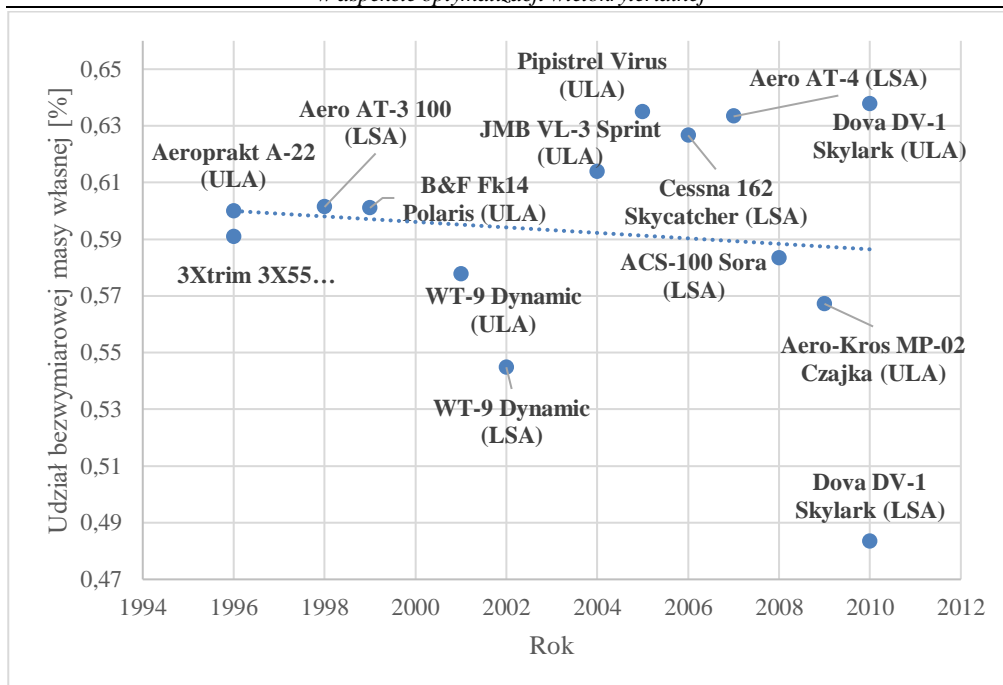
W celu zastosowania metody wielokryterialnej dla proponowanego rozwiązania zdecydowano się zastosować współczynniki wagowe oraz zadania celowe zdefiniowane w tabeli 2.

Tabela 2. Założenia proponowanej metodyki optymalizacji

KRYTERIUM	WSPÓŁCZYNNIK WAGOWY	KRYTERIUM OPTIMALIZACJI FUNKCJI CELU	ZAKRES OPTIMALIZACJI
aerodynamiczne	0,4	minimalizacja oporu aerodynamicznego, poprawa doskonałości aerodynamicznej, ułatwienia zadania pilotażowego	skrzydło statku powietrznego
wytrzymałościowe	0,3	maksymalizacja wytrzymałości struktury nośnej statku powietrznego	
aerosprężyste	0,3	zapewnienie sztywności konstrukcji w zakresie krytycznej prędkości flatteru	

Źródło: opracowanie własne.

Optymalizacja będzie prowadzić do zapewnieniu odpowiedniej masy statku powietrznego zgodnie z warunkami dopuszczenia przedstawionymi w tabeli 1, a także zgodnie z obecnie panującym trendem przedstawionym na rysunku 10. Na przedstawionej grafice (rys. 8) widać stosunek bezwymiarowej masy własnej statku powietrznego mieszczący się w przedziale 54-64% MTOW. Obserwujemy spadek bezwymiarowej masy własnej dla tych samych statków powietrznych jednak innych kategorii. Wynika on z stosowania tej samej konstrukcji płatowca dla samolotów klasy UL/ULM, LSA oraz VLA. Rozwiązaniem, które należy wziąć pod uwagę jest projekt oraz optymalizacja konstrukcji samolotu w celu opracowania konstrukcji spełniającej wymagania każdej z prezentowanych kategorii.



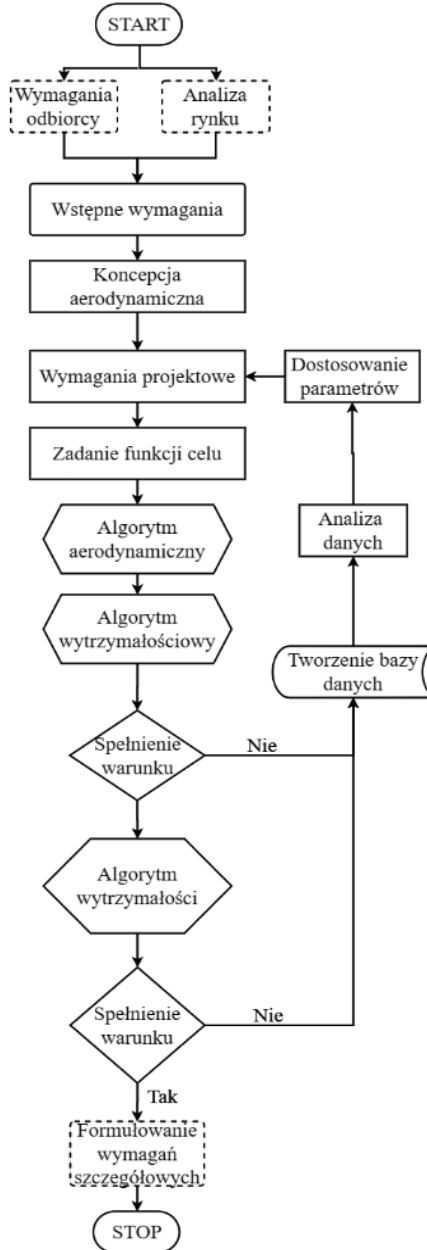
Rysunek 9. Procentowy udział masy własnej w MTOW statków powietrznych klasy General Aviation [opracowanie własne]

4.2. Propozycja algorytmu optymalizacji wielokryterialnej w aspekcie dostosowania wymagań aerodynamicznych, wytrzymałościowych oraz aerosprężystych

Prezentowany na rysunku 9 algorytm stanowi wstępną koncepcję strukturalną optymalizacji wielokryterialnej w aspekcie dostosowania wymagań aerodynamicznych, wytrzymałościowych oraz aerosprężystych. Zadaniem algorytmu jest przeprowadzenie optymalizacji statku powietrznego pod kątem dobranych funkcji celu. W wstępnych założeniach proces przebiegać będzie dwu etapowo. Etap pierwszy będzie polegał na optymalizowaniu konstrukcji lotniczej w celu minimalizowania oporu aerodynamicznego oraz maksymalizacji wytrzymałości struktury płatowca. Etap drugi odpowiada za zapewnienie maksymalnej wymaganej sztywności konstrukcji w zakresie krytycznych prędkości flatteru. Proponowana koncepcja algorytmu optymalizacyjnego będzie rozwijana o dokładnie rozbudowane pętle dla każdego kryterium będącego przedmiotem analizy. W każdej pętli zostaną zawarte niezbędne warunki spełnienia kryterium optymalizacyjnego. Wraz z rozwojem algorytmu będzie rozwijane środowisko optymalizacyjne oparte na komercyjnym oprogramowaniu CAE (ang. *computer aided engineering*) w zastosowaniach:

- CAD (ang. *Computer Aided Design*) – planowane zastosowanie oprogramowania Siemens NX do modelowania geometrii wariantów konstrukcyjnych z nałożeniem ustalonych zależności parametrycznych (wymiarowych);

- CFD (ang. *Computer Fluid Dynamics*) – planowane zastosowanie oprogramowania Ansys Fluent do wyznaczenia rozkładów ciśnień i w konsekwencji obciążeń aerodynamicznych działających na płatowiec;
- FEM (ang. *Finite Element Method*) – planowane zastosowanie oprogramowania MSC Nastran w zastosowaniu do wariantowych analiz wytrzymałościowych i obliczeń krytycznej prędkości flatteru.



Rysunek 10. Proponowany wstępny algorytm optymalizacji struktur nośnych lekkich samolotów klasy General Aviation w aspekcie optymalizacji wielokryterialnej [opracowanie własne]

5. Podsumowanie

Ze względu na stałe zainteresowanie rynkiem GA w Polsce oraz cykliczną konieczność modernizacji floty przez aerokluby jak i użytkowników indywidualnych przyszłość prezentowanego rynku w Polsce nie jest zagrożona. Dodatkowo ułatwienia w dopuszczaniu technicznym statków powietrznych mogą spowodować rosnące zainteresowanie małym lotnictwem. Skuteczne projektowanie statków powietrznych wymaga stałego rozwoju własnych zdolności w tym zakresie. Prezentowane podejście stanowi wstęp do rozwoju zagadnienia optymalizacji statków powietrznych metodą wielokryterialną. Proponowana metoda jest szeroko stosowana oraz rozwijana na całym świecie. Jej zastosowanie w lotnictwie umożliwia optymalizację założeń wykluczających się oraz dobranie parametrów najkorzystniejszych z punktu widzenia konstruktora dla potrzeb konstrukcji. Zastosowanie algorytmu projektowania optymalnego powoduje skrócenie czasu projektowania.

Podziękowania

Praca została sfinansowana/ dofinansowana przez Wojskową Akademię Techniczną w ramach uczelnianego grantu badawczego nr UGB 819/2023 pn. Metody optymalnego projektowania statków powietrznych w aspekcie doskonalenia ich własności konstrukcyjnych, aerodynamicznych i osiągowych.

Literatura

1. www.pansa.pl/podsumowanie-ruchu-lotniczego-general-aviation-w-2022-r [data dostępu: 23.03.2023].
2. www.fis.pansa.pl/statystyki-ruchu-general-aviation [data dostępu: 29.03.2023].
3. European Aviation Safety Agency, *Certyfikation Specifications for Light Sport Aircraft (CS-LSA)*, 2011.
4. European Aviation Safety Agency, *Certyfikation Specifications for Normal – Category Aeroplanes (CS-23)*, 2017.
5. European Aviation Safety Agency, *Easy Access Rules for Light Sport Aeroplanes (CS-LSA) (Amendment 1)*, 2018.
6. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 5 sierpnia 2022 (Dz. U. z 2022 r., poz. 1939 z późn. zm.).
7. Karkun M.S., Dharmalingam S., *3D Printing Technology in Aerospace Industry – A Review*, International Journal of Aviation, Aeronautic, and Aerospace, 9, 2022.
8. Galiński C., *Wybrane zagadnienia projektowania samolotów*, Biblioteka Instytutu Lotnictwa, Warszawa 2016.
9. Danilecki S., *Projektowanie samolotów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
10. Gudmundsson S., *General Aviation Aircraft Design: Applied Methods and Procedures*, Elsevier, Waltham, 2014.
11. Raymer D.P., *Aircraft Design: A Conceptual Approach 6th Edition*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston 2018.
12. Amadori K., Jouannet C., Krus P., *Aircraft Conceptual Design Optimization*, 26th International Congress of the Aeronautical Sciences, ICAS 2008-1.8.1, Anchorage 2008.
13. Yoon J., Nguyen N.V., Choi S., Lee J., Kim S., Byun Y., *Multidisciplinary General Aviation Aircraft Design Optimizations Incorporating Airworthiness Constraints*, 10th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Conference, AIAA 2010-9304, Fort Worth 2010.

14. Ostwald M., *Podstawy optymalizacji konstrukcji*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2003.
15. Sadrey M.H., *Aircraft Design: A Systems Engineering Approach*, John Wiley & Sons, Hoboken 2013.
16. Jonsson E., Riso C., Lupp C.A., Cesnik C.E.S., Martins J.R.R.A., Epureanu B.I., *Flutter and Post-Flutter Constrains in Aircraft Design Optimization*, Progress in Aerospace Sciences, 109, 2019.
17. Martins J.R.R.A., Kennedy G., *A Paralled Aerostructural Optimization Framework for Aircraft Design Studies*, Structural and Multidisciplinary Optimalization, 50, 2014.
18. Martins J.R.R.A., Li J., Du X., *Machine Learning in Aerodynamic Shape Optimization*, Progress in Aerospace Sciences, 134, 2022.
19. Szymczak C., *Elementy teorii projektowania*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998.
20. Zitzler E., *Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications*, ETH, Zurich 1999.

Problematyka i perspektywy projektowania struktur nośnych lekkich samolotów klasy General Aviation w aspekcie optymalizacji wielokryterialnej

Streszczenie

Celem pracy była analiza lekkich samolotów klasy General Aviation przeprowadzona w celu określenia kierunku rozwijania zagadnienia optymalizacji wielokryterialnej struktur nośnych lekkich statków powietrznych przy pomocy komputerowych technik optymalizacji. Praca zawiera przegląd oraz charakterystykę samolotów General Aviation z uwzględnieniem wybranych charakterystycznych kategorii takich jak UL/ULM, LSA, VLA, VLI. Prezentowane statki powietrzne zostały scharakteryzowane pod kątem określenia konstrukcji samolotu, zastosowanego układu aerodynamicznego, podstawowych parametrów geometrycznych, masowych oraz ograniczeń użytkowych przewidzianych dla danej kategorii. Przedstawiono podstawowe cele optymalizacji statku powietrznego w aspekcie optymalizacji wielokryterialnej. Zaprezentowano cykl projektowania płatowca statku powietrznego w ujęciu klasycznym oraz optymalnym. Na podstawie przeprowadzonej analizy dokonano wstępnego przygotowania propozycji własnego algorytmu optymalizacji cech konstrukcyjnych z uwzględnieniem podstawowych funkcji celu dla zagadnień aerodynamicznych, wytrzymałościowych oraz aeroprężystych. Przedstawiony model zostanie wykorzystany w dalszych pracach do stworzenia metodyki wraz z integrowanym środowiskiem badawczym do optymalizacji wielokryterialnej struktur nośnych lekkich statków powietrznych.

Słowa kluczowe: optymalizacja, metodyka obliczeniowa, optymalizacja wielokryterialna, algorytmy optymalizacji, lotnictwo ogólne

Issues and perspectives of designing framework structures of General Aviation light aircraft in the aspect of multidisciplinary optimization

Abstract

The aim of the study was the analysis of General Aviation light aircraft carried out in order to determine the direction of development of the issue of multidisciplinary optimization of the framework structures of light aircraft using computer optimization techniques. The paper contains an overview and characteristics of General Aviation aircraft, taking into account selected characteristic categories such as UL/ULM, LSA, VLA, VLI. The presented aircraft were characterized in terms of determining the aircraft structure, the aerodynamic system used, basic geometrical, mass parameters and operational limitations provided for a given category. The basic objectives of aircraft optimization in the aspect of multidisciplinary optimization are presented. On the basis of the analysis, a preliminary preparation of a proposal for our own algorithm for optimizing framework features was made, taking into account the basic functions of the goal for aerodynamic, strength and aeroelastic issues. The presented model will be used in further work to create a methodology together with an integrated research environment for multidisciplinary optimization of the bearing structure of light aircraft.

Keywords: optimization, calculation methodology, multidisciplinary optimization, optimization algorithms, general aviation

Badania numeryczne współczynnika sprzęgnięcia w elektromagnetycznym układzie do odzyskiwania energii elektrycznej

1. Wprowadzenie

Ochrona środowiska oraz wymogi Unii Europejskiej są głównymi przyczynami odchodzenia od paliw kopalnych. Największy spadek ich konsumpcji zaobserwowano podczas ostatniej dekady [1]. Równocześnie można zauważyć wzrost energii elektrycznej pozyskanej ze źródeł odnawialnych takich jak: energia słoneczna, energia wiatrowa, czy energia wodna [2]. Nową i dobrze zapowiadającą się technologią jest odzyskiwanie energii elektrycznej z otaczającego nas środowiska (ang. *Energy Harvesting*).

Urządzenia do odzyskiwania energii (tzw. harwestery) są przeznaczone do wychwytywania energii bezpośrednio z otoczenia i przekształcania jej w użyteczną energię elektryczną. Układy te działają w oparciu o różne zjawiska fizyczne m.in. efekt termoelektryczny, fotowoltaiczny lub piezoelektryczny. Harwestery stanowią alternatywne rozwiązanie dla baterii elektrochemicznych wykorzystywanych do zasilania niewielkich urządzeń bezprzewodowych lub czujników. Krótka żywotność baterii oraz konieczność okresowej wymiany przyczyniają się do rozwoju technologii odzyskiwania energii [3-5]. Drgania mechaniczne występujące jako efekt uboczny innych procesów, stanowią idealne źródło do odzyskiwania energii. Od wielu lat zarówno w przemyśle jak i w życiu codziennym stosuje się metody odzyskiwania energii z mechanizmów drgających. Na przykład w generatorach i prądnicach wykorzystywanych w elektrowniach wiatrowych stosuje się zamianę drgań mechanicznych w ruch magnesów wewnątrz zwoi cewki harwestera.

W pracy dokonano analizy wpływu sprzęgnięcia elektromechanicznego na odzyskiwanie energii elektrycznej w układzie z lewitacją magnetyczną. Sprzęgnięcie elektromechaniczne określa, w jaki sposób prąd indukowany w cewce jest związany z prędkością magnesu lewitującego, czyli definiuje sprzężenie pomiędzy układem mechanicznym a elektrycznym. W licznych pracach naukowych [6-8] sprzęgnięcie elektromechaniczne jest traktowane jako wartość stała. Fakt ten ułatwia i znacznie upraszcza analizę układów do odzyskiwania energii. Dlatego w pracy wykonano i porównano model sprzęgnięcia elektromechanicznego traktowanego jako wartość stałą z modelami sprzęgnięcia w postaci funkcji liniowej oraz nieliniowej. Wykonano również model numeryczny harwestera oraz zbadano dynamikę magnesu lewitującego oraz stopień odzyskiwania energii dla poszczególnych modeli sprzęgnięcia.

¹ ewelina.stezycka@pollub.edu.pl, studentka kierunku Inżyniera Biomedyczna, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.

² k.kecik@pollub.pl, Katedra Mechaniki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.

2. Odzyskiwanie energii

2.1. Współczynnik elektromechaniczny

Współczynnik sprzęgnięcia elektromechanicznego definiuje sprzężenie między układem mechanicznym a elektrycznym, a dokładniej określa w jaki sposób prędkość ruchomego magnesu wpływa na napięcie indukowane w cewce. Współczynnik ten jest zależny od konstrukcji układu do odzyskiwania energii [6, 8].

W literaturze można znaleźć wiele podejść określenia współczynnika sprzęgnięcia. Metodą opisywaną najczęściej jest traktowanie gęstości strumienia magnetycznego jako jednolitego (stałego) w zakresie ruchu cewki. Założenie to prowadzi do traktowania współczynnika sprzęgnięcia elektromechanicznego jako stałą wartość [3-6]. Uproszczenie to znacznie ułatwia analizę układu, jednak może prowadzić do błędów szczególnie przy analizie nieliniowych harwesterów. Ponadto, gdy przemieszczenia magnesu są dość duże i magnes „wychodzi” poza granice cewki założenie to może prowadzić do błędnych wyników.

Liniowy współczynnik sprzęgnięcia elektromechanicznego wyraża się wzorem:

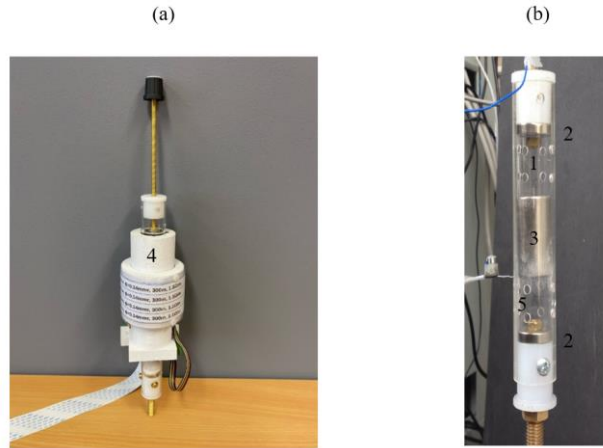
$$\alpha = zBl \quad (1)$$

gdzie: z – liczba zwoi cewki, B – strumień indukcji magnetycznej (T), l – średnia długość cewki spiralnej (m).

Współczynnik sprzęgnięcia elektromechanicznego jest wyrażany w (N/A) lub (Vs/m). Kolejną metodą, rzadziej używaną, jest określenie współczynnika sprzęgnięcia elektromechanicznego jako funkcję zależną od położenia magnesu w cewce. To rozwiązanie wykorzystuje się w przypadku skomplikowanych harwesterów oraz w układach z większym zakresem ruchu magnesu.

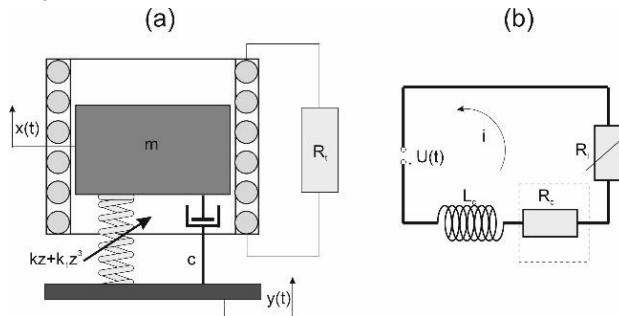
2.2. Model fizyczny i matematyczny układu do odzyskiwania energii

Obiektem badań opisanych w pracy jest harwester oparty na lewitacji magnetycznej składający się z cylindrycznej niemagnetycznej rurki wykonanej z pleksiglasu (1), trzech cylindrycznych magnesów trwałych (w tym dwa nieruchome (2) i jeden ruchomy lewitujący (3)). Dwa magnesy stałe zamontowane są wewnątrz rurki w jej górnym i dolnym końcu, a trzeci magnes lewituje pomiędzy nimi. Polaryzacja magnesów jest ułożona w taki sposób, że lewitujący magnes doświadcza sił odpychających od obu stałych magnesów. Cewka indukcyjna jest wykonana z drutu nawiniętego na karkas zamontowany na zewnętrznej powierzchni rurki (4). W celu wyeliminowania problemu związanego z ściśliwością powietrza, wykonano w rurce specjalne odpowietrzające otwory (5). Magnes swobodny oscyluje dzięki drganiom całego układu (wymuszenie układu poprzez zamontowanie go na wzbudniku drgań) co skutkuje indukcją siły elektromotorycznej. Zdjęcie układu elektromagnetycznego harwestera z założoną cewką i bez niej przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1. Zdjęcie układu elektromagnetycznego do odzyskiwania energii elektrycznej (a) oraz zdjęcie układu magnesów w cewce (b) [opracowanie własne]

Na podstawie układu doświadczalnego opracowano model fizyczny harwestera, który pokazano na rysunku 2. Układ do odzyskiwania energii został zamodelowany jako oscylator o masie (m) zawieszony na sprężynie magnetycznej o charakterystyce nieliniowej (k, k_1) oraz tłumiku (c). Do układu mechanicznego dołączono obwód elektryczny (rys. 2b) składający się z cewki o indukcji (L) i rezystancji (R_c). Cały układ do odzyskiwania energii jest wymuszany kinematycznie funkcją harmoniczną $y(t)$. Wymuszenie harmoniczne opisane jest za pomocą funkcji $y(t) = A \cos(\omega t)$, gdzie A oznacza amplitudę a ω częstość wymuszenia.



Rysunek 2. Model mechaniczny (a) oraz obwód elektryczny (b) badanego układu, opracowanie własne na podstawie [6]

W celu dokonania badań wpływu modeli sprzężeń elektromechanicznych układ fizyczny został opisany różniczkowymi równaniami ruchu 2 i 3:

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz + k_1 z^3 + \alpha(z)i + mg = m\ddot{y} \quad (2)$$

$$L\dot{i} + (R_l + R_c)i = \alpha(z)\dot{z} \quad (3)$$

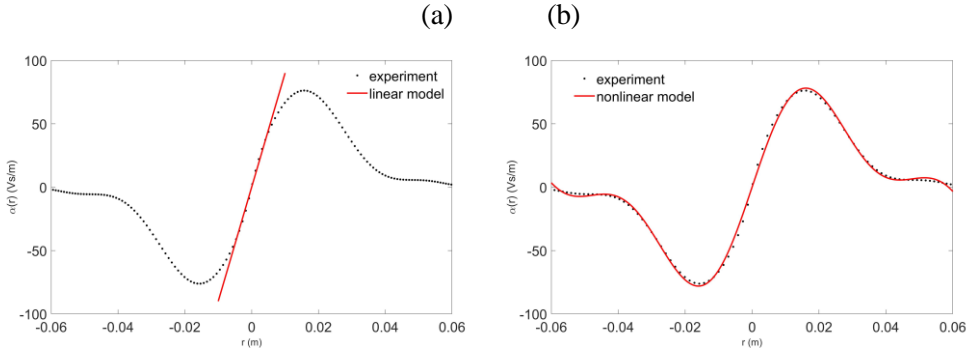
gdzie: m - masa magnesu ruchomego (kg), c - współczynnik mechanicznego tłumienia (Ns/m), k - liniowy współczynnik sztywności (N/m), k_1 - nieliniowy współczynnik sztywności (N/m³), $\alpha(z)$ - współczynnik sprzężenia elektromechanicznego (N/A), g - przyspieszenie ziemskie (m/s²), L - indukcyjność cewki (H), R_l - rezystancja odbiornika (Ω), R_c - rezystancja własna cewki (Ω).

Przesunięcie ruchomego magnesu jest wyrażone przez współrzędną $x(t) = x$, natomiast przesunięcie względne ruchomego magnesu jest zdefiniowane jako $z = z(t) = x(t) - y(t)$, i oznacza indukowany prąd. Kropka oznacza pochodne względem czasu. Równanie 2 opisuje przesunięcie magnesu natomiast równanie 3 opisuje indukowany prąd w cewce.

2.3. Modele sprzężeń elektromechanicznych

Współczynnik sprzężenia elektromechanicznego α jest rozpatrywany jako wartość stała, liniowa oraz nieliniowa. Otrzymane charakterystyki zostały wyznaczone na podstawie badań quasi-statycznych, przemieszczając magnes przez cewkę indukcyjną. Badania wykonano na maszynie wytrzymałościowej Shimadzu. Szczegóły badań zostały przedstawione w pracy [9].

Doświadczalny model współczynnika sprzężenia został przedstawiony za pomocą czarnej linii kropkowanej na rysunku 3a oraz 3b. Charakterystyka doświadczalna współczynnika $\alpha(z)$ jest nieliniowa i osiąga wartości maksymalne wynoszące ok. 80 Vs/m przy wyjściu magnesu z cewki. Zakładając, że ruch magnesu odbywa się w cewce, możemy założyć liniowy model (czerwona linia na rysunku 3a). Natomiast dla całego zakresu ruchu magnesu trzeba założyć model nieliniowy (czerwona linia na rysunku 3b).



Rysunek 3. Charakterystyki współczynnika sprzężenia elektromechanicznego dla modelu liniowego oraz z eksperymentu, opracowanie własne na podstawie [9]

Pierwszym analizowanym modelem w pracy jest założenie stałych wartości współczynnika sprzężenia. Model ten ma postać:

$$\alpha(z) = \alpha \quad (4)$$

Bazując na wykresie doświadczalnym wartości współczynnika sprzężenia widocznym na rysunku 3 do dalszej analizy przyjęto stałe wartości α wynoszące: 0 (Vs/m) (brak sprzężenia układu mechanicznego z elektrycznym), 30 (Vs/m) (ok. 40% wartości maksymalnej współczynnika), 60 (Vs/m) (ok. 75% wartości maksymalnej współczynnika), 90 (Vs/m) (ok. 110% wartości maksymalnej współczynnika).

Drugim analizowanym modelem jest rozwiązanie, w którym model sprzężenia elektromechanicznego jest traktowany jako liniowa funkcja zależna od położenia magnesu, która ma postać:

$$\alpha(z) = \alpha z \quad (5)$$

Na rysunku 3a model ten jest zaznaczony czerwoną linią. Jak można zauważyć model jest zgodny z eksperymentem, gdy magnes oscyluje wewnątrz cewki (tj. od -0,01 m do 0,01 m, nakładanie się charakterystyk). W badaniu przyjęto następujące parametry tego modelu: 500 (Vs/m²), 4000 (Vs/m²), 8000 (Vs/m²).

Trzecim analizowanym modelem jest model nieliniowy współczynnika sprzężenia (czerwona linia na rysunku 3b). Jest on wyrażony za pomocą nieliniowej funkcji sinusoidalnej w postaci:

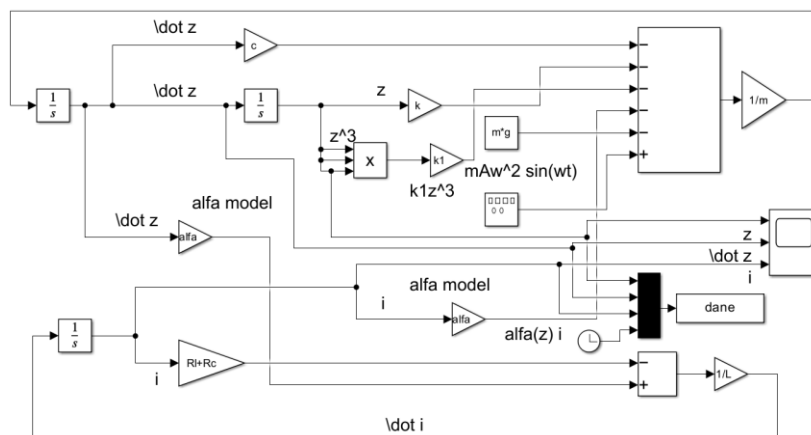
$$\alpha(z) = \alpha_1 \sin(\beta_1 z) + \alpha_2 \sin(\beta_2 z) \quad (6)$$

gdzie: α_1 oraz β_1 – współczynniki opisujące prosty kształt nieliniowej funkcji.

Model (6) może być stosowany dla całego zakresu ruchu magnesu w cewce. Parametry modelu przyjęto dopasowując model do charakterystyki doświadczalnej poprzez współczynniki kształtu wynoszące: $\alpha_1 = 60$ (Vs/m), $\alpha_2 = 31,5$ (Vs/m), $\beta_1 = 62,7$ (1/m), $\beta_2 = 130$ (1/m).

2.4. Model numeryczny układu do odzyskiwania energii

Model numeryczny, widoczny na rysunku 4, wykonano w programie MATLAB R2021b Simulink na podstawie wzorów 2 oraz 3.



Rysunek 4. Numeryczny model blokowy wykonany w Simulinku [opracowanie własne]

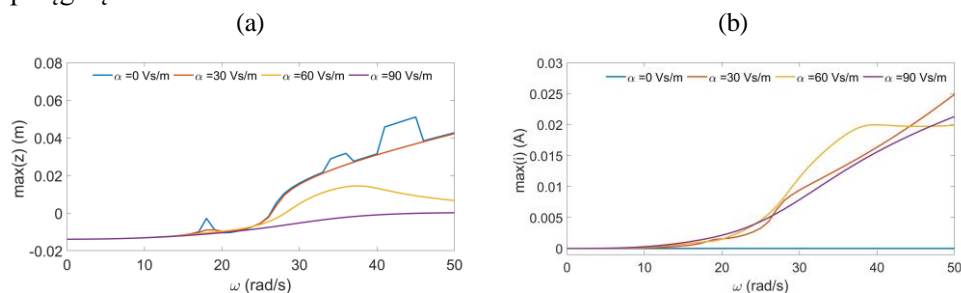
Parametry układu bazują na parametrach eksperymentalnego układu do odzyskiwania energii elektrycznej. Masa magnesu w przedstawionym schemacie wynosi $m = 0,98$ (kg). Liniowy współczynnik tłumienia równa się $c = 0,54$ (Ns/m). Współczynniki sztywności sprężyny wynoszą $k = 35$ (N/m) oraz $k_1 = 18$ (kN/m³). Przyspieszenie ziemskie równa się $g = 9,81$ (m/s²). Amplituda wymuszenia wynosi $A = 0,01$ (m). Czas symulacji przyjęto $t = 10$ (s). Indukcyjność cewki wynosiła $L = 1,46$ (H). Rezystancje wynoszą: dla cewki $R_C = 1,3$ (k Ω), dla rezystora $R_L = 1$ (k Ω). Badania wykonano ze zmiennym krokiem całkowania o maksymalnej wartości kroku 0,001 s oraz tolerancjami: bezwzględnej $1 \cdot 10^{-6}$ oraz względnej $1 \cdot 10^{-6}$. Wartości maksymalne rejestrowano dla czasu ustalonego.

3. Wyniki badań i ich analiza

3.1. Układ ze stałym współczynnikiem sprzężenia elektromechanicznego

W pierwszym etapie badań założono, że współczynniki sprzężenia mają wartość stałą. Badania przeprowadzono w zakresie częstotliwości wymuszenia 0-50 (rad/s).

Na krzywych rezonansowych (rys. 5a, 5b) pokazano charakterystyki maksymalnych wartości przemieszczenia względnego magnesu $\max(z)$ oraz indukowanego prądu $\max(i)$ w zależności od częstotliwości wymuszenia ω dla czterech wartości współczynnika sprzężenia.



Rysunek 5. Krzywa rezonansowa przemieszczenia względnego magnesu (a) oraz indukowany prąd (b) [opracowanie własne]

Pierwszy rezonans pojawia się w pobliżu częstotliwości wymuszenia 18 (rad/s), natomiast drugi rezonans występuje w okolicy 36 (rad/s). Dla niektórych wartości współczynnika sprzężenia rezonansowe piki są słabo widoczne. Dla częstotliwości mniejszych niż 18 (rad/s) układ zachowuje się praktycznie tak samo dla wszystkich wartości sprzężenia. Największe różnice są obserwowalne dla częstotliwości większych niż 25 (rad/s). Dla współczynnika sprzężenia wynoszącego 0 możemy zauważyć, że pik rezonansowy na krzywej przemieszczania (rys. 5a) jest najbardziej widoczny. Zwiększając współczynnik sprzężenia pik ten maleje, co pozwala stwierdzić, że zwiększenie współczynnika sprzężenia powoduje większe tłumienie układu. Jest to tzw. tłumienie elektryczne.

Wartości indukowanego prądu na krzywej rezonansowej (rys. 6b) w zależności od współczynnika sprzężenia są do siebie zbliżone. Dla wartości współczynników sprzężenia 30 (Vs/m), 60 (Vs/m) i 90 (Vs/m) krzywe są podobne do częstotliwości wymuszenia wynoszącej 20 (rad/s), a różnice rzędu 0,005 (A) występują dla częstotliwości od 20-30 (rad/s). Krzywa dla wartości sprzężenia równego 30 (Vs/m) jest inna dla wartości powyżej częstotliwości wymuszania 30 (rad/s), gdzie jest obserwowalny pik rezonansowy i indukowany prąd się stabilizuje na poziomie 0,02 (A).

Wielkość odzyskanej energii (mocy) elektrycznej można oszacować na podstawie wzoru:

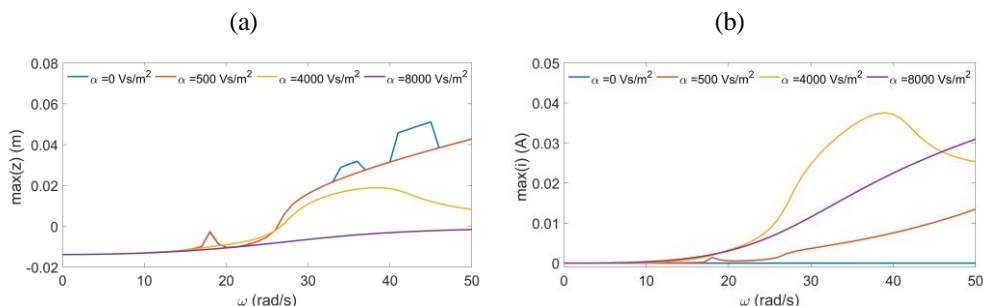
$$P = i_{\max}^2 R_l \quad (7)$$

Maksymalną chwilową energię odzyskano dla: $\alpha = 30$ (Vs/m), $P = 0,62$ (W), dla $\alpha = 60$ (Vs/m), $P = 0,4$ (W) i dla $\alpha = 90$ (Vs/m), $P = 0,44$ (W).

3.2. Układ z liniowym współczynnikiem sprzężenia elektromechanicznego

Model z liniowym współczynnikiem sprzężenia został opracowany na podstawie modelu opisanego równaniem (5), które zostało zaimplementowane do modelu numerycznego pokazanego na rysunku 4. Wartości współczynników dobrano tak, aby przemieszczenia maksymalne magnesu były podobne do wyników z modelowaniem harwestera ze stałym współczynnikiem sprzężenia. Wartości te wynoszą: 0 (Vs/m²), 500 (Vs/m²), 4000 (Vs/m²) oraz 8000 (Vs/m²).

Na krzywych rezonansowych (rys. 6a i 6b) pokazano charakterystyki maksymalnych wartości przemieszczenia względnego magnesu $\max(z)$, oraz indukowanego prądu $\max(i)$ dla czterech wartości współczynnika sprzężenia.



Rysunek 6. Krzywa rezonansowa przemieszczenia względnego magnesu (a) oraz indukowany prąd (b)
[opracowanie własne]

Pierwszy rezonans pojawia się dla częstotliwości wymuszenia 18 rad/s, drugi w okolicy 36 (rad/s). Wartości te są takie same jak w przypadku poprzedniego podejścia. Przed pierwszym pikiem rezonansowym charakterystyki dla wszystkich współczynników są takie same. Zwiększanie wartości współczynników sprawia, że piki rezonansowe maleją. Współczynniki, gdzie α ma wartości 0 (Vs/m) oraz 500 (Vs/m²) pokrywają się wręcz całkowicie aż do drugiego piku rezonansowego.

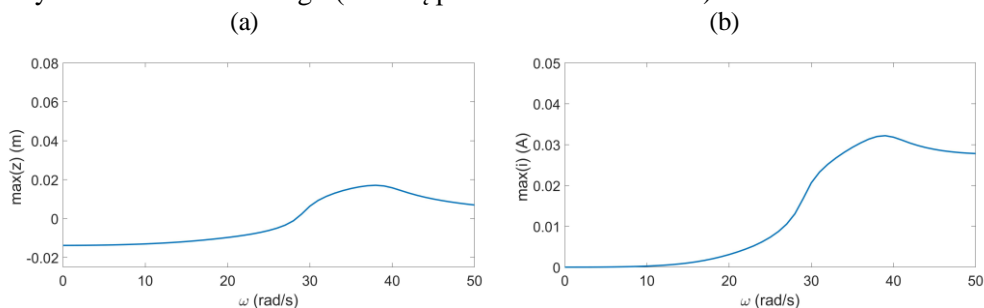
Analizując charakterystyki prądu indukowanego (rys. 6b) możemy zauważyć, że charakterystyki współczynników sprzężenia są do siebie zbliżone w początkowym przedziale częstotliwości. Różnice występują od wartości częstotliwości wymuszenia równej 18 (rad/s) dla której możemy zaobserwować pierwszy pik rezonansowy. Pik widoczny jest szczególnie dla wartości współczynnika równej 500 (Vs/m²). Dla częstotliwości większej niż 25 (rad/s) krzywe współczynników wynoszących 500 (Vs/m²) oraz 8000 (Vs/m²) rosną prawie liniowo. Dla współczynnika $\alpha = 4000$ (Vs/m²) krzywa rośnie gwałtownie i przy częstotliwości ok. 40 (rad/s) wartości maleją.

W porównaniu do krzywych rezonansowych dla sprzężenia o stałych wartościach (rysunek 5b) wartości indukowanego prądu są większe. W modelu z wartościami stałymi sprzężenia, natężenie sięgało 0,02 (A), natomiast w liniowym modelu sprzężenia natężenie jest dwukrotnie większe. Maksymalna chwilowa moc odzyskanej energii wynosi: dla $\alpha = 500$ (Vs/m²), $P = 0,18$ (W), dla $\alpha = 4000$ (Vs/m²), $P = 1,44$ (W) i dla $\alpha = 8000$ (Vs/m²), $P = 0,96$ (W).

3.3. Układ z nieliniowym współczynnikiem sprzęgnięcia elektromechanicznego

Model z liniowym współczynnikiem sprzęgnięcia został opracowany na podstawie modelu sprzęgnięcia opisanego równaniem (6), które zostało zaimplementowane do modelu numerycznego pokazanego na rysunku 4.

Na krzywych rezonansowych (rys. 7a i 7b) pokazano charakterystyki maksymalnych wartości przemieszczenia oraz prądu indukowanego na cewce w funkcji częstości wymuszenia ω . Ze względu na to, że ten model opisuje sprzęgnięcia dla całego zakresu ruchu magnesu w cewce, analizę przeprowadzono dla jednego zestawu parametru danych modelu nieliniowego (dane są podane w rozdziale 2.3).



Rysunek 7. Krzywa rezonansowa przemieszczenia względnego magnesu (a) oraz indukowany prąd (b) [opracowanie własne]

W tym przypadku pik rezonansowy obserwujemy dla częstości wymuszenia 36 (rad/s). Maksymalne przemieszczenie wynosi ok. 0,02 (m). W porównaniu do poprzednich krzywych rezonansowych przemieszczenia, możemy zaobserwować podobieństwo do dla stałej wartości współczynnika sprzęgnięcia równego 60 (Vs/m) oraz liniowego α wynoszącego 4000 (Vs/m²).

Charakterystyka krzywej rezonansowej indukowanego prądu jest przedstawiona na rysunku 8b. Od częstości wymuszenia wynoszącej ok. 10 (rad/s) krzywa zaczyna rosnąć. Pik rezonansowy jest widoczny dla częstości równej ok. 38 (rad/s), po którym krzywa się stabilizuje. Maksymalny prąd otrzymany wynosi ok. 0,035 (A).

Z kształtu krzywa rezonansowa dla współczynnika nieliniowego przypomina krzywe dla liniowego współczynnika α równego 4000 (Vs/m²) oraz współczynnika o stałej wartości równej 60 (Vs/m). Wartość maksymalna prądu indukowanego w porównaniu do wspomnianych modeli wypada pomiędzy wartością dla modelu sprzęgnięcia stałego (maksymalny prąd indukowany 0,02 (A)) i sprzężenia liniowego (maksymalny prąd indukowany 0,04 (A)).

Maksymalna chwilowa energia odzyskana dla współczynnika nieliniowego wynosi $P = 1,12$ (W). Można więc stwierdzić, że model ze sprzężeniem liniowym jest bliższy modelowi ze sprzężeniem nieliniowym.

Jak zaobserwowano układ z modelem elektromechanicznego sprzęgnięcia nieliniowego może być zastąpiony przez model liniowy sprzęgnięcia bądź wartość stałą sprzęgnięcia, pod warunkiem dobrania prawidłowych wartości współczynników. Osiągamy wtedy podobną dynamikę magnesu oraz indukowane prądy.

4. Wnioski i podsumowanie

W pracy zaproponowano i porównano modele sprzęgnięcia elektromechanicznego w postaci współczynnika będącego wartością stałą (klasyczne podejście w literaturze) z modelem z współczynnikiem w postaci funkcji liniowej oraz nieliniowej. Wartość stała sprzęgnięcia jest to uproszczenie sprzęgnięcia elektromechanicznego, stosowane głównie dla drgań magnesu o małej amplitudzie. Wartość linowa współczynnika sprzęgnięcia dobrze opisuje ruch magnesu, gdy on nie opuszcza cewki. Natomiast funkcja sprzęgnięcia nieliniowa jest dedykowana dla dużych oscylacji i uwzględnia przypadek opuszczenia cewki przez magnes. Parametry stałego współczynnika sprzęgnięcia elektromechanicznego oraz funkcji liniowej i nieliniowej dopasowano do modelu sprzęgnięcia elektromechanicznego uzyskanego w wyniku doświadczenia.

W rozpatrywanym układzie odzyskano chwilową energię na poziomie ok. 1,5 W. Największą energię można odzyskać w pobliżu rezonansu, gdzie wartość indukowanego prądu oraz oscylacje magnesu są największe. Co ciekawe prąd indukowany w cewce, dla przypadków, kiedy współczynnik był traktowany jako wartość stała bądź funkcja liniowa, otrzymywał największe wartości dla najmniejszych proponowanych wartości współczynników sprzęgnięcia elektromechanicznego.

Dla niektórych przypadków sprzęgnięcia opisanego wartością stałą oraz funkcją liniową krzywe rezonansowe oraz przebiegi czasowe wyglądem przypominały wyniki otrzymane z modelu nieliniowego sprzęgnięcia. Świadczy to o możliwości zastąpienia skomplikowanego modelu nieliniowego znacznie prostszymi modelami. Jednak problemem jest wyznaczanie dokładnych wartości parametrów dla uproszczonych modeli. Wymaga to zastosowania procedur optymalizacyjnych.

Podziękowania

Praca została sfinansowana w ramach projektu naukowego NCN OPUS18: „Teoretyczno-doświadczalna analiza możliwości definiowania charakteru sprzęgnięć elektromechanicznych w układach do odzyskiwania energii elektrycznej”, nr 2019/35/B/ST8/01068.

Literatura

1. <https://oko.press/paliwa-kopalne-przegraly-z-odnawialnymi-zrodlami-energii-raport/> [data dostępu: 18.01.2022].
2. <http://www.gios.gov.pl/pl/mfeog-2009-2014/projekt-monitoring-efektow-realizacji-projektu-pl0100-wzrost-efektywnosci-dzialalnosci-inspekcji-ochrony-srodowiska-na-podstawie-doswiadczen-norweskich/20-eea-aktualnosc/eea-aktualnosc-produkty/324-odnawialne-zrodla-energii-a-paliwa-kopalne-nowy-raport-eea> [data dostępu: 18.01.2022].
3. Sil I., Mukherjee S., Biswas K., *A review of energy harvesting technology and its potential applications*, Environmental and Earth Sciences Research Journal, tom 4, nr 2, 2017, s. 33-38.
4. Michalski A., *Wybrane aspekty zastosowania technologii „energy harvesting” w zasilaniu bezprzewodowych sieci sensorowych*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2017, s. 5-55.
5. Kaleta J., *Materiały magnetyczne SMART. Budowa, wytwarzanie, badanie właściwości, zastosowanie*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2013, s. 329-397.
6. Kęćik K., Mitura A., Lenci S., Warmiński J., *Energy harvesting from a magnetic levitation system*, International Journal of Non-Linear Mechanics, nr 94, 2017, s. 200-206.

7. Beeby S.P., Tudor M.J., White N.M., *Energy harvesting vibration sources for microsystems applications*, Measurement Science and Technology, tom 17, nr 12, 2006, s. 175-195.
8. Saravia C.M., Ramirez J.M., Gatti C.G., *A hybrid numerical-analytical approach for modeling levitationbased vibration energy harvesters*, Sensors and Actuators A: Physical, nr 257, 2017, s. 20-29.
9. Kęcik K., Kowalczyk M., *Effect of Nonlinear Electromechanical Coupling in Magnetic Levitation Energy Harvester*, Energies, tom 14, nr 9, 2021, s. 1-16.

Badania numeryczne współczynnika sprzężenia w elektromagnetycznym układzie do odzyskiwania energii elektrycznej

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki analizy numerycznej elektromagnetycznego układu do odzyskiwania energii elektrycznej. Układ ten składał się z lewitującego magnesu wewnątrz cewki indukcyjnej. Interakcja układu mechanicznego z układem elektrycznym jest scharakteryzowana poprzez tzw. współczynnik sprzężenia, który definiuje zdolność zamiany energii mechanicznej w elektryczną.

Na podstawie badań doświadczalnych wyznaczono eksperymentalny współczynnik sprzężenia elektromechanicznego, na podstawie którego opracowane własne modele matematyczne sprzężeń. Zaproponowano trzy warianty modelu sprzężenia: wartość stała, funkcja liniowa i nieliniowa zależna od położenia magnesu w cewce. Badania numeryczne dynamiki układu oraz odzyskiwanej energii wykonano w programie MATLAB Simulink. Otrzymane wyniki dowiodły, że współczynnik sprzężenia elektromechanicznego ma duży wpływ na oscylacje magnesu oraz stopień odzyskiwanej energii. Udowodniono, że współczynnik sprzężenia może być uproszczony i traktowany jako wartość stała pod warunkiem odpowiedniego oszacowania jego wartości. Na podstawie badań numerycznych stwierdzono, że maksymalna chwilowa moc może dochodzić do 1,5 W.

Słowa kluczowe: odzyskiwanie energii, współczynnik sprzężenia elektromechanicznego

Numerical studies of the coupling coefficient in the electromagnetic energy harvesting system

Abstract

The article presents the results of a numerical analysis conducted on an electromagnetic system designed for harvesting electric energy. This system consisted of a magnet that levitates inside an induction coil. The interaction between the mechanical and electrical components of the system is characterized by the electromechanical coupling coefficient, which determines the system's ability to convert mechanical energy into electrical energy.

Based on experimental studies, an experimental electromechanical coupling coefficient was determined. This coefficient served as the basis for developing mathematical models of the coupling coefficient. Three variants of the coupling model were proposed: a constant value, a linear function, and a non-linear function, all of which were dependent on the position of the magnet inside the coil.

Numerical studies were performed using the MATLAB Simulink program to analyze the dynamics of the system and the amount of energy recovered. The results obtained demonstrated that the electromechanical coupling coefficient significantly influenced the magnet's oscillations and the amount of recovered energy. It was established that the coupling coefficient could be simplified and treated as a constant value, as long as its accurate estimation was ensured. Through numerical tests, it was determined that the maximum instantaneous power achievable could reach 1.5 W.

Keywords: energy harvesting, electromechanical coupling coefficient

Badania irradiancji promieniowania elektromagnetycznego w zależności od wielkości piksela na matrycy sensorów

1. Wprowadzenie

Systemy wizyjne stosowane w aplikacjach przemysłowych wykorzystują różnego typu oświetlacze dobrane do konkretnych zadań kontrolnych lub pomiarowych. Podstawą obrazowania jest rejestracja promieniowania elektromagnetycznego w wybranym zakresie spektralnych na matrycy sensorów. Na tej podstawie rejestrowany jest opis sceny w postaci obrazu. Konstrukcja oświetlacza oraz zakres spektralny jego pracy ma decydujący wpływ na parametry rejestrowanego obrazu. Dodatkowo na jakość zarejestrowanego obrazu ma wpływ interakcja oświetlenia z powierzchnią obrazowanego obiektu. Należy również wziąć pod uwagę zmiany zakresu spektralnego oświetlacza wynikające z obecności w torze optycznym obiektywu, filtrów zastosowanych w obiektywie oraz na matrycy sensorów.

Dla każdej z aplikacji przemysłowych przy doborze sposobu oświetlenia obiektu należy uwzględnić również obecność i wpływ dodatkowych zakłóceń specyficznych dla danej branży.

Systemy wizyjne wykorzystują do rejestracji obrazu matryce sensorów CCD lub CMOS. Dobór typu matrycy realizowany jest na podstawie przyjętych wymagań opisanych parametrami takimi jak: częstotliwości rejestracji obrazów, minimalny czas naświetlania, czułość matrycy i dostępne wzmocnienia sprzętowe. Przykładowo matryce CMOS umożliwiające rejestrację obrazu z dużą częstotliwością i stosowane są do odczytywania położenia wzbudnika piezoelektrycznego. W takich aplikacjach należy dobrać częstotliwość pracy systemu wizyjnego do częstotliwości pracy badanego obiektu [1]. Autorzy powyższego artykułu przedstawili metodę pomiaru pełzania aktuatora piezoelektrycznego zrealizowaną z częstotliwością 5000 klatek na sekundę. Innym przykładem stosowania kamer wyposażonych w czujniki CCD lub CMOS jest wykorzystanie ich w systemie wizyjnym zawierającym dedykowany oświetlacz. Autorzy [2] przedstawili metodę pomiaru jakości powierzchni materiału wytwarzanego metodą selektywną spiekania laserowego proszku stopu AISi10Mg po frezowaniu. Przedstawiono pomiary topograficzne i parametry chropowatości powierzchni 3D oraz wyniki mikroskopowej analizy powierzchni. W tym zadaniu obrazu rejestrowano z bardzo małą częstotliwością około 1Hz, ale wymagane było zastosowanie matrycy o dużej czułości.

Szczególnym przykładem systemów wizyjnych jest taki, w którym zastosowano oświetlacz laserowy [3]. Należy wówczas uwzględnić możliwość redukcji czasu akwizycji obrazu w celu uniknięcia zjawiska nasycenia sensorów matrycy.

Przedstawione przykłady są potwierdzeniem tego jak ważne jest zarówno oświetlenie oraz jego detekcja w systemach wizyjnych stosowanych w szeroko pojętym przemyśle.

¹ wasniows@agh.edu.pl, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, www.agh.edu.pl.

Z tego powodu ważnym jest właściwa interpretacja wyników, również tych uzyskanych w wyniku modelowania i w symulacjach komputerowych. Artykuł przedstawia wyniki pomiarów symulacyjnych natężenia napromienienia (irradiacji). Termin natężenie napromienienia określa moc wypromieniowaną ze źródła światła, która pada na jednostkę powierzchni. Promieniowanie elektromagnetyczne wypromieniowywane jest ze źródła światła jakim jest oświetlacz przemysłowy i pada bezpośrednio na matrycę sensorów.

Dostępne są normy CIE, które definiują terminologię stosowaną w środowisku akademickim oraz branżowym przemysłu oświetleniowego takie jak: CIE 70 oraz CIE80. Norma CIE 70 przedstawia sposób wykonywania pomiarów za pomocą goniofotometru. Pomiary goniofotometryczne wykorzystuje się do wyznaczenia światłości promieniowania w danym punkcie pomiarowym. To pozwala wyznaczyć krzywe światłości w płaszczyznach w np. systemie C- γ , a następnie wykreślić bryłę fotometryczną. Pomiar goniofotometryczny został wykorzystany także podczas wykonywania badań rzeczowych, na których oparte są wyniki symulacyjne niniejszego artykułu.

W literaturze dostępne są artykuły dotyczące wpływu promieniowania elektromagnetycznego o zadanych parametrach na szybkość reakcji człowieka jak na przykład opisali to autorzy [4]. W powyższym artykule skupiono się na wpływie takich parametrów jak współczynnik oddawania barw (CRI) oraz temperatura barwowa (CCT) na szybkość reakcji człowieka przemieszczającego się samochodem w tunelu. W artykule przedstawiono wykresy widmowe mocy promieniowania elektromagnetycznego o różnych temperaturach barwowych (CCT) oraz o różnych współczynnikach oddawania barw (CRI).

Przykładem artykułu, w którym również umieszczono wykresy widmowe mocy promieniowania jest artykuł [5]. Powyższy artykuł przedstawia wpływ różnych wartości widmowych mocy oświetlacza na wzrost roślin.

Powyższe przykłady wskazują na to, że parametry takie jak CRI oraz CCT oraz moc promieniowania przedstawiona na wykresach widmowych mocy, mają niebagatelny wpływ na wiele aspektów życia. Dlatego są niezwykle ważne, aby wykonywać ich pomiary podczas badań za pomocą spektrometrii bądź systemu wizyjnego wyposażonego w czujnik pomiarowy typu CCD lub CMOS.

Artykuł prezentuje wyniki badań symulacyjnych średniego natężenia napromienienia światła na powierzchni matrycy sensorów oraz jego analizę i interpretację. W celach badawczych wykonano model stanowiska w dedykowanym do tego oprogramowaniu. Stanowisko badawcze w uproszczeniu składało się ze źródła światła oraz oddalonego od niego o zadaną odległość modelu matrycy sensorów. Model matrycy sensorów ma za zadanie odbierać padające na nią światło, a następnie w wyniku analizy komputerowej powinniśmy otrzymać wynik średniego natężenia padającego na nią promieniowania elektromagnetycznego. Symulacje wykonywano dla czterech różnych ilości promieni generowanych ze źródła światła. Zmiany parametrów zastosowano, po to, aby sprawdzić jak ta zmiana wpłynie na wartość średniego natężenia promieniowania światła padającego na model matrycy sensorów.

Pojęto się badań ze względu na brak danych literaturowych. Głównym celem jest przedstawienie czytelnikowi niniejszych badań, aby wiedział o zależnościach wynikających ze zmiany liczby promieni w czasie symulacji. Należy zwrócić uwagę na poprawności doboru parametrów symulacji, tak, aby otrzymać poprawne wyniki. Z tego powodu w dalszej części artykułu można przeczytać m.in. o metodzie Monte Carlo stosowanej

w oprogramowaniu do symulacji szeroko pojętego promieniowania elektromagnetycznego. A także o wykonywaniu badań rzeczywistych za pomocą goniofotometru. Badania spektrometrem wykonywane były według procedur własnych w ciemni fotometrycznej co zostało opisane w podpunkcie nr 3 artykułu.

2. Wzory i definicje

Zrozumienie pojęć związanych z techniką świetlną jest bardzo ważne. Z tego powodu poniżej przedstawione zostaną definicje oraz wzory związane bezpośrednio z tematem i zakresem niniejszej pracy.

Definicja 1

Irradiancja (natężenie napromienia) – irradiancja w punkcie powierzchni to iloraz strumienia energetycznego $d\Phi$, który pada na zawiera dany punkt oraz pola otoczenia dA tego elementu.

Wzór:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1)$$

Definicja 2

Strumień świetlny – wielkość wyprowadzana ze strumienia promieniowania poprzez ocenę promieniowania zgodnie z jego oddziaływaniem na obserwację fotometryczną według standardu CIE. Dla widzenia fotopowego:

Wzór:

$$\Phi_v = K_m \int_0^\infty \frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda [lm] \quad (2)$$

Gdzie:

$\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda}$ – spektralna dystrybucja emitowanego strumienia,
 $V(\lambda)$ – spektralna skuteczność świetlna.

Definicja 3

Bryła fotometryczna – to powierzchnia rozkładu natężenia światła jest ona powierzchnią utworzoną przez krańce wszystkich wektorów promienia wyprowadzonych ze wspólnego początku, przy czym długość każdego wektora promienia jest proporcjonalna do natężenia światła na powierzchni w odpowiednim kierunku.

Definicja 4

Widmo promieniowania elektromagnetycznego – widmo, w fizyce, natężenie światła zmieniające się wraz z długością fali lub częstotliwością. Miernik przeznaczony do wizualnej obserwacji widm nazywany jest spektroskopem, a przyrząd pomiarowy, który fotografuje lub mapuje widma to spektrograf. Urządzenie do pomiaru spektrum w zakresie szerszym niż zakres widzialny to spektrometr.

Definicja 6

Światłość – światłość I (źródła w danym kierunku) jest ilorazem strumienia $d\Phi$ świetlnego opuszczającego źródło rozchodzącego się w elemencie kąta bryłowego zgodnego z danym kierunkiem przez element kąta bryłowego $d\Omega$.

Wzór:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \left[cd = \frac{lm}{sr} \right] \quad (3)$$

3. Metoda

Stanowisko badawcze modelowano w oprogramowaniu Speos 2023 R1. Składało się ono z uproszczonego źródła świetlnego (walec o promieniu podstawy 1 mm i wysokości 1 mm) oraz matrycy sensorów usytuowanej równoległe do podstawy walca. Na sensor padało prostopadłe do niego promieniowanie elektromagnetyczne. Generowane promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie światła widzialnego posiadało charakterystyczną bryłę fotometryczną zmierzoną w sposób rzeczywisty na goniofotometrze oraz rozkład widmowy mocy charakterystyczny dla diody białej zmierzony za pomocą spektrometri. Wykonano serię symulacji dla liczby promieni 10^5 oraz 10^8 , $2 \cdot 10^4$ oraz $2 \cdot 10^9$. Wielkością, która była badana to wartość średniej irradiancji dla sensora irradiancji w zależności od liczby promieni oraz od liczby pikseli na sensorze.

Stanowisko symulacyjne: Środek świetlny utworzono w taki sposób, że wykonano bryłę – walec o średnicy podstawy 1 mm oraz wysokości 1 mm. Nadano mu właściwości Materiał dostępne w oprogramowaniu i wybrano 0% odbicia, pozostałe parametry przedstawiono na rysunku 1.

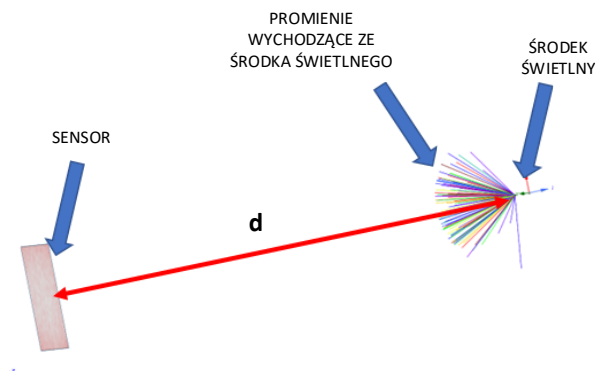
Schemat symulacji przedstawiono na rysunku 2.

General	
Description	
Type	Volume & Surface properties
Use texture	False
Volume properties	
Type	Opaque
Surface properties	
Type	Mirror
Reflectance	0 %

Rysunek 1. Fragment programu zawierający opcje dotyczące materiału, z którego wykonano środek świetlny.
Źródło: Opracowanie własne

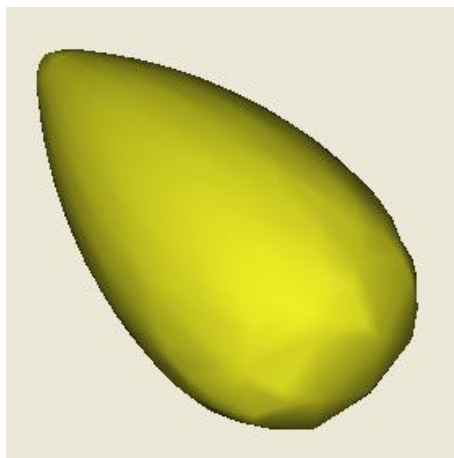
Dodatkowo w odległości $d = 500$ mm umieszczono matrycę sensorów. Do symulacji wykorzystano bryłę fotometryczną uzyskaną w rzeczywistych pomiarach na goniofotometrze. Bryłę fotometryczną przedstawiono na rysunku 3. Wykonano kilka symulacji mających na celu sprawdzenie czy liczba promieni wygenerowanych podczas symulacji ma wpływ na wartość średniej irradiancji przy nie zmienionych parametrach źródła światła.

Temperatura barwowa źródła promieniowania elektromagnetycznego (CCT) wynosiła 13284 K. Natomiast współczynnik oddawania barw (CRI) wyniósł 85.



Rysunek 2. Model symulacji w programie Speos 2023 R1. Źródło: Opracowanie własne

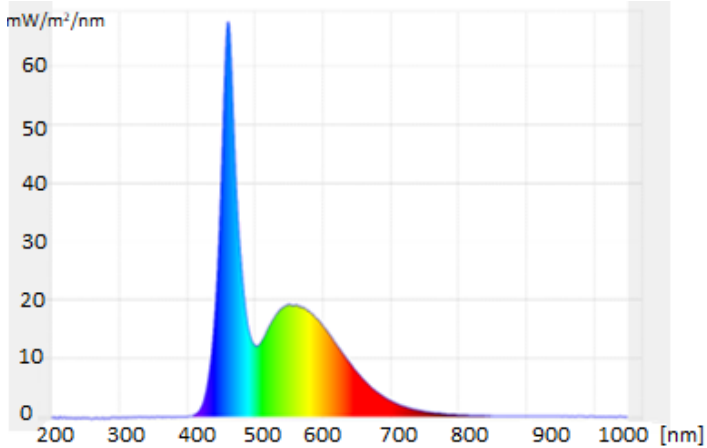
Pomiar goniofotometryczny polega na umieszczeniu oświetlacza bądź innego źródła światła na urządzeniu zwanym goniometr. W ramach badań wykonano pomiar w tzw. systemie C- γ . Goniofotometr służący do pomiarów w systemie C- γ (istnieją jeszcze systemy A- α oraz B- β) pozwala na obrót źródła światła w każdej płaszczyźnie o kąt C i o kąt γ . W systemie C- γ oś świetlna źródła światła jest również osią luksomierza – miernika wyposażonego w detektor umożliwiający pomiar natężenia oświetlenia. Po przekształceniach w oprogramowaniu dedykowanym do obliczeń światłości na podstawie natężenia światła otrzymujemy plik .ldt bądź .ies w zależności od oprogramowania. Pomiar goniofotometryczny wykonywany jest w ciemni fotometrycznej przy spełnionych warunkach otoczenia takich jak temperatura $25 \pm 1^\circ\text{C}$, prędkość przepływu powietrza 0,2 m/s. Przed pomiarem oświetlacz był zasilany i „wyrzany” w celu ustabilizowania mocy oświetlacza. Rysunek 3 przedstawia otrzymaną bryłę fotometryczną symulowaną w oprogramowaniu Speos 2023 R1.



Rysunek 3. Rzeczywista bryła fotometryczna wykorzystana w symulacji uzyskana za pomocą oprogramowania Speos 2023 R1. Źródło: Opracowanie własne

Pomiar spektrometrem wykonywano według procedur własnych w ciemni fotometrycznej. Oświetlacz zamontowano na uchwycie. W osi świetlnej, w odległości $d = 500$ mm umieszczono detektor spektrometru. Wykonano pomiar spektrometrem natężenia napromienienia, temperatury barwowej, współczynnika oddawania barw oraz w dedykowanym oprogramowaniu do spektrometru otrzymano wykres widmowy mocy promieniowania elektromagnetycznego oświetlacza. Przedstawiono otrzymany wykres widmowy mocy promieniowania elektromagnetycznego. W celach symulacyjnych wartości poniżej 0 przybliżono do 0. Zrobiono tak, ponieważ w pliku wykorzystywanym do symulacji widma nie może być wartości ujemnych.

Oprogramowanie Speos 2023 R1 umożliwia wykonanie symulacji o różnych parametrach. Wyróżnia się trzy główne możliwe do wykonania symulacje, które nazwano bezpośrednią symulacją – direct simulation, symulacją odwrotną – inverse simulation oraz interaktywną symulacją – interactive simulation.



Rysunek 4. Rzeczywisty wykres widmowy mocy promieniowania elektromagnetycznego otrzymany w dedykowanym oprogramowaniu do spektrometrii. Źródło: Opracowanie własne

Symulacja o nazwie bezpośrednia symulacja (Direct Simulation) umożliwia wykonanie symulacji, podczas której generowane promienie są ze źródła promieniowania elektromagnetycznego. Promienie te padają na sensor.

Symulacja o nazwie symulacja odwrotna (Inverse Simulation) umożliwia wykonanie symulacji, w której promienie propagowane są z kamery bądź sensora do źródła światła.

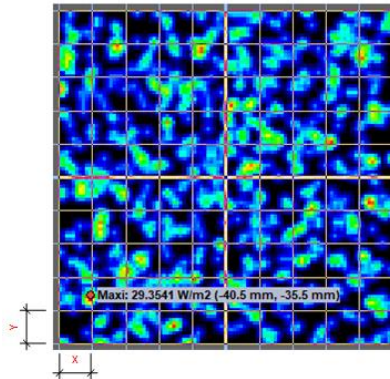
Trzecia możliwość, czyli interaktywna symulacja (Interactive Simulation) umożliwia wizualizację zachowania się promieni świetlnych w układzie optycznym.

Głównym założeniem niniejszych badań jest zmiana parametrów matrycy sensorów po to, aby zdobyć wiedzę na temat tego jak zmieni się wartość średniej irradiancji promieniowania elektromagnetycznego padającego na matrycę sensorów. Ze względu na to, że symulacja bezpośrednia umożliwia wykonanie symulacji, podczas której generowane są promienie ze źródła światła wybieramy właśnie ją. W opisywanej symulacji biorą udział takie elementy jak źródło promieniowania elektromagnetycznego, sensor irradiancji oraz imitowany środek świetlny. Szczegółowe opcje oferowane przez oprogramowanie Speos 2023 R1 w zakresie symulacji bezpośredniej (Direct Simulation) opisane są w pomocy oprogramowania [6, 7].

Każda z powyższych symulacji opiera się na algorytmie Monte Carlo. Metoda Monte Carlo jest powszechnie stosowaną metodą w oprogramowaniu do generowania oraz analizy promieniowania elektromagnetycznego [8-11]. Jest to jedna z najlepszych do tej pory znanych metod służących do tego typu obliczeń. Problematyczne może wydawać się to, ile promieni powinniśmy wygenerować, aby otrzymać poprawne wyniki. Wg literatury [9] należy zwiększyć liczbę promieni emitowanych przez źródło, aby zminimalizować stosunek sygnału do szumu na detektorze przy danej rozdzielczości. Typowa liczba promieni mieści się w zakresie od 10^5 do 10^8 . W ramach badań symulacyjnych sprawdzono parametry dla liczby promieni dla 10^5 , 10^8 , $2 \cdot 10^4$ oraz $2 \cdot 10^9$. Programy, w których stosuje się metodę Monte Carlo do śledzenia promieni wykorzystuje się do złożonych problemów analizy optycznej. Należy w nich wziąć pod uwagę cały system optomechaniczny. W artykule skupiono się jednak na uproszczonym modelu tak, aby pokazać istotę problemu. Wartość średniej irradiancji całej matrycy sensorów zależy po pierwsze od liczby wygenerowanych promieni źródła światła. A także, wartość średniej

irradiancji matrycy sensorów zmienia się dla tej samej liczby promieni źródła światła w zależności od wielkości piksela. Trzeba zaznaczyć, że uproszczenie modelu i ograniczenie go do zaledwie źródła światła oraz sensora pozwala na uniknięcie takich zjawisk jak np. ugięcie promieni na krawędziach – pomimo iż, metoda Monte Carlo sprawdza się i w takich układach, to uznano, że najlepszym rozwiązaniem będzie pokazanie przykładowo, gdy światło pada bezpośrednio na matrycę sensorów.

Matryca sensorów składa się z pikseli o zadanej szerokości (x) i długości (y). Na rysunku zaznaczono wielkości x i y . Matryca, która brała udział w symulacji miała wymiary 100 x 100 mm. Na niej znajdowało się 10000 pikseli o wymiarach $x = 1$ mm i $y = 1$ mm. Wynika z tego, że była to matryca o liczbie 100 x 100 pikseli.



Rysunek 5. Matryca sensorów umożliwiająca pomiar symulacyjny irradiancji w oprogramowaniu Speos 2023 R1. Źródło: Opracowanie własne

4. Wyniki badań

Rozważanie dotyczyły tego czy wartość średnia irradiancji ulegnie zmianie, gdy zmienimy liczbę promieni wygenerowanych w symulacji dla matrycy sensorów o takich samych parametrach podczas każdej symulacji. Cechą charakterystyczną matrycy sensorów jest wielkość piksela. W niniejszym artykule dla porównania wyników ustalono, że wielkość piksela będzie stała.

To jakie parametry posiadają dwa przykładowy sensor przedstawiono w tabeli 1. Na czerwono zaznaczono parametry, które ulegają zmianie. Reszta parametrów pozostaje bez zmian w każdej symulacji z wykorzystaniem sensora o tych samych parametrach.

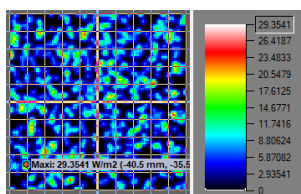
Wyniki badań symulacyjnych obejmują symulacje dla czterech liczb promieni wygenerowanych podczas symulacji: 10^5 , 10^8 , $2 \cdot 10^4$ oraz $2 \cdot 10^9$. W tabeli 1 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych w oprogramowaniu Speos 2023 R1. W tabeli umieszczono wartość średniej irradiancji dla każdej z wymienionych powyżej liczby symulowanych promieni świetlnych oraz rysunki, na które składa się matryca sensorów po wykonaniu symulacji. Z tego powodu są na niej widoczne kolorowe „plamy”, które charakteryzują rozkład wartości irradiancji promieniowania elektromagnetycznego w danym punkcie pomiarowym. Obok matrycy sensorów na każdym rysunku jest skala wartości irradiancji (W/m^2) dedykowana do danej matrycy sensorów.

Tabela 1. Wyniki badań symulacyjnych dla kilku wartości liczby promieni

WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH		
Lp.	Liczba promieni	Wartość średniej irradiancji:
1.	10^5	5,065 W/m ²
2.	10^8	5,222 W/m ²
3.	$2 \cdot 10^4$	5,153 W/m ²
4.	$2 \cdot 10^9$	5,228 W/m ²

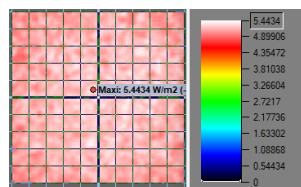
Źródło: Opracowanie własne.

Matryca sensorów wraz z kolorową skalą przedstawiającą wartości natężenia napromienienia w punkcie zarejestrowanej na matrycy sensorów. Wyniki dla symulacji o liczbie porządkowej numer 1 określona w tabeli 1. Liczba wygenerowanych promieni podczas symulacji to 10^5 .



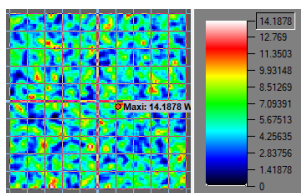
Rysunek 6. Matryca sensorów umożliwiająca pomiar wartości średniej irradiancji. Wynik symulacji w oprogramowaniu Speos 2023 R1. Źródło: Opracowanie własne

Matryca sensorów wraz z kolorową skalą przedstawiającą wartości natężenia napromienienia w punkcie zarejestrowanej na matrycy sensorów. Wyniki dla symulacji o liczbie porządkowej numer 1 określona w tabeli 2. Liczba wygenerowanych promieni podczas symulacji to 10^8 .



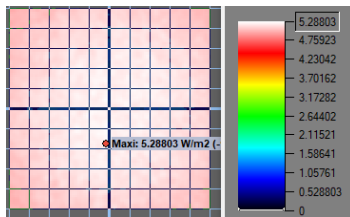
Rysunek 7. Matryca sensorów umożliwiająca pomiar wartości średniej irradiancji. Wynik symulacji w oprogramowaniu Speos 2023 R1. Źródło: Opracowanie własne

Matryca sensorów wraz z kolorową skalą przedstawiającą wartości natężenia napromienienia w punkcie zarejestrowanej na matrycy sensorów. Wyniki dla symulacji o liczbie porządkowej numer 1 określona w tabeli 3. Liczba wygenerowanych promieni podczas symulacji to $2 \cdot 10^4$.



Rysunek 8. Matryca sensorów umożliwiająca pomiar wartości średniej irradiancji. Wynik symulacji w oprogramowaniu Speos 2023 R1. Źródło: Opracowanie własne

Matryca sensorów wraz z kolorową skalą przedstawiającą wartości natężenia napromienienia w punkcie zarejestrowanej na matrycy sensorów. Wyniki dla symulacji o liczbie porządkowej numer 1 określona w tabeli 4. Liczba wygenerowanych promieni podczas symulacji to $2 \cdot 10^9$.



Rysunek 9. Matryca sensorów umożliwiającą pomiar wartości średniej irradiancji. Wynik symulacji w oprogramowaniu Speos 2023 R1. Źródło: Opracowanie własne.

5. Wnioski

Niestety autorka artykułu nie dysponuje algorytmem zastosowanym przez autorów oprogramowania Speos 2023 R1 do obliczania wartości średniej irradiancji na powierzchni matrycy sensorów. Wiadomo zaś, że metodą, którą stosowali jest Metoda Monte Carlo. Wiadome jest również to, że do obliczania irradiancji z typem „planar” (jest to jedna z możliwych opcji do wyboru obliczania irradiancji na matrycy sensorów) wykorzystywany jest wzór na wartość natężenia promieniowania na powierzchni będący ilorzem iloczynu światłości w danym kierunku oraz cosinusa kąta między prostą prostopadłą do powierzchni oraz promieniem i kwadratu odległości między źródłem światła a powierzchnią. Więcej można przeczytać w pomocy oprogramowania Speos 2022 R1 [6, 7].

Rozbieżność w wynikach pomiędzy największą wartością średniej irradiancji ($5,228 \text{ W/m}^2$) a najmniejszą wartością średniej irradiancji ($5,065 \text{ W/m}^2$) uzyskaną podczas symulacji wynosi $0,163 \text{ W/m}^2$. Z tego wynika, że jest to $0,85\%$ wartości $5,228 \text{ W/m}^2$. Przy czym w fotometrii dopuszcza się takie rozbieżności. W radiometrii taka rozbieżność też może być dopuszczalna.

Symulacje z mniejszą liczbą promieni charakteryzuje również większa różnica pomiędzy wartościami maksymalnymi irradiancji promieniowania elektromagnetycznego, a minimalnymi co widać na przedstawionych matrycach sensorów (rys. 6-9). Na nich znajdują się kolorowe „plamy” charakteryzujące wartości irradiancji w danym punkcie na matrycy sensorów. Obok matrycy sensorów znajduje się skala w postaci przypisanych wartości kolorom. Można zauważyć, że dla mniejszej liczby promieni jednorodność kolorów jest mniejsza. Natomiast dla większej liczby promieni jednorodność kolorów jest większa, co wiąże się z bardziej jednorodnym rozkładem irradiancji.

Badane zjawisko wynika prawdopodobnie z przyjętego algorytmu przez autorów oprogramowania Speos 2023 R1.

Podziękowania

Serdeczne podziękowania za pomoc zarówno merytoryczną jak i wsparcie w realizacji badań należą się dr hab. inż. Andrzejowi Siomie oraz firmie MILOO-ELECTRONIC Sp. z o.o. za umożliwienie wykonania badań. Dziękuję również rodzinie za wsparcie w dążeniu do osiągnięcia sukcesów.

Literatura

1. Grzybek D., Sioma A., *Creep Phenomenon in a Multiple-Input Single-Output Control System of a Piezoelectric Bimorph Actuator*, *Energies* (Basel), 15, 8267, 2022, doi:10.3390/en15218267.
2. Struzikiewicz G., Sioma A., *Surface Topographic Features after Milling of Additively Manufactured AlSi10Mg Aluminum Alloy*, *Materials*, 15, 2022, doi:10.3390/ma15103604.
3. Lentz B., Kwiek P., Sioma A., *Quality Control Automation of Electric Cables Using Machine Vision*, In Proceedings of the Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 2018, 10808.
4. Dong L.L., Liu P., Lou Q., Xu W.H., *Study on the Influence of LED Spectrum on the Visual and Nonvisual Effects in the Interior Zone of Tunnels*, *J Adv Transp*, 2021, doi: 10.1155/2021/5339959.
5. Matysiak B., Kaniszewski S., Dyśko J., Kowalczyk W., Kowalski A., Grzegorzewska M., *The Impact of Led Light Spectrum on the Growth, Morphological Traits, and Nutritional Status of 'Elizium' Romaine Lettuce Grown in an Indoor Controlled Environment*, *Agriculture* (Switzerland), 11, 2021, doi: 10.3390/agriculture11111133.
6. ANSYS HELP Available online:
https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v221/en/Optis_UG_ASP/Optis/UG_ASP/planar_illumiance_180509.html [data dostępu: 4.02.2023].
7. ANSYS HELP Available online:
https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v221/en/Optis_UG_ASP/Optis/UG_ASP/creating_an_irradiance_sensor_180507.html%23id_180507 [data dostępu: 4.02.2023].
8. Pawlak A., Zaremba K., *A Monte-Carlo Simulation of an Indirect Lighting Installation Using Light Emitting Diodes (LEDs)*, *PRZEGLĄ TECHNICZNY*, 89, 2013, s. 215-217.
9. Frasch H.J.J., Steinmetz G., *Monte Carlo Methods in Ray-Tracing Software*, In Proceedings of the Optical Design and Analysis Software II, SPIE, September 5, 4769, 2002, s. 55.
10. Freniere E.R., Gregory G.G., Hassler R.A., *Edge Diffraction in Monte Carlo Ray Tracing*, In Proceedings of the Optical Design and Analysis Software, SPIE, 3780, 1999, s. 151-157.
11. Peterson G.L., *Stray Light Calculation Methods with Optical Ray Trace Software*, In Proceedings of the Optical Design and Analysis Software, SPIE, Vol. 3780, 1999, s. 132-137.

Badania irradiancji promieniowania elektromagnetycznego w zależności od wielkości piksela na matrycy sensorów

Streszczenie

W pracy omówiono metodę modelowania sposobu rejestracji promieniowania elektromagnetycznego na matrycach sensorów używanych w systemach wizyjnych. Przeprowadzono zarówno badania rzeczywiste jak i symulacyjne. W ramach badań rzeczywistych wykonano pomiar rozkładu widmowego mocy promieniowania elektromagnetycznego źródła światła oraz pomiar goniofotometryczny. Na podstawie danych z pomiaru goniofotometrycznego uzyskano bryłę fotometryczną. Wyniki badań rzeczywistych wykorzystano w symulacjach komputerowych. W ramach badań zrealizowano pomiar średniego natężenia promieniowania elektromagnetycznego w zakresie widzialnym powierzchni matrycy sensorów oraz ich analizę i interpretację. Symulacje przeprowadzono z wykorzystaniem modelu zawierającego źródło światła oraz matrycę sensorów. W ramach przeprowadzonych badań sprawdzono wpływ zmiany parametrów modelu oświetlenia oraz wpływ zmiany parametrów matrycy na pomiar irradiancji. Wyniki badań symulacyjnych przedstawiono dla wybranych zestawów parametrów pracy modelu. Wyniki te porównano z badaniami eksperymentalnymi wykonanymi z wykorzystaniem przemysłowych wersji oświetlacza i matrycy sensorów.

Słowa kluczowe: matryca sensorów, symulacje komputerowe irradiancji promieniowania elektromagnetycznego

Studies of electromagnetic radiation irradiance depending on the size of the pixel on the sensor matrix

Abstract

The article discusses the method of modelling the method of registering electromagnetic radiation on sensor matrices used in vision systems. Both real and simulation tests were carried out. As part of the actual research, the measurement of the spectral distribution of the electromagnetic radiation power of the light source and the goniophotometric measurement were carried out. On the basis of data from goniophotometric measurements, a photometric solid was obtained. The results of real tests were used in simulation tests. As part of the research, the measurement of the average intensity of electromagnetic radiation in the visible range of the sensor matrix surface was carried out, as well as their analysis and interpretation. The research was carried out using a model containing a light source and a matrix of sensors. As part of the research, the impact of changing the parameters of the lighting model and the impact of changing the parameters of the matrix on the measurement of irradiation were checked. The results of simulation tests are presented for selected sets of model operating parameters. These results were compared with experimental studies carried out using industrial versions of the illuminator and sensor matrix.

Keywords: sensor array, simulation studies of electromagnetic radiation irradiance

Wpływ rodzaju destruktu asfaltowego na właściwości mieszanki mastyksu grysowego SMA JENA 16

1. Wstęp

SMA JENA to technologia wykonywania jednowarstwowej nawierzchni asfaltowej, zamiast tradycyjnego rozwiązania składającego się z pakietu dwóch warstw. Takie rozwiązanie pozwala na znaczne obniżenie kosztów budowy oraz przyspieszenie jej realizacji. Do układu jednowarstwowego wykorzystuje się mieszankę mastyksowo-grysową SMA o uziarnieniu do 16 mm, co przekłada się na dobrą trwałość oraz wysoką odporność na deformacje trwałe. To rozwiązanie zdobywa coraz większą popularność w naszym kraju za sprawą szeregu korzyści ekonomicznych oraz technologicznych. Świadczy o tym nowopowstające odcinki dróg w naszym kraju, których długość przekracza 1200 km [1]. Mieszanka SMA 16 JENA swoje zastosowanie znajduje przede wszystkim jako materiał do wykonania nakładek, ale może również zostać wykorzystana do budowy nowych nawierzchni asfaltowych. Pierwsze z przytoczonych rozwiązań jest częstą techniką utrzymania dróg poprzez wykorzystanie nakładek bitumicznych, po wcześniejszym sfrezowaniu warstwy ścieralnej. Celem takiego zabiegu jest przede wszystkim poprawa właściwości drogowych oraz przedłużenie żywotności nawierzchni drogowej. Należy podkreślić, że nakładki bitumiczne są korzystniejsze z punktu widzenia ekonomicznego, ponieważ jest to znacznie tańsze niż całkowita wymiana nawierzchni drogowej [2], i właśnie w takim przypadku doskonale sprawdza się SMA JENA, gdzie zamiast warstwy wyrównawczej i ścieralnej stosujemy jedną warstwę [3].

2. Mieszanki w technologii SMA JENA

2.1. Charakterystyka mieszanek mastyksowo-grysovych

Mieszanka mastyksowo-grysowa (SMA), jest mieszanką typu pośredniego stosowaną do wykonywania warstwy ścieralnej na drogach wszystkich typów. Dzięki swoim właściwościom SMA znajduje zastosowanie w miejscach, gdzie jest wymagana zwiększona odporność nawierzchni na deformacje, a przykładem takich miejsc są skrzyżowania, przystanki autobusowe czy place przeładunkowe [4]. W odróżnieniu od typowo stosowanego betonu asfaltowego (AC) SMA charakteryzuje się nieciągłą krzywą uziarnienia, składa się z bardzo drobnych i drobnych ziaren oraz z tych grubszych i bardzo grubych, natomiast cechą charakterystyczną nieciągłości jest brak lub zdecydowanie mniejsza zawartość frakcji kruszywa o średniej wielkości. Taki zabieg pozwala uzyskać silny szkielet

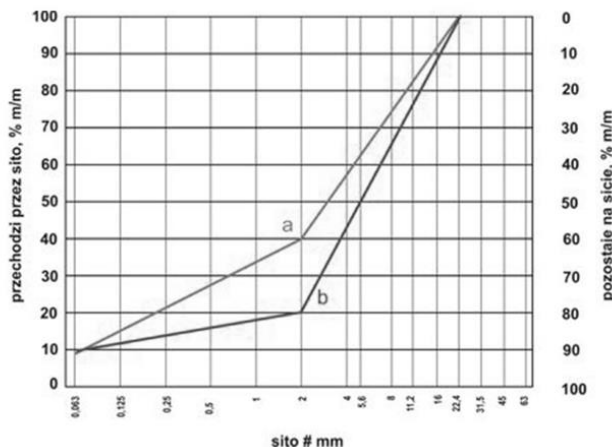
¹ 090327@student.tu.kielce.pl, Studenckie Koło Naukowe FENIX, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Świętokrzyska, www.tu.kielce.pl.

² 087231@student.tu.kielce.pl, Studenckie Koło Naukowe FENIX, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Świętokrzyska, www.tu.kielce.pl.

³ 087216@student.tu.kielce.pl, Studenckie Koło Naukowe FENIX, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Świętokrzyska, www.tu.kielce.pl.

⁴ piotr@tu.kielce.pl, Katedra Inżynierii Komunikacyjnej, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Świętokrzyska, www.tu.kielce.pl.

z kruszywa grubego, co przekłada się na osiągnięcie wysokiej odporności na deformacje trwałe [5]. Poprzez ograniczenie frakcji kruszywa o średniej wielkości na wykresie uziarnienia uzyskujemy typowe załamanie krzywej. Nieciągłość uziarnienia nie oznacza braku ciągłości linii uziarnienia, ale ograniczone występowanie udziału procentowego pośrednich frakcji kruszywa w mieszance mineralnej. Natomiast równomiernym udziałem procentowym wszystkich frakcji kruszyw cechują się mieszanki o ciągłej krzywej uziarnienia, często stosowane w betonie asfaltowym [2, 6]. Dzięki temu na wykresie uzyskamy krzywą bez mocnych załamań. Różnice między tymi dwoma typami doskonale obrazuje rysunek 1.



Rysunek 1. Przykładowe, uproszczone przesiewy mieszank o ciągłym (a) i nieciągłym (b) uziarnieniu [1]

Mieszanka mastyksowo-grysowa SMA różni się od betonu asfaltowego pod wieloma względami, różnice można dostrzec w składzie mieszanek, właściwościach fizycznych i mechanicznych oraz charakterystyce mieszanki. Mieszanka SMA cechuje się także dużo wyższą zawartością lepiszcza asfaltowego. To powoduje, że kruszywo grube umieszczone jest w szkieletcie z mastyksu, czyli mieszaniny drobnych frakcji kruszywa o maksymalnym uziarnieniu 2 mm i wypełniacza z asfaltem. Zapewnia to lepszą odporność na deformacje trwałe, a także na ścieranie w stosunku do betonu asfaltowego. Beton asfaltowy ma z kolei lepszą odporność na działanie wody i mrozu. Mieszanka mastyksowo-grysowa dzięki swoim właściwościom znajduje zastosowanie w nawierzchniach o większym obciążeniu ruchem i wymagających wyższej odporności na ścieranie takich jak np. autostrady czy drogi ekspresowe, jednakże na drogi o niższych kategoriach ruchowych wykorzystywana jest również często. Warto również zauważyć, że mieszanka SMA cechuje się dobrymi właściwościami przeciwhałasowymi w stosunku do innych mieszanek mineralno-asfaltowych. Tekstura warstwy ścieralnej z mieszanki mastyksowo-grysowej zapewnia także odpowiednie odprowadzenie cienkiej warstwy wody, która doprowadza do „aquaplaningu” [7].

Pomiędzy tradycyjną mieszanką SMA, a SMA 16 JENA główna różnica polega na stosowaniu większego maksymalnego wymiaru kruszywa, z uwagi na konieczność połączenia warstwy ścieralnej i wiążącej. W przypadku SMA JENA 16 maksymalny rozmiar kruszywa to 16mm.

Badania [8] wbudowanych mieszanek mastyksowo-grysowych SMA 16 JENA potwierdziły korzyści ze stosowania nowego rozwiązania, mianowicie:

- mieszanka SMA JENA cechuje się trwałością w zakresie odporności na deformacje trwałe;
- można zastosować standardowy asfalt drogowy 50/70;
- w mieszance SMA JENA na jednowarstwową nawierzchnię można użyć granulatu z destruktu asfaltowego spełniający wymagania PN-EN 13108-8:2016-07;
- możliwe jest wbudowywanie takiej mieszanki mineralno-asfaltowej o zmiennej grubości warstwy od 5 do 10 cm;
- grubsza warstewka (błonka) asfaltu na ziarnach kruszywa minimalizuje koszty utrzymania nawierzchni w cyklu jej życia;
- warstwa może być przykryta kolejną warstwą, umożliwiła rozbudowę drogi w przyszłości;
- rezygnacja ze skropienia między warstwą wiążącą a ścierną oraz ułożenie warstwy asfaltowej w jednym przejściu rozkładarki umożliwiającą znaczące skrócenie czasu wykonania [8].

2.2. Projekt i wymagania dla mieszanki SMA JENA

Pomimo licznych zalet zastosowania mieszanki SMA JENA, nie jest ona stosowana w typowych konstrukcjach nawierzchni drogowych wg Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych [9]. W Polsce w książce „Nawierzchnie jednowarstwowe z SMA 16 JENA” [2] Krzysztof Błażejowski oraz Ireneusz Strugała opisali krajowe zalecenia dla tego typu mieszanek. Wymagania wobec kruszyw mineralnych, podstawowego materiału w mieszance mineralno-asfaltowej, dla ruchu KR3-KR6 [10] są takie jak dla standardowej mieszanki SMA i są określone wg WT-1 2014 [11]. W tabeli 1 przedstawione zostały rzędne punktów kontrolnych uziarnienia mieszanki SMA 16 JENA.

Tabela 1. Rzędne punktów kontrolnych uziarnienia mieszanki SMA 16

Wymiar oczek sit # mm	Przechodzi % m/m
	Granice podstawowe wymagane dla kategorii ruchu KR1-KR6
22,4	100
16	90-100
11,2	65-80
8	45-58
4	27-37
2	20-30
0,125	7-13
0,063	6-11

Źródło: [2].

Użycie granulatu asfaltowego jest możliwe pod warunkiem spełnienia wymagań i szerzej omówione w punkcie 3 tego artykułu [4]. W niższych kategoriach ruchu możliwe jest wykorzystanie do 20% m/m mieszanki w przypadku metody na zimno, do 30% m/m mieszanki w przypadku metody na gorąco oraz do 40% m/m mieszanki w przypadku

metody na gorąco pod warunkiem, że granulaty pochodzą z warstw SMA. W przypadku niższych kategorii ruchu najczęściej stosowanym lepiszczem jest asfalt drogowy 50/70. Natomiast dla większych obciążeń lub powolnego ruchu warto rozważyć zastosowanie asfaltu wielorodzajowego MG 50/70-54/64 lub asfaltu modyfikowanego polimerami PMB 45/80-55. W przypadku największych obciążeń można rozważyć użycie asfaltów modyfikowanych polimerami PMB 45/80-65 lub PMB 45/80-80 HiMA. Podobnie jak w przypadku mieszanek mastyksowo-grysowych SMA, które wymagają użycia stabilizatora mastyksu, technologia SMA JENA również wymaga zastosowania stabilizatora, którego ilość ustala się podczas badania spływności lepiszcza. Stosując dodatek poprawiający adhezję asfaltu do kruszywa wymagane jest wykonanie badania przyczepności asfaltu do kruszywa frakcji 8/11,2 mm odsianego z zaprojektowanej mieszanki SMA 16 JENA. Jeśli do mieszanki zastosowane zostanie wapno hydratyzowane wówczas nie stosuje się jednocześnie dodatków adhezyjnych. Testem skuteczności działania środka adhezyjnego oraz wapna hydratyzowanego jest badanie ITSR. W tabeli numer 2 zostały przedstawione wymagania wobec projektowanej mieszanki oraz wykonanej warstwy dla kategorii ruchu KR3-KR4. W publikacji „Jednowarstwowa nawierzchnia asfaltowa SMA 16 JENA Poradnik dla zarządców i wykonawców dróg samorządowych” [8] zostały dokładnie przedstawione szczegóły dotyczące procesu projektowania mieszanki. Proces projektowania mieszanek mineralno-asfaltowych opiera się o zapisy zawarte PN-EN 13108-20:2016-07 [12] i każdorazowo powinien zakończyć się opracowaniem pełnego badania typu, uwzględniając wymogi ww. normy.

Tabela 2. Wymagania wobec projektowanej mieszanki SMA 16 JENA oraz wykonanej warstwy

Lp.	Właściwości	Warunki zagęszczenia wg PN-EN 13108-20	SMA 16 JENA KR3-KR6
Wymagania do projektowania mieszanki			
1	Zawartość wolnej przestrzeni V_m	Ubijanie 2×50 uderzeń,	$V_{min}2,5$ $V_{max}4,0$ $V_{max}4,5$ (dla warstw o grubości ≥ 5 cm**)
2	Zawartość wolnej przestrzeni wypełnionej asfaltem	Ubijanie 2×50 uderzeń,	VFB _{deklarowane}
3	Zawartość wolnej przestrzeni w mieszanke mineralnej VMA	Ubijanie 2×50 uderzeń,	VMA _{min16}
4	Odporność na działanie wody	Ubijanie 2×35 uderzeń	ITSR ₉₀
5	Odporność na deformacje trwałe	Wałowanie P ₉₈ – P ₁₀₀	WTS _{AIRMax} 0,15 PRD _{AIRMax} 7,0
6	Spływność lepiszcza	-	D _{0,3}
Wymagania wobec gotowej warstwy			
7	Wskaźnik zagęszczenia warstwy,%	-	$\geq 98,0$
8	Wolna przestrzeń w warstwie,%	-	$V_{min}2,0$ $V_{max}6,0$

Źródło: [2].

2.3. Wytwarzanie i wbudowywanie mieszanki SMA JENA

Mieszanka SMA 16 JENA, mimo iż nie jest „typową” mieszanką mineralno-asfaltową, to proces wytwarzania, i jej wbudowania jest typowy. Można ją wyprodukować w każdej wytwórni mas bitumicznych o działaniu cyklicznym, przystosowanej do produkcji zwykłej mieszanki SMA. W przypadku otaczarek o produkcji ciągłej uwagę należy zwrócić na system dozowania stabilizatora, gdyż w tym wypadku może być jedynie granulowany. Producent do każdej produkcji musi wystawić odpowiednie dokumenty tj. oznaczenie CE, Deklarację Właściwości Użytkowych, natomiast Badanie Typu powinno być opracowane przed rozpoczęciem produkcji mieszanki [2].

Maksymalna temperatura mieszanki z asfaltem, zaraz po wyprodukowaniu nie powinna przekraczać wartości:

- Drogowy 50/70 170°C;
- Wielorodzajowy MG 50/70-54/64 175°C;
- Modyfikowany polimerami PMB 45/80-55 185°C;
- Modyfikowany polimerami PMB 45/80-65 185°C;
- Wysokomodyfikowany polimerami PMB 45/80-80 HiMA 175°C.

Odpowiedni transport mieszanki do miejsca wbudowywania powinien zabezpieczyć przede wszystkim przed spadkiem temperatury. Biorąc pod uwagę czas transportu oraz warunki atmosferyczne należy użyć wszystkich technicznych środków, aby zapobiec stygnięciu mieszanki. Pod mieszankę SMA 16 JENA należy zastosować skropienie międzywarstwowe. Zabieg ten jest niezbędny do osiągnięcia odpowiedniej trwałości nawierzchni, natomiast ilość emulsji do skropienia dobiera się w zależności od stanu i rodzaju podłoża [1]. Z uwagi na to, że mieszankę układamy w relatywnie grubej warstwie od 5 do 10 cm, charakteryzuje ją duża pojemność cieplna, co daje pewną rezerwę czasu na zagęszczenie. Minimalna temperatura powietrza podczas wbudowywania nie powinna być niższa od 5°C. Układanie nawierzchni wykonanej w technologii SMA 16 JENA jest takie jak dla typowych mieszanek mastyksowo-grysowych. Rozkładarka powinna zapewnić wstępne zagęszczenie oraz odpowiednią równość. Walce stosowane do zagęszczania mieszanki to walce stalowe, statyczne lub wibracyjne. Z uwagi na występujący mastyks w mieszance nie zaleca się używania walców ogumionych. W celu osiągnięcia wymaganych właściwości przeciwpoślizgowych na powierzchni warstwy należy wykonać podsypkę z kruszywa grubego 2/4 bądź 2/5 mm, surowiec wykorzystany do wykonania podsypki powinien charakteryzować się odpowiednią odpornością na polerowanie, a wskaźnik PSV nie powinien być niższy niż 50 [4, 8]. Po zakończonym procesie wbudowywania mieszanki należy wykonać zestaw badań odbiorczych. Oddanie do ruchu nawierzchni z SMA 16 JENA powinno odbyć się po całkowitym jej wystygnięciu, w ten sposób unikniemy zniszczenia w postaci deformacji trwałych nawierzchni.

3. Granulat asfaltowy czy destruk asfaltowy? A może odpad? Aktualny stan prawny

Destrukt asfaltowy jest to „materiał przeznaczony do recyklingu, w postaci sfrezowanych warstw asfaltowych lub płyt zerwanych z nawierzchni asfaltowej lub mieszanki mineralno-asfaltowej odrzuconej albo będącej nadwyżką produkcji” [12]. Aktualnie wyróżniamy jeszcze dwa główne pojęcia z nim związane, destruk asfaltowy kwalifikowany, czyli „przetworzony destruk asfaltowy, przydatny i gotowy do zastosowania jako materiał składowy mieszanki mineralno-asfaltowej, po przeprowadzeniu badań, oceny

i klasyfikacji zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 13108-8” [13] oraz granulat asfaltowy „pewna ilość destruktu asfaltowego kwalifikowanego, o sklasyfikowanych/ deklarowanych właściwościach, przydatnego i gotowego do zastosowania jako materiał składowy w produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej” [13]. Natomiast z prawnego punktu widzenia destruktu asfaltowy jest to odpad, który może być wykorzystany powtórnie w mieszance mineralno-asfaltowej pod warunkiem spełnienia szeregu wymagań, które zostały przedstawione w rozporządzeniu z dnia 23 grudnia 2021 roku [14].

Pierwszym z nich jest nadanie właściwego kodu odpadu. Wyróżnić należy dwa kody odpadu:

- 17 03 01 mieszanki bitumiczne zawierające smołę;
- 17 03 02 mieszanki bitumiczne inne niż wymienione w 17 03 01.

Do wykorzystania w technologii na gorąco nadaje się tylko destruktu o kodzie 17 03 02, po utraceniu przez niego statusu odpadu. Aby tak się stało destruktu asfaltowy powinien być poddany badaniom:

- uproszczonym, w przypadku odpadów destruktu asfaltowego, dla których istnieją dowody, że powstały z mieszanki mineralno-asfaltowej wykorzystanej do budowy, przebudowy lub remontu dróg i wyprodukowanej po dniu 31 grudnia 2000 roku;
- szczegółowym w pozostałych przypadkach [14].

Badanie uproszczone polega na pokryciu badanej próbki mieszanki mineralno-asfaltowej specjalnym preparatem, którego składniki reagują ze smołą, zmieniając kolor [15]. Przykład badania przedstawiony został na rysunku 2.



Rysunek 2. Próbkę destruktu z widocznymi wtrąceniami smoły w przekroju [15]

W przypadku badań szczegółowych oznaczyć należy m.in.. łączną zawartość węglowodorów aromatycznych oraz zawartość benzo(a)pirenu, w odniesieniu do suchej masy próbki, maksymalne dopuszczalne stężenie pierwiastków w badaniu odcieku z próbki [14].

Ponadto niezależnie od metody, destruktu nie może być zanieczyszczony innymi odpadami niż te, które zostały zastosowane podczas procesu produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej, oraz spełniać co najmniej wymagania normy PN-EN 13108-8 [16]. Próbkę destruktu powinna zostać odpowiednio przebadana przez akredytowane laboratorium. Próbki do badań powinny zostać pobrane przed przystąpieniem do robót budowlanych, gdy w wyniku ich prac mają powstać odpady destruktu lub przed wykorzystaniem, w przypadku, gdy wykorzystaniu ma ulec magazynowany materiał. Minimalna ilość pobieranych próbek została przedstawiona w tabeli 3 [14].

Tabela 3. Minimalna ilość pobieranych próbek oraz sposób ich pobierania

Pobierane próbki z nawierzchni w postaci odwiertów		
Rodzaj próbki	Obszar referencyjny w (m ²)	Minimalna liczba pobieranych próbek
Pojedyncze pobieranie	5 000	1
Próbka reprezentatywna	20 000	1
Pobierane próbki z hałdy		
Pojedyncze pobieranie	3 000	1
Próbka reprezentatywna	20 000	1

Źródło: [14].

3.1. Wykorzystanie destruktu w praktyce

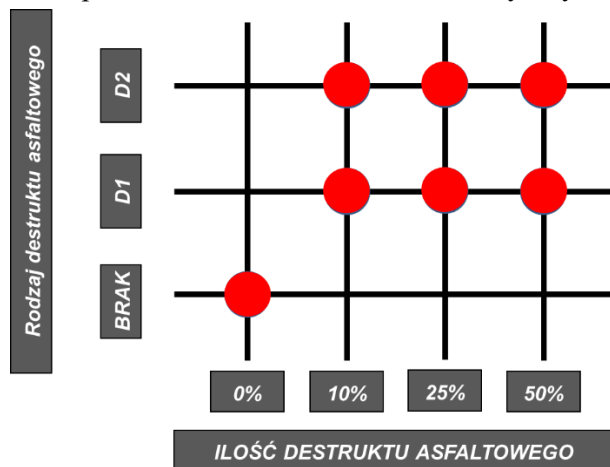
Destrukt asfaltowy, który straci status odpadu można wykorzystać ponownie w procesie budowy, remontu lub przebudowy dróg (w tym również utwardzenie placów i poboczy) oraz elementów wchodzących w skład infrastruktury lotniskowej [14]. Zaletami powtórnego wykorzystania materiałów jest ekologiczność, lecz również ekonomiczność, wadą takiego rozwiązania jest natomiast trudność z utrzymaniem jednorodności składu i grubości warstwy przy wykonywaniu recyklingu na miejscu. Warto zaznaczyć, że granulatu asfaltowego zawierającego substancje smołowe nie można użyć w technologii „na gorąco”, jednakże w przypadku technologii „na zimno” można. Szerzej o powtórnym wykorzystaniu w technologii „na zimno” materiału, jakim jest destrukt asfaltowy można przeczytać w pracach Iwańskiego oraz Chomicz-Kowalskiej [17, 18] oraz materiałach GDDKiA [19]. Wytyczne techniczne „WT-2” [4] wskazują, jakie wymagania należy spełnić, aby można było wykorzystać granulatu asfaltowy w mieszance mineralno-asfaltowej w technologii na gorąco. Zgodnie z dokumentem „WT-2” [4] należy określić właściwości lepiszcza odzyskanego w granulacie asfaltowym poprzez oznaczenie temperatury mięknięcia asfaltu metodą „pierścienia i kuli” (PiK) [25], w szczególnych przypadkach należy wykonać oznaczenie penetracji. Jeżeli w granulacie występują ciała obce, to ich obecność, zwartość oraz rodzaj powinny być sklasyfikowane do odpowiedniej kategorii. Należy ocenić również jednorodność granulatu asfaltowego poprzez przedstawienie rozstępu procentowego udziału w granulacie kruszywa grubego, kruszywa drobnego oraz płynów, zawartości lepiszcza asfaltowego oraz rozstępu pomiarów temperatury mięknięcia lepiszcza odzyskanego z granulatu asfaltowego [4]. Według Wytycznych Technicznych [4] w opisie granulatu asfaltowego należy zdeterminować typ mieszanki, z której pochodzi granulatu, rodzaj kruszywa oraz średnie uziarnienie, typ lepiszcza asfaltowego oraz maksymalną wielkość kawałków granulatu asfaltowego U GRA D/d. Właściwości kruszywa z granulatu powinny spełniać wymagania określone dla kruszywa w danej mieszance mineralno-asfaltowej [4]. Wytyczne projektu RID [13, 20] określają dodatkowe wymagania, wśród których znalazł .in.m.in. wskaźnik zastąpienia asfaltu i jego dopuszczalne wartości.

4. Ocena wpływu destruktu asfaltowego na właściwości SMA JENA

4.1. Plan badań

Celem badań była ocena wpływu destruktu asfaltowego na właściwości fizyczne oraz mechaniczne mieszanki SMA JENA 16. Zakres prac obejmował zaprojektowanie mieszanki referencyjnej, a następnie mieszanek badawczych z zastosowaniem destruktu

asfaltowego w ilości 10%, 25% oraz 50% w składzie mieszanki mineralno-asfaltowej. Każda z mieszanek bazowała na asfalcie drogowym 50/70. W badaniach wykorzystano dwa destrukty asfaltowe, pierwszy oznaczono jako D1, pochodził z warstwy ścieralnej i warstwy wiążącej natomiast drugi, oznaczony jako D2, pochodził z warstwy wiążącej i warstwy podbudowy. Plan badań przedstawiony został na rysunku 3. Zakres wykonanych badań obejmował podstawowe badania właściwości fizycznych i mechanicznych.



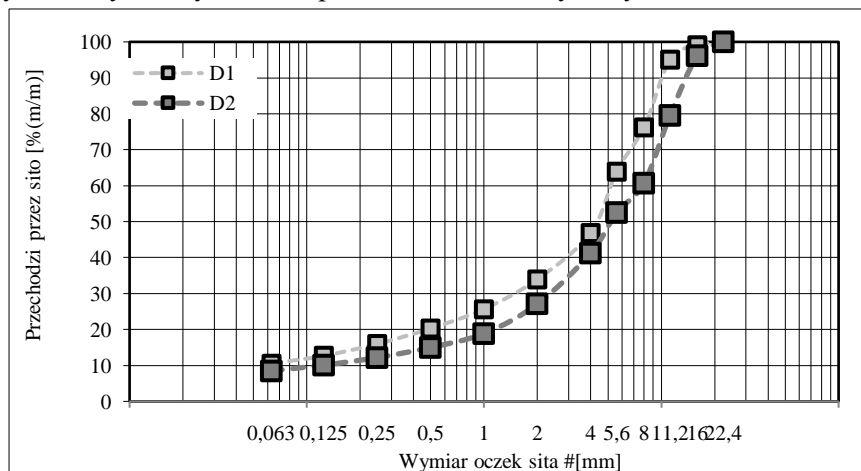
Rysunek 3. Plan badań z oznaczonymi rodzajami zaprojektowanych mieszanek SMA JENA (czerwone koła) [opracowanie własne]

4.2. Badania destruktu asfaltowego

Badania przeprowadzone dla destruktu asfaltowego:

- oznaczenie zawartości lepisczka rozpuszczalnego wg PN-EN 12697-1:2020-08 [21];
- oznaczenie składu ziarnowego zgodnie z PN-EN 12697-2+A1:2019-12 [22];
- oznaczenie gęstości destruktu wg PN-EN 12697-5:2019-01 [23];
- badanie penetracji wg PN-EN 1426:2015-08 [24].

Wyniki z wykonanych badań przedstawione zostały na rysunku 4 oraz w tabeli 4.



Rysunek 4. Krzywa uziarnienia dla destruktu D1 i D2 [opracowanie własne]

Tabela 4. Właściwości destruktu asfaltowego

	Właściwość	Destrukt	
		D1	D2
Wymiar oczek sита # [mm]	22,4	0	0
	16	0,9	3,9
	11,2	4	16,5
	8	18,8	18,9
	5,6	12,3	8,2
	4	17,1	11,2
	2	12,9	14,2
	1	8,3	8,2
	0,5	5,4	3,9
	0,25	4,3	2,8
	0,125	3,3	2,1
	0,063	2,2	1,6
	<0,063	10,5	8,5
Zawartość asfaltu rozpuszczalnego [%]		4,70	3,0
Gęstość objętościowa [Mg/m³]		2,65	2,55
Penetracja asfaltu [x0,1 mm]		25,0	17,00
Temperatura mięknięcia [C°]		66,0	69,0

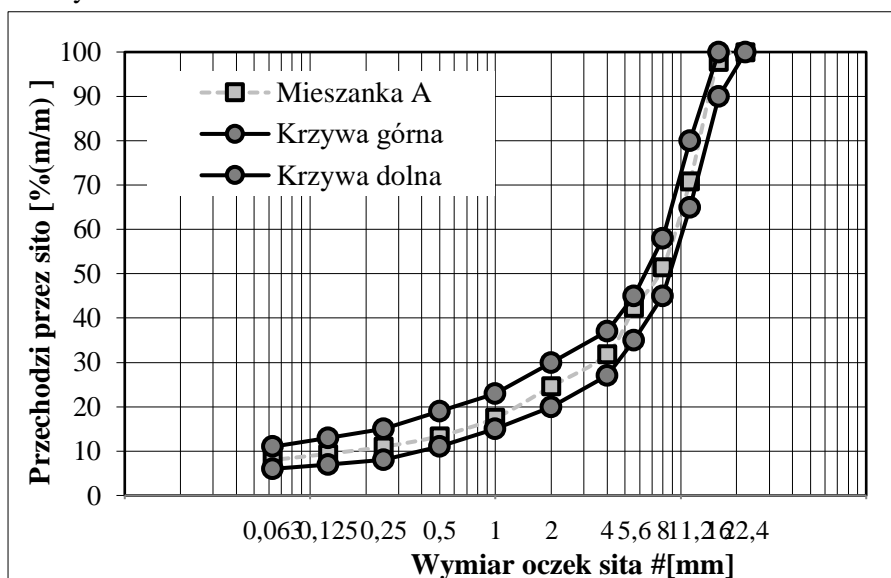
Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie wykonanych badań można stwierdzić, że destrukty w znacznym stopniu różniły się od siebie. Destrukt D1 pochodzący z warstwy ścieralnej i wiążącej był drobniejszy, oraz zawierał więcej wypełniacza w stosunku do destruktu D2. Oba destrukty zawierały również inny skład mineralny, który oceniono na podstawie wizualnej analizy kruszywa frakcji większej od 4 mm po ekstrakcji próbki destruktu. Destrukt D2, pochodzący z warstwy wiążącej składał się w całości z kruszywa wapiennego, oznaczona gęstość destruktu wynosiła 2,55 Mg/m³. W destrukcie D1 natomiast zaobserwowano kruszywo wapienne w ilości ok. 36%, bazaltowe w ilości ok 50%, a także najprawdopodobniej kwarcyt w ilości ok 14%. Gęstość destruktu D1 to 2,65Mg/m³. W przypadku mieszanki SMA JENA, rodzaj materiału mineralnego zastosowanego w destrukcie asfaltowym będzie miał wpływ na właściwości przeciwpoślizgowe, a także jasność wykonanej nawierzchni. Wpływ rodzaju destruktu na cechy powierzchniowe wytworzonych mieszanek nie był przedmiotem niniejszych badań, jednak będzie stanowić ich kontynuację w przyszłości.

Powiązanie destruktu do warstwy, z której pochodziły, potwierdza oznaczenie zawartości lepiszcza rozpuszczalnego. Destrukt D1 charakteryzował się 4,7%, a destrukt D2 3,0% asfaltu rozpuszczalnego. Z archiwalnych informacji pozyskanych od zarządców dróg, z których pozyskano próbki, ustalono, że w bazowych receptach dla destruktu D1 zastosowano asfalty modyfikowane, natomiast dla destruktu D2 dla warstwy wiążącej asfalt modyfikowany, a dla podbudowy asfalt drogowy. Zastosowanie różnych asfaltów potwierdziły badania wykonane po odzysku lepiszcza z destruktu. Badania wykazały asfalt z destruktu D1 ma większą penetrację oraz mniejszą temperaturę mięknięcia w stosunku do asfaltu odzyskanego z destruktu D2. Dla obu asfaltów określenie posiadania cechy asfaltu modyfikowanego (nawrót sprężysty) dało wynik negatywny, gdyż próbki podczas próby rozciągania pękały przedwcześnie.

4.3. Projekt i wytworzenie próbek mieszanki SMA JENA 16

Zgodnie z przyjętym planem badań jak pierwszą opracowano mieszankę referencyjną oznaczoną jako A. Do mieszanki wykorzystany został wypełniacz wapienny, drobne kruszywo wapienne 0/2 oraz gabro we frakcjach od 2 do 16 mm. Asfaltem bazowym był asfalt drogowy 50/70. W mieszance zastosowano środek adhezyjny oraz włókna celulozowe jako stabilizator mastyksu. Krzywą uziarnienia mieszanki referencyjne przedstawiono na rysunku 5.



Rysunek 5. Krzywa uziarnienia mieszanki A [opracowanie własne]

Kolejnym krokiem było zaprojektowanie mieszanek badawczych, w których zastosowano każdy z destruktyw w ilości 10%, 25% oraz 50%. W badaniach przyjęte zostało założenie, że każda z mieszanek powinna charakteryzować się uziarnieniem zbliżonym do mieszanki referencyjnej. W tabeli nr 5 przedstawione zostało uziarnienie mieszanki referencyjnej (oznaczone jako A) oraz pozostałych mieszanek badawczych:

- Mieszanka B 10% destruktu D1;
- Mieszanka C 25% destruktu D1;
- Mieszanka D 50% destruktu D1;
- Mieszanka E 10% destruktu D2;
- Mieszanka F 25% destruktu D2;
- Mieszanka G 50% destruktu D2.

Tabela 5. Udziały procentowe poszczególnych frakcji w mieszankach badawczych

Wymiar oczek sita # [mm]	Przesiew mieszanek mineralno-asfaltowych [%]						
	A	B	C	D	E	F	G
22,4	100	100	100	100	100	100	100
16	97,8	97,7	97,6	97,5	97,5	97,2	96,5
11,2	70,8	69,9	69,4	70,1	70	70,3	69,9
8	51,5	52,4	51,4	51,2	51,9	51,1	51,6
5,6	42,3	43,7	43	43,1	43,2	42,5	43,2

4	31,9	33,1	32,2	32,4	32,7	32,4	33,2
2	24,6	24,7	23,7	24,2	24,2	24,1	24,3
1	17,5	17,9	17,5	18,2	17,4	17,3	17,5
0,5	13,4	14	13,9	14,4	13,6	13,5	13,9
0,25	11	11,6	11,5	11,6	11,3	11,2	11,5
0,125	9,4	9,9	9,7	9,5	9,7	9,6	9,8
0,063	8	8,5	8,3	8	8,3	8,2	8,4

Źródło: Opracowanie własne.

Następnym etapem projektowania mieszanki mineralno-asfaltowej było określenie ilości asfaltu zastosowanego oraz rozpuszczalnego na ogólnych zasadach określonych w WT-2:2014. Jako wartość wyjściową B_{min} przyjęto ilość 5,2%, która określona została w „Nawierzchnie jednowarstwowe z SMA 16 JENA” [2]. Dalsze prace prowadzono przy założeniu, że ilość asfaltu w mieszankach badawczych musi być zbliżona do mieszanki referencyjnej. W tabeli 6 przedstawione zostały ilości asfaltu w poszczególnych mieszankach.

Tabela 6. Ilość procentowa destruktu i asfaltu w poszczególnych receptach

	Ilość destruktu w mieszance mineralnej		Asfalt dodany [%]	Asfalt z destruktu [%]	Wskaźnik zastąpienia asfaltu [%]
	D1	D2			
Recepta A	0	0	4,8	-	-
Recepta B	10	0	4,3	0,47	10,2
Recepta C	25	0	3,7	1,18	25,1
Recepta D	50	0	2,7	2,35	49,0
Recepta E	0	10	4,5	0,30	6,5
Recepta F	0	25	4,2	0,75	16,0
Recepta G	0	50	3,6	1,50	30,6

Źródło: Opracowanie własne.

Na podstawie analizy powyższej tabeli można stwierdzić, że w przypadku destruktu D1 osiągnięty został większy wskaźnik zastąpienia asfaltu, niezależnie od jego ilości w mieszance mineralnej (MM), w stosunku do destruktu D2. Dla maksymalnej ilości destruktu wynoszącej 50% w MM wskaźnik zastąpienia lepszemu wynosił odpowiednia dla destruktu D1 49%, natomiast dla destruktu D2 30,6%.

W każdej z mieszanek zastosowano środek adhezyjny w ilości 0,3% względem łącznej ilości asfaltu w mieszance oraz włókna celulozowe w ilości 0,3% w mieszance mineralno-asfaltowej.

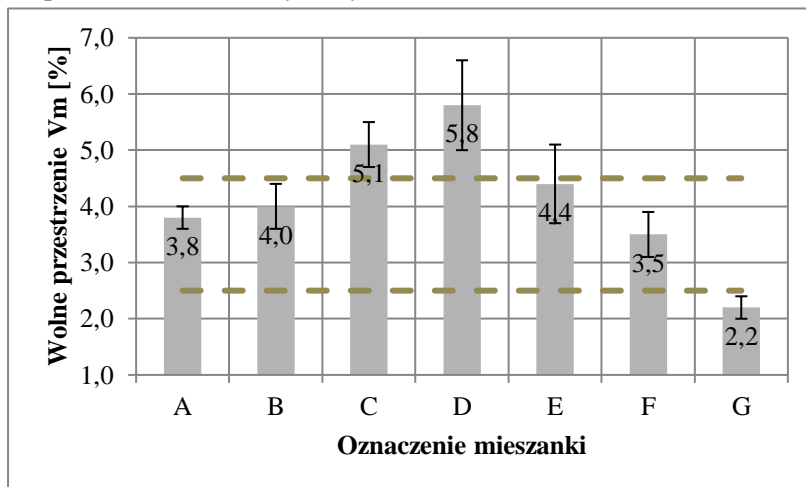
Podczas wytworzenia mieszanki SMA JENA 16, zastosowano wstępne podgrzanie destruktu do temperatury 60°C, a temperaturę nowego kruszywa stopniowano od 140°C dla mieszanki bez destruktu do 220°C dla mieszanki z 50% destruktu. Sumaryczna temperatura materiałów podczas mieszania wynosiła 140°C. Próbkę mieszanek zagęszczane były w temperaturze 135°C, z wykorzystaniem ubijaka Marshalla i zagęszczarki walcowej.

4.4. Analiza wyników badań

Oceny wpływu rodzaju destruktu asfaltowego na właściwości mieszanki SMA JENA 16 dokonano w oparciu o parametry fizyczne i mechaniczne zamieszczone w tabeli 4. Wyniki badań przedstawiono w postaci wykresów słupkowych, a wartości średnie uzu-

pełniono o odpowiadające im wartości odchyłeń standardowych z próby (w postaci słupków błędów).

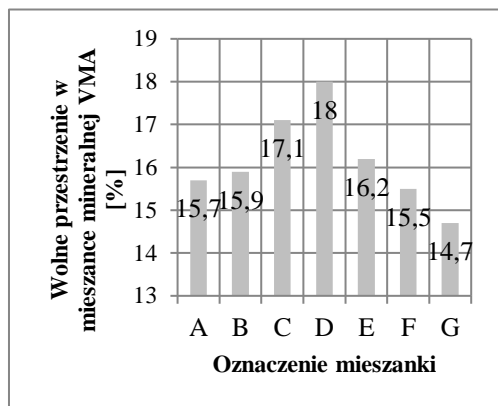
Pierwszym z ocenianych parametrów była zawartość wolnych przestrzeni. Wyniki oznaczenia przedstawione zostały na rysunku 6.



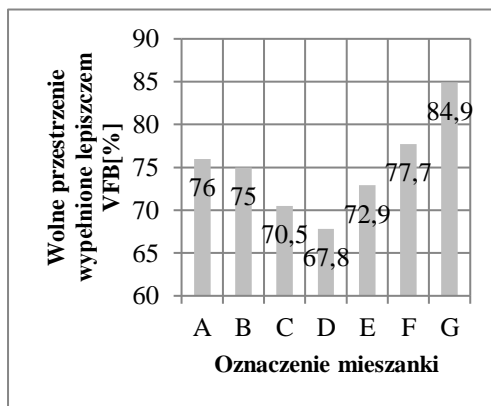
Rysunek 6. Wolne przestrzenie V_m [opracowanie własne]

Na podstawie analizy uzyskanych wyników można stwierdzić, że tylko cztery mieszanki włącznie z mieszanką referencyjną osiągnęły zgodną z wymaganiami zawartość wolnych przestrzeni. Mieszanki z destruktem D1 oznaczone jako „C” oraz „D” osiągnęły średnie zawartości wolnych przestrzeni większe od wymaganych natomiast mieszanka „G” z destruktem D2 mniejsze. W przypadku destruktu D1 zawartość wolnych przestrzeni rosła wraz ze wzrostem jego zawartości w mieszance mineralnej. Destrukt D2 charakteryzował się odwrotną zależnością. Wpływ na to miała różna geneza obu destruktyw oraz sposób jego przetworzenia – destrukt D1 był pozyskany bezpośrednio z drogi, natomiast D2 był granulowany. Ponadto wskaźnik zastąpienia lepiszcza wskazuje, że w mieszankach z destruktem D1 wprowadzono go znacznie więcej, w stosunku do takich samych ilości zastosowanego destruktu D2. Podkreślić należy, że w destrukcie D1 znajdował się tylko asfalt modyfikowany, natomiast w destrukcie D2 była to mieszanina asfaltu modyfikowanego i drogowego.

Kolejnym z analizowanych parametrów były wolne przestrzenie wypełnione w mieszance mineralnej oraz zawartość wolnych przestrzeni wypełnionych lepiszczem. Na rysunku 7 oraz 8 przedstawione zostały wyniki obu oznaczeń.



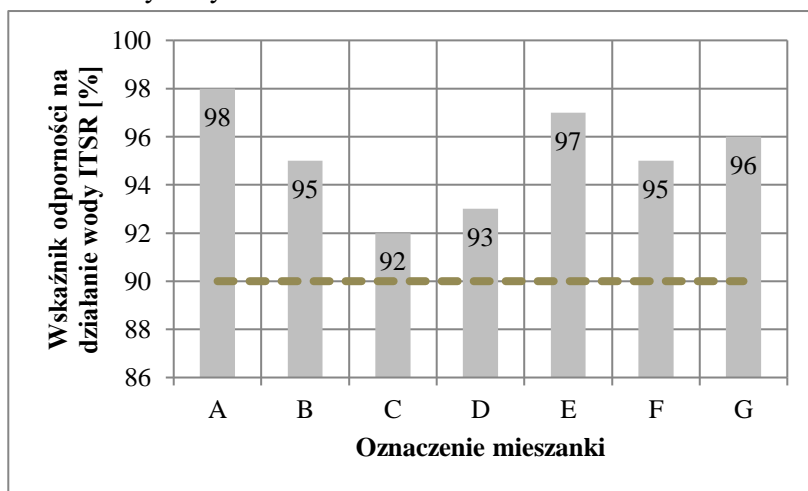
Rysunek 7. Wolne przestrzenie w mieszance VMA [opracowanie własne]



Rysunek 8. Wolne przestrzenie wypełnione lepiszczem VFB [opracowanie własne]

W przypadku dwóch parametrów VMA i VFB, ich wartości potraktowano jako informacyjne, nieposiadające kryterium oceny, chociaż w przypadku wymagań dot. wolnych przestrzeni w mieszance mineralnej w literaturze spotyka się minimalną wartość 16% [2]. Biorąc pod uwagę to wymaganie warunek został spełniony dla mieszanki C, D i E.

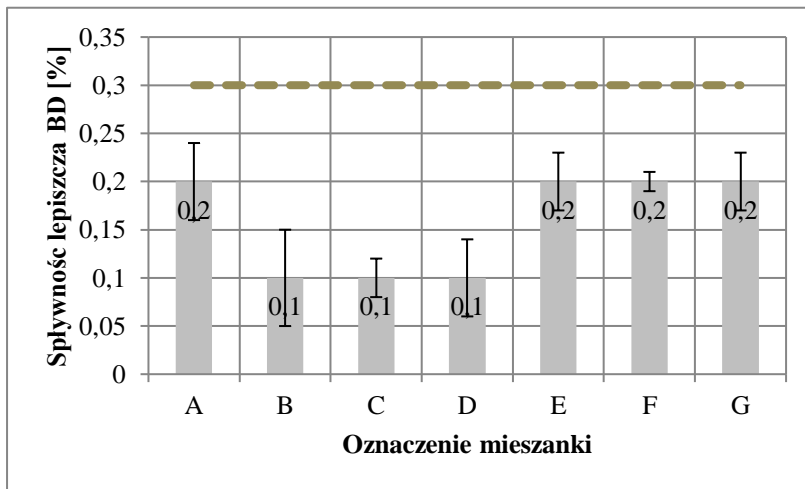
Wyniki odporności na działanie wody z 1 cyklem zamrażania wykazały, że każda z mieszanek osiągnęła wymaganą minimalną wytrzymałość 90%. Wyniki oznaczenia zamieszczone zostały na rysunku 9.



Rysunek 9. Wskaźnik odporności na działanie wody ITSR [opracowanie własne]

Na podstawie analizy wykonanego badania można stwierdzić, że dodatek destruktu nie wpłynął w znaczący sposób na odporność mieszanek na działanie wody i mrozu. Każda z mieszanek osiągnęła wymagane minimum, a różnice pomiędzy uzyskanymi wynikami są znikome.

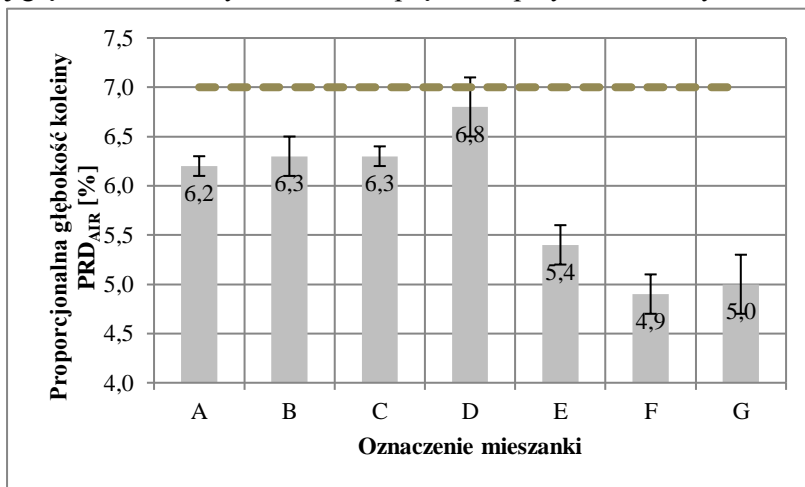
Podobnie zależności określono w przypadku spływności lepiszcza, wszystkie mieszanki spełniły wymaganie maksymalnej spływności 0,3%. Wyniki przedstawione zostały na rysunku 10.



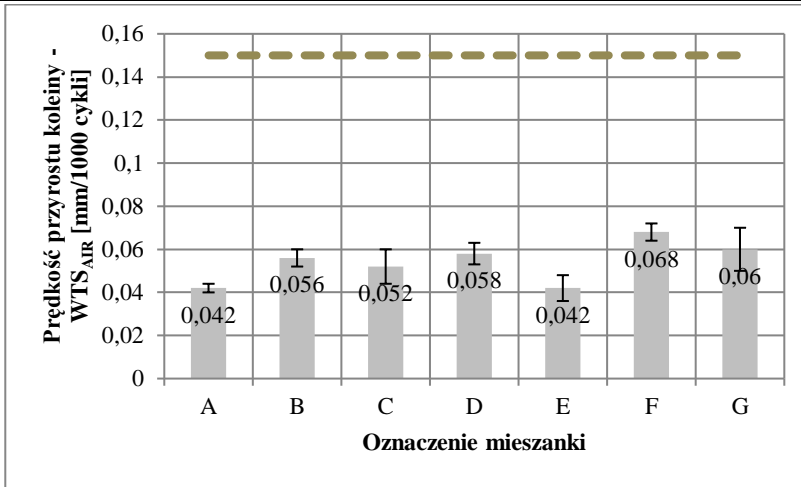
Rysunek 10. Spływność lepiszcza BD [opracowanie własne]

Zaznaczyć należy, że mieszanka z destruktem pochodzącym z warstwy ścieralnej osiągnęła lepsze parametry spływności lepiszcza, wpływ na to może mieć fakt, że destruktu ten pochodził z warstwy ścieralnej, którą była mieszanka SMA. Dla obu parametrów dodatek destruktu nie wpłynął znacząco na ich wartości.

Lepsze od minimalnych wymaganych wartości osiągnięto też dla odporności na deformacje trwałe. Na rysunkach 11 oraz 12 przedstawiono odpowiednio wyniki proporcjonalnej głębokości koleiny PRD_{AIR} oraz prędkości przyrostu koleiny WTS_{AIR} .



Rysunek 10. Proporcjonalna głębokość koleiny PRD_{AIR} [opracowanie własne]

Rysunek 11. Prędkość przyrostu koleiny WTS_{AIR} [opracowanie własne]

Dla obu parametrów, proporcjonalnej głębokości koleiny oraz prędkości przyrostu koleiny, dodatek nawet 50% destruktu asfaltowego pozwolił na osiągnięcie zadowalających wyników. W przypadku proporcjonalnej głębokości koleiny lepsze wyniki uzyskano dla destruktu z warstwy wiążącej i podbudowy, ze względu na fakt wystąpienia „twardszego” asfaltu niż w przypadku destruktu z warstwy ścieralnej i wiążącej.

5. Wnioski

Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań można sformułować następujące wnioski:

- Destrukty zastosowane w badaniach w znaczny sposób różniły się między sobą, rodzajem zastosowanego kruszywa, uziarnieniem, ilością asfaltu i jego parametrami, penetracją i temperaturą mięknięcia. Skutkowało to zróżnicowanym wpływem na parametry fizyczne i mechaniczne zaprojektowanych mieszank SMA JENA 16,
- Zaprojektowanie mieszank, w taki sposób, aby ich krzywe pokrywały się pozwoliło wykazać, że rodzaj i ilość destruktu w znaczny sposób wpływają na zmianę zawartości wolnych przestrzeni w mieszance SMA JENA 16, jednak wpływ ten nie był aż tak duży w przypadku pozostałych parametrów,
- Badanie zawartości wolnych przestrzeni wykazało, że w odniesieniu do średniej zawartości wolnej przestrzeni w próbach, tylko mieszanki C, D oraz G nie spełniają określonych wymagań,
- Zarówno wyniki badania wskaźnika odporności na działanie wody ITSR jak i spływności lepszysza D zostały spełnione dla każdej mieszanki. Lepsze wyniki osiągnęły mieszanki z dodatkiem destruktu pochodzącego z warstwy ścieralnej oraz warstwy wiążącej (destruk D1).
- Wyniki badania odporności na powstawanie deformacji trwałych, zarówno w zakresie proporcjonalna głębokość koleiny (PRD_{AIR}) jak i prędkość przyrostu koleiny (WTS_{AIR}) nie przekroczyły dopuszczalnej granicy. W przeciwieństwie do poprzednich badań lepsze wyniki uzyskano mieszanki z dodatkiem destruktu pochodzącego z warstwy podbudowy oraz warstwy wiążącej (destruk D2),

- Badania wykazały, że możliwe jest zastosowanie destruktu asfaltowego do mieszanki SMA JENA 16, tak, aby mieszanka spełniała wymagane parametry fizyczne i mechaniczne, jednak w analizowanym przypadku maksymalna ilość destruktu asfaltowego to 25%,

Literatura

1. <https://www.sma16jena.pl> [data dostępu: 10.03.2023].
2. Błażejowski K., Strugała I., *Nawierzchnia jednowarstwowa z SMA 16 JENA*, Rettenmaier Polska, 2019.
3. Szruba M., *Nowoczesne drogi asfaltowe*, Nowoczesne budownictwo inżynieryjne, maj-czerwiec, 2016, s. 22-25.
4. Wymagania techniczne – WT-2, *Mieszanki mineralno-asfaltowe 2014*, GDDKiA, Warszawa 2014.
5. RETTENMAUER POLSKA Sp. z o.o., *SMA 16 JENA – innowacja zamknięta w nawierzchni*, Nowoczesne budownictwo inżynieryjne, marzec-kwiecień, 2018, s. 78-79.
6. Kalabińska M., Piłat J., Radziszewski P., *Technologia materiałów i nawierzchni drogowych*, Wydawca: Oficyna wydawnicza politechniki warszawskiej, Warszawa 2003.
7. HEAVY DUTY SURFACES THE ARGUMENTS FOR SMA, European Asphalt Pavement Association - Rue du Commerce 77, 1040 Brussels, Belgium.
8. Błażejowski K., Jabłoński K., Sadkowski A., Strugała I., Wilk E., *Jednowarstwowa nawierzchnia asfaltowa SMA 16 JENA. Poradnik dla zarządców i wykonawców dróg samorządowych*, Wydawca: Rettenmaier Polska, 2014.
9. *Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych*, GDDKiA, Politechnika Gdańska, Katedra Inżynierii Drogowej, Warszawa 2014
10. Przybylski P., Tkaczyk S., *Analiza porównawcza możliwości wykonywania nawierzchni dróg lokalnych w technologii betonu wałowanego oraz SMA JENA*, Przegląd budowlany, 5-6, 2023, s. 130-133.
11. Wymagania techniczne – WT-1, *Kruszywa do mieszanek mineralno-asfaltowych i powierzchniowych utrwaleń na drogach krajowych 2014*, GDDKiA, Warszawa 2014
12. PN-EN 13108-20: 016-07 – *Mieszanki mineralno-asfaltowe – Wymagania – Część 20: Badanie typu*.
13. RID-I-06 Załącznik nr 9.2.1., *Wytyczne pozyskania i oceny przydatności destruktu i granulatu asfaltowego do recyklingu na gorąco w otaczarkach*, GDDKiA, 2019
14. Dz. U. z 2021 r. poz. 2468 Rozporządzenie z dnia 23 grudnia 2021 r. Ministra Klimatu i Środowiska w sprawie określenia szczegółowych kryteriów stosowania warunków utraty statusu odpadów dla odpadów destruktu asfaltowego.
15. *Katalog Przebudów i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych KPRNPP-2013*, GDDKiA, Warszawa 2013.
16. PN-EN 13108-8:2008 *Mieszanki mineralno-asfaltowe – Wymagania – Część 8: Destrukt asfaltowy*.
17. Iwański M., Chomicz-Kowalska A., *Laboratory Study on mechanical Parameters of Foamed Bitumen Mixtures in the Cold Recycling Technology*, Proceedings of the 11th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”. May 16-17, 2013, Vilnius, Lithuania. Procedia Engineering, 57, Elsevier, 2013, s. 433-442.
18. Iwański M., Chomicz-Kowalska A., *Właściwości recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym*, Drogownictwo, 9, 2011, s. 271-277.
19. GDDKiA: *Instrukcja projektowania i wbudowywania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)*, Gdańsk 2013.

20. RID-I-06 Załącznik nr 9.2.3. *Wytyczne cząstkowe w zakresie wymagań i projektowania mieszanek mineralno-asfaltowych z granulatem asfaltowym produkowanym na gorąco*, GDDKiA, 2019.
21. PN-EN 12697-1:2020-08 *Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań – Część 1: Zawartość lepiszcza rozpuszczalnego*.
22. PN-EN 12697-2+A1:2019-12 *Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań – Część 2: Oznaczenie uziarnienia*.
23. PN-EN 12697-5:2019-01 *Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań – Część 5: Oznaczenie gęstości*.
24. PN-EN 1426:2015-08 *Asfalty i lepiszcza asfaltowe – Oznaczenie penetracji igłą*.
25. PN-EN 1427:2015-08 *Asfalty i lepiszcza asfaltowe – Oznaczenie temperatury mięknięcia – Metoda Pierścieni i Kula*.

Wpływ rodzaju destruktu asfaltowego na właściwości mieszanki mastyksu grysowego SMA JENA 16

Streszczenie

Jednowarstwowa nawierzchnia asfaltowa może stanowić skuteczną alternatywę dla tradycyjnych nawierzchni asfaltowych, gdyż takie rozwiązanie pozwala skutecznie obniżyć koszty oraz przyspieszyć realizację inwestycji budowlanej. Aby taka mieszanka mogła być również bardziej „ekologiczna” możliwe jest wykorzystanie w niej materiałów poddanych recyklingowi, pozwalających na ograniczenie nowych materiałów, oraz wykorzystanie destruktu asfaltowego pozyskanego z rozbiórki istniejących nawierzchni dróg. W pracy podjęta została tematyka nawierzchni drogowej w technologii jednowarstwowej z mastyksu grysowego SMA JENA 16 z dodatkiem destruktu asfaltowego. Do badań zastosowane zostały dwa destrukty asfaltowe na bazie asfaltu drogowego oraz modyfikowanego polimerem w ilościach odpowiednio 10%, 25% oraz 50%. Celem pracy było określenie wpływu zastosowania destruktu asfaltowego na właściwości fizyczne i mechaniczne mastyksu grysowego SMA JENA 16. Przeprowadzony został szereg badań laboratoryjnych pozwalających na określenie właściwości destruktu asfaltowego, a także zaprojektowanych mieszanek SMA JENA 16. Wyniki wskazują, że możliwe jest zastosowanie zwiększonej, nawet do 50% ilości destruktu asfaltowego w takiej mieszance. Ponadto wykazano, że takie mieszanki pozwalają zachować odpowiednie parametry fizyczne i mechaniczne, co pozwoli na zachowanie odpowiedniej trwałości nawierzchni drogowej.

Słowa kluczowe: asfaltowa nawierzchnia jednowarstwowa, materiały z recyklingu, destrukty asfaltowe, mastyks grysowy

Impact of the type of reclaimed asphalt on the properties of the crushed stone mastic mix SMA JENA 16

Abstract

A single-layer asphalt pavement can be an effective alternative to traditional asphalt pavements because such a solution effectively reduces costs and accelerates the implementation of a construction project. Furthermore, for such a mixture to be more "ecological" and resource-efficient, recycled materials and reclaimed asphalt can be incorporated from the demolition of existing road pavement. The subject of this work is a single-layer SMA JENA 16 road surface made with the addition of reclaimed asphalt. Two reclaimed asphalts based on paving and polymer-modified asphalt were used in the tests at 10%, 25% and 50%, respectively. The aim was to determine the impact of using reclaimed asphalt on the physical and mechanical properties of SMA JENA 16. A number of laboratory tests were carried out to determine the properties of the reclaimed asphalt, as well as designed SMA JENA 16 mixes. The results indicate that it is possible to use increased, even up to 50%, reclaimed asphalt in such mixes. In addition, it has been shown that such mixtures maintain appropriate physical and mechanical parameters, ensuring the required durability of the road surface.

Keywords: single-layer asphalt pavement, recycled materials, reclaimed asphalt, stone mastic asphalt

Zautomatyzowane stanowisko wytwarzania katod do baterii termicznych bazujące na nowoczesnym układzie dozowania materiałów proszkowych

1. Wprowadzenie

Ostatnie lata przynoszą dalszy rozwój i modernizację przemysłu. W zakładach instalowane są nowoczesne linie technologiczne, automatyzowane są też poszczególne operacje jednostkowe, w tym procesy rozdrabniania, dozowania, naważania czy mieszania określonych składników. Należy pamiętać, że jednym z warunków prawidłowego przebiegu dowolnego procesu technologicznego w przemyśle jest konieczność doprowadzenia założonej i wymaganej w danej linii produkcji ilości różnych surowców i dodatków [1]. Warunki rozdrabniania i dozowania, zwłaszcza rozdrabniania selektywnego i odmierzania mikroskładników są bardzo zróżnicowane, gdyż wynikają zarówno ze stanu skupienia i postaci materiałów, a także z wymagań dotyczących rytmiczności zasilania maszyn i urządzeń. Niezależnie od tych uwarunkowań proces dozowania i naważania musi zapewniać równomierne i precyzyjne (okresowe lub ciągłe) doprowadzenie materiału do mieszarki lub zbiornika wagi sumującej w ściśle określonej i wymaganej ilości. Jednocześnie należy podkreślić, że szybkość przebiegu wielu procesów technologicznych oraz możliwość uzyskania produktu o określonych walorach i wymaganiach technologicznych jest uzależniona w wielu przypadkach od wielkości cząstek przerabianego materiału [1, 2]. Z tego względu zmniejszenie wielkości cząstek surowca jest jednym z podstawowych procesów w branży przemysłowej. W procesie rozdrabniania uzyskuje się cząstki o wymiarach mniejszych od wymiarów początkowych materiału, a w przypadku surowców pochodzenia roślinnego ich kształt może być różny i nieregularny. Równocześnie z procesem dozowania i rozdrabniania należy pamiętać o prawidłowym i jednorodnym mieszanii produktów wchodzących w skład określonej mieszaniny [3-5].

Producenci szukają rozwiązań, które usprawniają procesy produkcyjne. Nowoczesne technologie, które obecnie stosuje się w przemyśle, poprzez komputeryzację i wsparcie zaawansowanych układów automatycznego sterowania, nie do końca umożliwiają uzyskanie upragnionej precyzji i późniejsze jej wykorzystanie w każdym z etapów procesu produkcyjnego [6-8]. Wynikiem takiego stanu rzeczy jest utrata wysokiej jakości wytwarzanych produktów, nawet tych masowych. Dozowanie precyzyjne wykorzystuje się do wszystkich materiałów, których ilość jednocześnie musi być ściśle kontrolowana. Do nich zaliczają się różne materiały proszkowe a także inne substancje niezbędne do prawidłowego funkcjonowania wielu produktów [9, 10], takich jak:

¹ marcin.lijewski@pit.lukasiewicz.gov.pl, Grupa Badawcza Kształowania Blach, Centrum Obróbki Plastycznej, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny, ul. Jana Pawła II 14, 61-139 Poznań.

² krzysztof.plewa@pit.lukasiewicz.gov.pl, Grupa Badawcza Kształowania Blach, Centrum Obróbki Plastycznej, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny, ul. Jana Pawła II 14, 61-139 Poznań.

- przemysł spożywczy (m.in. podawanie dodatków smakowych, zapachowych, napełnianie słoików, torebek, worków, posypywanie ziołami produktów, wypełnianie worków, torebek mlekiem w proszku);
- przemysł chemiczny (m.in. dozowanie chemikaliów do określonych procesów);
- przemysł farmaceutyczny (m.in. dozowanie produktów wg receptury, wypełnianie produktów sterylnych, dozowanie tabletek o małych wymiarach);
- przemysł tworzyw sztucznych (podawanie pigmentów do mikserów, podawanie granulatów do wyłaczarek, dozowanie kredy jako wypełniacza, dozowanie ścinek do głównej linii produkcyjnej);
- przemysł rolniczy (produkcja pasz, nawozów);
- przemysł lakierniczy (dozowanie pigmentów);
- przemysł kosmetyczny (dozowanie dodatków do procesu);
- przemysł szklarski (podawanie glinki, emalii, barwników);
- przemysł gumowy (dozowanie mieszanek wg określonej receptury);
- inne (m.in. dozowanie tonerów do kopiarek, dozowanie w laboratoriach badawczych).

Bardzo istotnym obszarem jest automatyzacja wkraczająca w obszar przemysłu zbrojeniowego. Jednym z tych kierunków są baterie termiczne (baterie rezerwowe). Baterie rezerwowe aktywowane termicznie określane w skrócie bateriami termicznymi są specyficznymi chemicznymi źródłami prądu mającymi zastosowanie szczególnie do zasilania urządzeń specjalnych [11-13]. Cechami wyróżniającymi ten rodzaj baterii od pozostałych, jest bardzo długi okres przechowywania w różnych warunkach środowiskowych, duża odporność mechaniczna, niezawodność działania w szerokim zakresie temperatur oraz całkowita bezobsługowość w czasie magazynowania [14-15]. W zależności od przeznaczenia, baterie te charakteryzują się czasem aktywacji od 0,1 do kilku sekund i efektywnym czasem pracy od kilku sekund do kilkudziesięciu minut, a wartości napięcia i natężenia dostosowane są do wymagań użytkownika [15]. Powyższe właściwości wynikają z budowy baterii.

2. Cel pracy

Prezentowany zakres pracy i wyniki obejmują obszar przemysłu zbrojeniowego. W związku z tym, autorzy pracy nie mogą prezentować szczegółowo uzyskanych wyników i prac w tym obszarze. Prezentowane wyniki stanowią dopuszczalne dane jakie mogą być publikowane.

Celem pracy było opracowanie nowoczesnej i unikatowej linii technologicznej do wytwarzania katod baterii termicznych dla przemysłu zbrojeniowego (specjalnego przeznaczenia). W ramach pracy został zaprojektowany i wybudowany modułowy system dozowania i mieszania materiałów proszkowych. W pracy zostały także opracowane założenia technologiczne oraz został wybudowany system kontroli jakości produktu wraz z systemem selekcji produktu. Kolejnym etapem pracy było opracowanie ekspercki system eksperckiego systemu doboru modułów i parametrów procesu produkcyjnego, który będzie ograniczał koszty procesów technologicznych, skracał czas doboru czasu doboru parametrów oraz pozytywnie oddziaływał na środowisko, poprzez zmniejszenie ilości testów służących optymalizacji procesu produkcyjnego. Istotnym elementem było opracowanie oraz wykonanie prototypowego i precyzyjnego urządzenia dozującego materiały proszkowe. Urządzenie to opiera się na systemie ultradźwiękowym. Takie rozwiązanie pozwoliło na dozowanie materiałów sypkich z dużymi wydajnościami i wysoką

precyzją. Pozostałymi elementami urządzenia są: komora z atmosferą ochronną, śluza do wkładania/wyciągania elementów do komory, prasa hydrauliczna, stół obrotowy – czteropółosiowy, układ osuszania atmosfery, dodatkowa komora (połączona z komorą urządzenia) w której umieszczony został kompresor (siłowniki pneumatyczne bazujące na atmosferze z komory) wraz z układem oczyszczania atmosfery (filtry HEPA), 4 stanowiska robocze: układ podawania półproduktów wraz z układem zasypu proszku, układ rozgarniania, układ prasowania, odbioru wyrobów i kontroli, układ czyszczenia narzędzi.

3. Założenia dotyczące urządzenia

Pilotażowa instalacja pozwoliła przede wszystkim na znaczne zwiększenie wydajności (wykonanie do 300 sztuk każdego elementu dziennie, przy aktualnej produkcji około 100 sztuk dziennie). Uzyskana została także zdecydowana poprawa powtarzalności wykonywanych elementów co zmniejszy wydatnie ilość elementów wadliwych, znaczną poprawę ergonomii. Praca ta była wykonywana dotychczas ręcznie, która wymagał monotonna operacji wymagających użycia dużej siły fizycznej i/lub precyzji w niewygodnej pozycji podczas pracy w komorze rękawicowej, zastąpione zostały pracą automatu a rola operatora sprowadzona została do dozowania procesu i kontroli jakości. Urządzenie składa się z poszczególnych modułów, które poniżej zostały szczegółowo scharakteryzowane.

4. Budowa urządzenia – moduły urządzenia

4.1. System naważania

Jednym z kierunków rozwoju nowoczesnych technologii produkcyjnych w przemyśle jest obecnie technika dozowania precyzyjnego, często powiązana bezpośrednio z rozdrabnianiem i mieszaniem dozowanych produktów. Wysokorozwinięta technika precyzyjnego dozowania pozwala na osiągnięcie różnego rodzaju korzyści, do których należą przede wszystkim:

- zwiększenie efektywności produkcji przez zmniejszenie strat surowcowych i obniżenie kosztów, szczególnie w przypadku produktów specjalistycznych;
- zwiększenie jakości i powtarzalności produktów końcowych przez zapewnienie dokładnych proporcji składników receptury;
- umożliwienie miniaturyzacji produktów finalnych.

Rozwój techniki i prowadzenie badań w tej dziedzinie staje się zasadnym, dla sprośtania rosnącym wymaganiom i potrzebom produkcyjnym. W związku z powyższym przyjęte zostały założenia projektowe układu naważania precyzyjnego. Podstawowe założenia projektowe – parametry charakteryzujące finalne urządzenie:

- przeznaczenie: dozowanie produktów sypkich;
- zastosowanie: suche proszki o małej lejności;
- metoda dozowania: grawimetryczna, na zasadzie traconej masy;
- pomiar masy: tensometryczny;
- napęd: ultradźwiękowy, wysokoczęstotliwościowy;
- pojemność zasypu: ok. 1 dm³;
- wielkość porcji: do 2 g;
- dokładność naważania: $\pm 0,001$ g.

Kolejnym elementem przy projektowaniu systemu naważania był dobór materiału konstrukcyjnego. Wymagania dotyczące podstawowego materiału konstrukcyjnego:

- własności fizyczne i mechaniczne umożliwiające propagację drgań ultradźwiękowych;
- przeznaczenie do kontaktu z żywnością (zastosowanie urządzenia również w produkcji spożywczej);
- łatwość utrzymania w czystości, odporność na stosowane powszechnie chemiczne środki czystości;
- łatwość obróbki warsztatowej, kształtowania przy użyciu standardowych narzędzi.

Uwzględniając powyższe wymagania, jako główny materiał konstrukcyjny przyjęto austenityczną stal nierdzewną w gatunku 1.4301 wg PN-EN 10088 (304 wg AISI). Jako materiał zamienny przyjęto również stal austenityczną w gatunku 1.4404 wg PN-EN 10088 (316L wg AISI). Wartości gęstości i sprężystości charakteryzujące oba materiały zapewniają dobre przenoszenie drgań ultradźwiękowych i zapewniają odpowiednią prędkość rozchodzenia się fal oraz odpowiednią amplitudę drgań i ich częstotliwość.

Skład chemiczny zapewnia wysoką odporność na korozję w środowiskach kwaśnych i zasadowych, przez co stale te są zalecane do kontaktu z żywnością przez normy HACCP. Materiały odznaczają się dobrymi właściwościami technologicznymi, w tym spawalnością i skrawalnością.

W projektowaniu i opracowaniu systemu naważania istotnym elementem był dobór napędu. Przyjęte zostały następujące wymagania dotyczące doboru napędu:

- rodzaj napędu: ultradźwiękowy, wysokoczęstotliwościowy;
- częstotliwość drgań: ok. 33 kHz;
- amplituda drgań: ok. 5 μm ;
- ciężar własny: do 400 g.

Uwzględniając powyższe wymagania do napędu urządzenia wybrano przetwornik ultradźwiękowy – konwerter typu C35-SD8 firmy Artech US.

Napęd ultradźwiękowy w postaci konwertera należy do grupy czujników akustycznych i przetwarza sygnał elektryczny na ultradźwiękowy. Wybrany przetwornik charakteryzuje niska amplituda drgań, co ma zapewnić znikomy lub brak wpływu napędu na sygnał z pomiaru tensometrycznego. Zestaw generator i konwerter ultradźwięków przeznaczony jest fabrycznie do zastosowania w strukturach mechanicznych wykonanych z metali. Posiada możliwość bezpośredniej, procentowej nastawy wielkości amplitudy i pośrednią, programową możliwość regulacji częstotliwości.

W przypadku tak zaostzonych wymagań dotyczących dokładności nasypowej – masy, ważnym elementem był dobór tensometru pomiarowego. Wymagania dotyczące tensometru:

- nośność: do 3 kg;
- ilość działek wewnętrznych: min. 15000;
- działka odczytowa statyczna: min. 0,2 g.

Uwzględniając przyjęte wymagania do tensometrycznego pomiaru masy wybrano przetwornik typu PW6CMR/3 kg firmy HBM.

Bardzo istotnym elementem przy projektowaniu dozownika materiałów proszkowych był dobór kształtu i geometrii urządzenia. Wymagania dotyczące kształtu dozownika; zbiornika i rynny wysypowej:

- pojemność zbiornika: ok. 1 dm^3 ;

- kształt: umożliwiający swobodny wypływ dozowanego produktu;
- ciężar własny: do 1500 g;
- materiał konstrukcyjny: stal nierdzewna w gatunku 304 lub 316L wg AISI;
- napęd: przystosowany do zamocowania napędu ultradźwiękowego C35-SD8 poprzez falownik;
- pomiar wagi: tensometryczny o udźwigu nie przekraczającym 3 kg.

Dobór kształtu dozownika przeprowadzono etapowo celem osiągnięcia finalnie optymalnego rozwiązania, spełniającego przyjęte na wstępie wymagania.

ETAP 1

W pierwszym etapie analizie poddano bryły w formie ostrosłupa prawidłowego czworokątnego ściętego z otwartymi rynnami wysypowymi (rys. 4.1a). Wykonano niezbędne obliczenia, na podstawie których opracowana została dokumentacja warsztatowa, a następnie prototypy wybranych kształtów. Badane prototypy wyposażone zostały w nierdzewne siatki plecione, wklejane z odpowiednim naciągiem. Założeniem zastosowania siatek było rozproszenie – ujednoczenie strumienia produktu w trakcie dozowania i wyeliminowanie przesypania się proszku w momencie zatrzymania dozowania, ograniczenie bezwładności przepływu. Naciąg siatek wykonywano na stole do napięcia, a kontrolę naciągu przy użyciu miernika napięcia typu FT firmy Hans Schmidt & Co o zakresie pomiarowym $6 \div 50$ N/cm.

W wyniku przeprowadzonych w tym etapie testów otrzymano następujące wnioski:

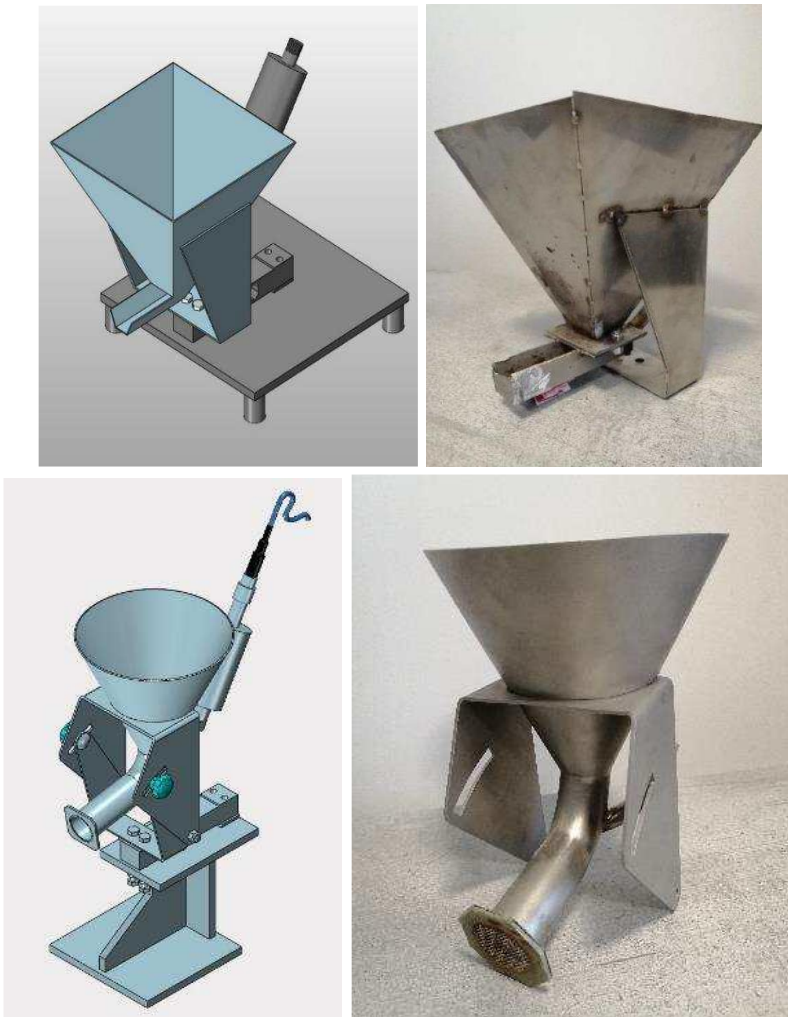
- określono optymalną dla procesu moc fal ultradźwiękowych na poziomie ok. 15 W;
- uzyskano zadowalającą propagację drgań i przepływu strumienia produktu, przy czym najlepszy efekt osiągnięto przy pochyleniu rynny wysypowej w kierunku dozowania;
- osiągnięto wymaganą dokładność naważenia przy założonej wielkości porcji;
- najlepszy efekt ujednoczenia produktu uzyskano przy zastosowaniu siatki rozpraszającej o oczku 0,8 mm i średnicy drutu 0,2 mm, wklejonej na końcu rynny wysypowej z naciągiem w przedziale $20 \div 25$ N/cm;
- w miejscach zagięć kształtu oraz na połączeniach spawanych zaobserwowano tendencję do miejscowego nagrzewania się elementów pod wpływem drgań;
- w miejscach zagięć kształtu zaobserwowano tendencję do zalegania i zawieszania się produktów testowanych.

ETAP 2

Na podstawie wniosków i spostrzeżeń uzyskanych podczas pierwszych testów mechanicznych w etapie drugim zdecydowano o modyfikacji kształtu dozownika celem wyeliminowania zjawisk niepożądanych, szczególnie tendencji do miejscowego nagrzewania się elementów i zalegania surowca oraz o wprowadzeniu rozwiązań usprawniających efektywny przepływ strumienia surowca przez pochylenie rynny wysypowej. Do dalszej analizy wybrano stożkowy kształt zbiornika oraz walcowy rynny (rys. 4.1b). Jak poprzednio wykonano niezbędne obliczenia, dokumentację techniczną i prototypy do dalszych analiz. W każdym wariantcie rozwiązania zastosowane zostało pochylenie rynny wysypowej polepszające swobodny przepływ strumienia dozowanego surowca. Przeprowadzono analizę geometryczną i zastosowano możliwość bezstopniowej regulacji kąta pochylenia w zakresie $00 \div 200$. Wszystkie prototypy wyposażono w siatki rozpraszające o dobranej uprzednio wielkości i określonym testami naciągu, umiejscowione na zakończeniu rynny wysypowej.

W wyniku przeprowadzonych w tym etapie testów stwierdzono, że:

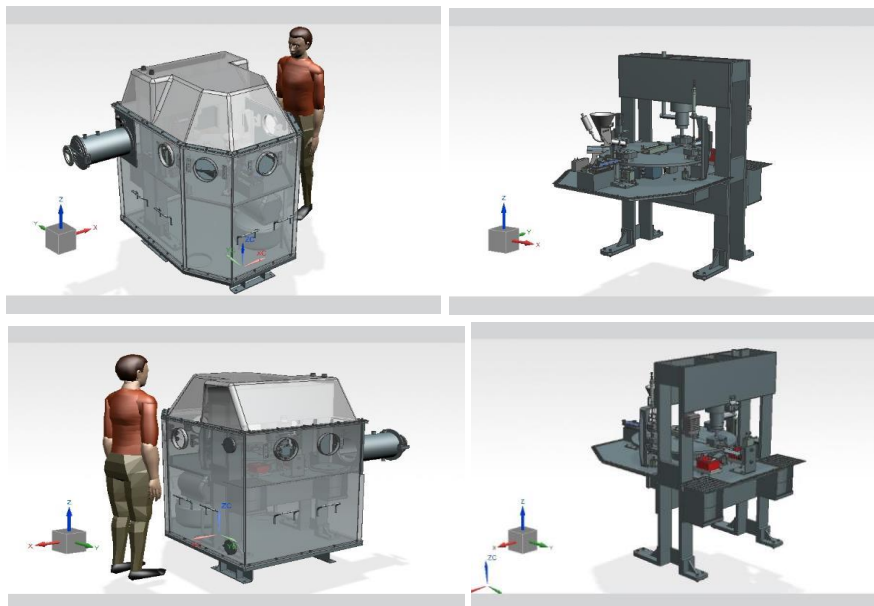
- wykonanie zbiornika z blach walcowanych w kształcie ściętego stożka oraz wysypu w postaci rury cylindrycznej daje najlepsze efekty propagacji drgań i w efekcie najlepszy i stabilny przepływ produktu dozowanego;
- połączenia skręcane zarówno elementów dozownika jak i mocowania siatki rozpraszającej mają tendencję do miejscowej utraty ciągłości drgań i wynikowo nagrzewania się elementów. Najlepsze rozchodzenie się drgań uzyskano na prototypach w postaci jednolitej bryły złożonej z elementów wzajemnie spawanych;
- zastosowanie wysypu z regulowanym pochyleniem daje możliwość optymalnego dostosowania wypływu z dozownika w zależności od charakteru dozowanego produktu;
- potwierdzono najlepszą skuteczność rozproszenia produktu przy siatce klejanej na końcu rynny wysypowej;
- wykonanie zbiornika z rynną jako elementu szybkodemontowalnego skraca znacząco czas czyszczenia i przezbrajania urządzenia.



Rysunek 4.1. Systemy dozujące a) w formie ostrosłupa prawidłowego, b) stożkowy kształt zbiornika [opracowanie własne]

4.2. Opis koncepcji działania linii technologicznej oraz poszczególnych gniazd technologicznych

Głównymi elementami linii (urządzenia do wytwarzania katod) są: komora z atmosferą ochronną, służąca do wkładania/wyciągania elementów do komory, prasa hydrauliczna, stół obrotowy, czteropłożeniowy, układ osuszania atmosfery, dodatkowa komora (połączona z komorą urządzenia) w której umieszczony został kompresor (siłowniki pneumatyczne bazujące na atmosferze z komory) wraz z układem oczyszczania atmosfery (filtry HEPA) oraz 4 stanowiska robocze (układ podawania półproduktów wraz z układem zasypu proszku, układ rozgarniania, układ prasowania, odbioru wyrobów i kontroli, układ czyszczenia narzędzi) – rys. 4.2.



Rysunek 4.2. Urządzenie do wytwarzania katod do baterii termicznych [opracowanie własne]

Po uruchomieniu urządzenia zostanie podane zasilanie do prasy i kompresora. Na czteropozycyjnym stole obrotowym zamocowane będą 4 gniazda narzędziowe, obracane cyklicznie co 90° . Po uruchomieniu cyklu:

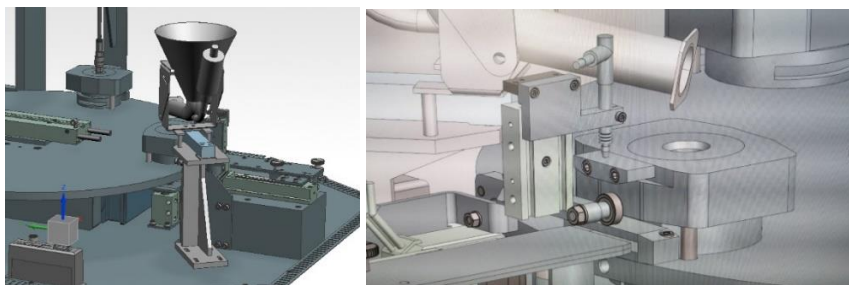
- w pierwszym gnieździe wysuwa się tłoczyko siłownika pneumatycznego pionowego, następnie suwak modułu liniowego do zadanej wysokości, uruchamiany jest ejector podciśnienia, następnie kolejno następuje: wycofanie suwaka modułu liniowego do zadanej wysokości, wysuwane będzie tłoczyko siłownika pneumatycznego poziomego, następuje wyłączenie podciśnienia i przedmuch, wycofanie tłoczyska siłownika poziomego, wycofanie tłoczyska siłownika pionowego, sprawdzenie pomiaru na czujniku. Jeśli pomiar mieści się w zadanych granicach, uruchamiany jest dozownik proszku. Po otrzymaniu od dozownika sygnału zakończenia zasypywania uruchamiany jest obrót tarczy stołu obrotowego, pod warunkiem zakończenia operacji na pozostałych trzech gniazdach;
- w drugim gnieździe następuje uruchomienie zadanych obrotów silnika serwo, przesunięcie suwaka modułu liniowego do zadanej pozycji, zmiana kierunku lub/i pręd-

kości obrotowej silnika serwo, zmiana położenia suwaka modułu liniowego, ponowna zmiana kierunku lub/i obrotów, a następnie wycofanie suwaka modułu liniowego i wysyłany jest sygnał gotowości do obrotu tarczy;

- w trzecim gnieździe uruchamiany będzie wysuw tłoczyska prasy hydraulicznej, po osiągnięciu żądanego ciśnienia następuje prasowanie w czasie określonym przez operatora i wycofanie tłoczyska. Następuje wysunięcie tłoka pionowego siłownika pneumatycznego. Następnie uruchamiany jest siłownik pneumatyczny poziomy i po pełnym wysunięciu tłoczyska następuje jego wycofanie. Tłok siłownika pionowego jest wycofywany. Sprasowany detal jest ważony i sprawdzany optycznie kamerą. W przypadku pozytywnego wyniku pomiarów następuje obrót siłownika obrotowego w lewo, zaś przy wyniku negatywnym w prawo. Wysyłany jest sygnał gotowości do obrotu tarczy;
- w czwartym gnieździe uruchamiany jest nadmuch gazu, wysuwany jest tłok siłownika dolnego i tłok siłownika górnego, a następnie tłoki są wycofywane. Wysyłany jest sygnał gotowości do obrotu tarczy. Po wykonaniu zadań we wszystkich gniazdach następuje obrót tarczy stołu i cykl powtarza się.

4.3. Gniazdo podawania półwyrobów i dozowania materiału proszkowego

W gnieździe dozowania i podawania rusztowań, zostały tak zaprojektowane elementy aby możliwe było zastosowanie dozownika (dostarcza partner w projekcie) o dozowaniu mas od 0,25 do 10 g przy zachowaniu dokładności $\pm 1\%$. Gniazdo zostało tak zaprojektowane aby możliwe było stosowanie wymiennych dozowników o określonych wielkościach (głównie rynnna wysypowa i wielkość zasobnika w dozowniku). Kolejnym elementem było dostosowanie układu podawania rusztowań do katod aby zapewnić możliwość stosowania rusztowań o zróżnicowanych średnicach (od 15 do 60 mm). Gniazdo zostało tak zaprojektowane, iż będzie istniała możliwość stosowania zakładanych typoszeregów (wymienne elementy układu) – rys. 4.3.

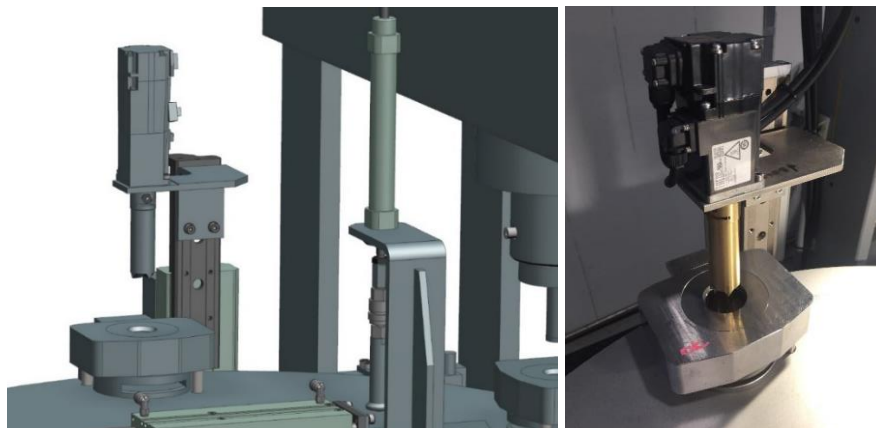


Rysunek 4.3. Gniazdo dozowania i podawania rusztowań [opracowanie własne]

W określeniu podstawowych parametrów pracy gniazda podawania półwyrobów i materiału proszkowego należało wykonać badania pozwalające na prawidłową pracę poszczególnych modułów gniazda. Warto wskazać, iż do podstawowych parametrów jakie należało wyznaczyć, zaliczyć należy: określenie siły docisku półwyrobu z zasobnika, wartość podciśnienia utrzymania półwyrobu w gnieździe, parametry nasypu (charakterystyka dla danego produktu): czas, częstotliwość działania ultradźwięków, charakterystykę procesu naważania (3 etapy procesu: naważanie zgrubne, dokładne i doważanie), moc ultradźwięków, płynność płynięcia proszku, itd. Bardzo ważnym elementem w tym przypadku jest także kontrola prawidłowego podania półwyrobu.

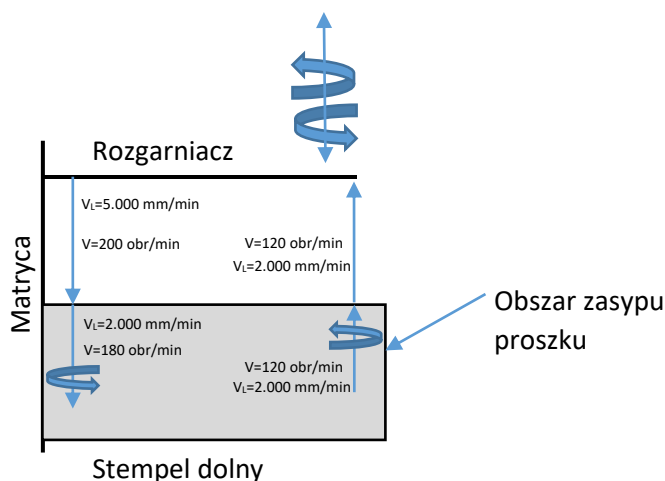
4.4. Gniazdo rozgarniania materiału proszkowego

W przypadku gniazda rozgarniania materiału proszkowego, zostały dobrane rozwiązania mechaniczne w taki sposób, iż będzie możliwość zmiany prędkości obrotowej rozgarniacza w zakresie od 50 do 300 obr./min. Jednocześnie zostały wszystkie elementy mechaniczne tak zaprojektowane aby gwarantowały zachowanie sztywności układu, nie zależnie do prędkości obrotowej rozgarniacza (układu napędowego) – rys. 4.4.



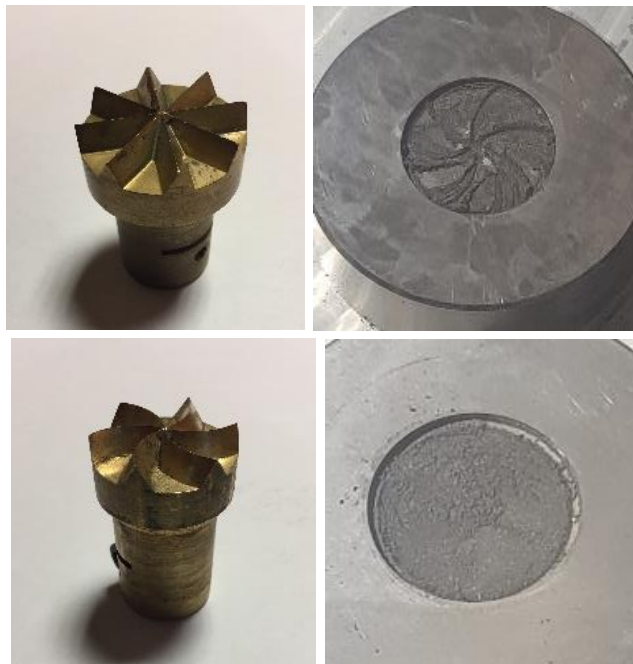
Rysunek 4.4. Gniazdo rozgarniania proszku [opracowanie własne]

Istotnym elementem w budowie urządzenia i układu rozgarniania materiału proszkowego, było odpowiednie zaprojektowanie procesu (ruchów) rozgarniacza – rys. 4.5. Scharakteryzować można 2 podstawowe ruchy: 1 – ruch wejścia rozgarniacza do narzędzi; 2 – ruch wycofania rozgarniacza z narzędzi. W obu przypadkach istotnymi parametrami do wyznaczenia i zbadania były takie parametry jak prędkość obrotowa rozgarniacza, prędkość liniowa układu, odległości wprowadzenia rozgarniacza, kierunki ruchu.



Rysunek 4.5. Schematyczny przebieg procesu rozgarniania wraz z poszczególnymi fazami procesu [opracowanie własne]

W trakcie badań analizowano także różne rozwiązania rozgarniaczy (rys. 4.6). Analizowano układy, których działanie miało spowodować jaknajkorzystniejsze rozgarnięcie materiału proszkowego. Na rysunku 4.6 przedstawione zostały przykłady rozgarniaczy wraz z uzyskiwanymi, przykładowymi strukturami rozproszanego proszku.



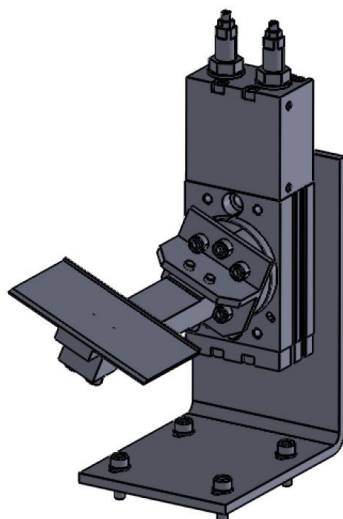
Rysunek 4.6. Przykładowe rozgarniacze oraz rozproszony proszek w gnieździe do prasowania [opracowanie własne]

4.5. System kontroli i segregacji wyrobów

W ramach pracy została opracowana koncepcja systemu kontroli i segregacji wyrobów. Założenia dotyczące systemu obejmowały:

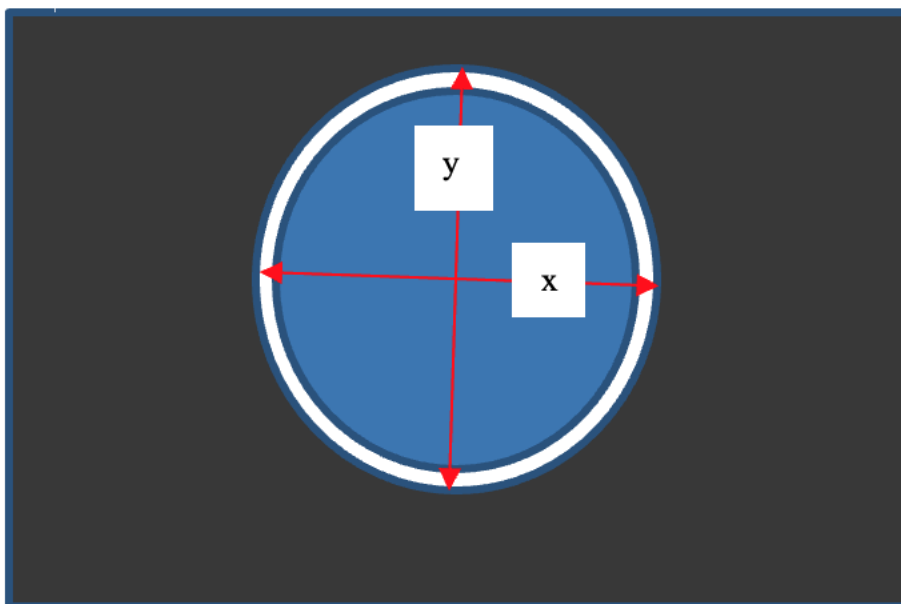
- kontrolę masy;
- kontrolę optyczną jakości wyrobu;
- sprzężenie systemu z systemem naważania proszku;
- przygotowanie danych do systemu eksperckiego.

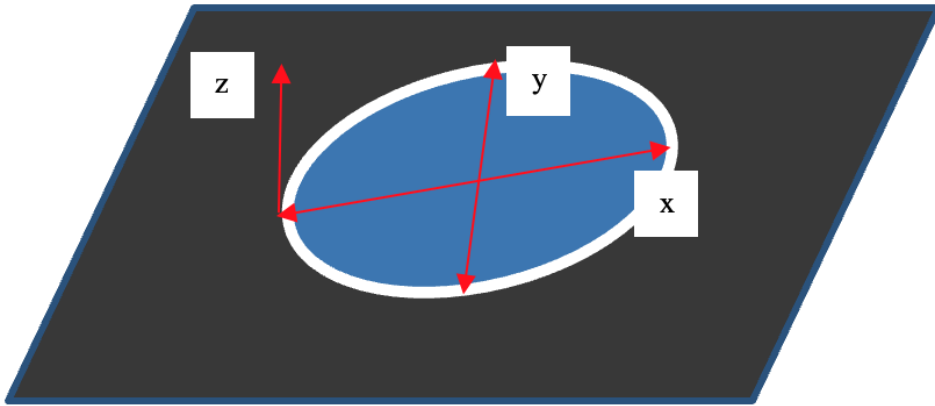
Koncepcja kontroli masy – układu pomiarowego masy została przedstawiona na rysunku 4.7. Układ pomiarowy bazuje na silniku z trzema położeniami: położenie zero – odbiór tabletki, położenie lewa strona wyrób dobry, położenie prawa strona wyrób nieprawidłowy. Na silniku umieszczona jest belka tensometryczna jako układ pomiarowy (czuły). Na belce tensometrycznej umieszczony został stolik, na który będą podawana wyroby. Wyroby będą poddane analizie – masa wyrobu i na podstawie tej analizy system (urządzenie) będzie prowadził selekcję wyrobów poprzez obrót stolika w odpowiednią stronę. Jeżeli wyrób spełnia warunki masy, wówczas nie następuje obrót stolika i prowadzona jest analiza jakościowa. W układzie należy zapewnić bezpieczny odbiór i przemieszczanie wyrobów. W tym celu należało zaprojektować i wykonać kontrolowany system odbioru wyrobów.



Rysunek 4.7. Koncepcja systemu kontroli masy [opracowanie własne]

Belka tensometryczna jako układ kontroli masy pozwoli na zakładaną wydajność – 300 sztuk na 8 godzin pracy. Układ dotyczący analizy geometrii – min dwie osie. W ramach analizy geometrii wyrobu, istotnymi pomiarami będzie określenie podstawowych wymiarów katody według poniższego schematu (rys. 4.7). Analiza geometrii względem osi x i y pozwoli na określenie centryczności naprasowanej warstwy proszku na podkładzie i siatce oraz będzie możliwe określenie niepokrytej powierzchni podkładu. Istotnym elementem będzie analiza katody względem osi z , co pozwoli na określenie zmian wysokości naprasowanego proszku na podkładzie. Analiza taka będzie możliwa w oparciu o optyczną kamerę dokładną z inspekcją max 30 sekund.





Rysunek 4.7. Schematyczna koncepcja systemu analizy geometrii katod [opracowanie własne]

4.5.1. Dobór elementu kontrolującego masę wyrobu – belka tensometryczna

W ramach I części prac dotyczących systemu kontroli, został zdefiniowany układ pomiarowy masy końcowej wyroby. Układ ten stanowi czuły tensometr (belka tensometryczna), na której jest zamontowany specjalny stolik na który będą umieszczane wyroby (katody). Rysunek belki tensometrycznej poglądowy przedstawiono poniżej (rys. 4.8).



Rysunek 4.8. Wytypowana belka tensometryczna [16]

Wytypowana belka tensometryczna to precyzyjny czujnik tensometryczny przeznaczony do ważenia ładunków statycznych.

Wymagania dotyczące tensometru:

- nośność: do 3 kg;
- ilość działek wewnętrznych: min. 15000;
- działka odczytowa statyczna: min. 0,2 g.

Uwzględniając przyjęte wymagania do tensometrycznego pomiaru masy wybrano przetwornik typu PW6CMR/3kg firmy HBM o poniższych parametrach:

- nośność: 3000 g;
- dokładność pomiarowa 0,001 g;
- ilość działek wewnętrznych: 15000;
- minimalna działka odczytowa: 0,2 g;
- klasa dokładności: C3MR;
- stopień ochrony: IP67;

- materiał: aluminium odporne na działanie proszku stosowanego na katodę.
Zakładana nośność wynika z całkowitego pomiaru układu (konstrukcja oraz wyroby). Dokładność – działka odczytu pozwoli na dokładną analizę masy wyrobów (zgodnie w wymaganiach przedstawionymi przez partnera w projekcie).

W ramach doboru kształtu i jakości wyrobu podjęte zostały analizy koncepcji działania m.in. czujnika położenia, kurny świetlnych czy czujnika laserowego do sprawdzania zmian wysokości naprasowanej warstwy proszku. Z uwagi iż katoda może zostać umieszczona w różnym położeniu na stoliku umieszczonym na belce tensometrycznej podjęto analizę zastosowania czułej kamery optycznej, dokładnej, pozwalającej na: określenie geometrii przez zdefiniowanie osiowości wyrobu, określenie równoległości (zmiana barwy światła) oraz określenie wysokości (zmiana kąta padającego światła) naprasowanego proszku. Na podstawie analizy literatury i na podstawie konsultacji z dostawcami precyzyjnych systemów optycznych podjęta została decyzja, iż najkorzystniejszym i najbardziej precyzyjnym rozwiązaniem będzie optyczna kamera inteligentna z własnym systemem oświetlenia i wymiennym obiektywem. Kamera tego typu pozwoli na analizę osiowości wyrobu (układ x-y) oraz zmianę wysokości (oś z). W związku z powyższym podjęto próbne testy tego typu urządzeń.

Dostępny czas na kontrolę wynosi 30 s. Elementy są kontrolowane podczas ich zatrzymania i są spozycjonowane z błędem w zakresie kilku milimetrów. Jednoczesnej kontroli podlega jeden plasterek. Podajnik/tło na jakim znajdują się plasterki jest ciemnego koloru.

4.5.2. Dobór systemu wizyjnego – kamera

Do testów wykorzystano monochromatyczną kamerę inteligentną serii P10 o rozdzielczości 640 x 480 px zamontowaną pod kątem prostym do powierzchni, na jakiej znajdują się próbki (rys. 4.9). W czasie testów, z obiektywem o ogniskowej 12 mm i przy odległości roboczej równej ok. 210 mm od frontu kamery do elementu, uzyskano pole widzenia o wymiarach ok. 60 x 45 mm. Dopuszczalna jest niewielka zmiana odległości roboczej, przekładająca się na zmianę pola widzenia. Jeśli różnica będzie duża, należy dobrać inny obiektyw. Do oświetlenia stanowiska podczas testów użyto oświetlacza wbudowanego, emitującego światło czerwone.

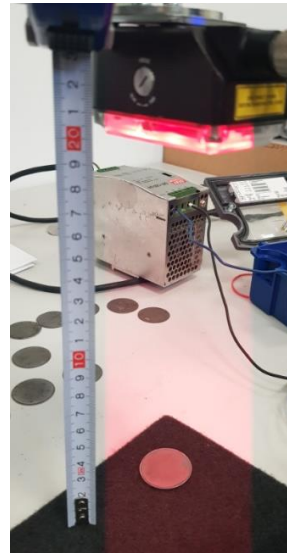
System wizyjny DataLogic: Kamera inteligentna serii P. Oświetlacz: wbudowany emitujący światło czerwone (rys. 4.9). Obiektyw: Obiektyw o ogniskowej 12 mm i 8 mm (zamiennie). Oprogramowanie: Impact 12.02.1. Podane wyżej odległości powinny są traktowane jako wartości przybliżone, a nie dokładne wymiary. Podczas montażu kamery należy uwzględnić możliwość niewielkiej zmiany ułożenia stanowiska w celu podniesienia jakości rejestrowanego obrazu.

Kontrola opiera się na wykorzystaniu jednego narzędzia wizyjnego, o nazwie Blob. Narzędzie działa na podstawie wyszukiwania zbiorów pikseli o wskazanym poziomie jasności. Na zarejestrowanych zdjęciach, warstwa proszku bez defektów, jest w szarym, powtarzalnym odcieniu, całkowite ubytki są zbliżone do barwy białej, natomiast miejsca o uszkodzonej warstwie proszku są widocznie ciemniejsze. Na podstawie danych o wielkości największego skupiska pikseli system wizyjny kwalifikuje poszczególne plasterki. Różnice pomiędzy otrzymanymi próbkami są wystarczające do jednoznacznego podziału. Ze względu na ciemne tło, konieczne stało się dodanie narzędzia lokalizacji jasnego okręgu, w celu znalezienia dokładnej pozycji plasterka i na tej podstawie dobranie regionu wyszukiwania blobów – obszarów o takich samych właściwościach.

Wstępny podział odbywa się na podstawie znajdowania „poprawnej” powierzchni koloru szarego. W otrzymanych dobrych próbkach ilość szarych pikseli znajduje się w przedziale od 95300 do 97000 px, akceptowalnych od 93900 do 96100 px, a złych od 79000 do 94400 px (zdefiniowane przedziały w testach wstępnych). Ta część programu pozwala odrzucić zdecydowaną większość (90% otrzymanych próbek) nieprawidłowych elementów. Pozostałe są eliminowane poprzez znajdowanie stosunkowo dużych skupisk białych pikseli (powyżej 600) oraz czarnych pikseli (powyżej 1200). Aby odróżnić próbki akceptowalne od dobrych wyszukiwane są niewielkie białe błozy (20-100 px) oraz sprawdzany jest błąd okrągłości okręgu do lokalizacji, aby wyeliminować nierówne nałożenie proszku.

Wytyczne:

- Odległość pomiędzy badanym detalem, a kamerą powinna być stała. Zmiana ustawienia odległości, może negatywnie wpłynąć na działanie systemu;
- Zalecane jest przynajmniej częściowe osłonięcie miejsca inspekcji od światła zewnętrznego;
- Czas wykonywania programu podczas testu nie przekraczał 600 ms;
- Tło miejsca kontroli powinno być zauważalnie różne (jaśniejsze lub ciemniejsze) od koloru kontrolowanego proszku.



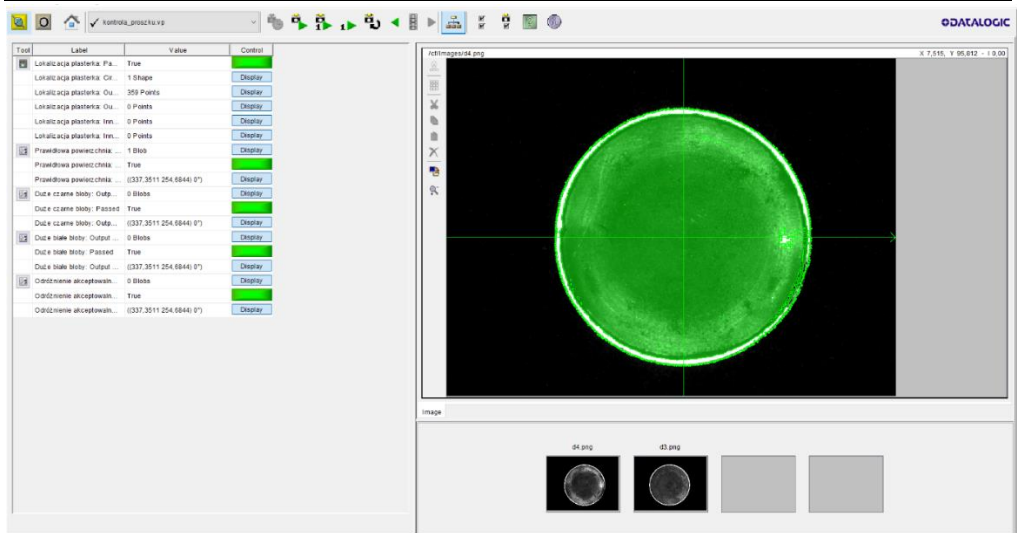
Rysunek 4.9. Kamera inteligentna serii P oraz testowe stanowisko [17]

W trakcie testów wykonane zostały analizy 3 rodzajów wyrobów zdefiniowanych jako:

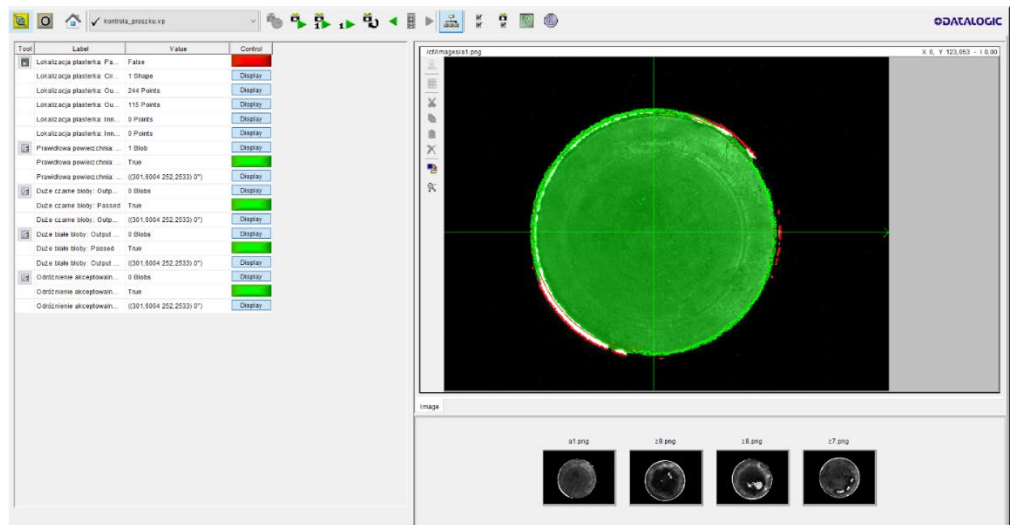
- Wyroby dobre;
- Wyroby akceptowalne;
- Wyroby złe.

Na poniższych rysunkach (4.10-4.12) zostały przedstawione przykładowe analizy i zdjęcia danych wyrobów.

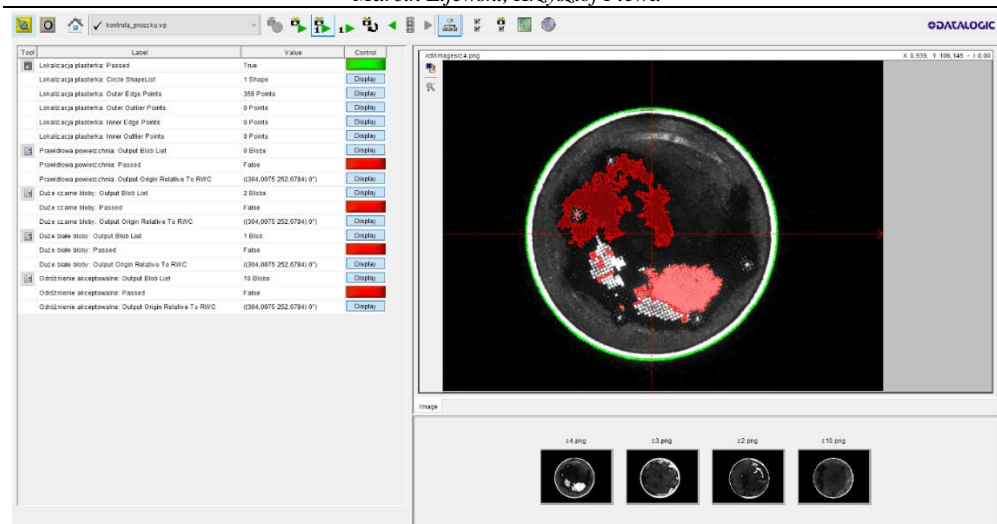
*Zautomatyzowane stanowisko wytwarzania katod do baterii termicznych
bazujące na nowoczesnym układzie dozowania materiałów proszkowych*



Rysunek 4.10. Przykład oceny wyrobu w programie do analizy obrazu – katoda prawidłowa [opracowanie własne]



Rysunek 4.11. Przykład oceny wyrobu w programie do analizy obrazu – katoda akceptowalna [opracowanie własne]



Rysunek 4.12. Przykład oceny wyrobu w programie do analizy obrazu – katoda wadliwa
[opracowanie własne]

4.5.3. Dobór elementów systemu odbioru wyrobu

Niezbędnym elementem do prawidłowo funkcjonującego systemu kontroli/analizy wyrobu i selekcji jest prawidłowy odbiór wyrobu i umieszczenie go w układzie pomiarowym (stolik na belce tensometrycznej). Niezbędne jest dobranie:

- Siłownika z przewodnicami o odpowiedniej sile (regulowana) oraz zakresie pracy;
- Napędu obrotowego do selekcji wyrobów;
- Mechanicznego elementu układu odbioru /blacha wysuwu/.

4.5.3.1. Siłownik z przewodnicami.

Siłownik z przewodnicami serii MGP (MGPM16-140Z) przedstawiono na rysunku 4.13. Parametry siłownika:

- Precyzyjny ruch przewodnicy – $\pm 0,03$ dokładności obrotu;
- Konstrukcja kompaktowa – zmniejszona waga i wymagana przestrzeń dzięki konstrukcji tłoczek prowadzących i płyty czołowej;
- Średnica tłoka: 16 mm;
- Skok 1400 mm (w zależności od średnicy tłoka);
- Można wybrać 3 rodzaje łożysk: łożysko ślizgowe, łożysko kulkowe i precyzyjne łożysko kulkowe. Wybrano precyzyjne łożysko kulkowe;
- Montaż u góry;
- Czujniki położenia tłoka montowany na 2 powierzchniach.

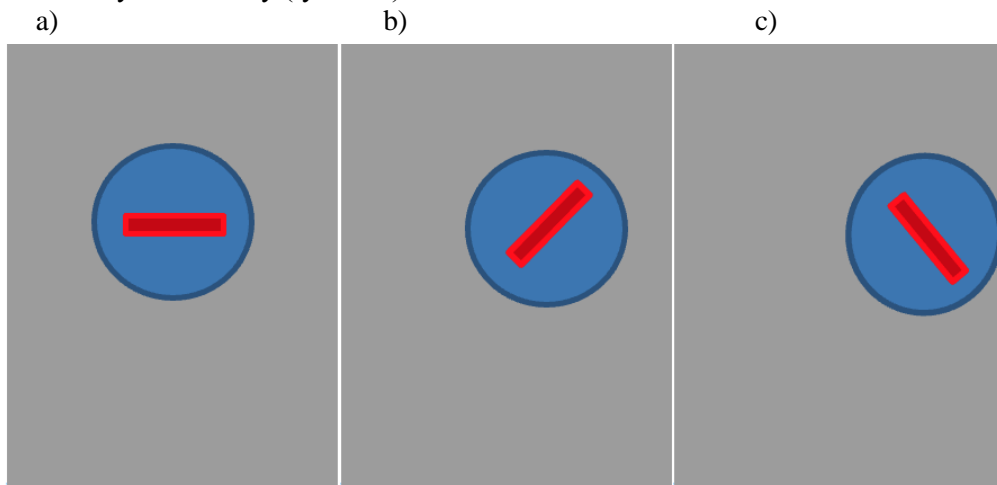


Rysunek 4.13. Siłownik z prowadnicami serii MGP (MGPM16-140Z) [18]

Siłownik posiada możliwość regulacji siły działania (zawory na wejściu sprężonego powietrza). Takie rozwiązanie pozwoli na optymalizację siły oddziaływania na katodę w procesie odbioru.

4.5.3.2. Napęd obrotowy do selekcji wyrobów – montaż belki tensometrycznej

W celu prawidłowego prowadzenia selekcji wyrobów niezbędnym było wytypowanie silnika – napędu z 3 – położeniami zdefiniowanymi w następujący sposób: obrót napędu z lewą stronę – wyrób prawidłowy, położenie zero – wyrób w trakcie odbioru, prawa strona – wyrób wadliwy (rys. 4.14).



Rysunek 4.14. Zdefiniowane położenia napędu do systemu selekcji wyrobów: obrót napędu z lewą stronę – wyrób prawidłowy (b), położenie zero – wyrób w trakcie odbioru (b), prawa strona – wyrób wadliwy (c) [opracowanie własne]

Na podstawie analizy dostępnych na rynku napędów obrotowych (silnik) 3 – położeniowy wytypowany został produkt firmy SMC Seria MSZ (rys. 4.15).



Rysunek 4.15. Napędy obrotowe 3-położeniowe z napędem dwuśrodkowym [18]

Dane urządzenia:

- Napędy obrotowe 3-położeniowe z napędem dwuśrodkowym;
- Obciążenie statyczne: 2,17 Nm;
- Wielkości: 20;
- Kąt obrotu: Do 190°;
- Regulowany zakres czasu obrotu: od 0,2 do 1 s/90°;
- Położenie pracy: pionowe;
- Typ obciążenia: bezwładnościowe (siłą ośrodkową);
- Kształt obciążenia: 0,1 m x 0,06 m (płyta prostokątna);
- Czas obrotu t: 0,3 s;
- Masa przedmiotu obracanego m: 0,4 kg;
- Odległość środka ciężkości od osi obrotu stołu H: 0,4 m.

4.5.3.3. Mechaniczny element układu odbioru (blacha wysuwu)

Element bezpośrednio mający kontakt z katodą /blacha wysuwu/, zamontowany na siłowniku z prowadnicami, został tak zaprojektowany aby minimalizować oddziaływanie na katody w procesie odbioru. Podstawowym elementem układu jest blacha wypychająca. Kąt rozwarcia czołowej płaszczyzny, która zbiera katody, został tak dobrany aby oddziaływać symetrycznie na boczne części katody i minimalizować możliwość uszkodzenia wyrobu. Grubość wypychacza została tak dobrana aby zapewnić możliwość przemieszczania się wypychacza w narzędziach do prasowania (narzędzia dzielone i podnoszone do góry w trakcie odbioru wyrobu) oraz zabierania katod z strefy prasowania na stół pomiarowy.

5. Wnioski/Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych prób i badań sformułowano następujące wnioski:

- Opracowano parametry procesu rozgarniania, nasypywania, prasowania celem określenia wytycznych do urządzenia.
- Na podstawie badań zostały opracowane wytyczne do wykonania urządzenia wraz z poszczególnymi gniazdami technologicznymi.
- W ramach pracy zostały opracowane wytyczne dotyczące procesu technologicznego produkcji katod baterii termicznych.
- Wykonany został system analizy i segregacji wyrobów, który pozwala na 100% eliminację wyrobów niezgodnych. System ten jest ciągle rozbudowywany na podstawie wyników prowadzonych prac i optymalizowany w oparciu o systematycznie dostarczane nowe dane eksperymentalne.

Literatura

1. Kozak A., *Mathematical Model of Elements of Automated System of Loose Materials Dosing*, Ukrainian journal of mechanical engineering and materials science., Vol. 2, Num. 1. – C, 2016, s. 65-74.
2. Abdullah E.C., Geldart D., *The use of bulk density measurements as flowability indicators*, Powder Technology, 102, 1999, s. 151-165.
3. Domian E., Grzegorzczak K., *Wybrane właściwości fizyczne modelowego napoju sojowego w proszku w aspekcie aglomeracji preparatami lecytynowymi*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 43, 2004, s. 31-32.
4. Panasiewicz M., *Postępy w technice precyzyjnego dozowania i naważania składników*, Część I. Przegląd Zbożowo-Młynarski, Nr 1, 1999, s. 41-43.
5. Panasiewicz M., *Postępy w technice precyzyjnego dozowania i naważania składników*, Część II. Przegląd Zbożowo-Młynarski, Nr 3, 1999, s. 32-34.
6. Giesko T., Reiner J., Zbrowski A., *System wysokowydajnej kontroli jakości powierzchni wyrobów metalowych o wysokich klasach wykonania z wykorzystaniem optycznej inspekcji*, Sprawozdanie końcowe, Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom 2009.
7. Dashchenko A. (red.), *Manufacturing Technologies for machines of the future*, Springer-Verlag, 2003, s. 40-44.
8. Wyleciał T., Urbaniak D., *Badanie rozdrabniania materiałów drobnoziarnistych w młynie strumieniowo-fluidalnym*, Hutnik – Wiadomości, Hutnicze, 79(5), 2012, s. 396-399.
9. Tabat S., Brudka Z., Szcześniak B., Moskalewicz M., Grzęda J., *Bateria Aktywowana termicznie jako źródło zasilania dla zastosowań specjalnych*, I Konferencja Uzbrojenia, Jawor k/Soliny 21-27.11.1996.
10. Linden D., *Reedy Handbook of batteries McGraw-Hill*, 3rd Edition, New York 2002.
11. Tabat S., Szcześniak B., Brudka Z., *Rezerwowe źródła zasilania aktywowane termicznie - charakterystyki eksploatacyjne ogniw*, Konferencja Naukowo-Techniczna WITU Uzbrojenie – Rynia, 1997.
12. Tabat S., Brudka Z., Szcześniak B., Moskalewicz M., Cieślukowska M., Grzęda J., *Nowoczesne rezerwowe źródła zasilania aktywowane termicznie, stosowane w technice wojskowej*, Wydawnictwo PIS, Skarżysko-Kamienna 1999.
13. Kopczyk M., Tabat S., Szcześniak B., Styczyński S., Brudka Z., *Przemysł Chemiczny*, 82/8-9, 2003, s. 1295.
14. Tabat S., Brudka Z., Szcześniak Z., *Charakterystyka rezerwowych źródeł zasilania pracujących ze stopionymi elektrolitami stosowanych w technice uzbrojenia. Możliwość i ograniczenia stosowania nieniszczących metod badań*, III Międzynarodowa Konferencja Uzbrojenia „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia” Waplewo, Wydawnictwo Bel Studio Sp. z o. o., 2000.
15. Kopera W., Kiełbasiński M., Kozłowski T., *System próżniowego dozowania materiałów sypkich*, Elektronika – Konstrukcje, Technologie, Zastosowania, z. 7, 2010.
16. www.hbm.com.
17. www.eltron.pl.
18. www.smc.eu.

Zautomatyzowane stanowisko wytwarzania katod do baterii termicznych bazujące na nowoczesnym układzie dozowania materiałów proszkowych

Streszczenie

Nowoczesne technologie, które obecnie stosuje się w przemyśle, poprzez komputeryzację i wsparcie zaawansowanych układów automatycznego sterowania, nie do końca umożliwiają uzyskanie upragnionej precyzji i późniejsze jej wykorzystanie w każdym z etapów procesu produkcyjnego. Wynikiem takiego stanu rzeczy jest utrata wysokiej jakości wytwarzanych produktów, nawet tych masowych. Dozowanie precyzyjne wyko-

rzystuje się do wszystkich materiałów, których ilość jednocześnie musi być ściśle kontrolowana. Do nich zaliczają się różne materiały proszkowe a także inne substancje niezbędne do prawidłowego funkcjonowania wielu produktów. Bardzo wymagającymi produktami, w produkcji których niezbędne jest precyzyjne dozowanie są baterie termiczne. Baterie termiczne stanowią szczególną grupę chemicznych źródeł prądu, a każda z konstrukcji, w porównaniu z innymi bateriami, jawi się jako skomplikowane urządzenie. Tego typu baterie stosowane są do zasilania układów sterowania i systemów samonaprowadzających rakiet, bomb, pocisków sterowanych i torped czy też w systemach bezpieczeństwa jak na przykład systemów katapultowania lub system uruchamiający zasłony przeciw ogniowe.

Opracowanie do użytku zautomatyzowanej linii technologicznej zdecydowanie poprawiło jakość wyrobów względem innych producentów i wymagań odbiorcy końcowego. Nastąpiło także zwiększenie konkurencyjności w wyniku rozszerzenia potencjalnej gamy wyrobów, a także szybszej i sprawniejszej produkcji wyrobów o wyższym standardzie.

Słowa kluczowe: katoda, bateria termiczna, dozowanie, dokładność, materiał proszkowy, przemysł zbrojeniowy

An automated station for the production of cathodes for thermal batteries based on a modern powder material dosing system

Abstract

Modern technologies that are currently used in industry, through computerization and support of advanced automatic control systems, do not fully allow to obtain the desired precision and its subsequent use in each of the stages of the production process. The result of this state of affairs is the loss of high-quality manufactured products, even mass-produced ones. Precision dosing is used for all materials whose quantity must be strictly controlled at a time. These include various powder materials as well as other substances necessary for the proper functioning of many products. Very demanding products, in the production of which precise dosing is necessary, are thermal batteries. Thermal batteries are a peculiar group of chemical power sources, and each of the structures, compared to other batteries, appears to be a complicated device. These types of batteries are used to power control systems and homing systems of rockets, bombs, guided missiles and torpedoes, or in security systems, such as catapult systems or a system that activates fire curtains.

The development of an automated processing line for use has definitely improved the quality of products compared to other manufacturers and the requirements of the end user. There was also an increase in competitiveness as a result of expanding the potential range of products, as well as faster and more efficient production of products of a higher standard.

Keywords: cathode, thermal battery, dosing, accuracy, powder material, defense industry

Kierunki i perspektywy zastosowania ciekłych kryształów w ogniwach fotowoltaicznych

1. Wprowadzenie

Efekt fotowoltaiczny (PV, ang. *Photovoltaic*) odkryty przez Becquerela w 1839 roku stał się podstawą burzliwie rozwijającej się energetyki słonecznej opartej na bezpośredniej konwersji energii fotonów na energię elektryczną [1, 2]. Jest to proces trzyetapowy składający się z formowania ekscytonu (para elektron-dziura), separacji oraz migracji elektronów i dziur do obwodu zewnętrznego. Odnawialne źródła energii (OZE) stały się szczególnie ważne w dobie problemów z dostępem do energii wytwarzanej ze źródeł nieodnawialnych. Do przetwarzania energii słonecznej w prąd elektryczny stosuje się zwykle ogniwa PV oparte na własnościach półprzewodników. Zaliczane są one do ogniw PV pierwszej generacji, w których stosuje się monokrystaliczny krzem produkowany metodą Czochralskiego lub polikrystaliczny, który otrzymuje się w wyniku topienia i odpowiedniego formowania krzemu [3, 4]. Sprawność tych ogniw jest rzędu 18-25,6% [5]. Natomiast ogniwa PVTF (ang. *Photovoltaic Thin-Film Solar Cells*) drugiej generacji to układy cienkowarstwowe (grubość warstwy 1-3 μm) zbudowane z monowarstw tellurku kadmu (CdTe), mieszaniny miedzi, indu, galu i selenu (CIGS, ang. *Copper Indium Gallium and Selenide*), czy krzemu amorficznego (a-Si, ang. *amorphous-Silicon*). Sprawność zmienia się z około 8% dla ogniw a-Si, do 17% dla modułów CdTe i 16% dla CIGS [6]. Ponadto, bardzo intensywnie badane są ogniwa PV należące do ogniw trzeciej generacji bazujące na odwracalnym procesie fotochemicznym znane jako ogniwa DSSC (ang. *Dye-Sensitized Solar Cell*) [2, 7-10]. Należy również wspomnieć o ogniwach PV opartych na własnościach kropek kwantowych [11, 12], czy efektach plazmonicznych [13].

Obiecującymi materiałami wykorzystywanymi w fotowoltaice są kryształy perowskitu [14], czy ciekłe kryształy (CK) [15]. CK to rodzaj materii miękkiej o uporządkowaniu pośrednim między cieczami a kryształami [16]. Samoorganizacja molekuł CK w specyficzne mezofazy stanowi podstawową własność tych substancji, która może być zastosowana do modyfikacji parametrów ogniw PV. Na przykład, CK stosuje się w ogniwach DSSC do polepszenia własności elektrolitu poprzez zwiększenie jego lepkości i stabilności. Dopasowanie układu donor-akceptor oraz procesów przenoszenia elektronów w warstwach aktywnych ma istotne znaczenie dla wydajności tych ogniw [17, 18]. Proponowane są różne strategie optymalizacji działania organicznych ogniw fotowoltaicznych (OSC, ang. *Organic Solar Cell*) takie jak kontrola morfologii warstwy fotoaktywnej, synteza nowych materiałów donorowo-akceptorowych, modyfikacja struktur międzywarstwowych, czy nowa architektura urządzeń [19].

Badania prowadzone są w kierunku odpowiedzi na następujące pytania: (i) Jak obecność struktur ciekłokrystalicznych w ogniwach PV wpływa na ich podstawowe parametry takie jak prąd zwarcia I_{SC} , napięcie obwodu otwartego U_{OC} , współczynnik wypełnienia

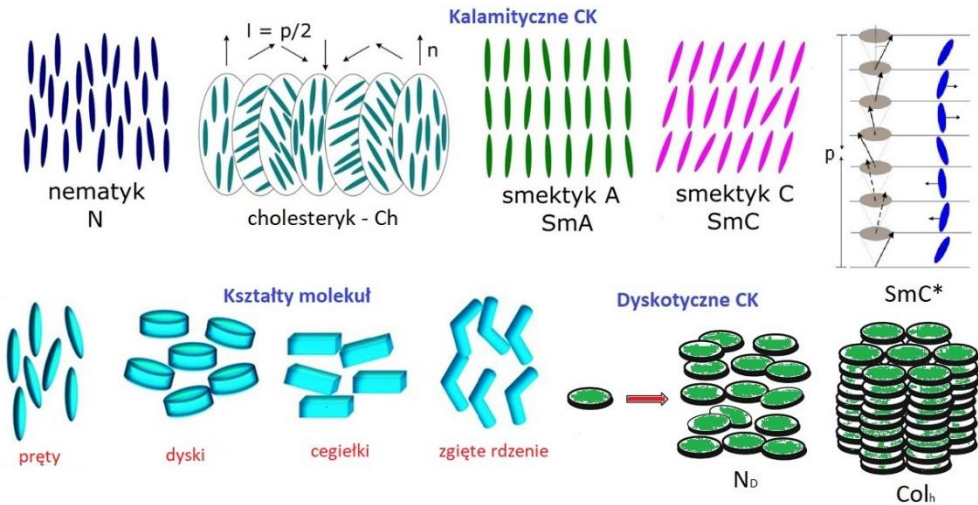
¹ srozansk@asta-net.com.pl, Katedra Elektrotechniki, Akademia Nauk Stosowanych im. Stanisława Staszica w Pile, www.ans.pila.pl.

FF, moc maksymalna P_{\max} , wydajność konwersji η ? (ii) Jaka jest rola CK w stabilizacji elektrolitu i trwałości ogni w DSSC? (iii) Jak struktura i rodzaj mezofazy wpływają na wydajność ogni w PV?

W pracy dokonano przeglądu najnowszych tendencji i osiągnięć w wykorzystaniu CK w celu zwiększenia sprawności i efektywności ogni w PV, ze szczególnym uwzględnieniem ogni w DSSC.

2. Ciekłe kryształy

CK stanowią wyjątkowy stan materii o uporządkowaniu molekuł pośrednim między izotropowymi cieczami a anizotropowymi kryształami stałymi. Dzięki zachowaniu własności cieczy a zarazem anizotropii własności fizycznych znalazły one szerokie zastosowanie w systemach obrazowania informacji [20], optycznych foliach kompensacyjnych do wyświetlaczy [21], urządzeniach fotonicznych wykorzystujących tranzystory polowe FET (ang. *Field-Effect Transistor*) [22], pamięci trwale NVM (ang. *Non-Volatile Memory*) [23], czy w organicznych ogniach fotowoltaicznych [15]. Ze względu na sposób formowania mezofaz dzieli się je na termotropowe i liotropowe. Uporządkowanie molekuł może być bardzo różnorodne, co prowadzi do powstania mezofaz o uporządkowaniu nematicznym, cholesterycznym oraz smektycznym (rys. 1). Natomiast ze względu na kształt molekuł CK dzielimy na kalamityczne (prętopodobne), dyskotyczne (dyskopodobne), sanidyczne (płytki/cegiełki) i typu zgiętego rdzenia (ang. *bent-core*) [16].



Rysunek 1. Schemat różnych faz ciekłokrystalicznych oraz kształtów molekuł, opracowanie własne na podstawie [15, 16]

2.1. Termotropowe ciekłe kryształy

Termotropowe CK tworzą związki organiczne, które po ogrzaniu do odpowiedniej temperatury przechodzą do fazy ciekłej charakteryzującej się własnościami anizotropowymi (rys. 1). W fazie nematicznej (N) długie osie prętopodobnych molekuł uporządkowane są średnio wzdłuż wyróżnionego kierunku zwanego direktorem, natomiast środki ich mas nie wykazują uporządkowania długozasięgowego. Faza cholesteryczna (Ch) cechuje się występowaniem przestrzennego uporządkowania molekuł w postaci struktury

helikoidalnej prowadząc do dużej aktywności optycznej oraz selektywnego odbicia światła. Smektyczne CK charakteryzują się warstwowym uporządkowaniem molekuł oraz ich określonym położeniem i orientacją w warstwach smektycznych. W fazie smektycznej A (SmA) środki mas molekuł ustawione są nieregularnie, a ich długie osie średnio prostopadle do warstw. Faza smektyczna B (SmB) charakteryzuje się heksagonalnym uporządkowaniem środków mas molekuł w warstwach, natomiast w fazie smektycznej C (SmC) długie osie molekuł są pochylone w stosunku do normalnej względem warstw. Natomiast w fazie chiralnej C (SmC*) molekuły chiralne tworzą strukturę helikoidalną, gdzie przy przejściu od warstwy do warstwy zmienia się orientacja przestrzenna długich osi molekuł. Faza ta wykazuje własności ferroelektryczne. Oprócz uporządkowania ferroelektrycznego wyróżnia się fazy o własnościach antyferroelektrycznych, ferrielektrycznych oraz wiele innych faz pośrednich [16].

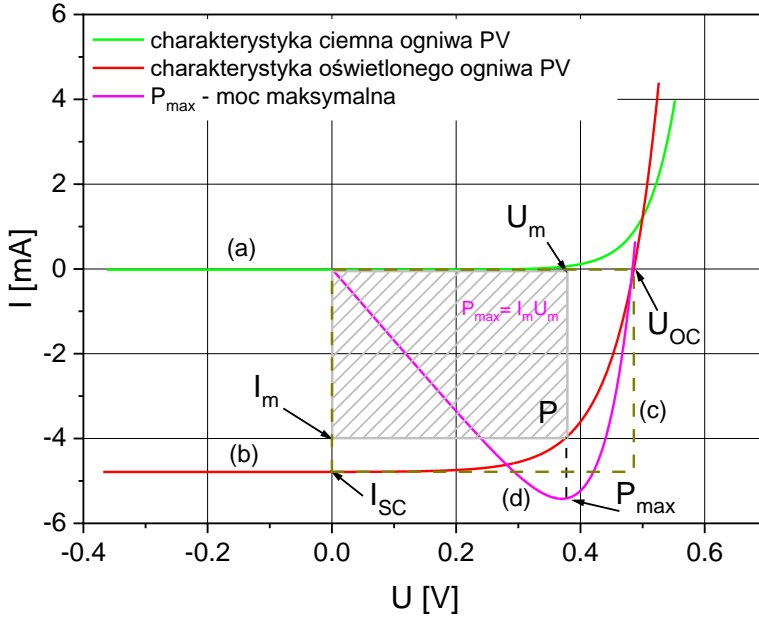
Ważną klasę CK tworzą fazy zbudowane z molekuł w kształcie dysków – dyskotyczne CK (DCK) [24]. Wraz ze zmianą temperatury obserwuje się przejście z fazy izotropowej do dyskotycznej fazy nematycznej (N_D), nematycznej fazy kolumnowej (N_{Col}), kolumnowej fazy heksagonalnej (Col_h), czy kolumnowej fazy prostokątnej (Col_r) (rys. 1). Molekuły dyskotyczne zbudowane są z aromatycznego rdzenia otoczonego elastycznymi łańcuchami alkilowymi. Kolumnowe uporządkowanie rdzeni molekuł umożliwia przenoszenie ładunków wzdłuż kolumn dzięki sprzężeniu π . Prowadzi to do własności półprzewodnikowych tych układów, które wykorzystuje się między innymi w fotowoltaice, diodach OLED (ang. *Organic Light-Emitting Diode*) czy drutach molekularnych [25].

2.2. Liotropowe ciekłe kryształy

Liotropowe CK (LCK) powstają w wyniku zmieszania dwóch lub więcej składników przy odpowiednio dobranym stężeniu np. molekuł amfifilowych w rozpuszczalniku [26]. Dla danej temperatury i stężenia obserwuje się swobodne amfifile, roztwór micelarny, fazę kubiczną, heksagonalną fazę walcową czy fazę lamelarną. LCK mają istotne znaczenie biologiczne ze względu na swoją strukturę, która jako rozpuszczalnik może zawierać wodę.

3. Parametry charakteryzujące ogniwa fotowoltaiczne

Rysunek 2 przedstawia charakterystykę prądowo-napięciową (IU) ogniwa PV w sytuacji braku oświetlenia (tzw. charakterystyka ciemna) (a) oraz oświetlenia światłem o mocy L (b) [4]. W przypadku ogniwa idealnego charakterystyka PV przyjąłaby kształt prostokąta (c) o współrzędnych odpowiadających natężeniu prądu zwarcia I_{SC} oraz napięciu obwodu otwartego U_{OC} . Moc maksymalna ogniwa idealnego $P_i = I_{SC}U_{OC}$ jest zawsze większa od mocy maksymalnej ogniwa rzeczywistego $P_{max} = I_m U_m$, gdzie I_m oraz U_m są współrzędnymi punktu P leżącego w maksimum mocy. Natomiast krzywa (d) przedstawia przebieg zależności mocy P od napięcia U z zaznaczonym punktem mocy maksymalnej P_{max} .



Rysunek 2. Charakterystyka prądowo-napięciowa ogniwa fotowoltaicznego wraz z zaznaczonymi parametrami charakteryzującymi ogniwo [opracowanie własne]

Istotnym parametrem określającym pracę ogniwa PV jest sprawność konwersji wyrażona wzorem

$$\eta = \frac{P_{\max}}{LS}, \quad (1)$$

gdzie: L - moc promieniowania przypadająca na jednostkę powierzchni ogniwa w W/m^2 , S - powierzchnia ogniwa w m^2 .

Parametr FF zwany współczynnikiem wypełnienia wyznacza się ze wzoru

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{sc}U_{oc}}, \quad (2)$$

który po podstawieniu do (1) daje zależność na nominalną wartość współczynnika konwersji

$$\eta = \frac{I_{sc}U_{oc}FF}{LS}. \quad (3)$$

Natomiast optymalną wartość oporu obciążenia oblicza się ze wzoru

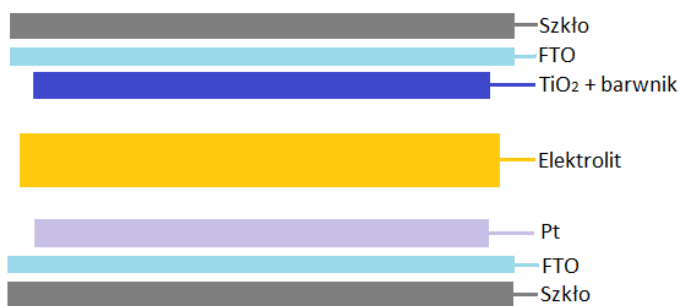
$$R = \frac{U_m}{I_m}. \quad (4)$$

4. Barwnikowe ogniwo fotowoltaiczne

Wspomniane we wstępie ogniwa PV DSSC stanowią ekonomiczną alternatywę dla powszechnie wykorzystywanych ogniw PV opartych na krzemie krystalicznym. W ostatnich latach współczynnik η dla ogniw organicznych wzrósł z 8% do 14% [27]. Aby produkcja ogniw DSSC była komercyjnie opłacalna badane są różnorodne materiały organiczne w celu poprawy ich wydajności oraz zwiększenia trwałości. Ponadto wydajność i opłacalność produkcji tego typu ogniw zależy od parametrów zastosowanej fotoanody, rodzaju barwnika oraz elektrolitu [2, 3, 28]. Jednak głównym problemem w budowie ogniw DSSC wpływającym na ich wydajność oraz długoczasową trwałość jest elektrolit [29, 30]. W dalszej części pracy zostaną przedstawione wyniki badań zmierzające do usunięcia tego ograniczenia poprzez wprowadzenie do elektrolitu CK.

4.1. Budowa i zasada działania ogniwa DSSC

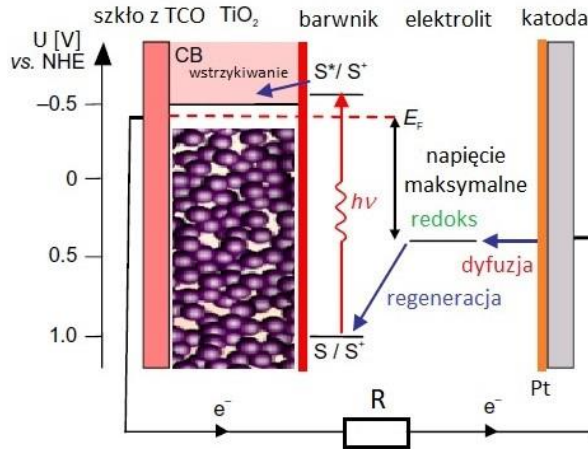
Schemat struktury warstwowej ogniwa DSSC został przedstawiony na rysunku 3. Ogniwo DSSC składa się z trzech podstawowych części: fotoanody, elektrolitu i przeciw-elektrody (CE, ang. *Counter Electrode*). Fotoanoda zbudowana jest z podłoża szklanego, na które naniesiona jest cienka, półprzezroczysta i przewodząca warstwa tlenku metalu TCO (ang. *Transparent Conductive Oxide*), którą może być warstwa FTO (ang. *Fluorine-doped Tin Oxide*), ITO (ang. *Indium Tin Oxide*) lub AZO (ang. *Aluminum-doped Zinc Oxide*) [2, 7]. Na tak przygotowanym podłożu umieszcza się warstwę nanokrystalicznego, półprzewodzącego tlenku metalu o szerokiej przerwie energetycznej (np. tlenek tytanu TiO_2) uczulonego barwnikiem. Roztwór barwnika zostaje zaabsorbowany w porowatej strukturze półprzewodnika w wyniku działania sił kapilarnych. CE stanowi również płytka szklana z warstwą FTO jednak tutaj na powierzchnię katody dodatkowo naniesiona jest warstwa katalizatora, np. platyny, grafitu, grafenu, itp. Między tak przygotowane elektrody wprowadza się elektrolit będący najczęściej roztworem jodu i jodku potasu pełniący rolę środowiska redoks przeznaczonego do szybkiej propagacji elektronów.



Rysunek 3. Schemat struktury warstwowej ogniwa PV DSSC, opracowanie własne na podstawie [7]

4.2. Procesy elektrochemiczne zachodzące w ogniwie DSSC

Na rysunku 4 przedstawiono schemat reakcji zachodzących w ogniwie DSSC, natomiast w tabeli 1 zamieszczono symboliczny zapis reakcji, które prowadzą do wytworzenia i przepływu prądu w obwodzie zewnętrznym [1].



Rysunek 4. Schemat reakcji w ogniwie DSSC, opracowanie własne na podstawie [1]

Zachodzące procesy można opisać następująco:

1. Foton o energii $E = h\nu$, gdzie h oznacza stałą Plancka, a ν częstotliwość, pada na molekułę barwnika zaabsorbowaną w porowatej półprzewodnikowej nanowarstwie TiO_2 i znajdującą się w stanie podstawowym S . Następuje jej wzbudzenie z najwyższego obsadzonego orbitalu (HOMO, ang. *Highest Occupied Molecular Orbital*) do najniższego nieobsadzonego orbitalu S^* (LUMO, ang. *Lowest Unoccupied Molecular Orbital*). Stan LUMO leży powyżej dna pasma przewodnictwa (CB, ang. *Conduction Band*) TiO_2 , natomiast stan HOMO leży poniżej stanu związanego z potencjałem redoks elektrolitu.
2. Półprzewodnik tlenkowy styka się z elektrolitem redoks. Następuje wstrzykiwanie elektronów do pasma przewodnictwa TiO_2 .
3. Utleniona molekuła barwnika S^+ ulega regeneracji poprzez elektron niesiony przez zredukowany jon I^- i przechodzi do stanu podstawowego S . Ponadto, jon I^- zostaje utleniony do I_3^- .
4. Jednocześnie elektron dyfunduje poprzez warstwę TiO_2 do przewodzącej elektrody TCO i przepływa do obwodu zewnętrznego, gdzie prąd elektryczny wykonuje pracę. Elektrony docierające do przeciwelektrody platynowej redukują utleniony jon I_3^- do postaci I^- . W wyniku rekombinacji molekuła barwnika przechodzi ze stanu S^* do stanu S .

Tabela 1. Reakcje zachodzące w ogniwie DSSC

Lp.	Reakcja	Wynik reakcji
1.	$\text{TiO}_2 S + h\nu \rightarrow \text{TiO}_2 S^*$	wzbudzenie
2.	$\text{TiO}_2 S^* \rightarrow \text{TiO}_2 S^+ + e^-(\text{CB})$	wstrzykiwanie
3.	$\text{TiO}_2 2S^+ + 3I^- \rightarrow \text{TiO}_2 2S + I_3^-$	regeneracja
4.	$I_3^- + 2e^-(\text{Pt}) \rightarrow 3I^-$	redukcja
5.	$I_3^- + 2e^-(\text{CB}) \rightarrow 3I^-$	powtórzenie
6.	$\text{TiO}_2 S^* + e^-(\text{CB}) \rightarrow \text{TiO}_2 S$	rekombinacja

Źródło: opracowanie własne na podstawie [9].

4.3. Ciekłe kryształy w ogniwach DSSC

Istotnym parametrem, który wpływa na wydajność konwersji oraz trwałość ogniw DSSC jest elektrolit pełniący rolę środowiska redoks w procesie konwersji energii fotonów na energię elektryczną. Modyfikacja elektrolitu, jego stabilizacja oraz zwiększenie mobilności jonów stanowią ważne pole badań nad ogniwami DSSC. Jedną z możliwości modyfikacji elektrolitu stwarza zastosowanie termotropowych jonowych ciekłych kryształów (JCK), które pozwalają na zaadoptowanie własności solwatacyjnych i przewodzących cieczy jonowych w uporządkowanych fazach CK [31]. JCK składają się z kombinacji tego samego typu kationów i anionów jak w cieczach jonowych. Jednak w wyniku obecności długich łańcuchów alkilowych oraz w wyniku procesów samoorganizacji następuje tworzenie uporządkowanych mezofaz na poziomie makroskopowym prowadząc zwykle do powstania faz smektycznych. Zastosowania JCK polegają na wykorzystaniu zorganizowanej, anizotropowej i częściowo uporządkowanej struktury cieczy jonowej w celu zwiększenia przewodnictwa materii i ładunku, np. w ogniwach barwnikowych.

Przykładem zastosowania JCK w celu modyfikacji elektrolitu są niekowalencyjne układy dwuskładniowe zbudowane z imidazoliowych cieczy jonowych domieszkowanych jodem (I_2) i związków mezogenicznych oraz jednoskładnikowe związki mezogeniczne o kowalencyjnym wiązaniu ugrupowania imidazoliowego domieszkowanego I_2 [32]. W strukturze materiału mezogenicznego występują wiązania oligooksyetylenowe sprzyjające hamowaniu procesu krystalizacji oraz prowadzące do zwiększenia transportu jonów w porównaniu do analogów z wiązaniami alkilowymi. Ponadto mieszaniny typu niekowalencyjnego wykazują ponad 10-krotnie wyższy współczynnik dyfuzji jonów I_3^- w porównaniu z układami kowalencyjnymi. DSSC zawierające CK typu niekowalencyjnego wykazują sprawność konwersji około $5,8 \pm 0,2\%$ w temperaturze 303 K i $0,9 \pm 0,1\%$ w temperaturze 393 K. Natomiast ogniwa PV zawierające elektrolit typu kowalencyjnego wykazują znaczny wzrost η do $2,4 \pm 0,1\%$ w temperaturze 393 K i lepszą wydajność niż urządzenia typu niekowalencyjnego w temperaturze powyżej 363 K. Ponadto CK-DSSC charakteryzują się stabilnością przekraczającą 10^3 h.

Innym przykładem jest dwuskładnikowy elektrolit zbudowany z mezogenu sfunkcjonalizowanego węglanami i jodkowej cieczy jonowej, który nanosegreguje się w struktury lamelarne wykazujące ponad czterokrotnie wyższe przewodnictwo jonowe równoległe niż prostopadle do warstw smektycznych. Poprzez zastosowanie tej metody uzyskuje się termicznie stabilny i trwały elektrolit CK umożliwiający zachodzenie reakcji redoks I^-/I_3^- w szerokim zakresie temperatury oraz wyższe współczynniki konwersji, co można przypisać dłuższym czasom życia elektronów i wyższym gęstościom elektronów w fotoelektrodach [30, 33].

W kolejnej pracy przedstawiono metodę polegającą na domieszkowaniu elektrolitu, składającego się z $0,5$ mol/l odpowiednio LiI i I_2 rozpuszczonych w 3-metoksypropionitrylu (3-MPN), ciekłym kryształem E7 składającym się z czterech rodzajów molekuł, a mianowicie 4-cyano-4'-pentylobifenylu (5CB), 4-cyano-4'-heptylbiphenylu (7CB), 4-cyano-4'-octanoylbiphenylu (8OCB) i 4-cyano-4'-pentyloparaterfenylu (5CT) o podobnej strukturze chemicznej. Identyczne terminalne grupy cyjanowe zwiększają oddziaływania międzymolekularne CK i 3-MPN, a pierścienie aromatyczne CK E7 z grupami cyjanowymi polepszają termiczną stabilność elektrolitu [29]. Z przeprowadzonych badań wynika, że niewielkie ilości domieszki CK zmniejszają gęstość prądu I_{sc} dla DSSC, ponieważ domieszkowanie CK zmniejsza szybkość reakcji elektrochemicznej

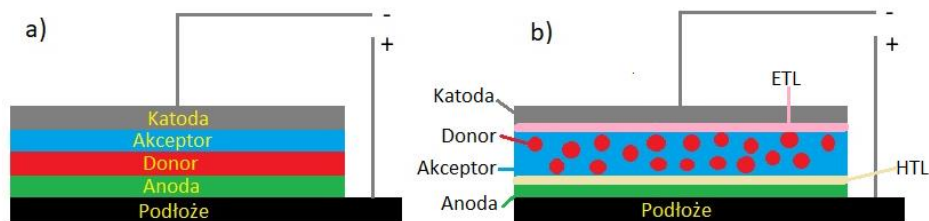
między przeciwelektrodą DSSC a elektrolitem. Jednakże, domieszka CK opóźnia tempo degradacji DSSC w wyniku oddziaływania między grupami cyjanowymi i rozpuszczalnikiem organicznym w ciekłym elektrolicie. Dzięki interakcji molekularnej CK zwiększają lepkość i stabilność elektrolitu, hamując w ten sposób szybkość jego parowania.

Nowo zsyntetyzowane CK 4-pirydylu 3N i 3N-1 [34] o szerokim zakresie temperaturowym fazy nematycznej i własnościach fotowoltaicznych wykorzystano w połączeniu z barwnikiem AZ6 [35] do badania wpływu prętopodobnych molekuł na parametry ogniwa DSSC. Wykorzystane CK wykazują odmienny wpływ na długoczasową stabilność i wydajność fotokonwersji współczulonego DSSC za pomocą 3N/AZ6 lub 3N-1/AZ6. Ponadto mezogenne molekuly formują silne wiązania koordynacyjne z atomami tytanu (Ti) na powierzchni porowatej warstwy TiO_2 polepszając stabilność i wydajność fotowoltaiczną ogniwa.

Własności cholesterycznych CK polegające na selektywnym odbiciu światła związanym ze strukturą helikoidalną oraz skokiem helisy zależnym od temperatury zostały wykorzystane w celu wytworzenia folii polimerowych jako przezroczystych i elastycznych tylnych reflektorów dla DSSC w celu poprawy zdolności zbierania światła w określonym obszarze długości fal [36]. Fotoniczne pasmo wzbronione może być precyzyjnie dopasowane poprzez modulację długości skoku oraz skrętności helisy. W badanych układach obserwuje się silną zależność fotoprądu oraz współczynnika konwersji mocy od długości fali dopasowanej dzięki selektywnemu odbiciu światła.

5. Masowe heterozłączone organiczne ogniwa fotowoltaiczne

Ważną klasę ogniw PV stanowią masowe organiczne ogniwa heterozłączone BHJ (ang. *Bulk Heterojunction*). BHJ zawiera strukturę wielowarstwową, gdzie każda z nich nanoszona jest dzięki specyficznej technologii [19].



Rysunek 5. Schemat heterozłącza (a) dwuwarstwowego i (b) masowego [opracowanie własne]

Warstwa aktywna składa się zwykle z dwóch składników – materiałem donorowym może być sprzężony polimer, barwnik lub oligomer natomiast materiałem akceptorowym są często pochodne fulerenu (rys. 5). Ponadto warstwa fotoaktywna umieszczona jest między anodą i górną katodą o niskiej pracy wyjścia. Często warstwy międzyfazowe transportujące dziury (HTL, ang. *Hole Transport Layer*) oraz transportujące elektrony (ETL, ang. *Electron Transport Layer*) są umieszczone odpowiednio między fotoaktywną anodą i fotoaktywną katodą w celu poprawienia wydajności i stabilności pracy BHJ.

W celu osiągnięcia wysokiego współczynnika konwersji oraz stabilności ogniwa BHJ należy odpowiednio dobrać układ poziomów energetycznych między warstwą fotoaktywną, katodą, anodą i warstwami transportującymi ładunki. Nie mniej istotnym problemem jest dobranie morfologii i mikrostruktury warstwy fotoaktywnej oraz warstw międzyfazowych HTL i ETL.

5.1. Ciekłe kryształy w organicznych ogniwach BHJ

W pracy [37] zaprezentowano zastosowanie dyskotycznego CK heksa-peri-heksabenzokoronenu (HBC-PHC12) w połączeniu z barwnikiem perylenowym w celu wytworzenia cienkich pionowo uporządkowanych warstw perylenu i heksabenzokoronenu tworzącymi duże powierzchnie międzyfazowe. Tak utworzona warstwa BHJ wprowadzona do organicznego ogniwa wykazuje efekt PV z wydajnością kwantową ponad 34% w pobliżu długości fali równej 490 nm. Obserwowana wydajność jest wynikiem fotoindukowanego przenoszenia ładunku między heksabenzokoronenem i perylenem, a także efektywnego transportu ładunków przez pionowo rozdzielone warstwy perylenu i heksabenzokoronenu.

Modyfikacja struktury warstwowej BHJ, wykorzystana w pracy [38], polegała na zastosowaniu dyskotycznego CK 1,7,13-heptanoilodekacyklenu (C7-DC) w połączeniu z polimerem poli[2-metoksy-5-(2'-etyloheksyloksy)-1,4-fenyleneWINYLENEM] (MEH-PPV). Zaobserwowano, że tri-podstawiony dekacyklen działa jako nowy materiał akceptorowy. Urządzenia fotowoltaiczne z warstwą zawierającą MEH-PPV i C7-DC wykazywały stosunkowo wysokie napięcie $U_{OC} = 1,3$ V, prawdopodobnie z powodu najniższej niezajętej orbity molekularnej (LUMO) C7-DC. Wydajność fotowoltaiczna uległa poprawie po wygrzaniu układu w temperaturze 373 K będącej temperaturą ciekłokrystalicznego przejścia fazowego dla C7-DC. W wyniku procesu wygrzewania zaobserwowano duże krystaliczne struktury C7-DC w warstwie aktywnej prowadzące do poprawy transportu elektronów, co podkreśla skuteczność struktur CK w modulowaniu wydajności urządzenia PV.

Prostą metodę zwiększenia wydajności ogniwa na bazie złącza BHJ opisano w pracy [39], poprzez wprowadzenie dyskotycznej cząsteczki CK [2,3,6,7,10,11]-heksabutoksytrifenylem (HAT4) pomiędzy warstwę transportującą dziury (HTL) a warstwę aktywną na bazie mieszanki poli(3-heksylofenu) (P3HT) i estru metylowego kwasu [6,6]-fenylo-C61-masłowego (PCBM), w skrócie (P3HT:PCBM). Wyniki pokazały, że ta metoda może zwiększyć I_{SC} i FF bez redukcji U_{OC} . W celu zbadania, w jaki sposób HAT4 poprawia sprawność konwersji osadzono trzy różne materiały na podłożu jako HTL, w tym poli(3,4-etylenodioksytiofen): poli(styrenosulfonian) (PEDOT:PSS), tlenek molibdenu (MoO_3) i tlenek niklu (NiO). W porównaniu z urządzeniami bez HAT4 współczynnik konwersji wzrósł o 43%, 43% i 35% w tych z HAT4 odpowiednio dla różnych HTL. Podsumowując można stwierdzić, że wprowadzenie cienkiej warstwy HAT4 pomiędzy HTL i kompozyt P3HT:PCBM znacznie zwiększa ruchliwość nośników, optymalizuje morfologię warstwy aktywnej (szczególnie po wygrzaniu) oraz zwiększa wartość fotoprądu, a tym samym wydajność ogniwa.

Podobny do powyżej przedstawionego sposób modyfikacji BHJ zastosowano w pracy [40] poprzez wstawienie dyskotycznej pochodnej trifenyleny do P3HT:PCBM. Pomiędzy anodą a warstwą aktywną zawierającą dyskotyczny CK umieszczono warstwę tlenku molibdenu (MoO_3). Dzięki temu zabiegowi uzyskano sprawność konwersji energii na poziomie 2,0%. Wykazano również wpływ grubości warstwy oraz długości łańcuchów alkilowych DCK na sprawność ogniwa. Ponadto, po wygrzaniu masowych heterozłączy z dyskotyczną warstwą ciekłokrystaliczną o grubości 20 nm uzyskano w nich napięcie $U_{OC} = 0,41$ V, gęstość prądu zwarciovego $I_{SC} = 17$ mA/cm², współczynnik wypełnienia $FF = 0,35$ i sprawność konwersji mocy $\eta = 2,5\%$.

Oprócz dyskotycznych CK jako materiałów modyfikujących masowe organiczne heterozłącza stosuje się również cholesteryczne CK (ChCK). Na przykład, zsyntetyzowano i zbadano szereg pochodnych kwasu mlekowego, które dodano do warstwy aktywnej P3HT:PCBM [41]. Niektóre z tych związków przyczyniały się do poprawy morfologii i stabilności termicznej warstwy BHJ, natomiast inne ulegały silnej agregacji po wygrzaniu próbki. Struktura molekularna wykorzystanych ChCK miała silny wpływ na gęstość prądu I_{SC} , natomiast nie wpływała na napięcie U_{OC} i współczynnik wypełnienia FF .

Obiecujące własności fotowoltaiczne uzyskano z wykorzystaniem chiralnych smektyków posiadających fazę ferroelektryczną zsyntetyzowanych na bazie pochodnej bis-fluorofenylotertiofenu zawierającej dwa ugrupowania mleczanowe domieszkowane pochodną fulerenu [42]. Pochodne fulerenu agregowały, tworząc mikrokryształy, które sprzyjały dysocjacji dziura-elektron w spolaryzowanej fazie smektycznej. Napięcie U_{OC} w obwodzie otwartym przekroczyło 1,2 V, a zewnętrzna wydajność kwantowa wynosiła około 80-50% przy oświetleniu promieniowaniem UV (UV, ang. *Ultraviolet*) i światłem niebieskim. Uzyskane napięcie U_{OC} przekracza napięcie organicznych ogniw słonecznych wykorzystujących akceptor oparty na fulerenach. Ponadto, małe molekuly ciekłokrystaliczne okazują się być skutecznym dodatkiem regulującym morfologię warstw aktywnych i podnoszą wydajność trójskładnikowych organicznych ogniw słonecznych TOCS (ang. *Ternary Organic Solar Cells*) w układach fulerenowych. Ogniwa TOCS zwykle składające się z gospodarza donorowego i akceptorowego oraz dodatkowego nośnika akceptorowego lub donorowego zwracają uwagę ze względu na możliwość zmiany morfologii warstwy aktywnej i uniknięcia ograniczeń ogniw dwuwarstwowych [43, 44].

Wiele wysokowydajnych układów PV wykazuje najlepsze współczynniki konwersji mocy przy cennie warstwie aktywnej rzędu 100 nm, co jest trudne do przełożenia na drukowanie techniką z rolki na rolkę (R2R, ang. *Roll-to-Roll*) z wysoką powtarzalnością. W pracy [45] zaproponowano nowy donor molekulary benzoditiofeno-tertiofeno-rodaninę (BTR), który charakteryzuje się własnościami nematycznego CK oraz wykazuje dobrą przetwarzalność i doskonałe właściwości optoelektroniczne. Szczególnie obiecujący jest fakt, że urządzenia oparte na BTR z warstwami aktywnymi nawet o grubości około 400 nm pozwalają osiągnąć wysoki współczynnik wypełnienia $FF = 70\%$ oraz duży współczynnik konwersji rzędu 8%.

W hybrydowych ogniwach słonecznych wykorzystuje się np. mieszanekę poli(3-heksylofenu) (P3HT) i dyskotycznych ligandów ciekłokrystalicznych sfunkcjonalizowanych ditiolem trifenylenu (TP-S) modyfikowanych nanocząstkami tlenku cynku (ZnO) [46]. Dyskotyczne ligandy ciekłokrystaliczne poprawiają kompatybilność między polimerem P3HT a nanocząstkami ZnO, co jest korzystne dla lepszej separacji ładunku i wydajności jego przenoszenia. Ponadto wydajność konwersji energii hybrydowych ogniw słonecznych polimer/ZnO wzrasta z 0,46% do 0,95% po modyfikacji struktury ZnO TP-S w wyniku obróbki termicznej.

6. Ciekłe kryształy w perowskitowych ogniwach PV

Hybrydowe perowskitowe ogniwa słoneczne PSC (ang. *Perovskite Solar Cell*) zbudowane na bazie materiałów organicznych i nieorganicznych stanowią obiecujące rozwiązanie technologiczne prowadzące do wytworzenia bardziej stabilnych i wydajnych ogniw PV nowej generacji. W pracy [47] przedstawiono sfunkcjonalizowany jonowy CK, 4'-(N,N,N-trimetyloamoniowy bromek heksyloksy)-4-cyjanobifenyl (6CNBP-N),

jako dodatek chemiczny do otrzymywania PSC $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ (MAPbI_3) o wysokiej wydajności i znacznej odporności na wilgoć. 6CNBP-N poprawia jakość i stabilność warstw perowskitowych, zmniejsza gęstość stanów pułapowania oraz preferuje transport nośników indukowany przez grupę cyjanową. Dzięki tej modyfikacji, wydajność konwersji mocy PSC zwiększa się z 18,07% dla kontrolnego PSC do 20,45% dla PSC z 6CNBP-N.

Wydajność konwersji ogniw PSC znacząco zależy od jakości powierzchni styku między perowskitem, a warstwą przenoszącą elektrony. W celu zwiększenia stabilności pracy PSC wprowadzono do ogniwa dodatkową międzywarstwę ciekłokrystalicznego elastomeru, co zapewniło dużą wydajność urządzenia na poziomie około 23%, a zarazem giętkość i elastyczność ogniwa PSC [48]. W celu ograniczenia liczby granic ziaren powstających podczas produkcji ogniw PSC wykorzystano jako środek wiążący CK (4'-heptylo-4-bifenylokarbonitryl). Oddziałuje on z PbI_2 , wymuszając odpowiednią orientację drobnych ziaren perowskitu, co przyczynia się do zwiększenia transportu elektronów oraz odporności na warunki zewnętrzne. W wyniku tych modyfikacji wydajność konwersji mocy wzrasta do 20,19% przy wysokim współczynniku wypełnienia (ponad 80%). Co ciekawe, PSC na bazie CK zachowują 92% swojej początkowej wydajności w temperaturze 298 K i wilgotności względnej 70% po 500 h, podczas gdy próbki kontrolne ulegają niemal całkowitemu rozkładowi w tych samych warunkach [49]. Ponadto, pożądaną drukowalność farb perowskitowych uzyskano dodając ciekłokrystaliczny kwas 4 ((6 (akryloiloksy) heksylo) oksy) benzoesowy (6OBA). 6OBA posiada temperaturowy zakres fazy CK odpowiadający temperaturze wygrzewania termicznego folii perowskitowych w procesie produkcji [50]. Wprowadzenie ciekłokrystalicznego polimeru jako domieszki do warstwy perowskitu umożliwia kontrolowanie odparowywania rozpuszczalnika, co prowadzi również do zmniejszenia granic ziaren, a co zatem idzie spowolnienia degradacji materiału oraz zredukowania rekombinacji ładunków [51].

Pojawiają się również próby włączenia technologii CK do bardziej konwencjonalnych metod konwersji energii fotonów opartych na krzemie. Jednym z przykładów może być zastosowanie cienkiej warstwy składającej się z niskocząsteczkowego CK oraz polimeru zmniejszającej połysk panelu PV, a zarazem charakteryzującej się wysoką przezroczystością mimo pewnego stopnia zmętnienia (ang. *Haze Film*). Stwierdzono, że pokrycie taką warstwą powierzchni ogniwa krzemowego poprawia konwersję energii słonecznej, a co za tym idzie wydajność modułu PV [52].

7. Wnioski

Ciekłe kryształy znajdują coraz większe zastosowanie w innowacyjnych ogniwach DSSC opartych na materiałach organicznych oraz w masowych układach heterozłączowych HBJ. Bardzo intensywnie rozwijane są badania zastosowania CK w technologii produkcji ogniw perowskitowych w celu polepszenia ich stabilności i wydajności. W wielowarstwowej strukturze ogniw DSSC istotnym elementem jest elektrolit jodkowy oraz warstwa aktywna, w której zachodzi proces konwersji energii fotonów na energię elektryczną. Badania pokazują, że dodanie CK do elektrolitu prowadzi w wielu przypadkach do zwiększenia wydajności oraz stabilności ogniw DSSC. Istotnym czynnikiem jest obecność określonej fazy ciekłokrystalicznej począwszy od fazy nematycznej i cholesterycznej, a skończywszy na fazie smektycznej. Ponadto kształt i struktura chemiczna molekuł formujących mezofazę przyczyniają się do znacznej modyfikacji omawianych ogniw PV.

Dla kalamitycznych CK molekuly ustawiają się średnio równolegle do siebie w fazie nematycznej, lub tworzą warstwy lub struktury helikoidalne w fazach smektycznych, co istotnie wpływa na oddziaływania molekularne i prowadzi do wzrostu przewodnictwa jonowego w ogniwie. Wykorzystanie selektywnego odbicia światła faz cholesterycznych w warstwach odbijających światło w ogniwach DSSC zwiększa znacząco ich wydajność. Dla dyskotycznych CK dodanych do warstwy aktywnej tworzą się fazy kolumnowe, co zwiększa przewodnictwo w kierunku rdzeni kolumn i powoduje zwiększenie wydajności ogniw. Zjawisko fotowoltaiczne odkryto nawet w fazach ferroektrycznych CK domieszkiowanych odpowiednimi nanocząstkami. Nowo syntetyzowane jonowe CK zawierają molekuly o określonej strukturze molekularnej zwiększającej przewodnictwo elektrolitu i sprawność warstwy aktywnej. Okazuje się, że porządkowanie mezofaz w wyniku zmiany temperatury lub przyłożenia pola elektrycznego przyczynia się znacząco do zwiększenia wydajności ogniw organicznych. Można przewidywać, że obserwowany ciągły postęp w zastosowaniu CK w elektronice i fotowoltaice organicznej przyczyni się w niedalekiej przyszłości do rozwoju nowych technologii służących wytwarzaniu energii elektrycznej oraz przetwarzania informacji w komputerach organicznych.

Literatura

1. Archer M.D., Green M.A. (red.), *Clean electricity from photovoltaics*, Imperial College Press, London 2015.
2. Pandey A.K., Shahabuddin S., Ahmad M.S. (red), *Dye-sensitized solar cells*, Elsevier Academic Press, London 2022.
3. Ikpesu J.E., Iyuke S.E., Daramola M., Oyetunde O.A., *Synthesis of improved dye-sensitized solar cell for renewable energy power generation*, Solar Energy, 206, 2020, s. 918-934.
4. Różański S.A., *Determination of the current-voltage characteristics of the photovoltaic cells using the CoachLabII+ measuring console*, Journal of Automation, Electronics and Electrical Engineering, 4, 2023, s. 31-38.
5. Battaglia C., Cuevas A., De Wolf S., *High-efficiency crystalline silicon solar cells: Status and perspectives*, Energy Environment Science, 9, 2016, s. 1552-1576.
6. Konagai M., *Present status and future prospects of silicon thin-film solar cells*, Japanese Journal of Applied Physics, 50, 2011, 030001.
7. Rawal N., Vaishaly A.G., Sharma H., Mathew B.B., *Dye sensitized solar cells: The emerging technology*, Energy and Power Engineering Science, 2, 2015, s. 46-52.
8. Hoppe H., Sariciftci N.S., *Organic solar cells: An overview*, Journal of Materials Research, 19, 2004, s. 1924-1945.
9. Andualet A., Demiss S., *Review on dye-sensitized solar cells (DSSCs)*, Journal of Heterocyclics, 1, 2018, s. 29-34.
10. Bera S., Sengupt D., Roy S., Mukherjee K., *Research into dye-sensitized solar cells: A review highlighting progress in India*, Journal of Physical Energy, 3, 2021, 032013.
11. Selopal G.S., Zhao H., Wang Z.M., Rosei F., *Core/shell quantum dots solar cells*, Advanced Functional Materials, 30, 2020, 1908762.
12. Kamat P.V., *Quantum dot solar cells. The next big thing in photovoltaics*, Journal of Physical Chemistry Letters, 4, 2013, s. 908-918.
13. Jang Y.H., Jang Y.J., Kim S., Quan L.N., Chung K., Kim D.H., *Plasmonic solar cells: From rational design to mechanism overview*, Chemical Reviews, 116, 2016, s. 14982-15034.
14. Kim J.Y., Lee J.W., Jung H.S., Shin H., Park N.G., *High-efficiency perovskite solar cells*, Chemical Reviews, 120, 2020, s. 7867-7918.

15. Bushby R.J., Kelly S.M., O'Neill M. (red.), *Liquid crystalline semiconductors*, Springer, Dordrecht 2013.
16. Demus D., Goodby J., Gray G.W., Spiess H.W., Vill V., *Physical properties of liquid crystals*, Wiley-VCH, Weinheim 2009.
17. Kumar M., Kumar S., *Liquid crystals in photovoltaics: a new generation of organic photovoltaics*, Polymer Journal, 49, 2017, s. 85-111.
18. Cui Y.J., Zhong J.X., Liao X.F., Chen Y.W., *Research progress of liquid crystal molecules for application in organic solar cells*, Chinese Journal of Applied Chemistry, 38, 2021, s. 1326-1339.
19. Rafiquea S., Abdullaha S.M., Sulaimana K., Iwamoto M., *Fundamentals of bulk hetero-junction organic solar cells: An overview of stability/degradation issues and strategies for improvement*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 84, 2018, s. 43-53.
20. Chen H.W., Lee J.H., Lin B.Y., Chen S., Wu S.T., *Liquid crystal display and organic light-emitting diode display: Present status and future perspectives*, Light: Science & Applications, 7, 2018, 17168.
21. Bisoyi H.K., Kumar S., *Discotic nematic liquid crystals: Science and technology*, Chemical Society Review, 39, 2010, s. 264-285.
22. Li C., Zhu C., Shi Y., Liu J., Chen H., Jiang L., *Room-temperature smectic liquid crystal monolayers for field-effect transistors*, Journal of Materials Chemistry C, 11, 2023, s. 3944-3948.
23. Lin Y.Ch., Li G.S., Yu P.J., Ercan E., *Organic liquid crystals in optoelectronic device applications: Field-effect transistors, nonvolatile memory, and photovoltaics*, Journal of the Chinese Chemistry Society, 69, 2022, s. 1289-1304.
24. Wöhrle T., Wurzbach I., Kirres J., Kostidou A., Kapernaum N., Litterscheidt J., Haenle J.C., Staffeld P., Baro A., Giesselmann F., Laschat S., *Discotic liquid crystals*, Chemical Reviews, 116, 2016, s. 1139-1241.
25. Kumar M., Varshney S., Kumar S., *Emerging nanoscience with discotic liquid crystals. Emerging nanoscience with discotic liquid crystals*, Polymer Journal, 53, 2021, s. 283-297.
26. Dierking I., Neto A.M.F., *Novel trends in lyotropic liquid crystals*, Crystals, 10, 2020, 604.
27. Sugathan V., John E., Sudhakar K., *Recent improvements in dye sensitized solar cells: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 52, 2015, s. 54-64.
28. Kaniyoor A., Ramaprabhu S., *An optically transparent cathode for dye sensitized solar cells based on cationically functionalized and metal decorated graphene*, Nano Energy, 1, 2012, s.757-763.
29. Huang C.Y., You C. F., Cheng C.E., Lei B.C., Jhang J. C., Yu F.C., Chang C.S., Chien S.S.F., *Liquid crystal-doped liquid electrolytes for dye-sensitized solar cell applications*, Optical Materials Express, 6, 2016, 1024.
30. Högberg D., Soberats B., Uchida S., Yoshio M., Kloo L., Segawa H., Kato T., *Nanostructured two-component liquid-crystalline electrolytes for high-temperature dye-sensitized solar cells*, Chemistry of Materials, 26, 2014, s. 6496-6502.
31. Axenov K.V., Laschat, S., *Thermotropic ionic liquid crystals*, Materials, 4, 2011, s. 206-259.
32. Högberg D., Soberats B., Yatagai R., Uchida S., Yoshio M., Kloo L., Segawa H., Kato T., *Liquid-crystalline dye-sensitized solar sells: Design of two-dimensional molecular assemblies for efficient ion transport and thermal stability*, Chemistry of Materials, 28, 2016, s. 6493-6500.
33. Högberg D., Soberats B., Yoshio M., Mizumura Y., Uchida S., Kloo L., Segawa H., Kato T., *Self-assembled liquid-crystalline ion conductors in dye-sensitized solar cells: Effects of molecular sensitizers on their performance*, ChemPlusChem, 82, 2017, s. 834-840.
34. Chen R., Weng Q., An Z., Zhu S., Wang Q., Chen X., Chen P., *Investigation of 4-pyridyl liquid crystals on the photovoltaic performance and stability of dye sensitized solar cells by the co-sensitization*, Dyes and Pigments, 159, 2018, s. 527-532.

35. Zhou P., Lin B., Chen R., An Z., Chen X., An Q., Chen P., *Effect of extending the conjugation of dye molecules on the efficiency and stability of dye-sensitized solar cells*, Omega, 6, 2021, s. 30069-30077.
36. Liu Y., Yu L., Jiang Y., Xiong W., Wang Q., Sun J., Yang H., Zhao X.Z., *Self-organized cholesteric liquid crystal polymer films with tunable photonic band gap as transparent and flexible back-reflectors for dye-sensitized solar cells*, Nano Energy, 26, 2016, s. 648-656.
37. Schmidt-Mende L., Fechtenkötter A., Mullen K., Moons E., Friend R.H., MacKenzie J.D., *Self-organized discotic liquid crystals for high-efficiency organic photovoltaics*, Science, 293, 2001, s. 1119-1122.
38. Hirota K., Tajima K., Hashimoto K., *Physicochemical study of discotic liquid crystal decacyclene derivative and utilization in polymer photovoltaic devices*, Synthetic Metals, 157, 2007, s. 290-296.
39. Zheng Q., Fang G., Bai W., Sun N., Qin P., Fan X., Cheng F., Yuan L., Zhao X., *Efficiency improvement in organic solar cells by inserting a discotic liquid crystal*, Solar Energy Materials & Solar Cells, 95, 2011, s. 2200-2205.
40. Bajpai M., Yadav N., Kumar S., Srivastava R., Dhar R., *Incorporation of liquid crystalline triphenylene derivative in bulk heterojunction solar cell with molybdenum oxide as buffer layer for improved efficiency*, Liquid Crystals, 43, 2016, s. 928-936.
41. Bubnov A., Iwan A., Cigl M., Boharewicz B., Tazbir I., Wojcik K., Sikorab A., Hamplova V., *Photosensitive self-assembling materials as functional dopants for organic photovoltaic cells*, RSC Advances, 6, 2016, s. 11577-11590.
42. Funahashi M., *High open-circuit voltage under the bulk photovoltaic effect for the chiral smectic crystal phase of a double chiral ferroelectric liquid crystal doped with a fullerene derivative*, Materials Chemistry Frontiers, 5, 2021, s. 8265-8274.
43. Yin A., Zhang D., Wang J., Zhou H., Fu Z., Zhang Y., *Mediated non-geminate recombination in ternary organic solar cells through a liquid crystal guest donor*, Frontiers in Chemistry, 8, 2020, 21.
44. Liao X., Qiannan He Q., Zhou G., Xia X., Zhu P., Xing Z., Zhu H., Yao Z., Lu X., Chen Y., *Regulating favorable morphology evolution by a simple liquid-crystalline small molecule enables organic solar cells with over 17% efficiency and a remarkable I_{sc} of 26.56 mA/cm²*, Chemistry of Materials, 33, 2021, s. 430-440.
45. Sun K., Xiao Z., Lu S., Zajączkowski W., Pisula W., Hanssen E., White J.M., Williamson R.M., Subbiah J., Ouyang J., Holmes A.B., Wong W.W.H., Jones D.J., *A molecular nematic liquid crystalline material for high-performance organic photovoltaics*, Nature Communications, 6, 2015, 6013.
46. Chen X., Chen L., Chenab Y., *Self-assembly of discotic liquid crystal decorated ZnO nanoparticles for efficient hybrid solar cells*, RSC Advances, 4, 2014, s. 3627-3632.
47. Xia X., Peng J., Wan Q., Wang X., Fan Z., Zhao J., Li F., *Functionalized ionic liquid-crystal additive for perovskite solar cells with high efficiency and excellent moisture stability*, ACS Applied Materials Interfaces, 13, 2021, s. 17677-17689.
48. Huang Z., Li L., Wu T., Xue T., Sun W., Pan Q., Wang H., Xie H., Chi J., Han T., Hu X., Su M., Chen Y., Song Y., *Wearable perovskite solar cells by aligned liquid crystal elastomers*, Nature Communications, 14, 2023, 1204.
49. Tao L., Wang Z., Duan K., Yang J., Zhang B., Ma G., Zhang J., Wang H., Dai S., *Liquid crystal molecule as "Binding Agent" enables superior stable perovskite solar cells with high fill factor*, RRL Solar, 3, 2019, 1900125.
50. Yang X., Yang H., Su M., Zhao J., Meng X., Hu X., Xue T., Huang Z., Lu Y., Li Y., Yang Z., *Scalable flexible perovskite solar cells based on a crystalline and printable template with intelligent temperature sensitivity*, RRL Solar, 6, 2022, 2100991.
51. Arivunithi V.M., Reddy S.S., Sree V.G., Park H.Y., Park J., Kang Y.C., Shin E.S., Noh Y.Y., Song M., Jin S.H., *Efficiency exceeding 20% in perovskite solar cells with side-*

chain liquid crystalline polymer-doped perovskite absorbers, *Advanced Energy Materials*, 8, 2018, 1801637.

52. Bae J.H., Jung E.D., Yun Seok Nam Y.S., Kim B.Ch., Choi H.J., Kim H.G., Song M.H., Choi S.-W., *Micro-segregated liquid crystal haze films for photovoltaic applications: A novel strategy to fabricate haze films employing liquid crystal technology*, *Materials*, 11, 2018, 2188.

Kierunki i perspektywy zastosowania ciekłych kryształów w ogniwach fotowoltaicznych

Streszczenie

Ciekłe kryształy stanowią ważną grupę materiałów organicznych wykorzystywanych w fotowoltaice oraz innych dziedzinach elektroniki organicznej. Znajdują coraz większe zastosowanie w różnego typu ogniwach fotowoltaicznych od organicznych ogniw barwnikowych DSSC i masowych ogniw heterozłączowych BHJ, po ogniwa perowskitowe. Stosowane są głównie jako samoorganizujący się dodatek do elektrolitu jodkowego zapewniając jego większą trwałość, stabilność oraz wydajność ogniw DSSC. Dodanie dyskotycznych ciekłych kryształów do warstwy aktywnej w BHJ przyczynia się do polepszenia przewodnictwa ładunków, efektywnej kontroli separacji faz w warstwach oraz wydajności ogniwa. Nowo syntetyzowane molekuly jonowych ciekłych kryształów stanowią istotny dodatek modyfikujący strukturę organicznych ogniw fotowoltaicznych. Ciekłe kryształy dodane w procesie produkcji elastycznych ogniw perowskitowych polepszają ich jakość, stabilność i wydajność konwersji. Zastosowanie znajdują również ciekłokrystaliczne polimery i elastomery. Słowa kluczowe: ogniwa fotowoltaiczne, ogniwa DSSC, ogniwa heterozłączowe, ogniwa perowskitowe, termotropowe ciekłe kryształy,

Directions and prospects for the application of liquid crystals in photovoltaic cells

Abstract

Liquid crystals are an important group of organic materials used in photovoltaics and other fields of organic electronics. They are increasingly used in various types of photovoltaic cells, from DSSC organic dye cells and mass BHJ heterojunction cells, to perovskite cells. They are mainly used as a self-organizing additive to the iodide electrolyte, ensuring its greater durability, stability and efficiency of DSSC cells. The addition of discotic liquid crystals to the active layer in BHJ contributes to the improvement of the charge conductivity, effective control of phase separation in the layers and cell efficiency. Newly synthesized molecules of ionic liquid crystals are an important additive modifying the structure of organic photovoltaic cells. Liquid crystals added in the manufacturing process of flexible perovskite cells improve their quality, stability and conversion efficiency. Liquid crystal polymers and elastomers are also used.

Keywords: photovoltaic cells, DSSC cells, heterojunction cells, perovskite cells, thermotropic liquid crystals

Zastosowanie falki Laplace'a do identyfikacji współczynnika tłumienia modalnego

1. Wprowadzenie

Analizę dynamiczną elementu czy układu mechanicznego można przeprowadzić we współrzędnych fizycznych lub współrzędnych modalnych. W przypadku współrzędnych fizycznych wartości amplitud drgań należy wyznaczyć we wszystkich punktach konstrukcji. Modele matematyczne znane są tylko dla prostych przypadków elementów (pręt, wał, belka) i tylko w takich przypadkach możliwe jest wyznaczenie amplitudy (czy przebiegu drgań) tylko w jednym punkcie i wyznaczenie w pozostałych punktach np. belki zginanej, na podstawie zależności wynikających ze znanego modelu belki (Bernoulliego – Eulera lub Timoshenki).

Analiza w dziedzinie modalnej wymaga wyznaczenia wartości częstości drgań własnych, współczynników tłumienia modalnego i wektorów własnych. W takim przypadku wyznaczenie amplitudy czy przebiegu drgań w dowolnym punkcie konstrukcji polega na superpozycji modalnej. Teoretycznie modów (wektorów własnych) jest nieskończenie wiele tak samo jak nieskończenie wiele jest współrzędnych fizycznych analizowanego układu. Ale tłumienie wewnętrzne w materiale konstrukcji jest proporcjonalne do prędkości odkształceń, stąd dla wyższych częstości drgań własnych tłumienie osiąga wartości tłumienia nadkrytycznego, dlatego analizę w dziedzinie modalnej można ograniczyć do kilku, kilkunastu modów.

Zidentyfikowane na podstawie zmierzonych sygnałów drganiowych, parametry modalne z jednej strony odzwierciedlają charakterystykę dynamiczną analizowanej konstrukcji, mogą również służyć jako dane wejściowe do dostrajania i walidacji modeli numerycznych takich jak modele elementów skończonych czy elementów brzegowych. Parametry modalne można wykorzystać również w diagnostyce i monitoringu stanu technicznego konstrukcji, jako symptomy uszkodzenia.

Największy problem przy wyznaczaniu paramentów modalnych konstrukcji stanowi wyznaczenie wartości współczynników tłumienia modalnego. Podstawową metodą identyfikacji tej wielkości jest metoda połowy mocy [1-4]. Zastosowanie tej metody prowadzi często do dużych błędów identyfikacji tłumienia [5]. Dlatego też nadal trwają prace nad metodami identyfikacji współczynnika, są one związane z analizą czasową mierzonych sygnałów drgań [6, 7], analizą czasowo-częstotliwościową [8, 9], a nawet analizą obrazów rejestrowanych za pomocą szybkich kamer [10, 11].

W niniejszej pracy autor proponuje wykorzystanie falki Laplace'a do identyfikacji współczynnika tłumienia modalnego. Proponowaną metodę zaliczyć można do metod czasowo-częstotliwościowych. Analiza sygnału czasowego z wykorzystaniem falki Laplace'a pozwala również uzyskać założoną rozdzielczość w dziedzinie częstotliwości niezależnie od rozdzielczości wynikającej z częstości próbkowania i ilości próbek (jak w FFT).

¹ majkut@agh.edu.pl, Katedra Mechaniki i Wibroakustyki, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, www.agh.edu.pl.

Zastosowanie proponowanej metody oraz wyniki analizy pokazano na podstawie analizy drgań układu o jednym stopniu swobody z różnymi współczynnikami tłumienia. Współczynniki tłumienia w kolejnych modelach różnią się o 1% wartości tłumienia krytycznego. W dalszej kolejności porównano wartości tłumienia pochodzących z identyfikacji i wykorzystanych w modelach układów o trzech i pięciu stopniach swobody. Dokonano również identyfikacji współczynników tłumienia dla belek wstępnie sprężonych na stanowisku laboratoryjnym. W tym przypadku wykazano zmianę współczynnika tłumienia wraz ze zmianą siły sprężającej (uszkodzeniem elementu), co pośrednio wskazuje na poprawność zaproponowanej metody identyfikacji. Nie da się określić tłumienia w takim przypadku nie jest więc możliwe porównanie wartości zidentyfikowanych z wartościami rzeczywistymi, tak jak tego dokonano w przypadku układów dyskretnych.

2. Falka Laplace'a

Falka jest funkcją matematyczną, która ma zerową wartość średnią, jest określona jedynie na pewnym skończonym (zwartym) przedziale (poza tym przedziałem falka przyjmuje wartości równe zero) i skończoną moc sygnału. Cechy te powodują, że funkcja falkowa jest dobrze zlokalizowana w dziedzinie czasu jak i częstotliwości. Wynika stąd duża popularność analizy falkowej różnych sygnałów czasowych [12-14]. Po zamianie zmiennej czasowej (czasu) na zmienną przestrzenną analizę falkową stosować można do analizy obrazów [15].

W pracy zaproponowano wykorzystanie falki Laplace'a do identyfikacji wartości współczynnika tłumienia modalnego. Falka Laplace'a nie nadaje się do wykorzystania w analizie falkowej (tak jak falki Haar'a czy Daubechies) ponieważ falki z rodziny falek Laplace'a nie są ortogonalne choć możliwe jest znalezienie funkcji ortogonalnej do każdej falki z rodziny [16]. Falka Laplace'a jest zespoloną funkcją analityczną, opisaną ekspotencjalną funkcją tłumioną. Część rzeczywista falki pochodzi wprost z odpowiedzi impulsowej układu mechanicznego o jednym stopniu swobody, część urojona stanowi transformata Hilberta części rzeczywistej [16].

Falka Laplace'a zdefiniowana jest zależnością [16]:

$$\psi(f, \zeta, \tau, t) = Ae^{\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cdot 2\pi \cdot f(t-\tau)} \cdot e^{-j2\pi \cdot f(t-\tau)} \quad (1)$$

dla $t \in \langle \tau, \tau + D \rangle$ i $\psi(f, \zeta, \tau, t) = 0$ dla próbek t spoza przedziału D .

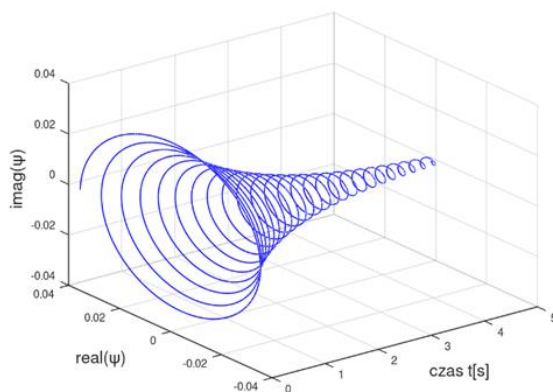
gdzie $j = \sqrt{-1}$, f - częstotliwość sygnału $f \in R^+$, ζ - współczynnik tłumienia wiskotycznego $\zeta \in (0,1)$.

Współczynnik tłumienia w falce Laplace'a wyrażony jest jako ułamek (procent) tłumienia krytycznego.

Przykładową falkę Laplace'a pokazano na rysunku 1.

Rodzinę falek, które można wykorzystać w analizie falkowej uzyskuje się przez zmianę częstości i współczynnika tłumienia.

Z opisu rodziny falek Laplace'a wynika wprost możliwość zastosowania tej falki do identyfikacji parametrów modalnych układów mechanicznych tj. częstości własnych i modalnych współczynników tłumienia. Ze względu na złożoność i czas obliczeń i co za tym idzie ich koszt autor proponuje by częstości własne wyznaczyć za pomocą szybkiej transformaty Fouriera (FFT) i tak uzyskane wartości wykorzystać jako wstępne dla określenia zakresu zmian częstości f w falce.



Rysunek 1. Falka Laplace'a dla danych: $f = 5\text{Hz}$, $\zeta = 0.02$, $D = 5\text{s}$ [opracowanie własne]

3. Identyfikacja tłumienia modalnego

Proponowana w pracy metoda identyfikacji wartości częstości drgań własnych i modalnych współczynników tłumienia polega na wyznaczeniu korelacji pomiędzy sygnałem drganiowym, a rodziną falek Laplace'a. Poszukiwane współczynniki modalne odpowiadają wartości maksymalnej współczynników korelacji.

3.1. Przygotowanie analizowanego sygnału

Sygnał, który jest poddany analizie z wykorzystaniem falki Laplace'a może być sygnałem odpowiedzi układu na niezerowe warunki początkowe lub, co często łatwiej zrealizować, odpowiedź na wymuszenie impulsowe tzw. odpowiedź impulsowa (funkcja Greena). W opisanym w pracy sposobie identyfikacji nie ma potrzeby pomiarów warunków początkowych lub popędu (impulsu) siły wymuszającej. To co jest niezbędne to jedynie to, by zarejestrować drgania zanikające.

Jak wspomniano wyżej falka Laplace'a opisana jest funkcją analityczną, dlatego też przed przystąpieniem do analizy, sygnał drganiowy należy przekształcić do postaci analitycznej. W tym celu należy zarejestrowany sygnał poddać transformacji Hilberta.

Ciągłe przekształcenie Hilberta jest przekształceniem całkowym dla sygnałów z przestrzeni L^2 [17]. Dla dowolnego przebiegu czasowego jest ono zdefiniowane zależnością:

$$x(s) = H[x(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(t)}{s-t} dt \quad (2)$$

Równanie (2) stanowi definicję transformaty Hilberta, częściej liczona jest jako splot sygnału $x(t)$ i funkcji $h(t)$:

$$h(t) = \frac{1}{\pi t} \quad (3)$$

Sygnał analityczny to sygnał zespolony, którego część rzeczywista to sygnał $x(t)$, a część zespoloną stanowi transformata Hilberta tego sygnału $H[x(t)]$:

$$z(t) = x(t) + jH[x(t)] \quad (4)$$

Analizie z wykorzystaniem falki Laplace'a poddany zostanie sygnał analityczny „skonstruowany” tak jak to opisano równaniem (4).

3.2. Analiza korelacyjna

Pod pojęciem analizy korelacyjnej autor rozumie proces wyznaczenia współczynników korelacji pomiędzy sygnałem analitycznym drgań analizowanego układu mechanicznego i falek z rodziny falek Laplace'a oraz poszukiwanie wartości częstotliwości f i współczynnika tłumienia ζ odpowiadających wartości maksymalnej tych współczynników korelacji.

W pierwszej kolejności należy określić rodzinę falek Laplace'a dla różnych częstotliwości $f \in (f_1 - f_2)$ z krokiem np. 1Hz i różnych współczynników tłumienia $\zeta \in (0.001 - 0.5)$ z krokiem np. 0.001. Współczynnik ζ jest liczony jako ułamek (procent) tłumienia krytycznego – stąd zakres. Zakresy można zmieniać dowolnie.

Dla każdej pary parametrów f i ζ należy wyznaczyć falkę Laplace'a zgodnie z zależnością (1). W kolejnym kroku analizy należy wyznaczyć współczynnik korelacji pomiędzy tak wyznaczoną falką i sygnałem analitycznym, opisanym równaniem (4). Ten sposób analizy prowadzi do wyznaczenia współczynnika korelacji jako funkcji dwóch zmiennych: częstotliwości i współczynnika tłumienia.

Korelacja wyznaczana jest poprzez iloczyn skalarny falki (1) i sygnału (4):

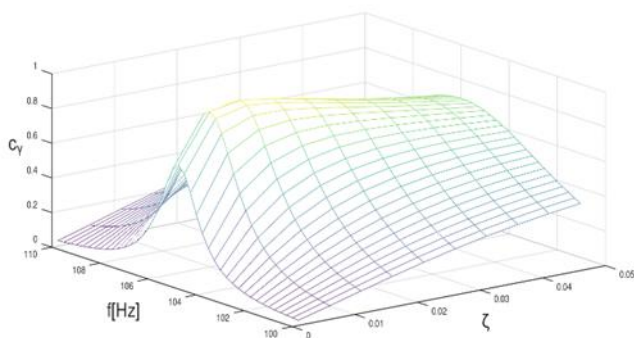
$$\langle \psi_\gamma(t), x(t) \rangle = \|\psi_\gamma(t)\|_2 \cdot \|x(t)\|_2 \cdot \cos(\theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_\gamma(t) \cdot x(t) dt \quad (5)$$

gdzie: $\gamma = \{f, \zeta\}$

Poszukiwany współczynnik korelacji $c_\gamma \in R$ definiowany jest zależnością:

$$c_\gamma = \frac{|\langle \psi_\gamma(t), x(t) \rangle|}{\|\psi_\gamma(t)\|_2 \cdot \|x(t)\|_2} \quad (6)$$

Przykładowy przebieg współczynnika c_γ w zależności do wartości częstotliwości i tłumienia pokazano na rysunku 2.



Rysunek 2. Przykładowy przebieg współczynnika korelacji [opracowanie własne]

Największa wartość współczynnika odpowiada najsilniejszej korelacji pomiędzy falką, a analizowanym sygnałem.

$$\chi = \max(c_\gamma) \quad (7)$$

Częstotliwość f i współczynnik tłumienia ζ , dla których wyznaczono wartość χ z równania (7) odpowiadają parametrom modalnym tj. częstotliwości własnej i współczynnikowi tłumienia modalnego, analizowanego układu mechanicznego.

Jak to wspomniano wcześniej autor proponuje by, ze względu na czas i koszt obliczeń, do identyfikacji częstości drgań własnych wykorzystać szybką transformatę Fouriera (FFT). Tak wyznaczoną częstość wykorzystuje się od określenia zakresu zmian częstości f w rodzinie falek Laplace'a.

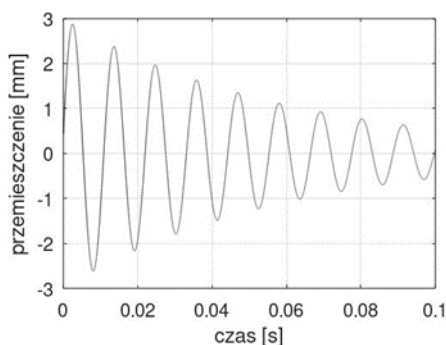
4. Identyfikacja tłumienia.

W tej części pracy opisane zostały wyniki identyfikacji współczynników tłumienia modalnego dla różnych sygnałów drganiowych. W celu sprawdzenia poprawności obliczeń i wyników identyfikacji, przygotowano sygnały testowe. Są sygnały drgań układów o jednym stopniu swobody, trzech i pięciu stopniach swobody. Sygnały te uzyskane zostały na drodze analizy numerycznej modelu matematycznego stąd wartości współczynników tłumienia są znane.

Analizie poddano również sygnały drganiowe zarejestrowane na stanowisku laboratoryjnym. Wykorzystano sygnały drgań belek betonowych z różnymi siłami sprężającymi. Współczynniki tłumienia modalnego nie są znane w takim przypadku, ale zidentyfikowane różne wartości współczynnika tłumienia dla różnych sił sprężających wskazują na poprawność proponowanej analizy. Zmiany współczynnika modalnego może być wykorzystany jako wskaźnik uszkodzenia (zmiany siły sprężającej) w belce wstępnie sprężonej.

4.1. Sygnał testowy

W przypadku układu o jednym stopniu swobody analizowany sygnał drganiowy to odpowiedź układu na niezerowe wartości początkowe. Jak to opisano wyżej część rzeczywista falki Laplace'a odpowiada właśnie takiemu sygnałowi, dlatego aby „utrudnić” proces identyfikacji autor przyjął niezerową prędkość początkową. Jeden z analizowanych sygnałów pokazano na rysunku 3.



Rysunek 3. Przykład analizowanego sygnału [opracowanie własne]

Analizie poddano sygnały wyznaczone dla różnych wartości tłumienia. W modelu matematycznym przyjęto odpowiednio tłumienie o wartości 1%, 2%, 3%, 4% i 5% tłumienia krytycznego. Tak przyjęte współczynniki pozwalają sprawdzić rozdzielczość proponowanej metody identyfikacji tłumienia.

Rodzinę falek Laplace'a dla różnych wartości tłumienia ζ skonstruowano z krokiem 0,001 czyli 0,1% tłumienia krytycznego. Wyniki identyfikacji zebrano w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki identyfikacji współczynników tłumienia układu o jednym stopniu swobody

wsp. w modelu matematycznym	wynik identyfikacji	błąd względny
1%	0,01	0%
2%	0,02	0%
3%	0,03	0%
4%	0,04	0%
5%	0,05	0%

Źródło: opracowanie własne.

Tak dobre wyniki identyfikacji wynikają z konstrukcji falki Laplace'a, ale wskazują również na poprawność przygotowanej procedury w programie Octave.

W przypadkach sygnałów drgań dla układów o trzech i pięciu stopniach swobody wyznaczono (numerycznie) charakterystykę amplitudowo – częstotliwościową w zakresie częstotliwości od 1 Hz do częstotliwości równej trzykrotności największej wartości częstości drgań własnych, przy stałej wartości amplitudy wymuszenia. Analizie z wykorzystaniem rodziny falek Laplace'a poddano sygnał otrzymany jako odwrotną transformatę Fouriera takiej charakterystyki. Odwrotna transformata Fouriera charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej to odpowiedź impulsowa układu mechanicznego.

Wyniki identyfikacji modalnych współczynników tłumienia dla układu o trzech stopniach swobody zamieszczono w tabeli 2. Przeanalizowano 3 przypadki modelowania różnych współczynników tłumienia.

Tabela 2. Wyniki identyfikacji współczynników tłumienia układu o trzech stopniach swobody

nr przykładu	wsp. w modelu matematycznym	wynik identyfikacji	błąd względny
1	$h_{kr1} = 0,005$	0,005	0,00%
	$h_{kr2} = 0,01$	0,01	0,00%
	$h_{kr3} = 0,015$	0,014	6,67%
2	$h_{kr1} = 0,01$	0,01	0,00%
	$h_{kr2} = 0,02$	0,02	0,00%
	$h_{kr3} = 0,03$	0,029	3,33%
3	$h_{kr1} = 0,01$	0,01	0,00%
	$h_{kr2} = 0,01$	0,01	0,00%
	$h_{kr3} = 0,01$	0,01	0,00%

Źródło: opracowanie własne.

W tabelach 2 i 3 przez h_{kr1} oznaczono współczynnik tłumienia modalnego odpowiadający pierwszej częstości drgań własnych, h_{kr2} – drugiej, h_{kr3} – trzeciej itd.

Konstruując rodzinę falek Laplace'a w zmiennej ζ zachowano krok równy 0,001. Przy zmniejszeniu kroku błędy identyfikacji współczynników h_{kr3} są znacznie mniejsze. Mimo tego autor uważa, że dokładność wyznaczenia modalnego współczynnika tłumienia z dokładnością do jednej dziesiątej wartości tłumienia krytycznego jest wystarczające dla celów analizy dynamicznej konstrukcji.

Wyniki identyfikacji modalnych współczynników tłumienia dla układu o pięciu stopniach swobody zamieszczono w tabeli 3. Przeanalizowano 3 przypadki modelowania różnych współczynników tłumienia.

Tabela 3. Wyniki identyfikacji współczynników tłumienia układu o pięciu stopniach swobody

nr przykładu	wsp. w modelu matematycznym	wynik identyfikacji	błąd względny
1s	$h_{kr1} = 0,005$	0,005	0,00%
	$h_{kr2} = 0,010$	0,01	0,00%
	$h_{kr3} = 0,015$	0,015	0,00%
	$h_{kr4} = 0,020$	0,021	5,00%
	$h_{kr5} = 0,025$	0,023	8,00%
2	$h_{kr1} = 0,01$	0,01	0,00%
	$h_{kr2} = 0,02$	0,02	0,00%
	$h_{kr3} = 0,03$	0,03	0,00%
	$h_{kr4} = 0,04$	0,04	0,00%
	$h_{kr5} = 0,05$	0,052	4,00%
3	$h_{kr1} = 0,01$	0,01	0,00%
	$h_{kr2} = 0,01$	0,01	0,00%
	$h_{kr3} = 0,01$	0,01	0,00%
	$h_{kr4} = 0,01$	0,01	0,00%
	$h_{kr5} = 0,01$	0,01	0,00%

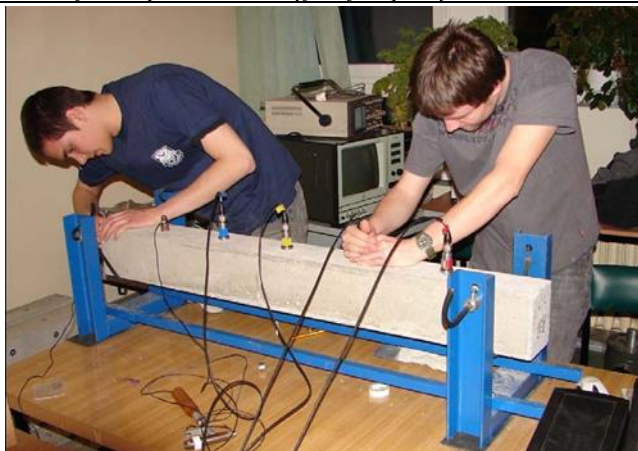
Źródło: opracowanie własne.

Podobnie jak w przypadku układu o 3-ch stopniach swobody rodzinę falek Laplace'a skonstruowano z krokiem 0,001 w zmiennej ζ .

Wyniki zebrane w tabelach 2 i 3 wskazują, że większe błędy identyfikacji występują dla większych wartości współczynnika tłumienia.

4.2. Sygnał zarejestrowany w laboratorium

Po sprawdzeniu poprawności procesu identyfikacji, proponowaną metodę autor zastosował do identyfikacji modalnych współczynników tłumienia układu ciągłego. Badanym układem były betonowe belki wstępnie sprężone. Stanowisko laboratoryjne pokazano na rysunku 4, każda z badanych belek jest wstępnie sprężona (rozciągnięte pręty przed zalaniem betonu) różnymi siłami.



Rysunek 4. Stanowisko pomiarowe [opracowanie własne]

Na stanowisku pokazanym na rysunku 4 analizowano belki o siłach sprężających równych: 0, 20, 40, 60, 80 i 100N. Na rysunku 4 można zauważyć, że odpowiedź układu jest wyznaczana w kilku punktach, wynika to z faktu, że w ramach badań laboratoryjnych wyznaczono wszystkie parametry modalne belki. Do wyznaczenia postaci drgań własnych (wektorów własnych) niezbędny jest pomiar w wielu punktach konstrukcji. W niniejszej pracy autor wykorzystuje sygnał zarejestrowany przez jeden z czujników.

W tabeli 4 zebrano parametry modalne zidentyfikowane z zarejestrowanego sygnału. Autor chciałby w przyszłości wykorzystywać zmiany modalnego współczynnika tłumienia jako wskaźnik zmiany stanu technicznego konstrukcji, dlatego też w tabeli zamieszczono również zmiany częstości drgań własnych. Również z tego powodu w tabeli 4 zamieszczono wyniki identyfikacji współczynników tłumienia modalnego odpowiadające trzeciej częstości drgań własnych. Współczynniki dla trzeciego modu zmieniają się w najszerszych granicach w porównaniu do modów 1, 2, 4 i 5. Z tego powodu współczynnik dla modu trzeciego jest najbardziej wrażliwy na zmianę wartości siły sprężającej belki (uszkodzenie konstrukcji). Z wartości zamieszczonych w tabeli wyraźnie wynika, że wskaźnik związany ze zmianą tłumienia jest znacznie bardziej czuły na uszkodzenie (zmianę siły sprężającej) niż powszechnie stosowany wskaźnik związany ze zmianą wartości częstości drgań własnych.

Tabela 4. Wyniki identyfikacji współczynników tłumienia belek betonowych o różnych siłach sprężających

siła sprężająca [N]	trzecia częstość drgań własnych	wsp. tłumienia
0	350,60	0,0051
20	350,88	0,0053
40	351,27	0,0055
60	354,77	0,0058
80	356,91	0,0074
100	357,93	0,0087

Źródło: opracowanie własne.

Autor podtrzymuje swoją opinię, że w przypadku wykorzystania zidentyfikowanych współczynników tłumienia modalnego do analizy tj. wyznaczenia wartości amplitud drgań konstrukcji, wyznaczenie ich z krokiem 0.001 czyli 0.1% tłumienia modalnego

jest wystarczające. W przypadku wykorzystania tego współczynnika jako wskaźnika uszkodzenia często konieczne jest zmniejszenie kroku w zmianach wartości ζ konstruując rodzinę fałek Laplace'a.

5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono metodykę wyznaczania modalnych współczynników tłumienia z wykorzystaniem falki Laplace'a. Prawdliwość metody i metodyki sprawdzono w pierwszej kolejności analizując, uzyskane numerycznie, sygnały drgań układu o jednym stopniu swobody oraz trzech i pięciu stopniach swobody. W przypadku układu o jednym stopniu swobody analizowano odpowiedź układu na niezerowe warunki początkowe, dla układów o trzech i pięciu stopniach swobody wyznaczono i analizowano odpowiedź impulsową układu. Proponowana metoda pozwala wyznaczyć prawidłowe tj. takie jak przyjęto w modelu numerycznym wartości współczynników tłumienia w obu przypadkach wymuszenia. Dodatkowo należy podkreślić, że proponowana metoda nie wymaga rejestracji siły wymuszającej.

Po sprawdzeniu poprawności proponowanej metodyki poprzez analizę sygnałów uzyskanych na drodze numerycznej, analizie poddano sygnały zarejestrowane w laboratorium dla układu rzeczywistego. Jako analizowany układ wybrano belki wstępnie sprężone. Współczynniki tłumienia w takim przypadku nie są znane, ale przyjmując, że głównym źródłem tłumienia jest tłumienie wewnętrzne to należy przyjąć, że wraz ze wzrostem siły sprężającej rośnie wartość trzeciej częstości drgań własnych i przez to wartość prędkości odkształceń i przez to wartość współczynnika tłumienia modalnego. Stąd zidentyfikowany wzrost modalnego współczynnika modalnego wskazany w tabeli 4 może potwierdzać poprawność proponowanej metody. Błąd identyfikacji nie jest znany, ponieważ „prawdziwa” wartość współczynnika modalnego nie jest znana.

W przyszłości autor chce wykorzystać zmianę modalnego współczynnika modalnego do diagnostyki stanu technicznego konstrukcji, stąd w tabeli 4 zamieszczono zmiany wartości zidentyfikowanych częstotliwości drgań własnych dla trzeciej postaci drgań. Zmiana częstotliwości własnych jest często wykorzystywana jako wskaźnik uszkodzenia. Po analizie tylko jednego przykładu tj. belki wstępnie sprężonej wniosek może być przedwczesny, a zmiany wartości współczynnika tłumienia wydają się być znacznie bardziej czułe na zmianę stanu technicznego konstrukcji od zmian częstości drgań własnych. Te prace będą kontynuowane dla sygnałów zarejestrowanych dla innych konstrukcji w tym wykonanych z innych materiałów.

Podziękowania

Prace zrealizowano w ramach subwencji badawczej nr 16.16.130.942.

Literatura

1. Ward H., Lammens S., Sas P., *Modal Analysis Theory And Testing*, Katholieke Universiteit Leuven, 1998.
2. Jimin H., Zhi-Fang F., *Modal Analysis*, Elsevier Ltd., 2001.
3. Maia N.M.M., Silva J.M.M., He J., Lieven N.A., Lin R.M., Skingle G.W., To W.M., Urgueira A.P.V., *Theoretical and Experimental Modal Analysis*, edited by Maia N.M.M. and Silva J.M.M. Research Studies Press, Taunton, Somerset, UK, 1997.
4. Silva J.M.M., *An Overview Of the Fundamentals Of Modal Analysis*, Proc. of NATO Advanced Study Institute on Modal Analysis and Testing, Sesimbra, Portugal, 1998.

5. Prandina M., Mottershead J.E., Bonisoli E., *An assessment of damping identification methods*, Journal of Sound and Vibration, 323, 2009, s: 662-676.
6. Arora V., *Structural damping identification method using normal FRFs*, International Journal of Solids and Structures 51, 2014, s. 133-143.
7. Vondelen A., Navalkar S., Iliopoulos A., van der Hoek D., Wingerden J., *Damping identification of offshore wind turbines using operational modal analysis: a review*, Wind Engineering Science, 7, 2022, s. 161-184.
8. Minh-Nghi T., Lardies J., Berthillier M., *Natural frequencies and modal damping ratios identification of civil structures from ambient vibration data*, Shock and Vibration 13, 2006, s. 429-444.
9. Zhonghong Y., Ayaho M., Zhongwei J., *Frequency slice algorithm for modal signal separation and damping identification*, Computers & Structures, 89, 2011, s. 14-26.
10. Tomac I., Slavic J., *Damping identification based on a high-speed camera*, Mechanical Systems and Signal Processing, 166, 2022.
11. Hallal J., Fakh M., Damerji H., Hammoud M., Chouman M., *Experimental Modal Damping Identification of a Mechanical Structure Using Video Magnification Technique*, Sound & Vibration, 55, 2021.
12. Białasiawicz J.T., *Falki i aproksymacje*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
13. Augustyniak P., *Transformacja falkowe w zastosowaniach elektrodiagnostycznych*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2003.
14. Kowalski C.T., *Zastosowanie analizy falkowej w diagnostyce silników indukcyjnych*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 82, Nr 1/2006.
15. Agarwal S, Singh O.P., Nagaria D., *Analysis and Comparison of Wavelet Transforms for Denoising MRI Image*, Biomed Pharmacol Journal, 10, 2017.
16. Abuhamdia T., Taheri S., Burns J., *Laplace wavelet transform theory and applications*, Journal of Vibration and Control, 24, 2017, s. 1-21.
17. Zieliński T., *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2005.

Zastosowanie falki Laplace'a do identyfikacji współczynnika tłumienia modalnego

Streszczenie

W pracy zaproponowano metodologię pozwalającą na wyznaczenia modalnych współczynników tłumienia z wykorzystaniem falki Laplace'a. Wyznaczenie współczynników tłumienia jest niezbędne w celu prowadzenia jakichkolwiek analiz dynamicznych konstrukcji. Proponowaną metodykę sprawdzono na otrzymanych numerycznie sygnałach testowych dla układu o jednym, trzech i pięciu stopniach swobody. Po wykazaniu poprawności metody dla sygnałów o znanych wartościach tłumienia, analizie poddano sygnał zarejestrowany w laboratorium. Wyznaczono zmiany jednej z częstości drgań własnych i odpowiadający tej częstości współczynnik tłumienia dla 5 belek betonowych o różnej wartości siły sprężającej. Wyniki analizy wskazują, że współczynnik tłumienia może być lepszym wskaźnikiem uszkodzenia niż częstości drgań własnych.

Słowa kluczowe: falka Laplace'a, analiza korelacyjna, sygnał analityczny, identyfikacja tłumienia modalnego

Application of the Laplace wavelet to identify the modal damping coefficient

Abstract

In the paper the author proposes a methodology for determining the modal damping coefficients using the Laplace wavelet. Determination of damping coefficients is necessary to conduct any dynamic analysis of the structure (i.e fatigue strength). The proposed methodology was tested on numerically obtained test signals for a system with single, three and five degrees of freedom. After proving the correctness of the method for signals with known damping values, the signal recorded in the laboratory was analysed. Changes in one of the frequencies of natural vibrations and the damping coefficient corresponding to this frequency were determined for five concrete beams with different values of the prestressing force. The results of the analysis indicate that the damping coefficient may be a better indicator of damage detection than natural frequencies.

Keywords: Laplace wavelet, correlation analysis, analytical signal, modal damping identification

Nośność na ścinanie belek z betonu z mikrobrojeniem włóknistym w świetle norm

1. Wstęp

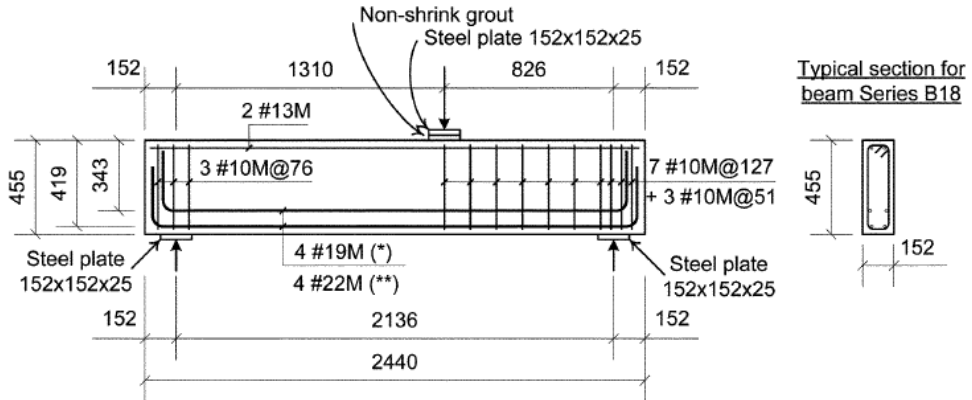
Od początku XX wieku trwają badania nad zjawiskiem ścinania w belkach betonowych i żelbetowych. Ich zadaniem jest opisanie mechanizmów zniszczenia tych elementów konstrukcyjnych na skutek działania sił poprzecznych. W tym celu opracowano wiele modeli teoretycznych, obrazujących pracę belek, które w mniej lub bardziej dokładny sposób pozwalają na określenie nośności obliczeniowej na ścinanie. Naukowcy pracują nad metodą wymiarowania pozwalającą na wykorzystanie w elementach konstrukcyjnych z betonu zbrojenia rozproszonego metalicznego lub niemetalicznego. Dodatek włókien do mieszanki betonowej może zmniejszyć liczbę strzemion potrzebnych do przeniesienia sił poprzecznych lub, w przypadku mniej obciążonych belek, umożliwia całkowite wyeliminowanie zbrojenia poprzecznego [1]. Warto zauważyć, że zastąpienie tradycyjnego zbrojenia na ścinanie zbrojeniem rozproszonym, zredukowałoby ciężar własny konstrukcji, który stanowi znaczną część obciążenia całkowitego budowli. Celem pracy jest porównanie doświadczalnych wyników nośności na ścinanie belek ze zbrojeniem rozproszonym, metalicznym z wynikami obliczeniowymi, otrzymanymi na podstawie wybranych norm do projektowania konstrukcji. Nośności eksperymentalne zaczerpnięto z literatury [2].

2. Opis badań

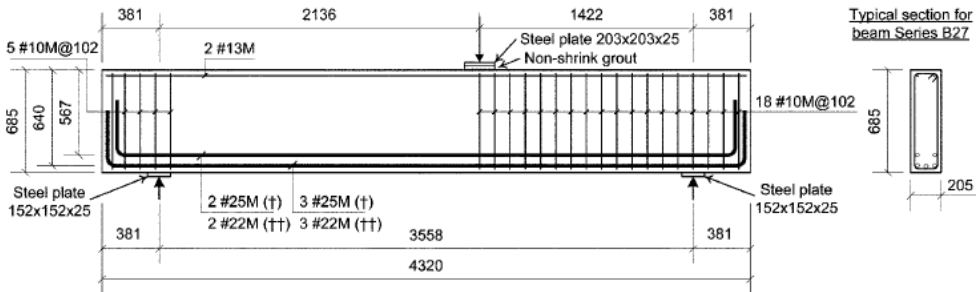
W artykule Dinha, Parra-Montesinosa i Wighta [2] określono nośność na ścinanie jednoprzęsłowych belek na podstawie próby trójosiowego zginania. W tym celu autorzy zbadali 24 elementy betonowe z dodatkiem włókien stalowych, haczykowatych o różnej długości i wytrzymałości na rozciąganie [2]. Zastosowane włókna można podzielić na 3 typy w zależności od ich długości i średnicy. Typ pierwszy 30 mm długości i stosunkiem długości do średnicy 55 i 80. Typ drugi 60 mm długości i stosunkiem 80. Włókna te miały wytrzymałość na rozciąganie wynoszącą 1100 MPa, natomiast włókna typu trzeciego 2300 MPa. Zastosowano zbrojenie rozproszone w zawartości 0,50-1,50% objętości mieszanki betonowej. Każda belka została wykonana z betonu o wytrzymałości na ściskanie o wartości 41 MPa. Program badań obejmował dwie serie elementów o różnej rozpiętości i wymiarach przekroju poprzecznego. Pokazano je na rysunku 1 i 2. Belki jednej z serii miały długość 244,0 cm i przekrój poprzeczny 15,2 x 45,5 cm, natomiast drugiej 432,0 cm i przekrój 20,5 x 68,5 cm. Siła obciążająca belkę została przyłożona bliżej jednej z podpór w odległości a . Stosunek a do wysokości użytecznej belki d był w każdym przypadku większy niż 3,43 w celu minimalizacji wpływu efektu łukowego przenoszenia obciążeń na podporę. Zjawisko to polega na bezpośrednim przekazywaniu sił przez ściskany beton. Mamy wtedy do czynienia z dociskiem betonu, a nie ścinaniem

¹ Politechnika Białostocka, Instytut Inżynierii Łądowej, Katedra Konstrukcji Budowlanych i Mechaniki Budowli.

elementu w wyniku działania sił poprzecznych. Belki były zbrojone dołem na zginanie prętami podłużnymi, stalowymi. Stopień zbrojenia wynosił 1,6-2,7%. Ilość tego zbrojenia ma wpływ na nośność na ścinanie belek, ponieważ przenosi siły rozciągające w zarysowanym elemencie.



Rysunek 1. Zbrojenie belki – schemat 1 [1]



Rysunek 2. Zbrojenie belki – schemat 2 [2]

W celu określenia nośności na ścinanie belek zbrojonych włóknami do obliczeń przyjęto siłę poprzeczną w odległości d od podpory, w przekroju bez strzemion. Obciążenie przy którym elementy uległy zniszczeniu przedstawia tabela 1. Zawarto w niej również wymiary belek, zawartość włókien w objętości betonu, ilość zbrojenia podłużnego oraz długość i średnicę włókien. Należy nadmienić, że w elementach numer 11-14 zostały zastosowane włókna o długości większej niż odległość w świetle między prętami podłużnymi. Na skutek tego podczas betonowania zbrojenie rozproszone zawieszało się na zbrojeniu głównym, blokując właściwe ułożenie mieszanki betonowej. Spowodowało to wystąpienie miejscowych pustek w belkach, które zostały wypełnione zaczynem cementowym. Na skutek tego autorzy uzyskali mniejsze nośności na ścinanie w przypadku tych elementów.

Tabela 1. Geometria belek oraz ich zbrojenie oraz siła niszcząca (opracowanie własne)

	b_w	h	d	l_{span}	ρ	a/d	$f_{c,cyl}$	V_f	l_f/d_f	f_{tenf}	V_{Ed}
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[-]	[MPa]	[%]	[-]	[MPa]	[kN]
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	152	455	381	2136	2,0	3,43	44,8	0,75	30/0,4-0,6	1100	441,00
2	152	455	381	2136	2,0	3,43	44,8	0,75		1100	413,00
3	152	455	381	2136	2,0	3,50	38,1	1,00		1100	437,00
4	152	455	381	2136	2,0	3,50	38,1	1,00		1100	445,00
5	152	455	381	2136	2,7	3,50	38,1	1,00		1100	503,00
6	152	455	381	2136	2,7	3,50	38,1	1,00		1100	367,00
7	152	455	381	2136	2,7	3,43	31,0	1,50		1100	384,00
8	152	455	381	2136	2,7	3,43	31,0	1,50		1100	507,00
9	152	455	381	2136	2,7	3,43	44,9	1,50		1100	494,00
10	152	455	381	2136	2,7	3,43	44,9	1,50		1100	490,00
11	205	685	610	3558	2,7	3,43	49,2	1,00	60/0,8	1100	445,00
12	205	685	610	3558	2,7	3,43	49,2	1,00		1100	565,00
13	205	685	610	3558	2,0	3,43	43,3	0,75	30/0,4-0,60	2300	498,00
14	205	685	610	3558	2,0	3,43	43,3	0,75		2300	490,00
15	205	685	610	3558	2,0	3,50	50,8	0,75		1100	908,00
16	205	685	610	3558	2,0	3,50	50,8	0,75		1100	837,00
17	205	685	610	3558	2,0	3,50	28,7	0,75	60/0,8	1100	872,00
18	205	685	610	3558	2,0	3,50	28,7	0,75		1100	854,00
19	205	685	610	3558	1,6	3,50	42,3	0,75	30/0,4-0,6	1100	846,00
20	205	685	610	3558	1,6	3,50	42,3	0,75		1100	863,00
21	205	685	610	3558	1,6	3,50	29,6	0,75	60/0,8	1100	663,00
22	205	685	610	3558	1,6	3,50	29,6	1,50		1100	556,00
23	205	685	610	3558	2,1	3,50	44,4	1,50	30/0,4-0,6	1100	1081,00
24	205	685	610	3558	2,1	3,50	42,8	1,50	60/0,8	1100	1046,00

b_w – szerokość przekroju poprzecznego belki; h – wysokość przekroju poprzecznego belki; d – wysokość użyteczna przekroju poprzecznego, l_{span} – długość belki; ρ – stopień zbrojenia podłużnego, a/d – współczynnik ścinania, będący stosunkiem odległości przyłożenia siły do wysokości użytecznej d ; $f_{c,cyl}$ – wytrzymałość na ściskanie próbek walcowych; V_f – zawartość włókien w objętości betonu, l_f/d_f – stosunek długości włókien do ich średnicy; f_{tenf} – wytrzymałość na rozciąganie włókien; V_{Ed} – siła niszcząca belkę

Źródło: opracowanie własne na podstawie [2].

3. Nośność na ścinanie

Obliczenia przeprowadzono na podstawie czterech norm: DIN 1992-1-1 [3], RILEM TC 162-TDF [4, 5], Model Code 2010 [6, 7], CNR-DT 204/2006 [8] bazując także na poszerzonych komentarzami do nich [9, 10, 11]. Każda z tych norm zawiera procedury pozwalające na określenie nośności na ścinanie belek z dodatkiem zbrojenia włóknami. Norma DIN 1992-1-1 pochodzi z Niemiec. Model Code jest stosowana w niektórych stanach USA i została opracowana przez American Society of Civil Engineers (ASCE). Norma RILEM TC 162 TDF została stworzona przez The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, System and Structures zrzeszającą inżynierów z całego świata. CNR-DT 204/2006 pochodzi z Włoch i została opracowana przez Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto di Ricerca sulle Costruzioni (CNR-IRC).

Każda z przytoczonych norm bazuje na innych wzorach pozwalających na oszacowanie nośności na ścinanie belek z betonu z dodatkiem włókien. Proponują one różne

wartości współczynników bezpieczeństwa służących do wyznaczenia obliczeniowych wartości nośności na ściskanie betonu i granicy plastyczności stali zbrojeniowej. Wpływa to na rozbieżności wyników. Celem licznych badań jest opracowanie metody obliczeń pozwalającej na uzyskanie nośności zbliżonych do eksperymentalnych, przy zadowalającym zapasie bezpieczeństwa. Autor pracy porównał wyniki badań zawartych w literaturze z nośnościami obliczeniowymi. Aby wyznaczyć nośność na ścinanie belek dodatkem włókien potrzebna jest wytrzymałość na rozciąganie uzyskana z badań mechaniki pękania betonu. Niestety w przypadku większości publikacji te dane nie są dołączane. Na potrzeby obliczeń przyjęto wytrzymałość z badań własnych. Analizując metodykę wymiarowania proponowaną przez normy można zauważyć podobieństwo między niemiecką DIN oraz RILEM. Nośność na ścinanie wyznaczana jest jako suma nośności betonu bez dodatku włókien oraz nośności uzyskanej poprzez zastosowanie zbrojenia rozproszonego zgodnie z wzorami (2,3). Normy Model Code oraz włoska CNR określają nośności na ścinanie za pomocą jednego członu uwzględniającego obie składowe według wzorów (4).

Nośność na ścinanie belek bez zbrojenia strzemionami według DIN 1992-1-1 [2]

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,cf} \quad (1)$$

gdzie: V_{Rd} – wytrzymałość na ścinanie betonu z uwzględnieniem włókien, $V_{Rd,c}$ – wytrzymałość na ścinanie betonu bez zbrojenia włóknami, $V_{Rd,cf}$ – wytrzymałość na ścinanie betonu z włóknami

Nośność na ścinanie belek bez zbrojenia strzemionami według RILEM TC 162 TDF [3,4]

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{fd} \quad (2)$$

gdzie: V_{Rd} – wytrzymałość na ścinanie betonu z uwzględnieniem włókien, $V_{Rd,c}$ – wytrzymałość na ścinanie betonu bez zbrojenia włóknami, V_{fd} – wytrzymałość na ścinanie betonu z włóknami

Nośność na ścinanie belek bez zbrojenia strzemionami pierwszy i drugi model według Model Code 2010 i CNR-DT 204/2006 [5,6,7]

$$V_{Rd} = V_{Rd,F} \quad (3)$$

gdzie: V_{Rd} – wytrzymałość na ścinanie betonu z uwzględnieniem włókien, V_F – wytrzymałość na ścinanie betonu z włóknami

Nośności na ścinanie belek z dodatkiem włókien przedstawia tabela 2. Zestawiono w niej wyniki dla każdego elementu wraz z wartością siły poprzecznej, przy której nastąpiło zniszczenie przy podporze bez zbrojenia strzemionami V_{EXP} .

Tabela 2. Nośności na ścinanie belek

	V_{Ed}	DIN EN 1992-1-1	RILEM TC 162 TDF	MODEL CODE 1	MODEL CODE 2	CNR-DT 204/2006	V_{EXP}
		$V_{Rd,D}$	$V_{Rd,R}$	$V_{Rd,MC,1}$	$V_{Rd,MC,2}$	$V_{Rd,C}$	
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
	12	13	14	15	16	17	18
1	441,00	133,18	100,58	122,78	111,02	122,78	170,54
2	413,00	133,18	100,58	122,78	113,35	122,78	159,71
3	437,00	129,65	96,35	119,42	106,57	119,42	176,29
4	445,00	129,65	96,35	119,42	105,95	119,42	179,51
5	503,00	136,34	104,37	131,99	101,65	131,99	202,91

6	367,00	136,34	104,37	131,99	112,45	131,99	148,05
7	384,00	131,67	98,77	127,55	108,23	127,55	148,49
8	507,00	131,67	98,77	127,55	99,31	127,55	196,06
9	494,00	140,29	109,10	135,75	106,94	135,75	191,03
10	490,00	140,29	109,10	135,75	107,24	135,75	189,49
11	445,00	298,00	220,26	271,62	230,66	271,62	172,08
12	565,00	298,00	220,26	271,62	212,69	271,62	218,49
13	498,00	277,99	196,25	240,35	217,48	240,35	192,58
14	490,00	277,99	196,25	240,35	218,66	240,35	189,49
15	908,00	285,13	204,82	247,16	172,54	247,16	362,89
16	837,00	285,13	204,82	247,16	179,38	247,16	334,52
17	872,00	261,27	176,19	224,42	162,38	224,42	348,51
18	854,00	261,27	176,19	224,42	173,07	224,42	341,31
19	846,00	267,70	183,90	222,22	173,61	222,22	338,11
20	863,00	267,70	183,90	222,22	172,01	222,22	344,91
21	663,00	254,21	167,71	209,37	183,02	209,37	264,98
22	556,00	254,21	167,71	209,37	195,25	209,37	222,21
23	1081,00	281,24	200,16	245,35	154,63	245,35	432,04
24	1046,00	279,62	198,21	243,80	156,56	243,80	418,05

Źródło: opracowanie własne na podstawie [2-9].

Tabela 3 przedstawia porównanie nośności doświadczalnych V_{EXP} z obliczeniowymi V_{Rd} dla wszystkich norm. Dla każdej belki obliczono współczynnik określający zapas bezpieczeństwa. Aby uznać, że belka jest zaprojektowana poprawnie musi być on większy od 1.0. Im wartość współczynnika bezpieczeństwa jest większa od 1.0, tym belka została zaprojektowana mniej ekonomicznie. Duży zapas nośności pozwalałby na mniejsze zużycie stali w belce i redukcję kosztów materiałowych. Większość wyników potwierdziła, że nośność doświadczalna jest większa niż obliczeniowa.

Tabela 3. Nośności na ścinanie belek

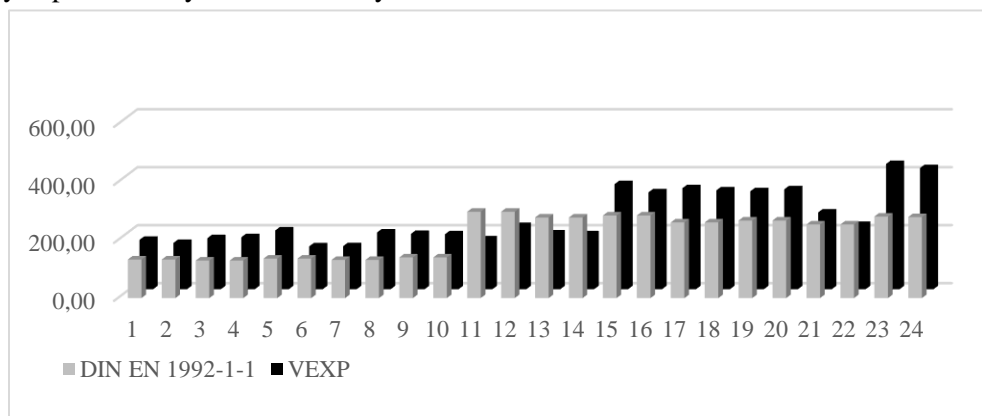
	DIN EN 1992-1-1	RILEM TC 162 TDF	MODEL CODE 1	MODEL CODE 2	CNR-DT 204/2006
	$V_{EXP}/V_{Rd,D}$	$V_{EXP}/V_{Rd,R}$	$V_{EXP}/V_{Rd,MC,1}$	$V_{EXP}/V_{Rd,MC,2}$	$V_{EXP}/V_{Rd,C}$
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
	19	20	21	22	23
1	1,28	1,70	1,39	1,54	1,39
2	1,20	1,59	1,30	1,41	1,30
3	1,36	1,83	1,48	1,65	1,48
4	1,38	1,86	1,50	1,69	1,50
5	1,49	1,94	1,54	2,00	1,54
6	1,09	1,42	1,12	1,32	1,12
7	1,13	1,50	1,16	1,37	1,16
8	1,49	1,99	1,54	1,97	1,54
9	1,36	1,75	1,41	1,79	1,41
10	1,35	1,74	1,40	1,77	1,40
11	0,58	0,78	0,63	0,75	0,63
12	0,73	0,99	0,80	1,03	0,80
13	0,69	0,98	0,80	0,89	0,80
14	0,68	0,97	0,79	0,87	0,79
15	1,27	1,77	1,47	2,10	1,47
16	1,17	1,63	1,35	1,86	1,35
17	1,33	1,98	1,55	2,15	1,55
18	1,31	1,94	1,52	1,97	1,52

Nośność na ścinanie belek z betonu z mikrobrojeniem włóknistym w świetle norm

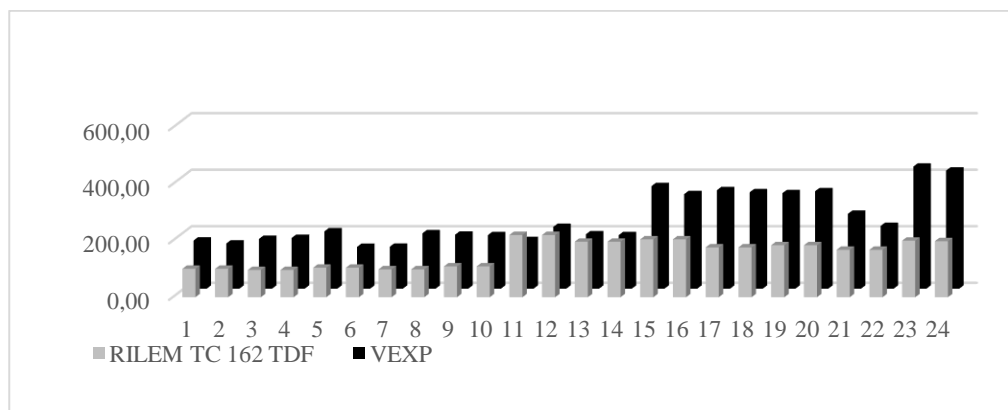
19	1,26	1,84	1,52	1,95	1,52
20	1,29	1,88	1,55	2,01	1,55
21	1,04	1,58	1,27	1,45	1,27
22	0,87	1,32	1,06	1,14	1,06
23	1,54	2,16	1,76	2,79	1,76
24	1,50	2,11	1,71	2,67	1,71

Źródło: opracowanie własne na podstawie [2-9].

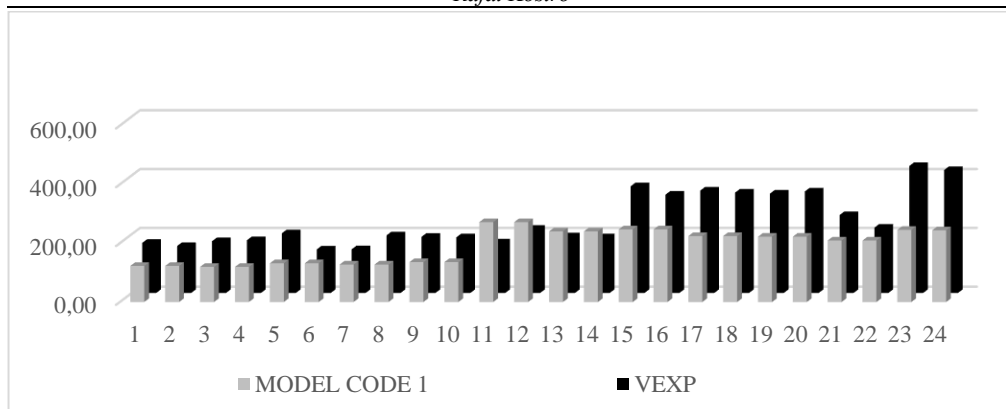
Wyniki obliczeń według poszczególnych norm przedstawiono na rysunkach 3-7. Widzimy na nich zestawienie nośności obliczeniowych (kolumny szare) i doświadczalnych (kolumny czarne) dla każdej z dwudziestu czterech belek. Można zauważyć, że większość próbek uzyskała wynik doświadczalny większy niż obliczeniowy. Wyjątek stanowią elementy numer 11-14 oraz 22, które nie osiągnęły zakładanej nośności. Trend ten jest podobny dla wszystkich norm. Wynika to z zastosowania włókien dłuższych niż odległość w świetle między prętami zbrojenia dolnego. Włókna te spowodowały niewłaściwe ułożenie mieszanki betonowej zaobserwowane w postaci szczelin. Wpłynęło to na uzyskanie niezadowolających wyników nośności na ścinanie pomimo zainiektowania tych pustek zaczynem cementowym.



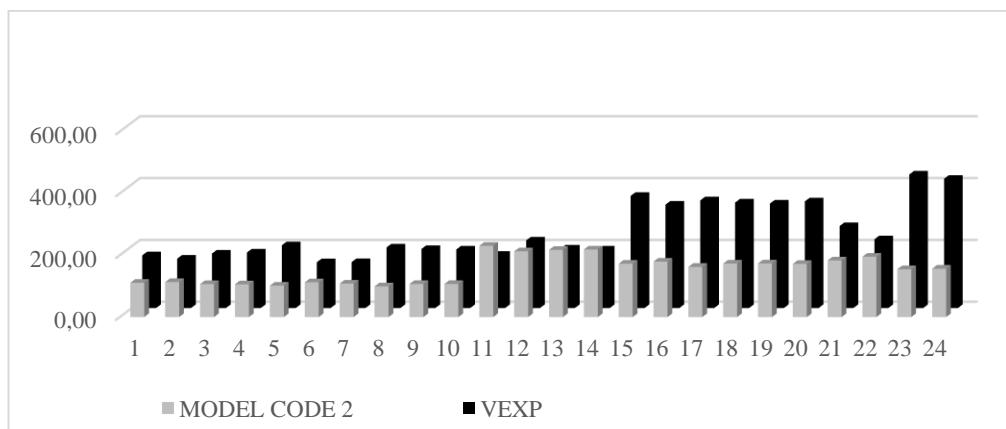
Rysunek 3. Porównanie nośności obliczeniowej uzyskanej zgodnie z normą DIN 1992-1-1 z wynikami doświadczalnymi (opracowanie własne)



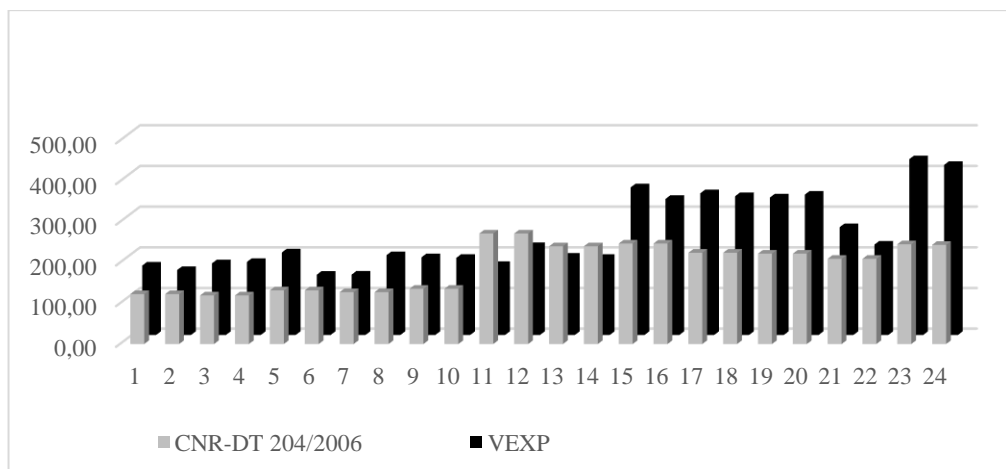
Rysunek 4. Porównanie nośności obliczeniowej uzyskanej zgodnie z normą RILEM TC 162 TDF z wynikami doświadczalnymi (opracowanie własne)



Rysunek 5. Porównanie nośności obliczeniowej uzyskanej zgodnie z normą MODEL CODE model zniszczenia pierwszy z wynikami doświadczalnymi (opracowanie własne)



Rysunek 6. Porównanie nośności obliczeniowej uzyskanej zgodnie z normą MODEL CODE model zniszczenia drugi z wynikami doświadczalnymi (opracowanie własne)



Rysunek 7. Porównanie nośności obliczeniowej uzyskanej zgodnie z normą CNR-DT 204/2006 z wynikami doświadczalnymi (opracowanie własne)

W celu analizy wyników obliczeń sporządzono Tabelę 4. Przedstawiono w niej średni zapas nośności na ścinanie belek betonowych z dodatkiem włókien dla każdej z norm. W zestawieniu pominięto pięć elementów, które zawierały defekty i nie przeniosły wymaganej siły poprzecznej. Średnią najbliższą wartości 1.0 uzyskano w przypadku obliczeń na podstawie niemieckiej normy DIN 1992-1-1 [3]. Na podstawie tego można wnioskować, że odwzorowuje ona najdokładniej rzeczywiste zachowanie belek. Wyniki z największym, średnim zapasem nośności dał drugi model pracy według normy Model Code 2010 [5, 6]. Projektowanie zgodnie z tą normą może powodować przewymiarowanie belek z dodatkiem włókien. Najmniejsze odchylenia zapasów nośności na ścinanie uzyskano dla normy DIN 1992-1-1 [3], natomiast wyniki najdalej od wartości 1.0 odbiegały w przypadku normy amerykańskiej Model Code 2010 [5,6].

Tabela 4. Nośności na ścinanie belek (opracowanie własne)

L.p.	Norma	Ilość wyników poniżej nośności obliczeniowej	Średnia	Odchylenie od wartości 1.0
1	DIN	0	1,31	0,3362
2	RILEM	0	1,80	0,8230
3	MOCEL CODE 1	0	1,45	0,4769
4	MOCEL CODE 2	0	1,87	0,9485
5	CNR	0	1,45	0,4769

Źródło: opracowanie własne na podstawie [2-9].

4. Dyskusja

W literaturze można znaleźć przykłady prac porównujących wyniki doświadczalne z wynikami obliczeniowymi, otrzymanymi na podstawie norm i wzorów proponowanych przez naukowców zajmujących się wykorzystaniem włókien jako zbrojenia na ścinanie belek z betonu. Zauważono, że zbrojenie rozproszone wpływa na ograniczenie zarysowania elementów zginanych [12]. Niewielki jego dodatek powoduje, że do inicjacji zarysowania potrzebne jest większe obciążenie. Jest to wynikiem wzrostu wytrzymałości na rozciąganie betonu z dodatkiem włókien. Zbrojenie rozproszone ogranicza również szerokość rys, co ma niebagatelne znaczenie w kwestii trwałości konstrukcji budowlanych. Szerokość rys jest mniejsza niż graniczna wartość wynosząca 0.3 mm w warunkach normalnej eksploatacji [13]. Stwierdzono również większą nośność na ścinanie belek z dodatkiem włókien niż tych bez tego zbrojenia. Średni zapas bezpieczeństwa w przypadku obliczeń Saidy [12] wyniósł 1.7. Nośność na ścinanie okazała się proporcjonalna do współczynnika zawartości włókien w objętości mieszanki betonowej [13]. Zastosowano również numeryczną metodę nieliniowych elementów skończonych do obliczenia momentu rysującego i nośności na ścinanie oraz ugięć belek. Wyniki uznano za zadowalające w porównaniu z rezultatami doświadczalnymi [12]. Analizując geometrię belek zawartą w literaturze można dojść do wniosku, że duża część z tych elementów miała stosunkowo małe wymiary w porównaniu z rzeczywistymi rozmiarami konstrukcji budowlanych. Ponadto zazwyczaj bada się belki o małym przekroju poprzecznym co ogranicza możliwość przeanalizowania efektu skali [14]. Można jednak zauważyć, że nośność na ścinanie nie jest wprost proporcjonalna do wysokości użytecznej przekroju poprzecznego i po przekroczeniu pewnej wysokości wartość tej nośności rośnie wolniej. Ze względu na brak wystarczającej liczby próbek nie można wyciągnąć potwierdzonych wniosków. Ponadto autorzy badań stosują przewymiarowane zbrojenie podłużne belek

w celu uniknięcia zniszczenia ze względu na zginanie. W projektowaniu konstrukcji betonowych unika się dużych zapasów nośności ze uwagi na oszczędność stali. Wtedy wyniki będą adekwatne do rzeczywistej pracy konstrukcji na ścinanie. Większość belek opisanych w literaturze została wykonana z betonu o normalnej wytrzymałości na ściskanie. Nieliczne badania przeprowadzono przy wykorzystaniu betonów niskiej i wysokiej wytrzymałości. W celu efektywnego wykorzystania wpływu włókien na nośność na ścinanie, najczęściej stosuje się dodatek w ilości 0,5-1,5% w stosunku do objętości mieszanki betonowej. W literaturze dostępne są jednak wyniki badań betonów o zawartości w przedziale 0,2-4,5%. Najczęściej stosuje się włókna o kształcie haczykowatym z zagięciami na końcach. Takie ukształtowanie włókien poprawia ich zdolności zakotwienia i przyczepność do matrycy cementowej, co umożliwi poprawną współpracę betonu i włókien. W literaturze można znaleźć wyniki dla różnych kształtów włókien np. włókna falowane. Ważnym aspektem w badaniach belek jest współczynnik ścinania. Jest on stosunkiem odległości siły od podpory i wysokości użytecznej przekroju poprzecznego. Powinien on być w miarę największy by uniknąć łukowego przekazywania się obciążeń na podporę, bez wzbudzenia belkowej pracy elementu betonowego. Badania z niską wartością współczynnika na ścinanie nie mają zatem sensu w kwestii sprawdzenia nośności włókien. Nośność na ścinanie belek z dodatkiem włókien wzrasta wraz z ilością dodanego zbrojenia rozproszonego. Wpływ ilości zbrojenia rozproszonego, włóknistego w objętości betonu jest większy niż wpływ ich kształtu.

5. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że obliczenia oparte na algorytmach normowych dają nośności na ścinanie belek z betonu ze zbrojeniem rozproszonym, metalicznym większe od nośności doświadczalnych. Pozwala to na bezpiecznie projektowanie konstrukcji z pewnym zapasem bezpieczeństwa. Wielkość tej rezerwy jest zależna od normy, której używamy. Wykonana analiza pozwala na stwierdzenie, że normą pozwalającą na uzyskanie wyników najbardziej zbliżonych do wyników doświadczalnych jest DIN 1992-1-1. Do podobnych wniosków doszła również autorka pracy [14]. Dokładniejsze odwzorowanie rzeczywistości umożliwi projektowanie konstrukcji na mniejsze siły poprzeczne i redukuje wykorzystanie zbrojenia. Najbardziej rozbieżne z rzeczywistością rezultaty otrzymano na podstawie drugiego modelu obliczeniowego normy Model Code 2010. Można stwierdzić, że metody obliczeń zawarte w normach pozwalają na bezpieczne projektowanie belek betonowych z dodatkiem włókien jako zbrojenia na ścinanie.

Literatura

1. Krassowska J., Kosior-Kazberuk M., Berkowski P., *Shear behavior of two-span fiber reinforced concrete beams*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 19(4), 2019, s. 1442-1457
2. Dinh H., Parra-Montesinos G., Wight J., *Shear behavior of steel fiber-reinforced concrete beams without stirrup reinforcement*, ACI Structural Journal, 107(5), 2010, s. 597-606.
3. DIN-EN 1992-1-1.
4. RILEM TC 162-TDF: *Test design methods for steel fibre reinforced concrete*, Materials and Structures, 36, 2003, s. 550-567.
5. RILEM TC-TDF: *Test and design methods for steel fiber reinforced concrete, Uni-axial tension test for steel fiber reinforced concrete*, Materials and Structures, 34, January-February 2001, s. 3-6.

6. Model Code 2010, Final draft, volume 1.
7. Model Code 2010, Final draft, volume 2.
8. CNR-DT 204/2006.
9. *Stahlfaserbeton nach der DafStb-Richtlinie*, Tech-News, nr 2012/07.
10. Mondo E., *Shear capacity of steel fibre reinforced concrete beams without conventional shear reinforcement*, Master of science thesis, Sweden, Stockholm 2011.
11. Guide for design and construction of fiber reinforced concrete structures, National Research Council, Advisory Committee on Technical Recommendations for Constructions.
12. Said M.A., Mahmoud A., Shanour A., *Experimental and analytical shear evaluation of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars*, Construction & Building Materials, 102, 2016, s. 574-591.
13. Singh B., Jain K., *Appraisal of steel fibers as minimum shear reinforcement in concrete beams*, ACI Structural Journal, 111(5), 2014, s. 1191-1202.
14. Lantsoght E., *Database of Shear Experiments on Steel Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrups*, Materials, 12(6), 2019, s. 917.

Nośność na ścinanie belek z betonu z mikrobrojeniem włóknistym w świetle norm

Streszczenie

Celem pracy było porównanie obliczeniowych nośności belek na ścinanie z wynikami doświadczalnymi zawartymi w literaturze. Elementy te wykonano z betonu z dodatkiem włókien stalowych. Analiza pozwoliła na zweryfikowanie czy metody projektowania dobrze odzwierciedlają rzeczywiste zachowanie belek i dają wyniki mniejsze od rzeczywistych. Obliczeniowe nośności uzyskano na podstawie czterech norm: DIN 1992-1-1, RILEM TZ 162-TDF, MODEL CODE 2010 uwzględniając dwa modele pracy oraz CNR-DT 204/2006. Artykuł zawiera wyniki przeprowadzonej analizy wraz z ich dyskusją. Na podstawie tego opracowania sformułowano zalecenia do projektowania belek ze zbrojeniem na ścinanie w postaci włókien. Wynioskowano, że należy używać włókien o długości mniejszej niż odległość w świetle między prętami głównymi, by zapewnić dobre ułożenie mieszanki betonowej w deskowaniu. Stwierdzono, że przy prawidłowym wykonaniu belek uzyskują one nośności na ścinanie większe niż obliczeniowe. Normą, która pozwala uzyskać wyniki najbliższe nośnościom doświadczalnym jest DIN 1992-1-1.

Słowa kluczowe: belki, beton, włókna, ścinanie, normy

Shear capacity of fiber reinforced concrete beams compared to design capacity

Abstract

The aim of the article was to compare design shear capacity of beams with experimental results showed in the literature. These elements are made of steel fiber reinforced concrete. The analysis let to verify design methods included in codes and to check if experimental results are higher than design values. Four codes were used: DIN 1992-1-1, RILEM TZ 162-TDF, MODEL CODE 2010 taking into account two models and CNR-DT 204/2006. The article contains results and analysis of them. Based on that studies, author formulated conclusions and recommendations for designing fiber reinforced concrete beams. Studies shows that fibers should be no longer than distance between main bars to let concrete fill a form. If beam is correctly made, shear capacity is higher than design ones. DIN 1992-1-1 gives the best results in case of economy and safety of constructions.

Keywords: beams, concrete, fibers, shear, codes

Wpływ zastosowania elementów konstrukcyjnych o zmiennej grubości na wyniki doświadczalne odkształceń/naprężeń przykładowych mebli metalowych

1. Wprowadzenie

Materiały charakteryzujące się zmienną grubością występują w różnego rodzaju konstrukcjach takich jak zbiorniki (szczególnie pionowe) [1], statki wodne i powietrzne [2-4], pojazdy samochodowe zarówno jeżeli chodzi o ich poszycie [5-8] jak również o elementy napędowe np. tarcze turbin czy kół zamachowych [9].

Zastosowanie tego rodzaju materiałów związane jest głównie z rosnącymi wymaganiami dotyczącymi obniżania masy konstrukcji, a tym samym zużycia paliwa [10]. Dodatkowo odpowiednie ukształtowanie cienkościennych elementów konstrukcyjnych w tym bardzo często o zmiennej grubości [5-8] poprawia energochłonność ustroju nośnego podczas zderzenia pojazdu wpływając tym samym na bezpieczeństwo podróży. Użycie elementów konstrukcyjnych o zmiennej grubości może doprowadzić również do równomiernego rozkładu naprężeń pod działającym obciążeniem, a w lokalnych obszarach gdzie jest to wymagane poprawić sztywność konstrukcji.

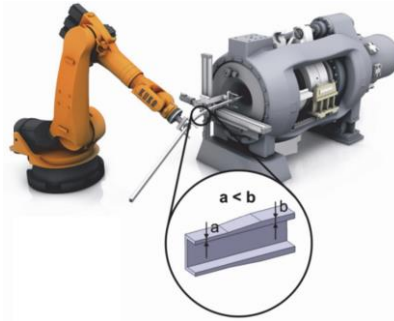
Elementy konstrukcyjne o zmiennej grubości mogą być wytwarzane przy użyciu różnych technologii. Jedną z najstarszych technologii umożliwiającej wytwarzanie materiałów o zmiennej grubości jest proces odlewania. Jednak ze względu na koszt wytworzenia między innymi formy odlewniczej (szczególnie do odlewania ciśnieniowego) proces ten staje się opłacalny dopiero przy produkcji wielkoseryjnej [11]. Jednak możliwości wytwarzania elementów o różnych kształtach w tym elementów o zmiennej grubości są praktycznie bez ograniczeń.

Kolejną technologią wytwarzania elementów konstrukcyjnych o zmiennej grubości jest wyciskanie materiału na gorąco zwane ekstruzją. Technologia ta umożliwia wytwarzanie szerokiej gamy kształtów charakteryzujących się zmiennymi grubościami ścianek na przekroju poprzecznym do osi profilu. Jednak praktycznie każda zmiana wymiarów profilu czy grubości ścianki związana jest z wymianą matrycy. W ostatnim czasie pojawiły się badania nad możliwością modyfikowania wymiarów matrycy podczas procesu wyciskania [12] między innymi w celu osiągnięcia zmiennej grubości materiału nie tylko na przekroju poprzecznym, ale również na pionowym przekroju podłużnym (rys. 1).

¹ Robert.Soltysiak@pbs.edu.pl, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Inżynierii Biomedycznej, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Politechnika Bydgoska, <https://wim.pbs.edu.pl/pl/pracownik/robert-soltysiak>.

² slawomir.c@metalkas.com.pl, Zarządzanie finansami, zarządzanie projektami, Metalkas S.A., www.metalkas.com.pl.

³ piotr@metalkas.com.pl, Biuro Techniczne, Metalkas S.A., www.metalkas.com.pl.



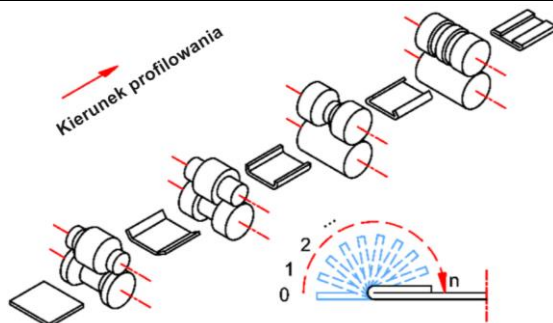
Rysunek 1. Przykład przedstawiający proces wykonywania profili krzywoliniowych i ekstruzji profili o zmiennych przekrojach [12]

Wymieniając technologie umożliwiające kształtowanie elementów o zmiennej grubości należy również wspomnieć o procesie kucia. Możliwość kształtowania elementów konstrukcyjnych o zmiennej grubości ograniczona jest tutaj głównie wielkością pras i młotów, a w przypadku kucia w foremniku również wielkością foremnika. W porównaniu do poprzednich technologii większe organicznie dotyczy tutaj minimalnej grubości kutej ścianki ze względu na szybkie jej wychłodzenie [13].

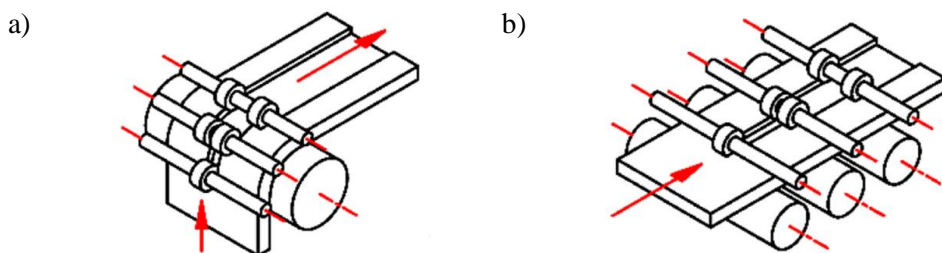
Do materiałów o zmiennej grubości można również zaliczyć elementy wykonane przy użyciu profilowania rolkowego (ang. *roll forming*). W tym przypadku występuje możliwość osiągnięcia zmiennej grubości jedynie na poziomie 100% w stosunku do grubości użytej taśmy (rys. 2). Obrabiana taśma przechodzi przez serię rolek i stopniowo zagina się, aż do momentu zetknięcia się [14]. Jeżeli użyjemy do profilowania taśmę o grubości 1 mm to na bocznych krawędziach otrzymamy zmienną grubość na poziomie 2 mm. Należy zaznaczyć, że w standardowym procesie profilowania rolkowego zagięta na krawędziach taśma blacha (zwana często felcem) nie jest w żaden sposób dodatkowo łączona.

Innym procesem umożliwiającym otrzymanie podobnego kształtem elementu jak w poprzednim rozwiązaniu jest walcowanie rolkowe (ang. *strip profile rolling*). Po raz pierwszy taki sposób walcowania rolkowego taśm zaproponował Kopp i Böhlke [15]. Sposób ułożenia rolek przedstawiono na rysunku 3a. Mniejsze rolki przemieszczały materiał w kierunku poprzecznym przy każdym przejściu i gromadziły go po lewej i prawej stronie taśmy. Ryabkow i in. [16] zaproponowali trochę inny sposób walcowania poprzez zastąpienie jednego dużego walca trzema mniejszymi rolkami (rys. 3b). Uzyskany efekt w postaci taśmy o zmiennej grubości pozostał podobny.

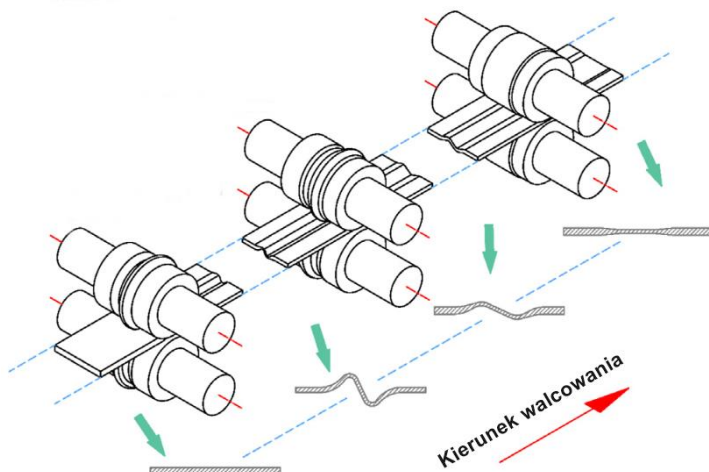
Kolejny sposób wytwarzania taśm o zmiennej grubości rozwijanych z kręgu zaproponowali Wang i inni [17]. W zaproponowanej metodzie zastosowali rolki walcujące w kształcie „S”, które w obszarze tego kształtu powodowały pocienienie taśmy. Następnie taśmę tak obrobioną poddawano prostowaniu w celu uzyskania płaskiej taśmy o zmiennej grubości (rys. 4). W kolejnym artykule Wang i inni [18] zaproponowali metodę wytwarzania taśmy o zmiennej grubości charakteryzującej się większą grubością na brzegach oraz w części środkowej taśmy (rys. 5). Taki rodzaj taśmy uzyskano przy użyciu rolek walcujących najpierw zaginających taśmę na kształt „V” bez zmiany jej grubości (przejście taśmy przez I zestaw rolek). Następnie kolejny zestaw rolek (zestaw II) dokonywał przewężenia na pionowych ściankach „V”. Po uzyskaniu tego przewężenia kolejne zestawy rolek (III oraz IV) prostowały taśmę w celu otrzymania taśmy o zmiennej grubości.



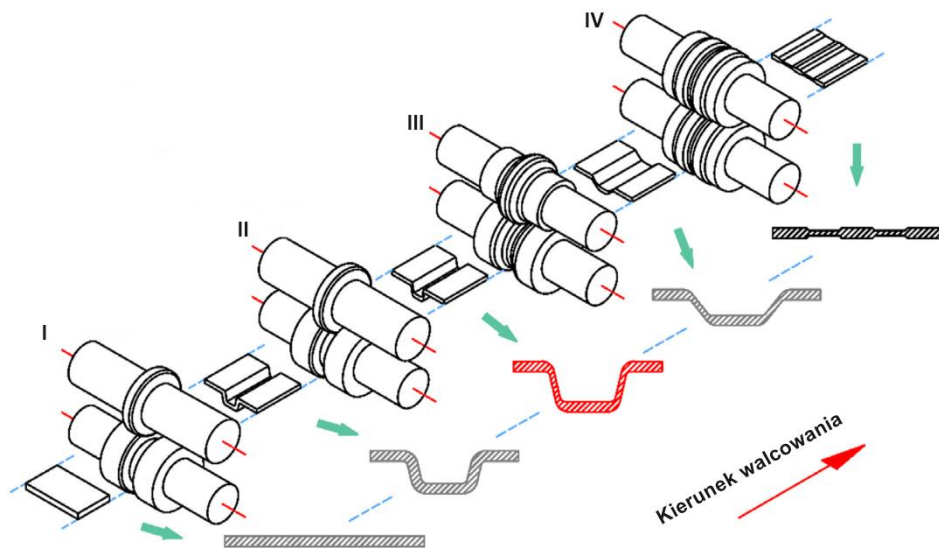
Rysunek 2. Schemat profilowania rolkowego prowadzący do otrzymania zmiennej grubości [18]



Rysunek 3. Przykłady walcowania taśm rozwijanych z kęgów [18]

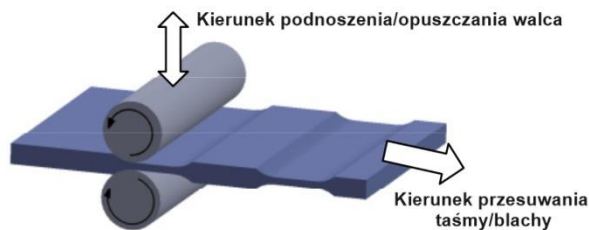


Rysunek 4. Przykład uzyskiwania taśmy o zmiennej grubości poprzez walcowanie taśmy rolkami w kształcie „S” [18]



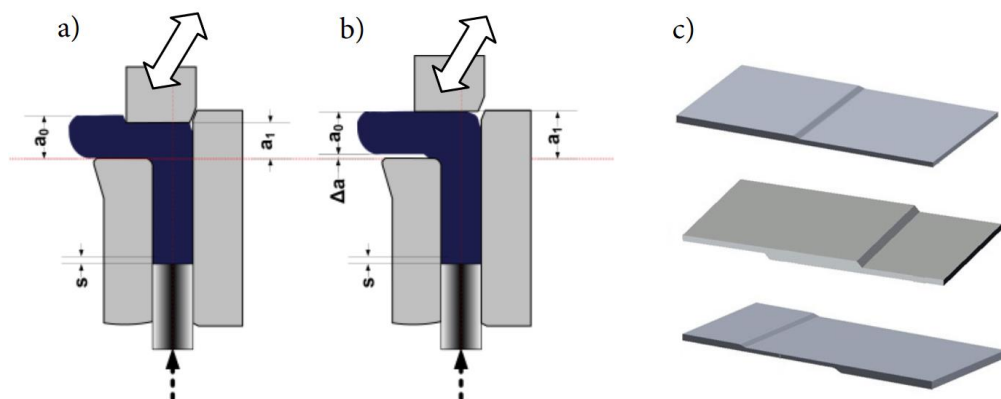
Rysunek 5. Przykład uzyskiwania taśmy o zmiennej grubości poprzez walcowanie taśmy rolkami w kształcie „V” [18]

Przedstawione sposoby walcowania taśm umożliwiają uzyskanie zmiennej grubości na przekroju poprzecznym do kierunku walcowania (przesuwania się taśmy). Rozróżnia się również metody wytwarzania taśm, które będą charakteryzowały się zmienną grubością wzdłuż kierunku walcowania [16, 19]. Zmienną grubość wzdłuż kierunku walcowania uzyskuje się poprzez okresowe podnoszenie oraz opuszczanie walca w celu uzyskania miejscowego pocienienia walcowanej blachy lub taśmy (rys. 6).



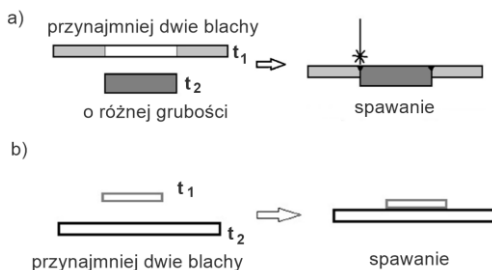
Rysunek 6. Przykład uzyskiwania taśmy o zmiennej grubości w procesie walcowania poprzez podnoszenie/opuszczanie walca [19]

Olejniki i inni [19] zaproponowali metodę pocienienia i pogrubienia płaskich elementów za pomocą przyrostowego kształtowania ścinaniem (rys. 7). Zmienioną grubość a_1 uzyskiwano przez dobór dolnego położenia stempla w stosunku do grubości początkowej blachy a_0 . Obniżenie czoła stempla poniżej grubości powodowało pocienienie blachy (rys. 7a), a zatrzymanie stempla powyżej odległości a_0 o Δa – blachę pogrubiało [19]. Możliwe do uzyskania tą metodą elementy o zmiennej grubości przedstawiono na rysunku 7c.



Rysunek 7. Prezentacja metody zmiany grubości płaskiego elementu poprzez przyrostowe ścinanie: a) pocienienie, b) pogrubienie oraz c) przykładowe elementy o zmiennej grubości [19]

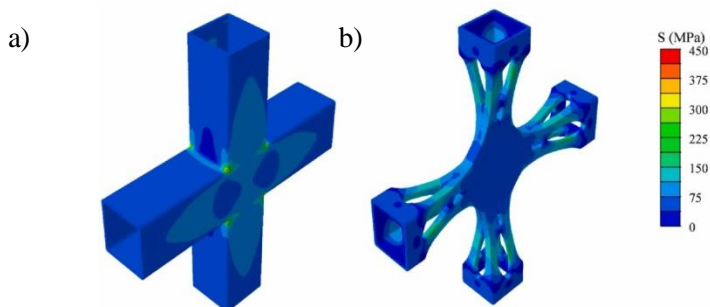
Elementy o zmiennej grubości można uzyskać również używając różnego rodzaju procesów spajania (rys. 8). W przypadku otrzymania elementu o zmiennej grubości według przykładu przedstawionego na rysunku 8a konieczne jest przygotowanie przynajmniej dwóch fragmentów blach o różnej grubości. W drugim przypadku (rys. 8b) elementy o zmiennej grubości powstaną poprzez połączenie tych samych grubości blach, ale różnej szerokości.



Rysunek 8. Przykład elementów o zmiennej grubości wytworzonych przy użyciu procesów spawania: a) połączenie doczołowe b) połączenie przyłgowe, opracowanie własne na podstawie [20]

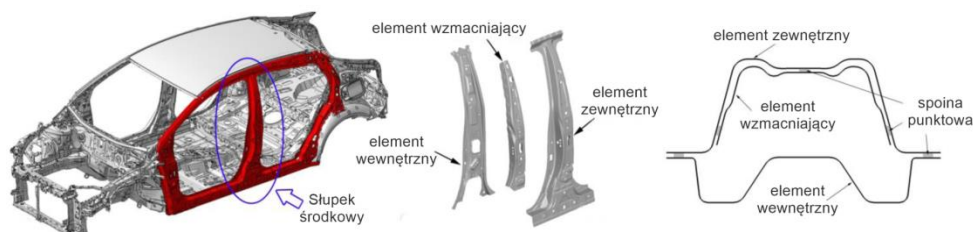
Pisząc o możliwościach wytwarzania materiałów o zmiennej grubości należy również wspomnieć o elementach, które zostają pocienione poprzez zastosowanie obróbki mechanicznej (np. [21]). Obróbką tą może być między innymi frezowanie, toczenie czy szlifowanie. Technologie te jednak przy produkcjach masowych nie są opłacalne.

W ostatnim czasie bardzo popularne stały się technologie addytywne do których można zaliczyć między innymi wydruki 3D (np. [22, 23]). Technologie te charakteryzują się dużym potencjałem jeżeli chodzi o wytwarzanie elementów o zmiennej grubości. Na rysunku 9 przedstawiono przykładową symulację numeryczną standardowo wykonanego węzła krzyżowego spawanego w porównaniu z zoptymalizowanym modelem, który zaprojektowano i wydrukowano metodą SLM (ang. *selective laser melting*). Oba elementy wytworzono ze stali nierdzewnej. W spawanym elemencie spoiny powodują koncentrację naprężeń, natomiast zoptymalizowany węzeł krzyżowy pozwolił zredukować te naprężenia o 60% [24].

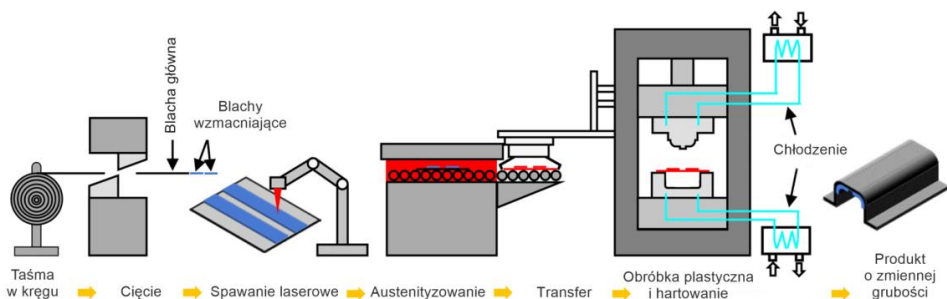


Rysunek 9. Przykładowe porównanie rozkładu naprężeń w krzyżowym złączu spawanym (a) z zoptymalizowanym elementem drukowanym metodą SLM (b) [24]

Przedstawione powyżej rozwiązania dotyczące technologii wytwarzania elementów o zmiennej grubości nie wyczerpują omawianego zagadnienia. W ostatnim czasie bardzo duża ilość elementów o zmiennej grubości powstaje podczas złożonych procesów obróbki. Przykładem może być połączenie operacji tłoczenia i spajania [5] (rys. 10) lub odwrotnie [25]. Występują również procesy łączące kilka operacji: przecinania, spawania, austenitzowania, obróbki plastycznej i hartowania tak jak przedstawiono to na rysunku 11 [5]. Innym procesem jest sukcesywne kucie w celu wytworzenia płaskiego elementu charakteryzującego się zmienną grubością a następnie tłoczenie na gorąco do postaci pokrycia dachowego [26].



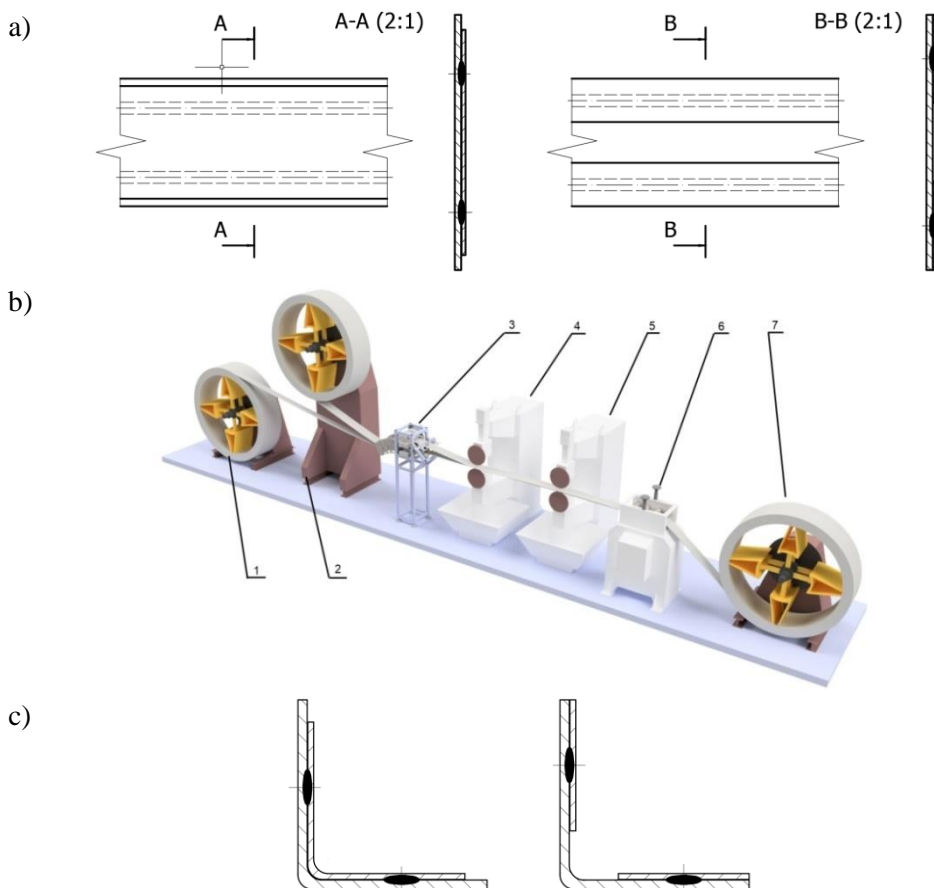
Rysunek 10. Przykładowe zastosowanie elementu o zmiennej grubości powstałego najpierw poprzez wytłoczenie a później spajanie, opracowanie własne na podstawie [5]



Rysunek 11. Przykładowy proces powstawania elementu o zmiennej grubości, opracowanie własne na podstawie [5]

W ramach prac nad projektem pt. „Opracowanie technologii wytwarzania szaf metalowych z materiałów o zmiennej grubości” realizowanego na podstawie umowy numer POIR.01.01.01-00-0713/18 opracowano innowacyjną technologię wytwarzania elementów

o zmiennej grubości (rys. 12b), która umożliwia wytwarzanie taśm o zmiennej grubości (rys. 12a). Zgodnie z opracowaną technologią w celu wytworzenia taśmy o zmiennej grubości należy zamontować na dwóch rozwijakach 1 oraz 2 kręgi taśm o różnych szerokościach (lub też grubościach). Następnie rozwijane taśmy trafiają do prostowarki rolkowej 3, która jest jednocześnie odpowiedzialna za pozycjonowanie tych taśm. Zgrzewarki oporowe 4 i 5 wyposażone w elektrody rolkowe wykonują po jednym ściegu zgrzeiny liniowej lub w razie konieczności punktowej. Tak wykonana taśma trafia na prostowarkę rolkową 6 oraz zostaje nawinięta w krąg na zautomatyzowanym nawijaku 7 w celu przetransportowania do dalszych operacji. Taśma o zmiennej grubości może również trafić bezpośrednio na profilarkę rolkową w celu wykonania kształtownika o zmiennej grubości, którego przykłady znajdują się na rysunku 12c. Proces wytwarzania kształtowników o zmiennej grubości został zgłoszony do Urzędu Patentowego w celu uzyskania patentu [27].



Rysunek 12. Taśma o zmiennej grubości (a), proces jej wytwarzania (b) oraz przykładowe możliwości otrzymania kątownika o zmiennej grubości [opracowanie własne]

Jeżeli chodzi o badania eksperymentalne elementów o zmiennej grubości to dotyczą one głównie opracowywania technologii wykonywania tego typu materiałów. Jest znikoma ilość badań dotyczących zachowania się materiałów o zmiennej grubości w konstrukcjach. Przeprowadzane są np. testy dynamiczne rur o zmiennej grubości mających za zadanie

pochłanianie energii podczas zderzenia [6-8] czy np. zachowania się zbiorników wykonanych z materiałów o zmiennej grubości [1]. W poniższej pracy przedstawiono wyniki porównawcze badań przemieszczeń, odkształceń oraz naprężeń przykładowych mebli metalowych w postaci szafy wykonanej w całości z blachy o grubości 0,8 mm oraz nowej szafy wykonanej z blachy o grubości 0,5 mm, wzmocnionej kątownikami o zmiennej grubości.

2. Obiekt badań oraz metoda badawcza

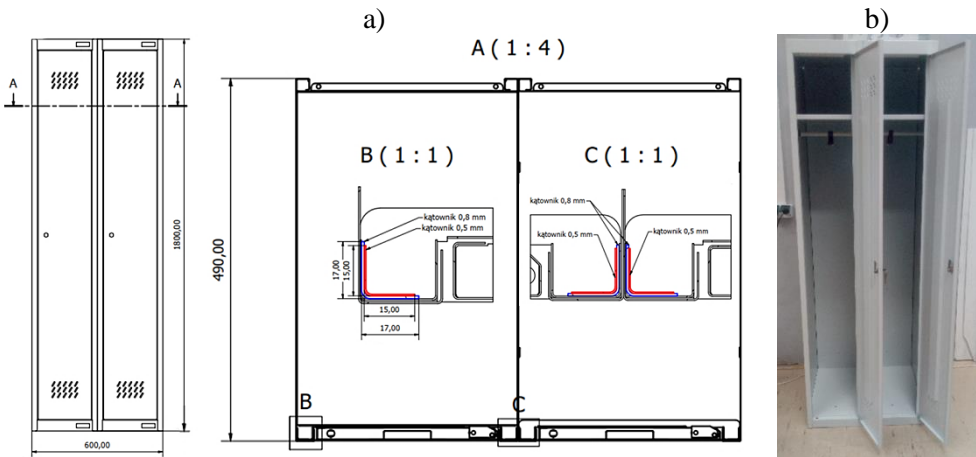
W celu przeprowadzenia badania wpływu zastosowania elementów konstrukcyjnych o zmiennej grubości na wyniki doświadczalne odkształceń/naprężeń przykładowych mebli metalowych wytypowano dwa rodzaje szaf. Na potrzeby niniejszej pracy nazwano te szafy jako typ I oraz typ II. Szafa typu I charakteryzowała się tym, że została wykonana z materiału DC01 (własności zamieszczono w tabeli 1) w postaci blachy o jednej grubości $g_2 = 0,8$ mm. Natomiast szafa typu II została wykonana z różnych grubości blach tego samego gatunku. W szafie typu II zastosowano korpus o grubości blachy $g_1 = 0,5$ mm, który wzmocniono kątownikiem o zmiennej grubości $g_2 = 0,8$ mm + $g_3 = 0,5$ mm. Kształt oraz miejsce umieszczenia kątownika o zmiennej grubości przedstawiono na rysunku 13a i zaznaczono kolorem granatowym oraz czerwonym. Szafa typu I nie posiadała wyżej opisanego wzmocnienia elementem o zmiennej grubości. Przykładową szafę przeznaczoną do badań przedstawiono na rysunku 13b.

Tabela 1. Skład chemiczny oraz własności wytrzymałościowe [28]

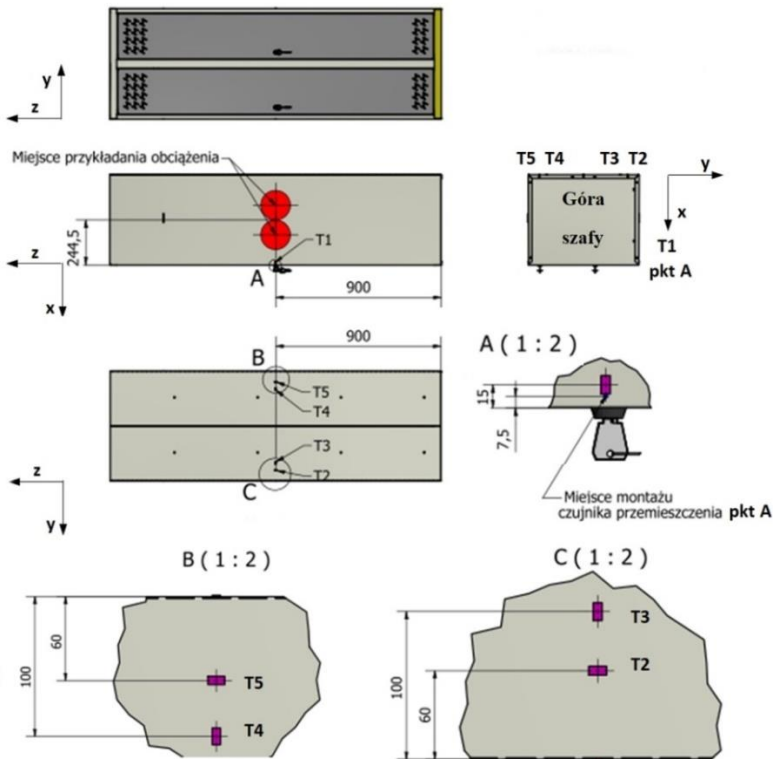
Oznaczenie:		Re, MPa	Rm, MPa	A80,%	Rm, MPa
PN-EN 10027-1	PN-EN 10027-2	140-280	270-410	min. 28*	361,8**
Skład chemiczny					
DC01	1.0330	C, max,%	P, max,%	S, max,%	Mn, max,%
		0.120	0.045	0.045	0.600
* Dla grubości $\leq 0,7$ mm, lecz $> 0,5$ mm dopuszcza się minimalne wartości wydłużenia niższe o 2 jednostki. Dla grubości $\leq 0,5$ mm dopuszcza się minimalne wartości wydłużenia niższe o 4 jednostki. ** Doświadczalna wartość średnia wytrzymałości na rozciągania wyznaczona dla materiału rodzimego dla kilku grubości w zakresie 0,4-0,8 mm.					

Źródło: opracowanie własne na podstawie [28].

Zarówno szafy typu I jak i szafy typu II obciążano w pozycji leżącej kładąc je na lewym boku (od strony zamka) i przykładając obciążenie od strony punktu A (rys. 14). W celu pomiaru odkształceń wytypowano pięć charakterystycznych obszarów na których naklejono tensometry jednoosiowe o bazie pomiarowej 6 x 2 mm. Lokalizację tensometrów zaznaczono na rysunku 14 symbolami T1-T5. Na tym samym rysunku zaznaczono również miejsce pomiaru przemieszczenia „A” przy użyciu czujnika zegarowego.



Rysunek 13. Rysunek 2D szafy typu II z elementami o zmiennej grubości (a) oraz przykładowe zdjęcia szafy wzmacnionej elementami o zmiennej grubości (b) [opracowanie własne]



Rysunek 14. Lokalizacja miejsc pomiaru odkształceń/naprężeń T1-T5, przemieszczeń „A” oraz przykładania obciążenia [opracowanie własne]

Obciążenie przykładano w postaci nakładanych na bok szafy obciążników. Obciążniki stanowiły krążki o średnicy 160 mm, o masie 2,5 kg każdy, które umieszczano w połowie wysokości szafy, dwa obok siebie. Szafę obciążano stopniowo, co 5 kg, do osiągnięcia obciążenia równego 45 kg.

3. Wyniki badań

W ramach prowadzonych badań zanotowano wartości odkształceń z poszczególnych tensometrów oraz wartości przemieszczeń w punkcie A. Wyniki odkształceń oraz przemieszczeń odpowiadające wartości obciążenia dla szafy typu I oraz typu II zestawiono odpowiednio w tabelach 2 i 3

Tabela 2. Wyniki wartości odkształceń oraz przemieszczeń dla poszczególnych obciążeń dla szafy typu I

Szafa Typ I						
Obciążenie	T1	T2	T3	T4	T5	Pkt A
kg	%	%	%	%	%	mm
0	0,0001190	-0,0000286	-0,0001524	0,0000000	-0,0000095	0,00
5	0,0074571	-0,0006476	-0,0005381	0,0000000	-0,0000524	0,69
10	0,0107810	-0,0009048	-0,0010000	0,0000000	-0,0000476	1,38
15	0,0132762	-0,0011190	-0,0013810	0,0000000	-0,0000286	2,05
20	0,0146524	-0,0013048	-0,0016143	0,0000000	-0,0000238	2,69
25	0,0157333	-0,0013905	-0,0012667	0,0000000	-0,0000048	3,32
30	0,0150762	-0,0014048	-0,0008952	-0,0000190	0,0000000	3,89
35	0,0161095	-0,0013619	-0,0002048	-0,0000857	0,0000000	4,45
40	0,0157905	-0,0012810	0,0004905	-0,0001000	0,0000048	4,99
45	0,0156667	-0,0011952	0,0012905	-0,0001905	0,0000000	5,54

Źródło: [opracowanie własne].

Tabela 3. Wyniki wartości odkształceń oraz przemieszczeń dla poszczególnych obciążeń dla szafy typu II

Szafa Typ II						
Obciążenie	T1	T2	T3	T4	T5	Pkt A
kg	%	%	%	%	%	mm
0	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,00
5	0,0074000	0,0000000	0,0011000	-0,0001000	0,0000000	1,02
10	0,0100000	0,0000000	0,0029000	-0,0004000	-0,0001000	1,87
15	0,0123000	-0,0003000	0,0049000	-0,0006000	-0,0002000	2,75
20	0,0157000	-0,0005000	0,0066000	-0,0009000	-0,0002000	3,54
25	0,0224000	-0,0007000	0,0085000	-0,0013000	-0,0003000	4,33
30	0,0293000	-0,0010000	0,0103000	-0,0017000	-0,0003000	5,00
35	0,0380000	-0,0011000	0,0121000	-0,0021000	-0,0003000	5,85
40	0,0469000	-0,0012000	0,0138000	-0,0024000	-0,0003000	6,60
45	0,0583000	-0,0014000	0,0154000	-0,0028000	-0,0004000	7,37

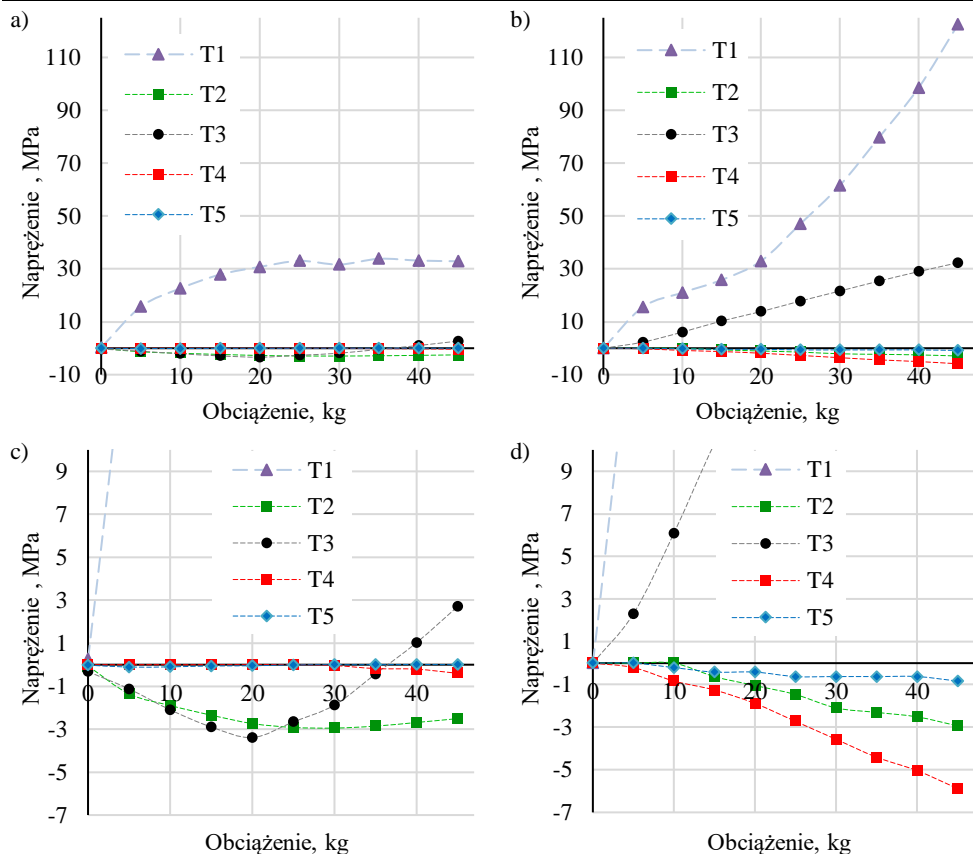
Źródło: [opracowanie własne].

4. Analiza wyników badań

Zgodnie ze wzorem (1) wartości odczytanych odkształceń przeliczono na wartości naprężeń stosując moduł Younga E równy 210 000 MPa. Otrzymane wartości naniesiono na wykresy naprężeń w funkcji przemieszczeń. Wykresy dla szafy typu I oraz dla szafy typu II zestawiono odpowiednio na rysunkach 15a i 15b. W celu zobrazowania zachowania się naprężeń o mniejszych wartościach te same wykresy przedstawiono w ograniczonej skali naprężeń od -7 do 9 MPa (rys. 15c i 15d).

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (1)$$

gdzie: σ – wartość naprężenia, ε – wartość odkształcenia, E – moduł Younga



Rysunek 15. Wykresy naprężeń w funkcji przykładanego obciążenia: a i c – dla szafy typu I oraz b i d dla szafy typu II [opracowanie własne]

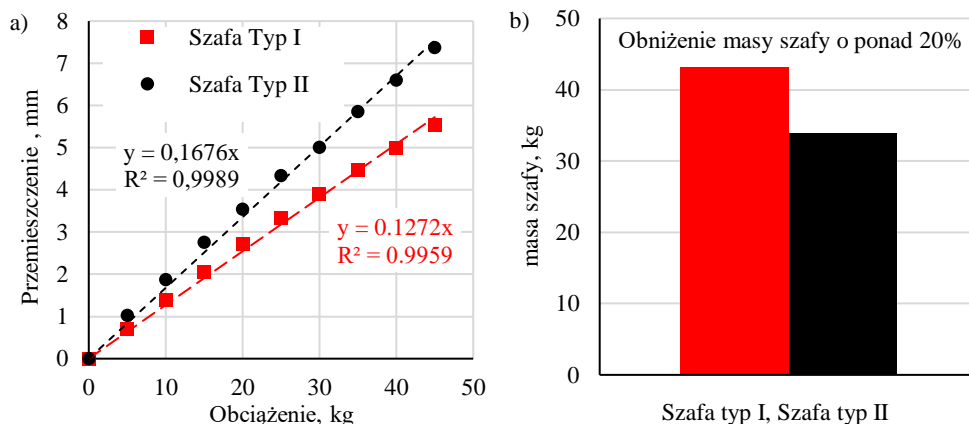
Analizując otrzymane wykresy należy zauważyć, że naprężenia w wyznaczonych obszarach przyjmują wartości dodatnie lub ujemne. Wartości dodatnie świadczą o tym, że zewnętrzne włókna materiału od strony naklejonego tensometru są rozciągane równoległe do dłuższego wymiaru bazy pomiarowej tensometru natomiast wartości ujemne świadczą o tym, że zewnętrzne włókna materiału od strony naklejonego tensometru są ściskane równoległe do dłuższego wymiaru bazy pomiarowej tensometru.

Naprężenia w funkcji obciążenia dla szafy typu II charakteryzują się praktycznie liniowym charakterem (współczynnik determinacji dla danych ze wszystkich tensometrów posiadał wartość $R^2 > 0,9$). Dużą nieliniowość naprężeń w funkcji obciążenia obserwuje się dla wyników dla szafy typu I, szczególnie dla obszarów oznaczonych jako T1, T2 i T3. Do obciążenia 20 kg wartości bezwzględne naprężeń w tych obszarach rosną, następnie powyżej obciążenia 20 kg w obszarach T1 i T2 wartości naprężeń ulegają tylko nieznacznej zmianie. Natomiast dla obszaru T3, powyżej obciążenia 20 kg, wartości bezwzględne naprężeń maleją do 0 MPa i ponownie rosną, ale z przeciwnym znakiem.

Powyzsza sytuacja jest trudna do zinterpretowania. Możliwe, że początkowo w obszarze T3 występowały głównie obciążenia ściskające, natomiast po przekroczeniu obciążenia 20 kg blacha uległa wyboczeniu i tensometr T3 zaczął rejestrować głównie naprężenia pochodzące od zginania. Takiego zjawiska nie obserwuje się w szafie typu II, której

korpus wykonany był z blachy o grubości 0,5 mm. W szafie tej tensometr T3 wskazywał od razu naprężenia rozciągające świadczące prawdopodobnie o wyboczeniu blachy w tym miejscu. W szafie typu II obserwuje się również przeniesienie większego obciążenia, niż w szafie typu I w dolne partie szafy, czyli w obszary T4 i T5. Związane jest to z mniejszą sztywnością całego korpusu szafy a w szczególności jego tylnej części, która nie została usztywniona kątownikami o zmiennej grubości.

Przemieszczenie w punkcie A (rys. 16a) dla obu szaf posiadało praktycznie liniowy charakter (współczynnik determinacji $R^2 > 0,99$). Pomimo usztywnienia korpusu szafy typu II kątownikiem o zmiennej grubości odnotowano większe wartości przemieszczeń dla punktu A niż w szafie typu I. Jednak ze względu na możliwość włamania się do szafy bez narzędzi pomocniczych typu łom uznano te wartości przemieszczeń za dopuszczalne. Dodatkowo stosując korpusy szaf o grubościach blach 0,5 mm wzmocnione kątownikami o zmiennej grubości obniżono całkowitą masę szafy o ponad 20% (rys. 16b).



Rysunek 16. Wykres przemieszczeń w funkcji obciążenia (a) oraz zestawienie mas całkowitych szaf [opracowanie własne]

5. Podsumowanie

W ramach powyższej pracy przedstawiono wyniki porównawcze badań przemieszczeń, odkształceń oraz naprężeń przykładowych mebli metalowych w postaci szafy wykonanej w całości z blachy o grubości 0,8 mm oraz nowej szafy wykonanej z blachy o grubości 0,5 mm, wzmocnionej kątownikami o zmiennej grubości. Uzyskane wyniki oraz przeprowadzona analiza pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków.

Zastosowanie cieńszego korpusu wzmocnionego kątownikami o zmiennej grubości spowodowało przeniesienie naprężeń w obszary dalej oddalone od miejsca obciążenia, czyli w obszary T4 i T5. Dodatkowo zastosowanie elementów konstrukcyjnych o zmiennej grubości spowodowało obniżenie masy szafy a tym samym zmniejszenie materiałochłonności produkcji.

Zmniejszenie stosowanej na cały korpus szafy grubości blachy z 0,8 mm na 0,5 mm z dodatkowym wzmocnieniem w postaci kątownika o zmiennej grubości doprowadziło do zmiany charakteru wartości naprężeń w analizowanych obszarach, szczególnie w obszarze T3, gdzie naprężenia od strony naklejonego tensometru najpierw rosły jako ściskające, następnie zaczęły rosnać jako naprężenia rozciągające.

Dokładne wyjaśnienie charakteru zmian naprężeń pod wpływem narastającego obciążenia wymaga zwiększenia liczby obszarów pomiarowych lub przeprowadzenia analiz numerycznych wyjaśniających zachowanie się blachy w korpusie szaf przy narastającym obciążeniu. W kolejnych badaniach zaplanowano wyjaśnienie powstałego charakteru naprężeń wspomagając się analizami numerycznymi.

Uwagi ogólne

Badania wykonano w ramach projektu pt. „Opracowanie technologii wytwarzania szaf metalowych z materiałów o zmiennej grubości” realizowanego na podstawie umowy numer POIR.01.01.01-00-0713/18. Projekt współfinansowany jest ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego, w ramach Działania 1.1 Projekty B+R przedsiębiorstw Poddziałanie 1.1.1 Badania przemysłowe i prace rozwojowe realizowane przez przedsiębiorstwa Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020.

Literatura

1. Nassernia S., Showkati H., *Experimental Investigation to local settlement of steel cylindrical tanks with constant and variable thickness*, Engineering Failure Analysis, v.118, 2020, s. 104916.
2. Li H., Li Z., Cheng Z., Zhou Z., Wang G., Wang B., Tian K., *A data-driven modelling and optimization framework for variable-thickness integrally stiffened shells*, Aerospace Science and Technology, v.129, 2022, s. 107839.
3. de Faria A.R., de Almeida S.F.M., *Buckling optimization of plates with variable thickness subjected to nonuniform uncertain loads*, International Journal of Solids and Structures, v.40, 2003, s. 3955-3966.
4. Braga D.F.O., Tavares S.M.O., da Silva L.F.M., Moriera P.M.G.P., de Castro P.M.S.T., *Advanced design for lightweight structures: Review and prospects*, Progress in Aerospace Sciences, 69, 2014, s. 29-39.
5. Shi D., Watanabe K., Naito J., Funada K., Yasui K., *Design optimization and application of hot-stamped B pillar with local patchwork blanks*, Thin-Walled Structures, v.170, 2022, s. 108523.
6. Lu R., Liu X., Chen S., Xianlei H., Liu L., *Axial crushing analysis for tailor rolled square tubes with axially graded both wall thickness and material strength*, Thin-Walled Structures, v.117, 2017, s. 10-24.
7. Fang J., Gao Y., Sun G., Zheng G., Li Q., *Dynamic crushing behavior of new extrudable multi-cell tubes with a functionally graded thickness*, International Journal of Mechanical Sciences, v. 103, 2015, s. 63-73.
8. Zheng G., Pang T., Sun G., Wu S., Li Q., *Theoretical, numerical, and experimental study on laterally variable thickness (LVT) multi-cell tubes for crashworthiness*, International Journal of Mechanical Sciences, 118, 2016, s. 283-297.
9. Vullo V., Vivio F., *Elastic stress analysis of non-linear variable thickness rotating disks subjected to thermal load and having variable density along the radius*, International Journal of Solids and Structures, 45, 2008, s. 5337-5355.
10. Allwood J.M., Cullen J.M., *Sustainable Materials: With Both Eyes Open*, UIT Cambridge, 2012.
11. Dudek P., Białoń J., Piwowońska J., Walczak W., Wrzała K., *The impact on the cost of making high pressure die castings with multi-cavity die and vacuum assistance*, Vacuum, v.210, 2023, s. 111859.
12. Selvaggio A., Haase M., Ben Khalifa N., *Extrusion of Profiles with Variable Wall Thickness*, Procedia CIRP, 18, 2014, s. 15-20.

13. Skarbiński M., Skarbiński J., *Technologiczność konstrukcji maszyn*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1982.
14. Brunet M., Lay B., Pol P., *Computer aided design of roll-forming of channel sections*, Journal of Materials Processing Technology, 60, 1996, s. 209-214.
15. Kopp R., Böhlke P., *A New Rolling Process for Strips with a Defined Cross Section*, CIRP Annals, 52, 2003, s.197-200.
16. Ryabkov N., Jackel F., van Putten K., Hirt G., *Production of blanks with thickness transitions in longitudinal and lateral direction through 3D-Strip Profile Rolling*, Int J Mater Form, 1, 2008, s. 391-394.
17. Wang X.G., Liu X.H., Sai W., Zhi Y., *Experiment and simulation to rolled profile strip with variable thicknesses in lateral direction*, Journal of Materials Processing Technology, v. 258, 2018, s. 259-270.
18. Wang S., Hu X., Wang X., Chen J., Liu X., Li C., *Design and experiment of V-shaped variable thickness rolling for rolled profiled strips*, Journal of Materials Research and Technology, 15, 2021, s. 4381-4396.
19. Olejnik L., Rosochowski A., *Wytwarzanie wielofunkcyjnych blach do tłoczenia za pomocą przyrostowego odkształcania w kanale kątowym*, Obróbka Plastyczna Metali, 26(4), 2015, s. 307-324.
20. Merklein M., Johannes M., Lechner M., Kuppert A., *A review on tailored blanks – Production, applications and evaluation*, Journal of Materials Processing Technology, 214, 2014, s. 151-164.
21. Zadpoor A.A., Sinke J., Benedictus R., *Experimental and numerical study of machined aluminum tailor-made blanks*, Journal of Materials Processing Technology, 200, 2008, s. 288-299.
22. Kumekawa N., Mori Y., Tanaka H., Matsuzaki R., *Experimental evaluation of variable thickness 3D printing of continuous carbon fiber-reinforced composites*, Composite Structures, v.288, 2022, s. 115391.
23. Zhou Y., Wen W., Cui H., *Spatial modelling of 3D woven variable thickness composite plate at the mesoscopic scale*, Composite Structures, v.239, 2020, s. 111946.
24. Huang S., Deng X., Wang Y., *Experimental investigations of optimized 3D Printing Planar X-joints manufactured by stainless steel and high-strength steel*, Engineering Structures, v.285, 2023, s. 116054.
25. Wróbel I., Firgane D., *Symulacje procesów tłoczenia na gorąco wytłoczek o zmiennej grubości*, Mechanik, R. 90, nr 11, 2017, s. 991-993.
26. Nakagawa Y., Mori K., Murata Y., Maeno T., *Reduction in length of transient region in successive forging of tailored blank for hot stamping of ultra-high strength steel parts*, Procedia Engineering, 207, 2017, s. 693-698.
27. Cieślak S., Sołtysiak R., *Kształtownik metalowy i sposób wytwarzania kształtownika metalowego*. P.441858.
28. PN-EN 10130:2009 - *Wyroby płaskie walcowane na zimno ze stali niskowęglowych do obróbki plastycznej na zimno – Warunki techniczne dostawy*.

Wpływ zastosowania elementów konstrukcyjnych o zmiennej grubości na wyniki doświadczalne odkształceń/naprężeń przykładowych mebli metalowych

Streszczenie

Zarówno na rynku krajowym, jak i światowym, wykorzystywane są elementy konstrukcyjne charakteryzujące się zmienną grubością. Elementy te wykonuje się z zastosowaniem różnych technik m. in. spajania, walcowania czy poprzez obróbkę ubytkową. Elementy o zmiennej grubości stosowane są w obszarach, w których występują lub mogą wystąpić nadmierne obciążenia lub wymagana jest podwyższona sztywność. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań dotyczących szaf w których zastosowano elementy o zmiennej grubości w celu zmniejszenia ich masy a tym samym materiałochłonności produkcji. Do przeprowadzenia badań

wykonano szafę z blachy o grubości 0,8 mm oraz nową szafę z blachy o grubości 0,5 mm, którą wzmocniono kątownikiem o zmiennej grubości. W ramach testów mierzono przemieszczenie krawędzi ścianek bocznych oraz odkształcenie wybranych obszarów konstrukcji obu szaf pod stopniowo zwiększonym obciążeniem. Przemieszczenie mierzono przy użyciu czujnika zegarowego natomiast odkształcenie przy użyciu tensometrii oporowej. Otrzymane wyniki zestawiono na wykresach przemieszczenia oraz naprężenia w funkcji przykładowego obciążenia. W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano porównywalne wartości przemieszczeń krawędzi ścianek bocznych obu szaf przy zmniejszeniu masy nowej szafy o ponad 20%.

Słowa kluczowe: zmienna grubość, szafa, przemieszczenie, naprężenie

The influence of the use of structural elements of variable thickness on the experimental results of strain/stress of exemplary metal furniture

Abstract

Both on the national and global market, structural elements characterized by variable thickness are used. These elements are made using various techniques, e.g. by welding, rolling or by machining. Elements with variable thickness are used in areas where excessive loads occur or may occur or increased stiffness is required. This paper presents the results of research on cabinets in which elements of variable thickness were used in order to reduce their weight and thus the material consumption of production. For the tests, a cabinet made of 0.8 mm thick sheet metal and a new cabinet made of 0.5 mm thick sheet metal, which was reinforced with an angle bar of variable thickness, were made. As part of the tests, the displacement of the edges of the side walls and the strain of selected areas of the construction of both cabinets were measured under gradually increasing loads. Displacement was measured using a dial indicator, while strain was measured using resistance strain gauges. The obtained results were presented on the diagrams of displacement and stress as a function of the applied load. As a result of the conducted tests, comparable values of displacements of the edges of the side walls of both cabinets were obtained, while reducing the weight of the new cabinet by over 20%.

Keywords: variable thickness, cabinet, displacement, stress

Algorytm automatycznej analizy obrazu struktury na zglądach metalograficznych stopów z wyraźną granicą ziaren

1. Wprowadzenie

Konieczność oceny struktury metalograficznej stopu występuje w wielu branżach produkcyjnych, szczególnie tych gdzie stosuje się obróbkę plastyczną. Struktura stopu rzutuje bezpośrednio na parametry wytrzymałościowe materiału między innymi takie jak wytrzymałość na rozciąganie, granica plastyczności oraz maksymalne wydłużenie. Badania metalograficzne są nieodzowne dla zapewnienia odpowiedniej jakości technologicznej oraz niezawodności wyrobu. Należy zauważyć, że analiza próbek metalograficznych jest długotrwała oraz wymaga doświadczonego operatora, a mimo to wciąż istnieje ryzyko popełnienia błędu, a także niespójnej interpretacji wyników.

Dla skrócenia czasu analiz, a także zapewnienia wysokiej powtarzalności wyników zaproponowano algorytm, który pozwala na automatyzację procesu analizy obrazu struktury metalograficznej. Wyniki osiągane dzięki zastosowaniu proponowanego algorytmu służącego do oceny obrazu struktury metalograficznej nie są zależne od interpretacji osoby wykonującej analizę, a także są dokładniejsze niż uzyskiwane metodami przybliżonymi. Należy jednak zauważyć, że proponowany algorytm wymaga uważnej kalibracji oraz testów w fazie wdrożeniowej, jednak po jej zakończeniu analiza kolejnych próbek przebiega w sposób szybki i powtarzalny. Proponowany algorytm działa w oparciu o środowisko MathWorks MATLAB.

W dalszej części artykułu przedstawiono podstawowe operacje morfologiczne zastosowane w proponowanym algorytmie oraz wybrane metody segmentacji wykorzystywane w analizie obrazów. Omówiono także metody charakteryzacji pola powierzchni ziaren wykorzystywane w badaniach metalograficznych. Następnie przedstawiono sposób działania algorytmu, a także scharakteryzowano parametry ziaren, które mogą zostać poddane analizie. Przedstawiono też proces przygotowania próbek, a także na przykładzie porównano zastosowanie metody przybliżonej oraz przedstawianego algorytmu.

Celem artykułu jest pokazanie pewnych możliwości algorytmu analizy struktury metalograficznej stopów z wyraźną granicą ziaren na tle operacji morfologicznych w analizie obrazów, metod segmentacji obrazu oraz metod oceny zglądów metalograficznych.

2. Operacje morfologiczne w analizie obrazów

Morfologia matematyczna jest to nieliniowy sposób przetwarzania obrazów cyfrowych wywodzący się z teorii zbiorów Minkowskiego, którego autorami są G. Matheron

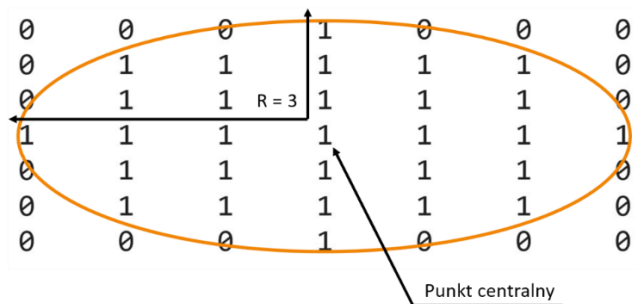
¹ mateusz.miksza@s.tu.koszalin.pl, Szkoła Doktorska, Politechnika Koszalińska, <https://www.tu.koszalin.pl>.

² lukasz.bohdal@tu.koszalin.pl, Katedra Mechaniki i Konstrukcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Koszalińska, <https://www.tu.koszalin.pl>.

³ katarzyna.koska@s.tu.koszalin.pl, Szkoła Doktorska, Politechnika Koszalińska, <https://www.tu.koszalin.pl>.

oraz J. Serra [1]. Najczęściej wykorzystywana jest do obróbki obrazów binarnych, jednak może być także rozszerzona na obrazy w skali szarości. W przedstawionej pracy wykorzystano jedynie przetwarzanie obrazów binarnych.

Operacje morfologiczne są operacjami dwuargumentowymi, gdzie jednym z argumentów jest przetwarzany obraz, a drugim element strukturalny, stanowiący geometryczną reprezentację elementu, który używany jest do przekształcenia obrazu [2]. Element strukturalny w formie dysku o promieniu równym trzem pikselom przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1. Element strukturalny w formie dysku o promieniu równym trzem pikselom [opracowanie własne]

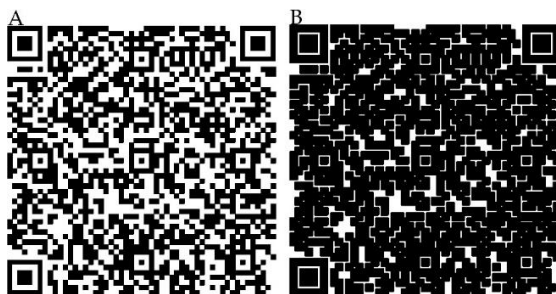
Każdy element strukturalny musi posiadać punkt centralny, względem którego określone są współrzędne pozostałych jego punktów. Operacje morfologiczne polegają na porównywaniu wartości pikseli obrazu w sąsiedztwie punktów elementu strukturalnego. Do podstawowych operacji morfologicznych zalicza się erozję oraz dylatację obrazu.

W przypadku operacji erozji, do każdego pikseli obrazu przykładany jest element strukturalny w jego punkcie centralnym. Jeżeli jakikolwiek piksel znajdujący się w obszarze pokrytym przez element strukturalny ma wartość 0, wówczas również piksel, do którego przyłożony był punkt centralny elementu strukturalnego przyjmuje wartość 0 [3, 4]. Zapis matematyczny operacji erozji przedstawia zależność (1) [4].

$$A \ominus B = \{z | (B_z \subseteq A)\} \quad (1)$$

gdzie: A – zbiór punktów analizowanego obrazu, B – zbiór punktów elementu strukturalnego, z – zbiór punktów wynikowych.

Przykład zastosowania erozji przedstawiono na rysunku 2. Operacja została przeprowadzona z wykorzystaniem elementu strukturalnego w kształcie dysku o promieniu $r = 7$ pikseli.



Rysunek 2. Przykład działania operacji erozji białych obszarów z wykorzystaniem elementu strukturalnego w kształcie dysku, $r = 7$ pikseli. A – obraz oryginalny, B – obraz po przekształceniu [opracowanie własne]

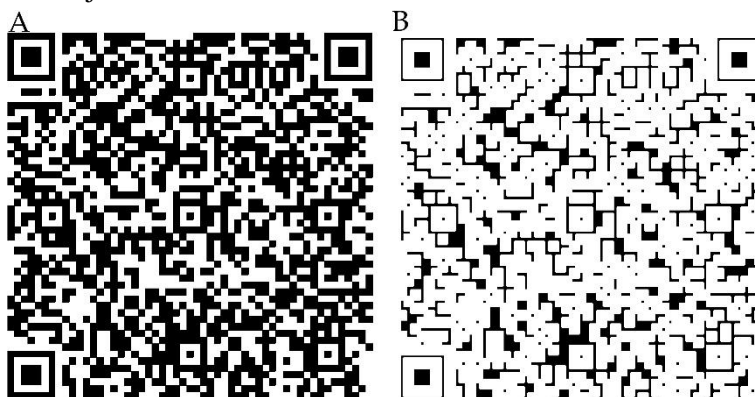
Erozja wykorzystywana jest do otwierania obszarów na obrazie, a także do usuwania szumu, ponieważ, wszystkie obiekty mniejsze niż element strukturalny są usuwane z obrazu.

Dylatacja jest działaniem odwrotnym do erozji, również polega na przykładaniu elementu strukturalnego do każdego z pikseli obrazu i porównaniu wartości pikseli w sąsiedztwie. Jednak różnica polega na tym, że jeżeli jakikolwiek piksel przykryty przez element strukturalny ma wartość 1, piksel, do którego przyłożono punkt centralny, również przyjmuje wartość 1 [3, 4]. Zapis matematyczny operacji dylatacji przedstawia zależność (2) [4].

$$A \oplus B = \{z | (\hat{B})z \cap A \neq \emptyset\} \quad (2)$$

gdzie: A - zbiór punktów analizowanego obrazu, B - zbiór punktów elementu strukturalnego, z - zbiór punktów wynikowych.

Przykład zastosowania dylatacji przedstawiono na rysunku 3. Operacja została przeprowadzona z wykorzystaniem elementu strukturalnego o wymiarach tożsamy jak w przypadku erozji.



Rysunek 3. Przykład działania operacji dylatacji białych obszarów z wykorzystaniem elementu strukturalnego w kształcie dysku, $r = 7$ pikseli. A – obraz oryginalny, B – obraz po przekształceniu [opracowanie własne]

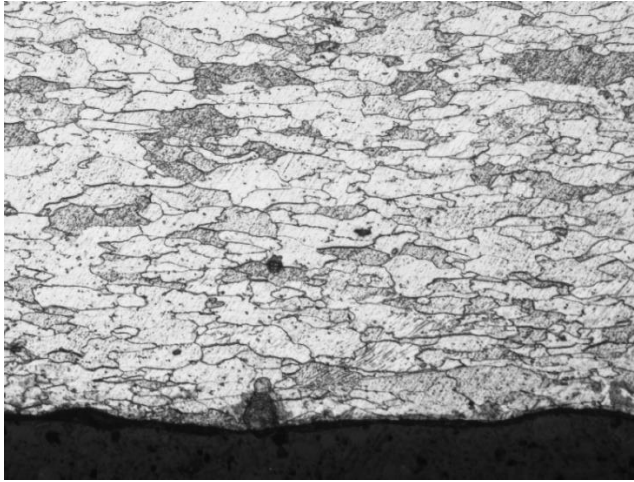
Zastosowaniem dylacji jest domykanie obszarów na obrazie, a także wypełnianie drobnych ubytków, gdyż przestrzenie mniejsze niż element strukturalny są wypełniane.

Pozostałe operacje morfologiczne jak na przykład otwarcie, bądź zamknięcie obszaru na obrazie stanowią odpowiednio kombinację operacji erozji oraz dylatacji.

3. Metody segmentacji obrazu

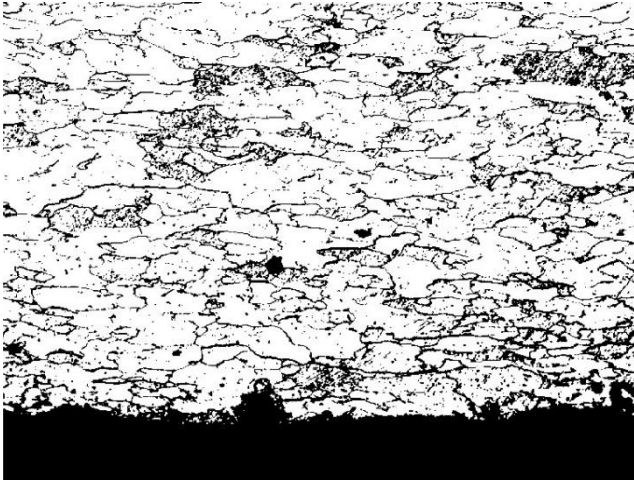
Segmentacja obrazu jest to proces przekształcenia obrazu kolorowego, bądź w skali szarości do formy obrazu binarnego, gdzie każdy z pikseli może przyjmować jedynie wartość 0 – element tła, bądź 1 – element pierwszego planu.

Dla zobrazowania efektów uzyskanych z zastosowaniem różnych metod segmentacji wykorzystano obraz przedstawiony na rysunku 4.



Rysunek 4. Obraz oryginalny wykorzystany do porównania efektów segmentacji z wykorzystaniem różnych metod [opracowanie własne]

Podstawową metodą binaryzacji obrazu, stosowaną w wielu programach graficznych jest metoda Otsu, która nazwę zawdzięcza nazwisku jej twórcy [5]. Jest to metoda polegająca na globalnej binaryzacji obrazu na podstawie histogramu wartości skali szarości. Algorytm dąży do minimalizacji sumy ważonej wariancji obiektów stanowiących tło oraz pierwszy plan. Metoda Otsu jest powszechnie stosowana ze względu na prostotę oraz bardzo wysoką efektywność [6]. Efekt segmentacji obrazu z wykorzystaniem metody Otsu przedstawiono na rysunku 5.



Rysunek 5. Obraz poddany segmentacji metodą Otsu [opracowanie własne]

Innym podejściem jest metoda adaptacyjna oparta na lokalnych statystykach pierwszego rzędu. W odróżnieniu od metody Otsu histogram nie jest analizowany globalnie. Zamiast tego wartość każdego piksela obliczana jest adaptacyjnie, na podstawie wartości pikseli znajdujących się w jego sąsiedztwie [7]. Efekt segmentacji przedstawiono na rysunku 6. Zauważalne są znaczne różnice, dlatego też dobór metody segmentacji powinien być uzależniony od wybranego celu analizy obrazu.



Rysunek 6. Obraz poddany segmentacji metodą adaptacyjną z wykorzystaniem lokalnych statystyk pierwszego rzędu [opracowanie własne]

Metoda aktywnego konturu polega na iteracyjnym przesuwaniu krawędzi uprzednio zdefiniowanej maski w kierunku krawędzi obiektów znajdujących się na obrazie [8]. Efekt segmentacji po wykonaniu dziesięciu tysięcy powtórzeń przedstawiono na rysunku 7.

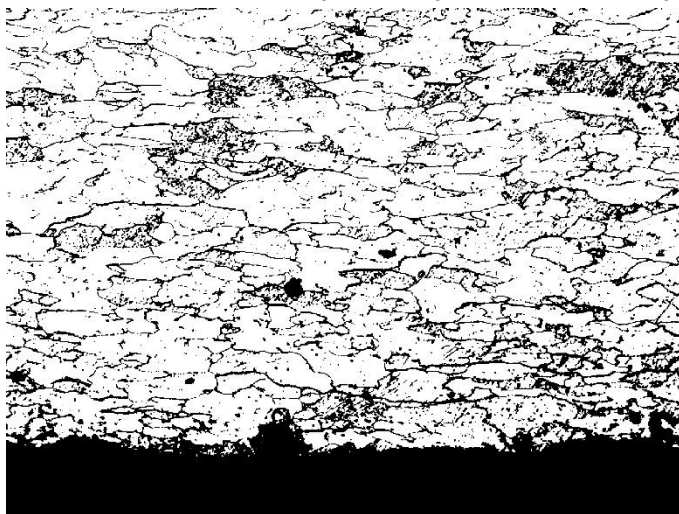


Rysunek 7. Obraz poddany segmentacji metodą aktywnego konturu, stan po 10000 iteracji [opracowanie własne]

Zauważalna jest znacznie gorsza jakość segmentacji obrazu, która wyklucza użycie tej metody dla analizy omawianych obrazów.

Do segmentacji obrazów można wykorzystać także algorytm centroidów k -średnich (ang. *k-means clustering*). Jest to narzędzie wywodzące się z teorii przetwarzania sygnałów, które pozwala na przyporządkowanie n obserwacji (w przypadku analizy obrazów wartości przypisanej do każdego piksela) do k grup (w przypadku obrazu binarnego grupy obiektów tła lub pierwszego planu, ale możliwe jest wyodrębnienie większej liczby grup). Algorytm dąży do minimalizacji wariancji wewnątrzklasowej w każdej z grup [9].

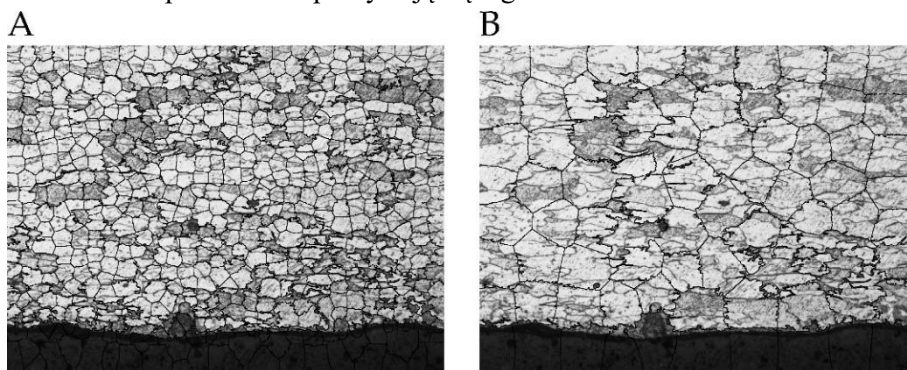
Efekt segmentacji przedstawiono na rysunku 8. Należy zauważyć, że jest on tożsamy z efektem uzyskanym dzięki zastosowaniu metody Otsu, gdyż w przypadku zastosowania jedynie dwóch klas, do których przyporządkowuje się obserwacje algorytmy te działają niemal identycznie, dążąc do minimalizacji wariancji wewnątrzklasowej.



Rysunek 8. Obraz poddany segmentacji metodą centroidów k -średnich (*k-means clustering*) [opracowanie własne]

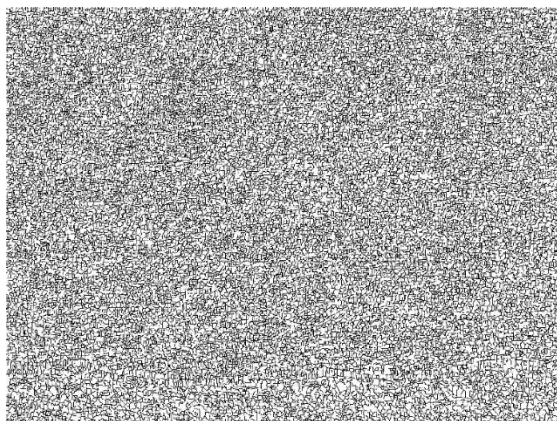
Możliwe jest także wykorzystanie algorytmu grupującego piksele na obrazie biorąc pod uwagę ich wartości. Jest to tak zwana metoda superpikseli [10]. W kontekście analizy zglądów metalograficznych metoda ma ograniczone zastosowanie, gdyż wymaga uprzedniego zdefiniowania, na ile regionów należy podzielić obraz. W odróżnieniu od metody centroidów k -średnich, gdzie definiuje się liczbę klas elementów, zdefiniowanie liczby elementów może być bardzo utrudnione lub wręcz niemożliwe.

Rysunek 9 przedstawia efekt segmentacji z wykorzystaniem metody superpikseli, przy podziale obrazu na sześćset oraz na osiemdziesiąt regionów. W obu przypadkach wyznaczone linie podziału nie pokrywają się z granicami ziaren.



Rysunek 9. Obraz poddany segmentacji metodą superpikseli z wykorzystaniem: A – sześciuset elementów, B – osiemdziesięciu elementów [opracowanie własne]

Kolejną metodą segmentacji obrazu jest metoda wododziału. Nazwa nawiązuje do terminologii geologicznej, gdzie wododział oznacza linię oddzielającą dorzecza lub zlewnie mórz. W tej metodzie obraz jest analogią mapy topograficznej. Im jaśniejszy kolor, tym wyższej wysokości odpowiada. Algorytm wypełnia obszary zaczynając od najniższych (najciemniejszych), aż do wyznaczenia linii podziału. Każdy z wyznaczonych w ten sposób regionów stanowi odrębną jednostkę, która oddzielona jest od innych linią o szerokości jednego piksela [11]. Do każdej jednostki przypisana jest unikalna etykieta. Zastosowanie metody do nieprzetworzonych obrazów prowadzi do zjawiska przesegmentowania obrazu (ang. *oversegmentation*), co pokazano na rysunku 10.



Rysunek 10. Obraz poddany segmentacji metodą wododziału z wyraźnym widocznym zjawiskiem przesegmentowania [opracowanie własne]

Do segmentacji obrazu można także wykorzystać metody uczenia maszynowego, na przykład algorytm samouczący WEKA, który został opracowany na uniwersytecie w Waikato w Nowej Zelandii [12] i jest dostępny w pakiecie programów do naukowej analizy obrazów Fiji [13]. Do poprawnego działania algorytm wymaga ręcznego zdefiniowania klas, do których mają zostać przypisane elementy na obrazie. Następnie automatycznie dokonuje segmentacji wielu obrazów. Efekt segmentacji przedstawiono na rysunku 11.



Rysunek 11. Obraz poddany segmentacji z wykorzystaniem algorytmu samouczącego WEKA [opracowanie własne]

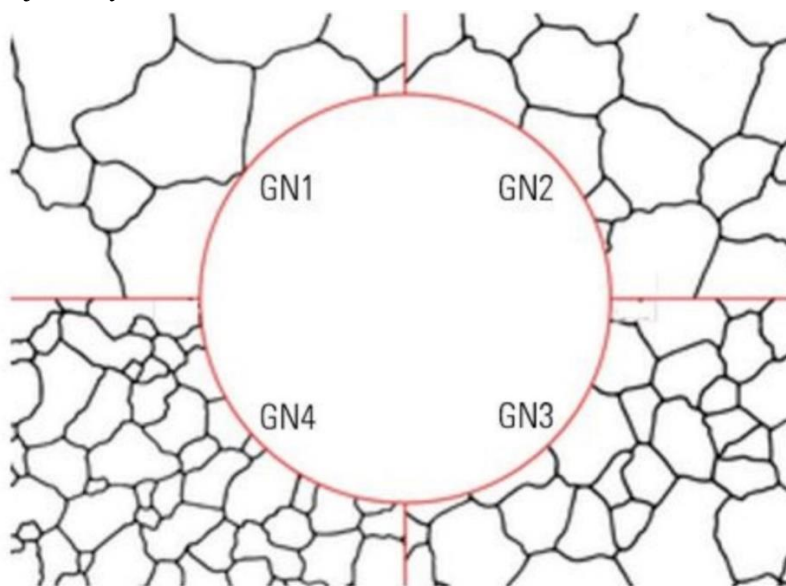
Szeroki wybór metod segmentacji obrazu pozwala na dobór odpowiedniej metody w zależności od potrzeb i stawianych celów.

4. Metody oceny zglądów metalograficznych

Metody analizy zglądów metalograficznych w celu określenia średniej wielkości ziaren określają normy ISO 643:2019 [14] oraz ASTM E112-13(2021) [15]. Opisują one metody przybliżone, spośród których można wyróżnić metodę porównawczą, metodę liniową, oraz metodę planimetryczną.

4.1. Metoda porównawcza

Polega na manualnym porównaniu obrazu struktury metalograficznej ze wzorcem. Wykorzystuje się do tego celu siatki porównawcze wbudowane w okular mikroskopu, lub nanoszone cyfrowo na cyfrowy obraz zglądu metalograficznego. Przykładową siatkę porównawczą pokazano na rysunku 12. Metoda charakteryzuje się wysoką szybkością analizy, jednak jest nieprecyzyjna, ze względu na silną zależność od interpretacji osoby dokonującej analizy.



Rysunek 12. Przykładowa siatka do oceny średniej wielkości ziaren wykorzystywana w metodzie porównawczej [16]

4.2. Metoda liniowa

Metoda polega na naniesieniu wzoru geometrycznego w postaci linii na obraz zglądu metalograficznego [14, 15], następnie wyznaczana jest średnia długość przecięcia l , którą definiuje się jako (3) [14, 15]:

$$l = \frac{1}{P_L} = \frac{1}{N_L} \quad (3)$$

gdzie: P_L – liczba ziaren przeciętych przez wykreśloną linię na jednostkę długości, N_L – liczba punktów przecięcia granic ziaren z wykreśloną linią na jednostkę długości.

Znając wartość średniej długości przecięcia l , możliwe jest wyznaczenie indeksu wielkości ziaren G , który opisuje zależność (4) [15]:

$$G = -6,6457 \cdot \log(l) - 3,298 \quad (4)$$

gdzie: l – średnia długość przecięcia.

Przykładowy obraz mikroskopowy struktury na zglądzie metalograficznym przecięty liniami testowymi, z zaznaczeniem punktów przecięcia z granicami ziaren przedstawiono na rysunku 13.



Rysunek 13. Obraz mikroskopowy struktury na zglądzie metalograficznym przecięty liniami testowymi [opracowanie własne]

4.3. Metoda planimetryczna

Na obraz zglądu nanoszony jest okrąg testowy o znanej średnicy. Następnie określana jest liczba ziaren przypadająca na jednostkę powierzchni – N_A , którą przedstawia zależność (5) [14, 15]:

$$N_A = \left(\frac{M^2}{A}\right) \cdot \left(n_w + \frac{n_p}{2}\right) \quad (5)$$

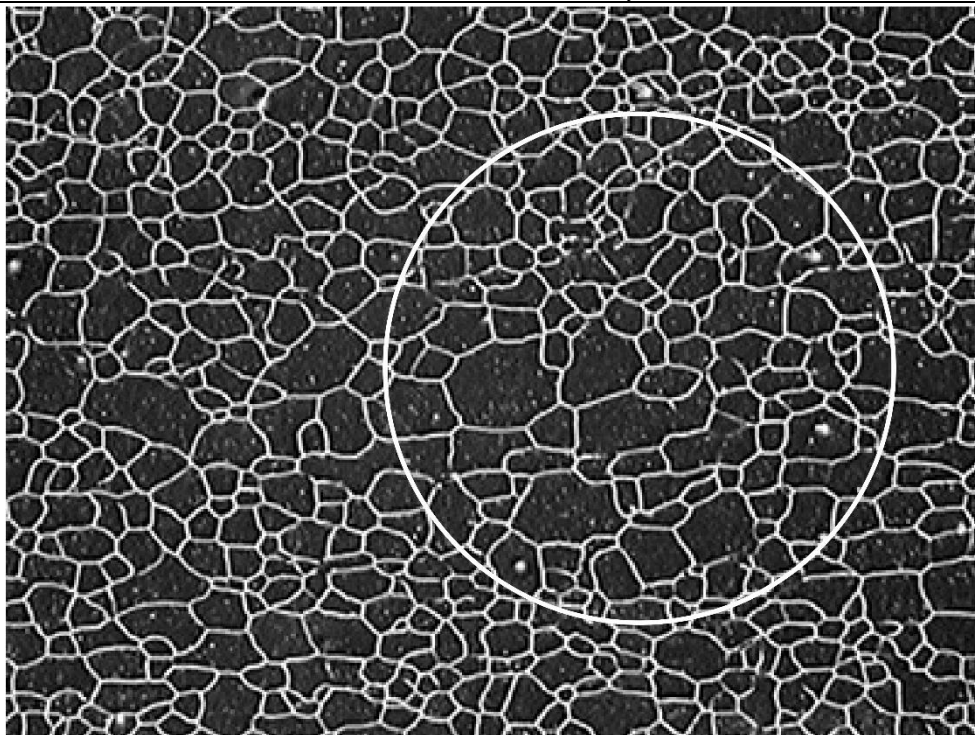
gdzie: M – powiększenie mikroskopu, A – pole powierzchni obszaru ograniczonego naniesionym okręgiem, n_w – liczba ziaren kompletnie mieszczących się w obszarze wyznaczonym przez naniesiony okrąg, n_p – liczba ziaren przeciętych przez naniesiony okrąg.

Na podstawie parametru N_A można wyznaczyć indeks wielkości ziaren G (6) [15]:

$$G = -3,322 \cdot \log(N_A) - 2,954 \quad (6)$$

gdzie: N_A – liczba ziaren przypadająca na jednostkę powierzchni.

Zastosowanie metody przedstawiono na rysunku 14.



Rysunek 14. Obraz mikroskopowy struktury na zglądzie metalograficznym z naniesionym okręgiem testowym metody planimetrycznej [opracowanie własne]

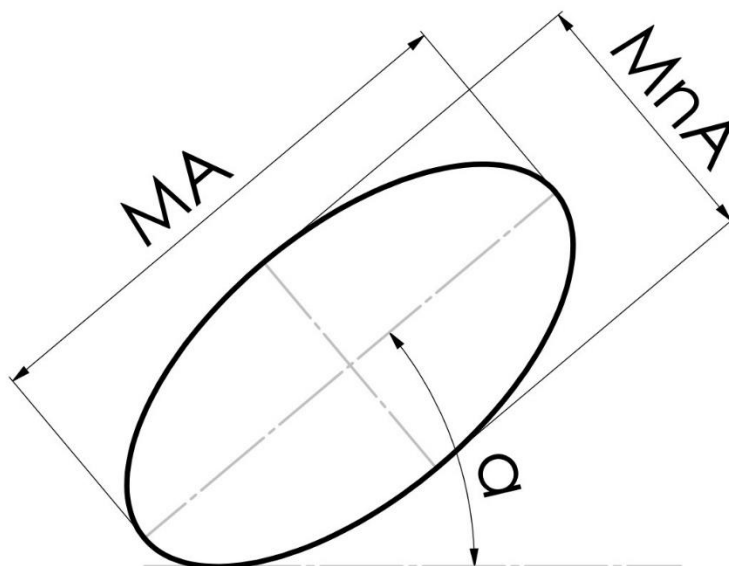
Zarówno metoda liniowa oraz metoda planimetryczna pozwala na uzyskanie powtarzalnych oraz dokładnych wyników, mimo, że przybliżonych. Należy zauważyć, że im większa łączna długość linii w metodzie przecięcia, tym wyższa dokładność metody [16].

5. Opis proponowanego algorytmu do analizy obrazu struktury na zglądach metalograficznych

Algorytm, w odróżnieniu od metod przybliżonych pozwala na dokładną analizę powierzchni wszystkich ziaren znajdujących się w polu widzenia mikroskopu. Ponadto możliwa jest także analiza parametrów ich kształtu. Ocenie można poddać parametry takie jak okrągłość, mimośrodowość oraz orientacja ziaren, a także długość dłuższej oraz krótszej osi ziarna. Wizualizację ocenianych parametrów przedstawiono na rysunku 15.

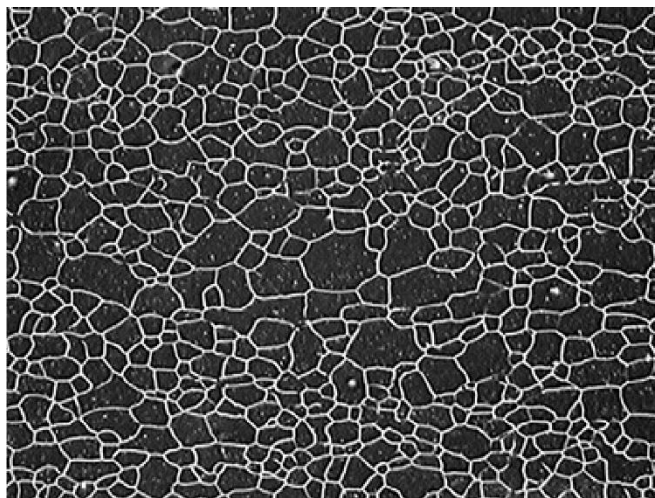
Okrągłość ziarna określa jak bardzo analizowany region zbliżony jest do koła. Może przyjmować wartości pomiędzy 0 a 1, przy czym 1 oznacza idealne koło.

W celu analizy mimośrodowości, długości osi, a także orientacji analizowany region przybliżany jest elipsą o takim samym momencie bezwładności. Mimośrodowość określa stosunek odległości pomiędzy ogniskami elipsy a długością jej głównej osi. Może przyjmować wartość pomiędzy 0 a 1, przy czym wartości skrajne oznaczają przypadki zdegenerowane. Elipsa o mimośrodowości równej 0 jest kołem, natomiast o mimośrodowości 1 – odcinkiem linii. Orientacja określa kąt zawarty pomiędzy osią X a dłuższą osią elipsy.

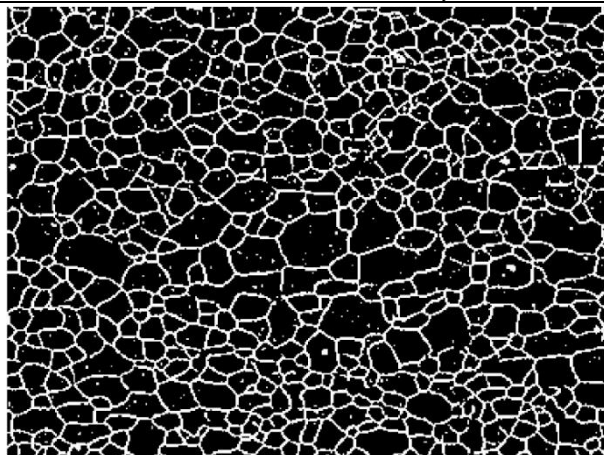


Rysunek 15. Wizualizacja analizowanych parametrów, MA – dłuższa oś elipsy, MnA – krótsza oś elipsy, a – orientacja [opracowanie własne]

Działanie algorytmu rozpoczyna się od otwarcia oryginalnego obrazu cyfrowego w skali odcieni szarości, co pokazano na rysunku 16. Następnie przeprowadzana jest binaryzacja obrazu z wykorzystaniem metody Otsu, której efekt przedstawiono na rysunku 17.

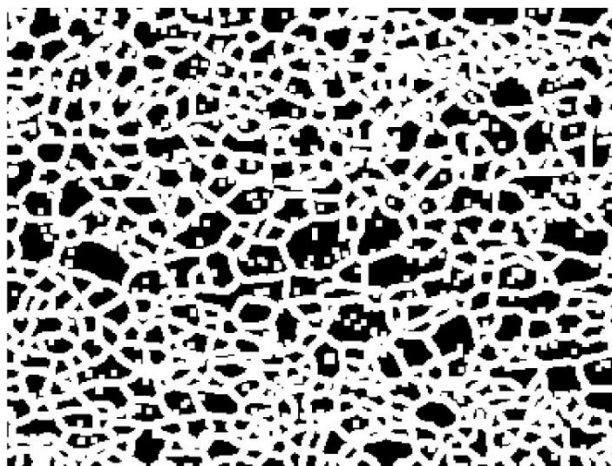


Rysunek 16. Oryginalny obraz w skali odcieni szarości [opracowanie własne]



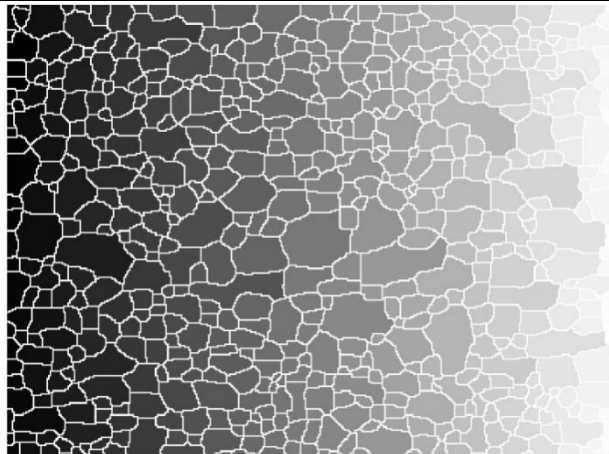
Rysunek 17. Obraz binarny uzyskany przez zastosowanie metody Otsu [opracowanie własne]

Z wykorzystaniem operacji morfologicznych uwydatniane są granice ziaren (rys. 18), a następnie dokonywane jest wyznaczenie indywidualnych regionów z zastosowaniem metody wododziału (rys. 19) wykorzystując algorytm F. Meyera [11]. Przy segmentacji wykorzystano domyślne parametry algorytmu zawarte w oprogramowaniu MATLAB.

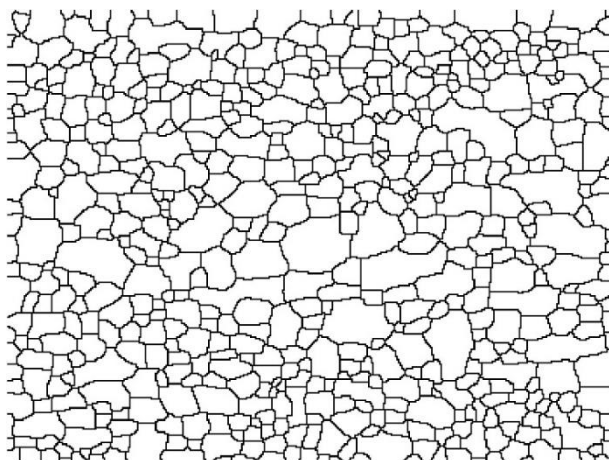


Rysunek 18. Obraz poddany operacjom morfologicznym w celu uwydatnienia granic ziaren [opracowanie własne]

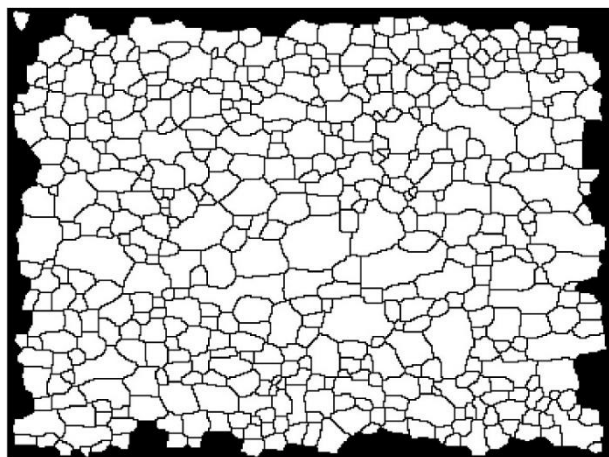
Po podziale obrazu na indywidualne regiony odpowiadające kształtem ziarnom stopu dokonywana jest kolejna binaryzacja, która ma na celu umożliwienie analizy regionów widocznych na przekształconym obrazie (rys. 20). Ponowna binaryzacja jest konieczna ze względu na fakt, że obraz poddany segmentacji składa się z n grup pikseli. Każdy piksel przynależący do danej grupy przyjmuje jednakową wartość, zawartą w przedziale $1÷n$. Natomiast piksele o wartości 0 wyznaczają granice regionów. Proces ponownej binaryzacji polega na przypisaniu wartości 1 do każdego piksela, mającego wartość > 1 . Ostatnim krokiem jest oczyszczenie obrazu z ziaren granicznych, czyli przeciętych przez krawędzie pola widzenia. Ma to na celu wykluczenie nie w pełni widocznych ziaren z analizy, aby nie wpływać negatywnie na dokładność wyniku (rys. 21).



Rysunek 19. Wizualizacja regionów uzyskanych przez zastosowanie metody wododziału [opracowanie własne]



Rysunek 20. Obraz uzyskany poprzez binaryzację regionów uzyskanych metodą wododziału [opracowanie własne]



Rysunek 21. Obraz po usunięciu ziaren granicznych wykorzystany do analizy [opracowanie własne]

6. Przygotowanie i analiza próbek

Próbki do badań metalograficznych zostały wykonane ze stali walcowanej na zimno, przeznaczonej do obróbki plastycznej DIN EN 10130 DC01 [17] o grubości 3 mm. Skład chemiczny stali przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Skład chemiczny stali DIN EN 10130 DC01

C max [%]	P max [%]	S max [%]	Mn max [%]	Ti max [%]
0,120	0,045	0,045	0,600	-

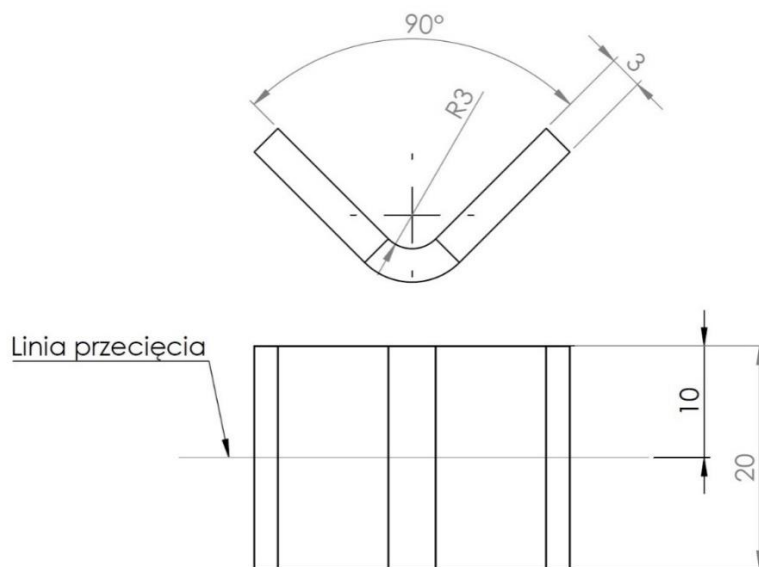
Źródło: opracowanie własne na podstawie [17].

Próbki zostały wykonane w formie kątownika przez wygięcie na prasie krawędziowej, co przedstawiono na rysunku 22. Następnie przecięto próbki wzdłuż zaznaczonej linii przecięcia, w płaszczyźnie prostopadłej do linii gięcia. Do tego celu wykorzystano piłę precyzyjną Presi Mecatome T 201 A. Następnie próbki zostały zainkludowane w żywicy fenolowej i przygotowane do szlifowania i polerowania.

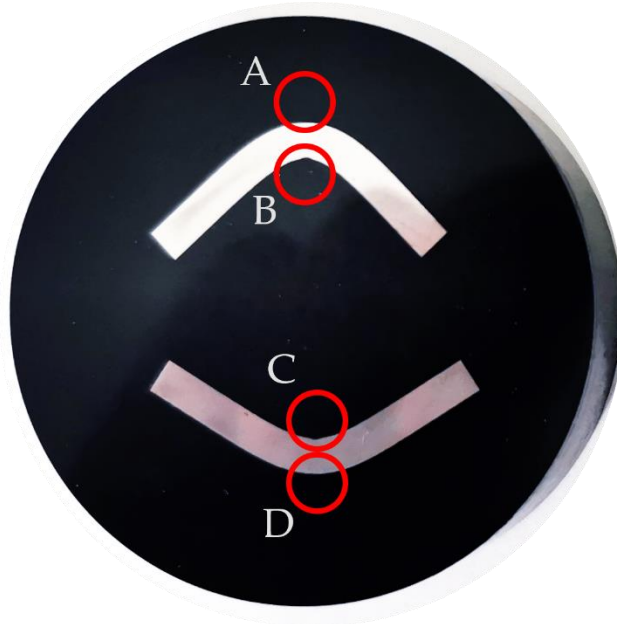
Próbki szlifowano na mokro z wykorzystaniem polerki ręcznej, stosując kolejno papiery ściernicze o gradacji 240, 320, 400, 600, 800, 1000 oraz 1200. Następnie powierzchnie zainkludowanych próbek zostały wypolerowane z zastosowaniem tarczy filcowej oraz monokrystalicznej diamentowej pasty polerskiej o wielkości ziarna 1 μm .

Dla uwidocznienia struktury dokonano trawienia próbek po uprzednim podgrzaniu ich ciepłym powietrzem. Jako roztwór trawiący wykorzystano 2% roztwór Nitalu (roztwór kwasu azotowego – H_3PO_4 w alkoholu etylowym $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Próbki trawiono przez 20 sekund.

Ocenie metalograficznej poddawano strefy przedstawione na rysunku 23. Natomiast dla celów tej publikacji skupiono się wyłącznie na strefie A struktury badanego stopu. Wnioski z analizy będą tematem następnych publikacji, jako, że celem tej pracy jest przedstawienie działania algorytmu.

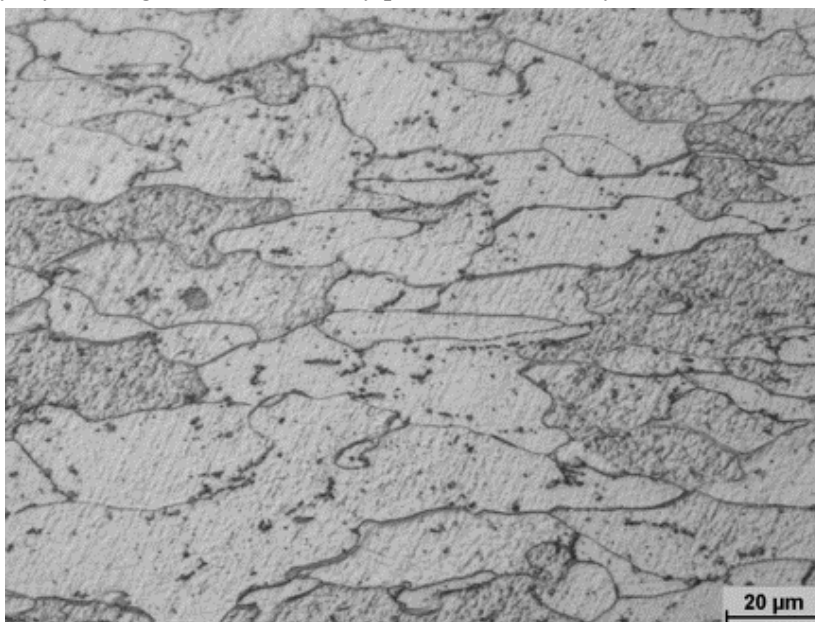


Rysunek 22. Próbka wykorzystana w badaniach, wymiary w mm [opracowanie własne]



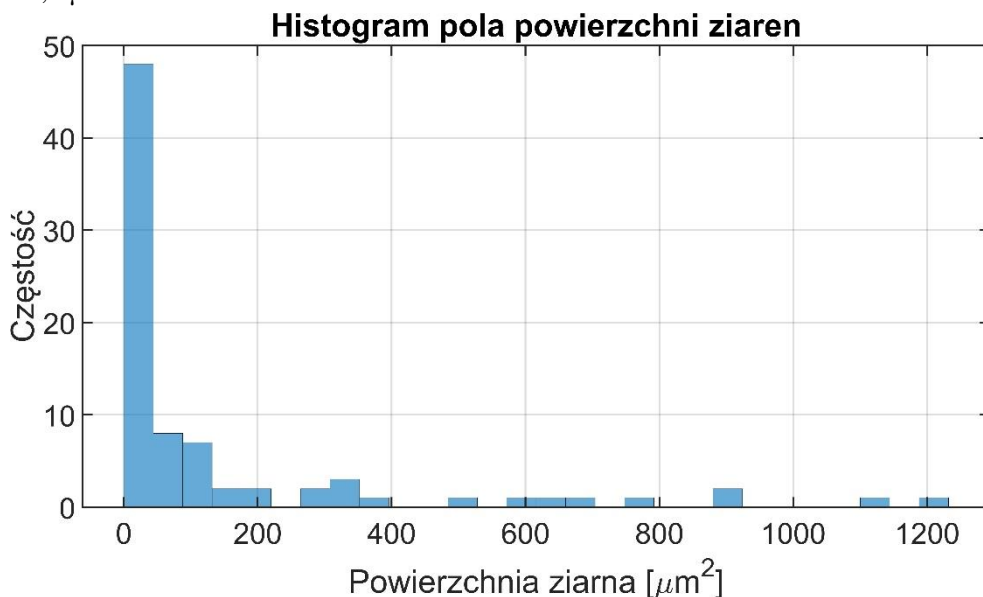
Rysunek 23. Miejsca, w których dokonywano oceny struktury stopu, A – strefa rozciągana, od strony matrycy, gięcie pod kątem 90° ; B – strefa ściskana, od strony stempla, gięcie pod kątem 90° ; C – strefa rozciągana, od strony matrycy, gięcie pod kątem 115° ; D – strefa ściskana, od strony stempla, gięcie pod kątem 115° [opracowanie własne]

Działanie algorytmu opisanego w rozdziale 5. przedstawiono na przykładzie obrazu struktury wykonanego w strefie A, który przedstawiono na rysunku 24.



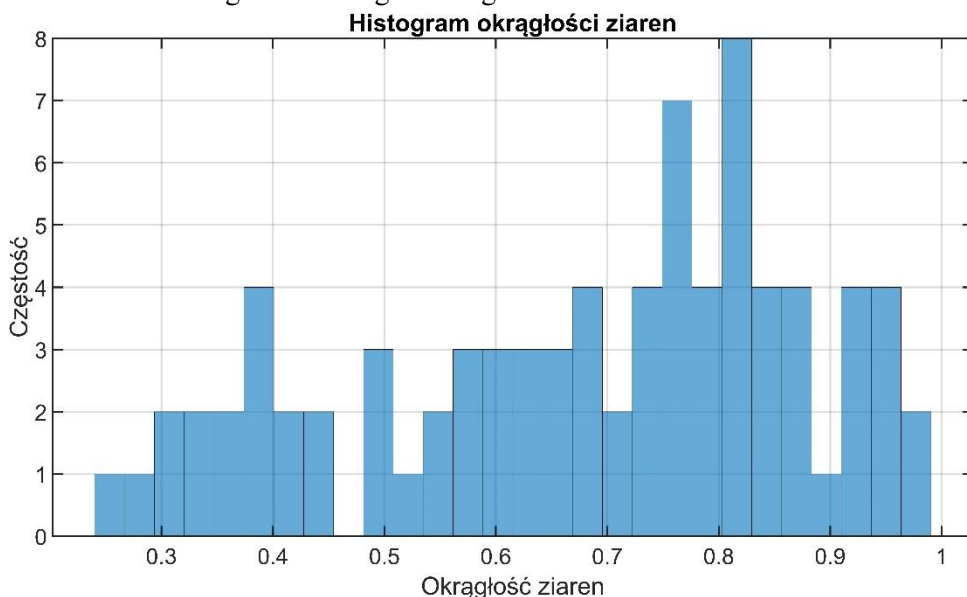
Rysunek 24. Obraz struktury ze strefy A, przygotowany do analizy [opracowanie własne]

Dzięki zastosowaniu algorytmu możliwe było wykreślenie histogramu pola powierzchni ziaren (rys. 25), a także określenie średniej wartości ich pola powierzchni wynoszącej $148,1 \mu\text{m}^2$.

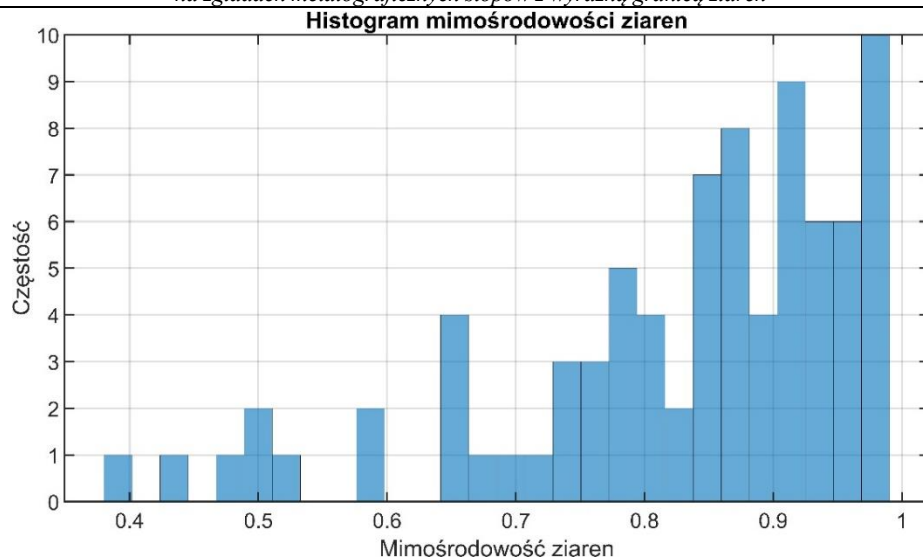


Rysunek 25. Histogram pola powierzchni ziaren w próbce [opracowanie własne]

Określono także średnią kołowość i mimośrodowość ziaren oraz wygenerowano histogramy tych wielkości, które przedstawiono odpowiednio na rysunku 26 oraz 27. Średni współczynnik okrągłości ziaren wynosi 0,68, natomiast średni współczynnik mimośrodowości równy jest 0,83. Oznacza to, że kształt ziaren jest wydłużony, co potwierdza jakościowa analiza zglądu metalograficznego.

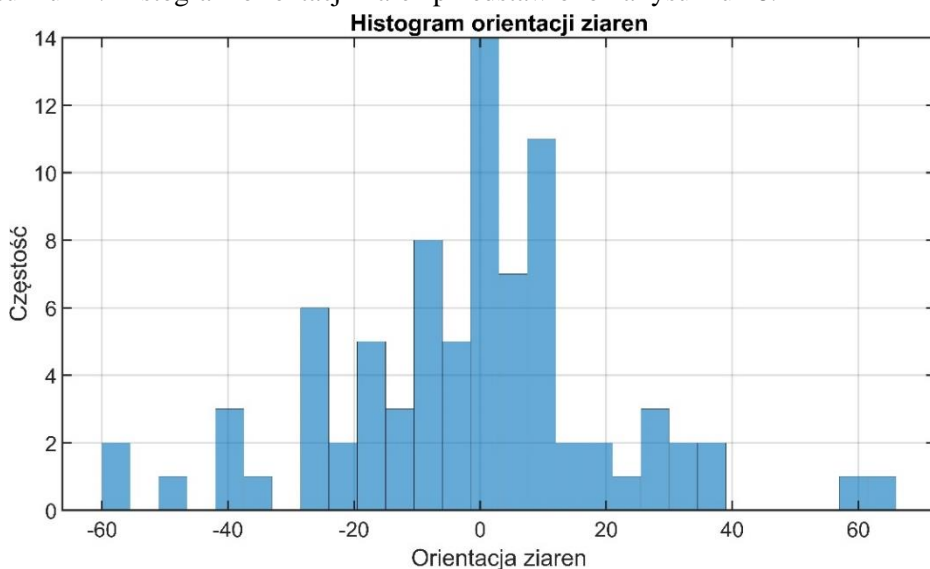


Rysunek 26. Histogram współczynnika okrągłości ziaren w próbce [opracowanie własne]



Rysunek 27. Histogram współczynnika mimośrodowości ziaren w próbce [opracowanie własne]

Średnia orientacja ziaren wynosząca $-1,86^\circ$ oznacza, że ziarna wydłużone są w kierunku osi X, co również potwierdza jakościowa analiza zglądu przedstawionego na rysunku 24. Histogram orientacji ziaren przedstawiono na rysunku 28.



Rysunek 28. Histogram orientacji ziaren w próbce [opracowanie własne]

7. Podsumowanie

W opracowaniu scharakteryzowano podstawowe operacje morfologiczne, a także metody segmentacji obrazu, wstępu teoretycznego do opisu algorytmu służącego do analizy parametrów ziaren w stopach metali z wyraźną granicą ziaren.

Przedstawiono także charakterystykę przybliżonych metod określania średniej wielkości ziarna. W dalszej części przedstawiono parametry, których analizę umożliwia zapro-

ponowany algorytm służący do analizy obrazu struktury na zglądach metalograficznych, a także przedstawiono sposób jego działania.

Przedstawiono także analizę rzeczywistej próbki uzyskanej w toku równoległe prowadzonych badań. Zastosowanie algorytmu oceniającego wszystkie ziarna w polu widzenia mikroskopu pozytywnie wpływa na szybkość analizy, gdyż, po poprawnej kalibracji, dalsze analizy przebiegają w sposób zautomatyzowany. Możliwe jest także uzyskanie informacji na temat kształtu oraz orientacji ziaren, na co nie pozwalają metody przybliżone.

Dalszy rozwój algorytmu pozwoli na przyspieszenie analiz zmian struktury w strefie gięcia w celu oceny wpływu parametrów procesu na wytrzymałość zmęczeniową wyrobów.

Literatura

1. Haas A., Matheron G., Serra J., *Morphologie Mathématique et granulométries en place*, Annales des Mines, XI, 1967, s. 736-753.
2. Soille P., *Introduction*, [w:] Soille P. (red.), *Morphological Image Analysis: Principles and Applications*, Springer, Berlin 2004, s. 1-14.
3. Soille P., *Erosion and Dilation*, [w:] Soille P. (red.), *Morphological Image Analysis: Principles and Applications*, Springer, Berlin 2004, s. 63-103.
4. Gonzalez R.C., Woods R.E., Eddins S.L., *Digital Image Processing Using MATLAB*, Gatesmark Publishing, Knoxville 2020, s. 337-347.
5. Otsu N., *A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 9, 1979, s. 62-66.
6. Vala H.J., Baxi A., *A Review on Otsu Image Segmentation Algorithm*, International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology, 2 (2), 2013, s. 387-389.
7. Bradley D., Roth G., *Adaptive Thresholding using the Integral Image*, Journal of Graphics Tools, 12, 2007, s. 13-21.
8. Chan T.F., Vese L.A., *Active contours without edges*, IEEE Transactions on Image Processing, 10, 2001, s. 266-277.
9. Arthur D., Vassilvitskii S., *k-means++: the advantages of careful seeding*, [w:] Proceedings of the Eighteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, SODA '07, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia 2007, s. 1027-1035.
10. Achanta R., Shaji A., Smith K., Lucchi A., Fua P., Süsstrunk S., *SLIC Superpixels Compared to State-of-the-Art Superpixel Methods*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 34, 2012, s. 2274-2282.
11. Meyer F., *Topographic distance and watershed lines*, Signal Processing, Mathematical Morphology and its Applications to Signal Processing, 38, 1994, s. 113-125.
12. Eibe F., Hall M.A., Witten I.H., *The WEKA Workbench*, [w:] Kaufmann, M. (red.) *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*, Morgan Kaufman, Waikato 2016, s. 7-9.
13. Schindelin J., Arganda-Carreras I., Frise E., Kaynig V., Longair, M., Pietzsch, T., Preibisch, S., Rueden, C., Saalfeld, S., Schmid, B., Tinevez, J.-Y., White, D.J., Hartenstein, V., Eliceiri, K., Tomancak, P., Cardona, A., *Fiji: an open-source platform for biological-image analysis*, Nat Methods, 9, 2012, s. 676-682.
14. Norma ISO 643:2019 - Steels — *Micrographic determination of the apparent grain size*.
15. Norma ASTM E112-13(2021) — *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*.
16. Diez D., DeRose J., *How to Adapt Grain Size Analysis of Metallic Alloys to Your Needs*, <https://www.leica-microsystems.com/science-lab/applied/how-to-adapt-grain-size-analysis-of-metallic-alloys-to-your-needs/> [data dostępu: 25.03.2023].
17. Norma PN-EN 10130:2009 — *Wyroby płaskie walcowane na zimno ze stali niskowęglowych do obróbki plastycznej na zimno – Warunki techniczne dostawy*.

Algorytm automatycznej analizy obrazu struktury na zglądach metalograficznych stopów z wyraźną granicą ziaren

Streszczenie

W artykule przedstawiono algorytm służący do analizy zglądów metalograficznych stopów metali. Algorytm służy do analizy stopów z wyraźną granicą ziaren oraz pozwala na ocenę parametrów takich jak średnia wielkość, okrągłość oraz mimośrodowość ziaren. Analiza dokonywana jest z wykorzystaniem metod morfologii matematycznej oraz segmentacji obrazu z wykorzystaniem wodorodzia. Przeprowadzono także analizę możliwości wykorzystania innych metod segmentacji, jak na przykład algorytm centroidów k-średnich. W trudniejszych przypadkach wykorzystano metodę binaryzacji obrazu z wykorzystaniem samouczącego się algorytmu WEKA, a następnie przeprowadzono operacje morfologiczne. W artykule przedstawiono wyniki analizy metalograficznej stali DIN EN 10130 DC01. Niewątpliwą zaletą w porównaniu do metod przybliżonych jest fakt, że prezentowany algorytm analizuje wszystkie ziarna widoczne w polu widzenia mikroskopu. Ponadto możliwa analiza nie ogranicza się jedynie do określenia średniej wielkości ziarna. Algorytm opracowano w celu analizy zmian struktury materiału w strefie gięcia w zależności od parametrów procesu oraz kierunku obróbki.

Słowa kluczowe: metalografia, analiza obrazu, morfologia matematyczna, stopy metali, struktura stopu

Algorithm for automatic analysis of the structure image on metallographic microsections of alloys with a clear grain boundary

Abstract

The objective of this work is to present an algorithm for automatic analysis of metallographic microsections of metal alloys with clear grain boundary. Proposed algorithm allows for analysis of grain parameters such as mean area, circularity and eccentricity. The analysis is carried out using methods of mathematical morphology and watershed image segmentation. Article describes also the another methods of image segmentation for example k-means clustering. In more complicated cases self-learning image segmentation WEKA algorithm was used for image binarization. This works presents the results of metallographic analysis of DIN EN 10130 DC01 steel. An unquestionable advantage compared to approximate methods is the fact that the presented algorithm analyzes all grains visible in the microscope field of view. Moreover, analysis is not limited to mean grain area. This algorithm was developed for analysis of alloy structure changes in bending zone in terms of bending process parameters and bending line orientation.

Keywords: metallography, image analysis, mathematical morphology, metal alloys, alloy structure

System monitorowania transportu ciepła i pary wodnej w przegrodach budowlanych

1. Wprowadzenie

System monitorowania transportu ciepła i pary wodnej w przegrodach budowlanych odgrywa ważną rolę w zapewnianiu efektywności energetycznej i komfortu termicznego w budynkach. Pozwala on na śledzenie i ocenę efektywności izolacji termicznej oraz wykrywanie potencjalnych problemów związanych z wilgocą i kondensacją pary wodnej w przegrodach [1].

Systemy monitoringu obejmuje czujniki i urządzenia służące do transmisji oraz przetwarzania danych, które mierzą parametry związane z wymianą ciepła i pary wodnej. Dane te są zbierane i analizowane w celu oceny efektywności energetycznej i oceny ryzyka związanego z wilgocą.

Jeśli przegroda budowlana w budynku drewnianym ramowym została skonstruowana z wykorzystaniem materiałów o odpowiedniej charakterystyce, można uzyskać konstrukcję otwartą dyfuzyjnie. Oznacza to, że przepuszczalność dla pary wodnej przez przegrodę jest odpowiednio kontrolowana, co pozwala na naturalną regulację wilgotności wewnątrz budynku. Tego rodzaju konstrukcje przyczyniają się do redukcji ryzyka kondensacji wilgoci w przegrodach, a w konsekwencji destrukcji biologicznej materiałów pochodzenia drzewnego. Ważne jest, aby taka konstrukcja została odpowiednio zaprojektowana wykonana i użytkowana, uwzględniając warunki klimatyczne oraz inne czynniki, takie jak szczelność przegrody oraz wentylację [2].

Te przesłanki były podstawą podjęcia realizacji projektu badawczo rozwojowego wspólnie z firmą ITS, producentem domów drewnianych o konstrukcji ramowej. Celem tego projektu jest opracowanie innowacyjnych rozwiązań w zakresie przegród budowlanych.

W artykule przedstawiono badania, których celem było opracowanie systemu monitorowania stanu przegrody budowlanej. Celem działania systemu monitorowania jest ciągła ocena stanu przegrody, co umożliwi sterowanie transportem i magazynowaniem w przegrodzie budowlanej strumieni masy wody oraz ciepła w celu zwiększenia efektywności energetycznej budynku oraz zapewnieniu komfortu cieplnego mieszkańcom. System ten umożliwi również wczesne wykrywanie ewentualnych uszkodzeń lub degradacji [3]. Dzięki temu możliwe jest podjęcie odpowiednich działań naprawczych lub konserwacyjnych, zwiększając trwałość i bezpieczeństwo konstrukcji. W chwili obecnej brak jest na rynku rozwiązań w postaci warstwowej przegrody budowlanej wraz z zintegrowanym z nią systemem monitorującym. Przedstawione w artykule rozwiązanie stanowi etap stworzenia układu autonomicznego zarządzania zasobami budynku i umożliwi stworzenie cyfrowego bliźniaka przegrody budowlanej.

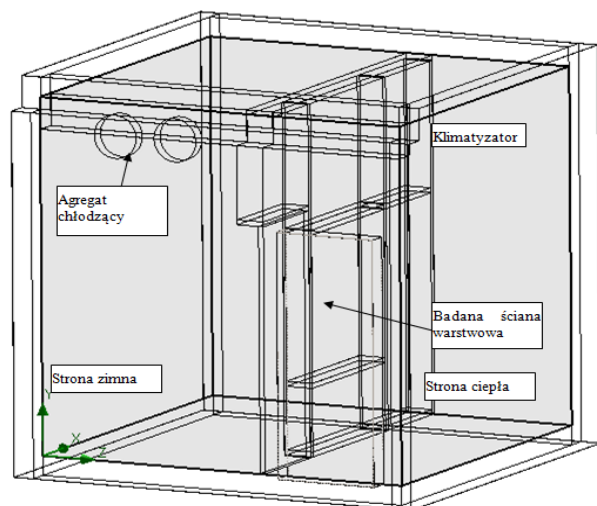
¹ dariusz.tomkiewicz@tu.koszalin.pl, Filia PK w Szczecinku, Politechnika Koszalińska, tu.koszalin.pl.

2. Metodologia

W celu opracowania systemu monitorowania przegrody budowlanej wykorzystano komorę klimatyczną, w której umieszczono próbki wielowarstwowej przegrody budowlanej stosowanej w budownictwie drewnianym o konstrukcji szkieletowej. Komora klimatyczna została podzielona na dwie strefy: zimną, odwierciedlającą warunki pogodowe na zewnątrz budynku, oraz ciepłą, odwierciedlającą warunki mikroklimatu wewnątrz budynku (rys. 1).

W strefie ciepłej komory zapewniono warunki klimatyczne zgodne z komfortem cieplnym dla pomieszczeń mieszkalnych, utrzymując temperaturę na poziomie 22°C i wilgotność na poziomie 45%. Eksperymenty związane z weryfikacją poprawności działania systemu monitorowania przeprowadzono przy zadanych temperaturach po stronie zimnej: +30°C, -15°C, +5°C. Dodatkowo, przy temperaturze po stronie ciepłej komory na poziomie 22°C i temperaturze po stronie zimnej na poziomie 5°C, wilgotność po stronie ciepłej została zwiększona do poziomu 90%. Czas trwania eksperymentów podczas, których utrzymywano stałą temperaturę i wilgotność został określony na podstawie badań wstępnych i ustalony na 36 godzin.

Za utrzymanie stabilnych warunków odpowiadał układ automatyki, który składał się ze sterownika, grzałek i klimatyzatora.



Rysunek 1. Stanowisko badawcze - komora klimatyczna z rozmieszczonymi elementami układu sterowania oraz badaną wielowarstwową przegrodą budowlaną

Próbki przegrody budowlanej, odwzorowujące strukturalnie budowę przegrody budowlanej będącej częścią składową domu szkieletowego o konstrukcji drewnianej, składały się z wielu warstw funkcyjnych. Wielowarstwowa konstrukcja została opracowana w taki sposób, aby poszczególne warstwy wzajemnie współdziałały, zapewniając realizację funkcji przegrody budowlanej, takie jak izolacja termiczna, ochrona przed wilgocią, wytrzymałość i estetyka. Materiały użyte do budowy przegrody, w tym materiał izolacyjny (włókno celulozowe), umożliwiły stworzenie otwartej dyfuzyjnie konstrukcji [4].

Próbka przegrody budowlanej składała się z następujących warstw funkcyjnych:

1. Tynk mineralny, który stanowił zewnętrzną warstwę dekoracyjną przegrody, nadając jej estetyczny wygląd.
2. Płyta drewnopochodna dyfuzyjnie otwarta, podtynkowa (np. Steico Protect): pełniła funkcję izolacyjną i regulowała paroprzepuszczalność, znajdując się bezpośrednio pod tynkiem mineralnym.
3. Konstrukcja drewniana wypełniona materiałem izolacyjnym – wełną celulozową zapewniała wysoką izolacyjność termiczną.
4. Płyta OSB, która będąc dodatkową warstwą strukturalną przegrody, wzmacnia jej wytrzymałość i stabilność.
5. Ścianka instalacyjna z wełny mineralnej: pełniła funkcję izolacyjną i akustyczną, a także umożliwiała prowadzenie instalacji wewnątrz przegrody.
6. Płyta Fermacell była warstwą wewnętrzną przegrody, nadając jej wykończenie i dodatkową wytrzymałość.

Opisana struktura ściany zapewni odpowiednią izolację termiczną, akustyczną oraz ochronę przed wilgocią i wiatrem [5].

3. Struktura układu pomiarowego

Układ pomiarowy do monitorowania stanu przegród budowlanych powinien spełniać wymagania związane z specyfiką środowiska, w którym jest zaimplementowany, to znaczy budynków drewnianych o konstrukcji ramowej:

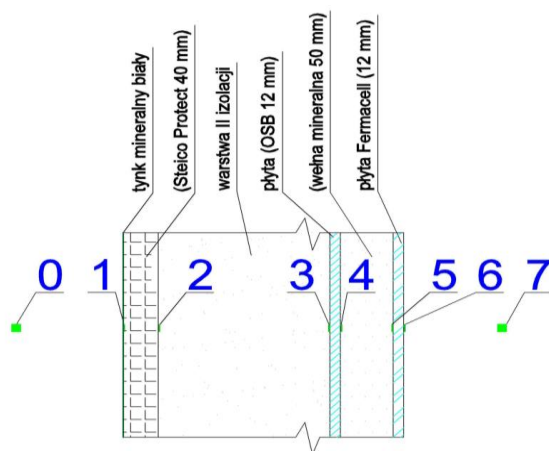
1. Monitorowanie rozkładu temperatury wewnątrz przegrody. Pomiar temperatury w różnych częściach przegród budowlanych może dostarczyć informacji na temat przepływu i akumulacji ciepła przez poszczególne warstwy funkcyjne przegrody budowlanej. Monitoring temperatury jest istotny dla utrzymania odpowiednich warunków termicznych w budynku.
2. Monitorowanie rozkładu wilgotności powietrza znajdującego się wewnątrz przegrody. W budynkach drewnianych o konstrukcji ramowej, monitorowanie rozptyłu pary wodnej jest ważne dla utrzymania optymalnego poziomu wilgotności. Nadmierna wilgotność powietrza może prowadzić do kondensacji i powstawania pleśni, co jest szkodliwe zarówno dla drewna, jak i dla zdrowia mieszkańców oraz obniża izolacyjność cieplną.
3. Układ pomiarowy powinien umożliwiać rozproszone pomiary w różnych punktach przegród budowlanych odzwierciedlających rozkład strumieni ciepła i masy w budynkach. Ze względu na rozproszenie punktów pomiarowych w budownictwie, układ powinien być zdolny do równoczesnego monitorowania wielu lokalizacji.
4. Bezprzewodowa transmisja danych. Ze względu na trudności z prowadzeniem przewodów w przypadku systemów pomiarowych składających się z kilkudziesięciu lub kilkuset punktów pomiarowych, układ pomiarowy powinien wykorzystywać bezprzewodowe protokoły transmisji danych. Dzięki temu możliwa będzie swobodna komunikacja między czujnikami a centralną jednostką monitorującą.
5. Ze względu na specyfikę, układ pomiarowy powinien być ekonomiczny w zakresie budowy i utrzymania. Ograniczenie kosztów jest istotne, ponieważ układ taki, aby pełnić swoje funkcje wymaga wielu punktów pomiarowych.

Wszystkie te wymagania mają na celu zapewnienie skutecznego monitorowania stanu przegród budowlanych, co umożliwi wczesne wykrywanie potencjalnych problemów,

optymalne zarządzanie energią i utrzymanie wysokiej funkcjonalności przegrody budowlanej.

Opracowany układ monitorowania pozyskiwał dane ze scalonych czujników do pomiaru temperatury i wilgotności względnej SHT30. Czujniki SHT30 oferują wysoką precyzję pomiaru wilgotności względnej z dokładnością do $\pm 2\%$, zapewniają również precyzyjny pomiar temperatury z dokładnością do $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$. Dzięki zastosowaniu scalonych czujników można monitorować równocześnie w tym samym punkcie przestrzennym temperaturę wraz z wilgotnością, co jest istotne ze względu na możliwość oszacowania paramentów termodynamicznych powietrza i materiałów na podstawie równań bilansu masy i energii [6].

Podczas eksperymentów czujniki SHT30 zostały przytwierdzone do powierzchni każdej warstwy funkcyjnej przegrody budowlanej opisanej w rozdziale drugim tak, aby można było mierzyć strumień masy pary i ciepła przenikający przez każdą z warstw. Dodatkowe czujniki umożliwiały pomiar chwilowej wartości temperatury i wilgotności względnej powietrza po stronie zimnej i ciepłej komory klimatycznej (rys. 2).

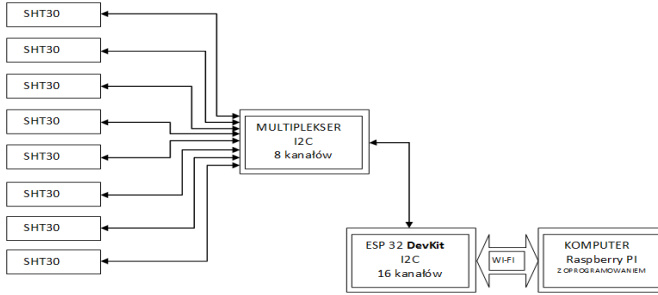


Rysunek 2. Rozmieszczenie czujników pomiarowych na każdej warstwie funkcyjnej w badanej przegrodzie budowlanej (czujnik 0 umieszczony po stronie zimnej komory klimatycznej, czujnik 7 po stronie ciepłej komory klimatycznej)

Czujniki zostały podłączone do multiplexera I2C, który umożliwia podłączenie większej liczby urządzeń I2C do jednej magistrali.

Dane z ośmiu czujników zainstalowanych na stanowisku badawczym były przesyłane poprzez multiplexer do mikrokontrolera ESP32, który charakteryzuje się dużą liczbą interfejsów komunikacyjnych. Możliwości ESP32 sprawiają, że jest on powszechnie stosowany w projektach związanych z Internetem Rzeczy (IoT) [7].

Ze względu na konieczność przetwarzania i analizy danych pomiarowych pochodzących z całego budynku, dane z pojedynczego punktu pomiarowego składającego się z czujników umieszczonych w wybranym punkcie przegrody budowlanej po pozyskaniu przez mikrokontroler ESP32 były transmitowane w celu dalszej analizy do komputera Raspberry Pi poprzez sieć Wi-Fi z zastosowaniem protokołu MQTT.



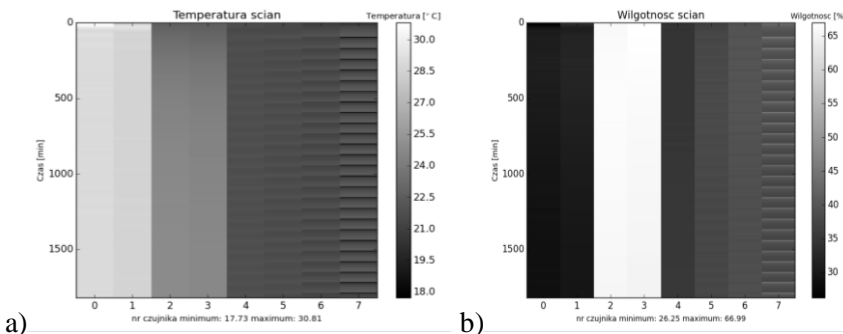
Rysunek 3. Schemat budowy układu monitorowania transportu ciepła i pary wodnej w przegrodach budowlanych

Protokół MQTT zapewnia minimalne wymagania, co do przepustowości, pamięci i zasobów sieciowych. Dzięki temu jest szeroko stosowany w IoT i urządzeniach o ograniczonych zasobach, takich jak mikrokontrolery. Mechanizmy zawarte w protokole MQTT zabezpieczają komunikację w trybie trwałej sesji.

Raspberry Pi jest komputerem jednopłytkowym o niewielkich rozmiarach oraz umiarkowanej cenie. Posiada architekturę ARM o wystarczającej mocy obliczeniowej do realizacji zadań analizy danych pomiarowych. Raspberry Pi posiada różne interfejsy, które zapewniają łączność i komunikację z innymi urządzeniami. Oprogramowanie zaimplementowane na komputerze Raspberry Pi zostało napisane w środowisku Python i służy do przetwarzania, analizy i rejestracji danych, a także do podejmowania odpowiednich akcji na podstawie przeprowadzonych analiz.

4. Weryfikacja działania układu monitorowania transportu ciepła i pary wodnej w przegrodach budowlanych

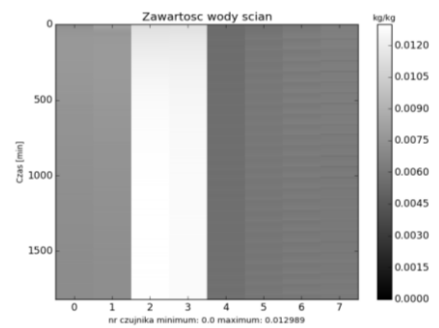
W celu weryfikacji działania układu monitorowania transportu ciepła i pary wodnej w przegrodach budowlanych, przeprowadzono cykl eksperymentów w komorze klimatycznej, których sposób przeprowadzenia został opisany w rozdziale 2. Eksperymenty uwzględniały dane zabrane za pomocą układu pomiarowego opisujące zmiany temperatury i wilgotności względnej powietrza umożliwiające monitorowanie parametrów przegrody budowlanej. Na rysunku 4 zostały zaprezentowane dane pozyskane podczas eksperymentu dla temperatury strony zimnej równej 30°C i temperaturze po stronie cieplej równej 22°C.



Rysunek 4. Dane pozyskane z systemu monitorowania parametrów przegrody budowlanej a) zmiany temperatury powietrza, b) zmiany wilgotności względnej powietrza

Rysunek 4a przedstawia zmianę temperatury zarejestrowaną na powierzchniach poszczególnych warstw (numeracja czujników zgodna z numeracją na rysunku 2). Oś pionowa na rysunku przedstawia upływ czasu w minutach. Na rysunku 4b zobrazowano zarejestrowane zmiany wilgotności względnej powietrza. Każdy wiersz na rysunku 4 opisuje pojedynczy pomiar przeprowadzony przez system monitorowania. Pomiary były realizowane z częstotliwością raz na dziesięć minut.

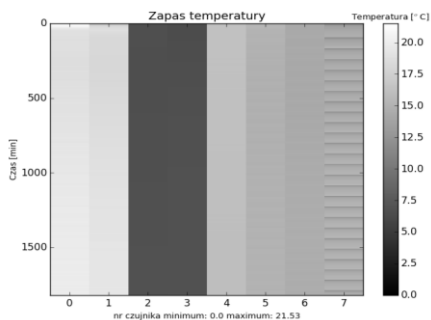
Pozyskiwane dane z układu monitorującego powietrza na bieżąco były wykorzystane do obliczenia wskaźników opisujących stan przegrody budowlanej. Wskaźniki pozwalające oszacować stan przegrody budowlanej obejmowały między innymi zawartość pary wodnej w powietrzu. Na podstawie równań opisujących stan wilgotnego powietrza obliczono stosunek masy wody w powietrzu do masy suchego powietrza (rys. 5).



Rysunek 5. Zmiany wartości zawartości wody w powietrzu obliczonej na podstawie danych z czujników pomiarowych w poszczególnych warstwach struktury ściany

Zawartość masowa pary wodnej w powietrzu umożliwi analizę przepływu strumienia masy wody przez przegrodę budowlaną [8].

Kolejnym wyliczonym na podstawie danych pomiarowych wskaźnikiem była temperatura punktu rosy, która opisuje, przy jakiej temperaturze, dla danych parametrów powietrza, para wodna z powietrza zacznie kondensować. Temperatura punktu rosy być obliczana na podstawie temperatury i wilgotności względnej powietrza. W kolejnym kroku była wyliczana różnica pomiędzy aktualną temperaturą materiału przegrody budowlanej a temperaturą punktu rosy. Różnica ta nazywana jest również zapasem temperatury, wskazuje jak daleko temperatura materiału przegrody budowlanej jest od temperatury punktu rosy (rys. 6). Zapas temperatury jest istotny dla oceny ryzyka kondensacji wilgoci w materiale, z którego zbudowana jest przegroda.



Rysunek 6. Zmiany różnicy pomiędzy temperaturą warstwy a temperaturą punktu rosy (zapas temperatury) obliczonej na podstawie danych z czujników pomiarowych ściany

Po obliczeniu wyżej wymienionych wskaźników jest możliwe dokonanie oceny stanu przegrody budowlanej pod względem wymiany ciepła i pary wodnej [9].

5. Podsumowanie

Celem badań przedstawionych w artykule było opracowanie systemu monitorowania stanu przegrody budowlanej. Zastosowanie układu pomiarowego, w którym wykorzystano scalone czujniki SHT30 pozwoliło uzyskać system charakteryzujący się precyzyjnym pomiarem temperatury i wilgotności względnej.

Dzięki zastosowanym rozwiązaniom możliwe było monitorowanie rozkładu temperatury wewnątrz przegrody budowlanej oraz śledzenie rozkładu wilgotności względnej powietrza. Opracowany układ umożliwił równoczesny pomiar wartości temperatury i wilgotności w wielu dyskretnych punktach rozmieszczonych w poszczególnych warstwach przegrody budowlanej. Układ ten bez problemu można rozszerzyć do kilkuset punktów pomiarowych tak, aby można było monitorować rozkład strumieni ciepła i pary wodnej w całym budynku.

Dzięki zastosowaniu bezprzewodowych metod transmisji danych między innymi takich jak protokół WiFi wsparty przez protokół MQTT, możliwa była transmisja danych z wielu punktów pomiarowych przy zapewnieniu odporności na zakłócenia i chwilowe przerwy w komunikacji. Zastosowane do budowy elementy, takie jak czujniki temperatury i wilgotności względnej powietrza SHT30, mikrokontrolery ESP32 czy komputer jednopłytkowy Raspberry Pi w pełni potwierdziły swoją niezawodność oraz posiadały wystarczające zasoby obliczeniowe do realizacji zadań związanych z pomiarem, transmisją oraz przetwarzaniem danych. Układy te charakteryzują się również względnie niskim kosztem zakupu i łatwością tworzenia oprogramowania zapewniającego prawidłowe funkcjonowanie systemu monitorowania.

Eksperymenty przeprowadzone w komorze klimatycznej potwierdziły skuteczność i niezawodność systemu monitorowania wymiany ciepła i pary wodnej w przegrodach budowlanych. Wyliczone wskaźniki, takie jak zawartość masowa pary wodnej w powietrzu i temperatura punktu rosy, umożliwiły ocenę stanu przegrody budowlanej pod względem transmisji ciepła i pary wodnej. Wyniki eksperymentów wskazują na przydatność opracowanego systemu monitorowania do sterowania i utrzymania przegrody budowlanej w odpowiednim stanie użytkowania.

Podziękowania

Autor pragnie złożyć podziękowanie pracownikom firmy ITS za pomoc w trakcie prowadzonych badań oraz Urzędowi Marszałkowskiemu województwa zachodniopomorskiego za finansowanie projektu badawczo rozwojowego o nazwie „Projekty Badawczo-Rozwojowe w RPZP.01.00.00 Gospodarka, innowacje, nowoczesne technologie – Prace B+R prowadzone przez firmę ITS sp. z o.o. i Politechnikę Koszalińską nad stworzeniem optymalnej przegrody budowlanej stosowanej w budownictwie drewnianym”.

Literatura

1. Guedi C., Ochoa C., *What Is a Real Intelligent Envelope*, In *Intelligent Envelopes for High-Performance Buildings*, Springer International, 2017, s. 1-20.
2. Herzog T., Krippner R., Lang W., *Facade Construction Manual*, Birkhauser Publishers for Architecture, Basel 2004.

3. Yang J., Peng H., *Decision Support to the Application of Intelligent Building Technologies*, Renewable Energy, 22(1-3), 2001, s. 67-77.
4. Knaack U., *Façades: Principles of Construction*, Birkhäuser, Basel 2014.
5. Böke J., Knaack U., Hemmerling M., *State-of-the-art of intelligent building envelopes in the context of intelligent technical systems*, Intelligent Buildings International, 2018.
6. Kohei A., *Advances in Information and Communication Networks*, Proceedings of the 2018 Future of Information and Communication Conference (FICC), Vol. 2. Springer Nature Switzerland AG, 2019.
7. Mahalik N.P., *Handbook of Sensors and Networks*, Springer-Verlag Berlin 2007.
8. Moreno M.V., *Big data: the key to energy efficiency in smart buildings*, Soft Computing 20, 2016, s. 1749-1762.
9. Tomkiewicz D., *Wireless Sensor for Measurement of Grain Bulk Dynamics*, Informačné a Automatizačné Technológie v Riadení Procesov, Medzinárodná Vedecká Konferencia, Nitra 2011, s. 199-203.

System monitorowania transportu ciepła i pary wodnej w przegrodach budowlanych

Streszczenie

Celem badań przedstawionych w artykule było opracowanie systemu monitorowania stanu przegrody budowlanej. Wielowarstwowa przegroda budowlana była częścią budynku o konstrukcji drewnianej ramowej. Materiały wykorzystane do budowy przegrody, w tym w materiał izolacyjny (włókno celulozowe), umożliwiały opracowanie konstrukcji otwartej dyfuzyjnie.

W przegrodzie budowlanej podczas procesu użytkowania zachodzą zjawiska związane z przemieszczaniem strumieni masy (pary wodnej) oraz ciepła. W przypadku konstrukcji otwartej dyfuzyjnie pożądana jest możliwość monitorowania tych procesów w celu optymalnego sterowania ogrzewaniem, klimatyzacją oraz predykcyjnego utrzymania budynku w stanie zdolności do użytkowania.

W zaprezentowany w artykule system monitorowania składający się ze zbioru czujników umieszczonych w poszczególnych warstwach przegrody budowlanej, systemu bezprzewodowej transmisji danych umożliwia akwizycję danych, analizę danych pomiarowych oraz detekcję zjawisk wpływających na destrukcję materiałów stosowanych w konstrukcji przegrody.

Opracowany system monitorowania został przetestowany w warunkach laboratoryjnych w komorze klimatycznej. Podczas badań poddawano zewnętrzną stronę przegrody działaniu wybranych warunków temperatury i wilgotności powietrza. Wyniki badań potwierdziły poprawne funkcjonowanie systemu. System monitorowania jest aktualnie zainstalowany i testowany w budynku demonstracyjnym.

Słowa kluczowe: monitorowanie, przegroda budowlana, układ pomiarowy

A system for monitoring heat and water vapor transport in building envelopes

Abstract

The aim of the research presented in the article was to develop a system for monitoring the condition of the building envelope. The multi-layer building envelope was part of a timber-frame building. The materials used for the construction of the envelope, including the insulating material (cellulose fibre), made it possible to develop a diffusion-open structure.

In the building envelope phenomena related to the movement of mass (water vapor) and heat flows occur. In the case of a diffusion open structure, it is desirable to be able to monitor these processes in order to optimally control heating, air conditioning and predictive maintenance.

The monitoring system presented in the article consists of a set of sensors placed in individual layers of the building envelope, a wireless data transmission system enabling data acquisition, measurement data analysis and detection of phenomena affecting the destruction of materials used in the construction of the envelope.

The developed monitoring system was tested in laboratory conditions in a climatic chamber. During the tests, the external side of the envelope was subjected to selected conditions of temperature and air humidity. The test results confirmed the proper functioning of the system. The monitoring system is currently installed and tested in a demonstration building.

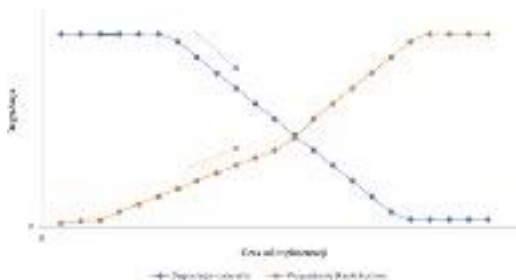
Keywords: monitoring, building envelope, measurement system

Degradacja bioresorbowalnych kompozytów z hydroksyapatytu i poliestrów stosowanych na implanty kostne

1. Wprowadzenie

Bioresorbowalne kompozyty hydroksyapatytu z poliestrami są obiecującymi materiałami do zastosowania w inżynierii tkankowej. Materiały te odznaczają się nie tylko odpowiednią wytrzymałością mechaniczną, lecz także bioaktywnością, biokompatybilnością i bioresorbowalnością. Z punktu widzenia możliwości aplikacyjnych niezwykle istotną jest kontrola procesu degradacji materiału w czasie. Jedno z rozwiązań zakłada, że rusztowanie powinno zapewnić stabilność mechaniczną do momentu odbudowy ubytku. Ustalenie kinetyki resorpcji materiału pozwalającej na przerośnięcie implantu i przejście naprężeń przez kość jest ideą nierozstrzygniętą [1, 2]. Rysunek 1 przedstawia koncepcję kinetyki degradacji bioresorbowalnego wszczepu i narastania tkanki kostnej. Według tej idei materiał powinien w początkowej fazie być stabilny i mieć wystarczająco wysokie właściwości mechaniczne aż do czasu wykształcenia się tkanki kostnej, która będzie w stanie przenosić obciążenia.

Degradacja długoczasowa bioresorbowalnych materiałów w środowisku płynów ustrojowych i zmiennych obciążeniach jest trudna do przewidzenia na etapie projektowania. Pomimo wielu lat badań nie ma rozwiązania na bioresorbowalny materiał na wszczep ortopedyczny, który zapewni odpowiednie właściwości mechaniczne w czasie regeneracji ubytku kostnego. Obecne rozwiązania wymagają wzmocnienia miejsca wszczepu płytą tytanową.



Rysunek 1. Oczekiwana kinetyka degradacji bioresorbowalnych wszczepów oraz narastania tkanki kostnej, opracowanie własne na podstawie [3]

Jednym z materiałów na bioresorbowalne implanty są kompozyty fosforanów wapnia z poliestrami. Powstało w ostatnich latach wiele nowych rozwiązań materiałowych oraz technologii związanych z otrzymywaniem i formowaniem takich kompozytów. Są to zarówno materiały porowate wytwarzane metodami chemicznymi, druku 3d, jak także

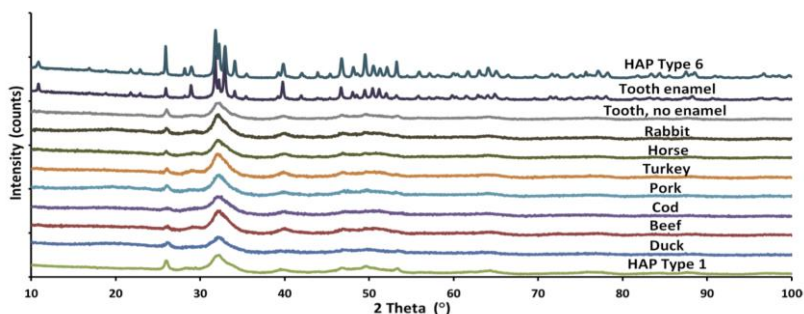
¹ e.pietrzykowska@labnano.pl, Laboratorium Nanostruktur, Instytut Wysokich Ciśnień, Polska Akademia Nauk, www.labnano.pl.

² Instytut Wysokich Ciśnień „Unipress”, PAN.

materiały lite wytwarzane metodą wtrysku lub prasowania osiowego bądź izostatycznego. Kompozyty te składają się z fosforanów wapnia, między innymi hydroksyapatytu oraz polimerów takich jak polilaktyd (PLA) czy polikaprolakton (PCL) [3- 7].

Hydroksyapatyt (HAP) jest to materiał z grupy fosforanów wapnia, naturalnie występujący w tkankach zębów i kościach. Cechuje się wysoką biogodnością, bioaktywnością oraz osteoindukcyjnością. Jako biomateriał jest szeroko stosowany w stomatologii, chirurgii kostnej a także medycynie estetycznej. Stosowany jest też w celu poprawy właściwości powierzchni implantów jako powłoki, w szczególności na stopy metali i polimery. Ceramika z HAP jest krucha, w związku z czym jej zastosowanie jest ograniczone. Znalazła zastosowanie jako porowate bloczki do wypełnień nieobciążonych ubytków kostnych. Ponad to hydroksyapatyt jest szeroko badany pod kątem zastosowania go w kompozytach na bioresorbowalne implanty ortopedyczne [4].

Syntecznym hydroksyapatytem może mieć strukturę identyczną do apatyty znajdującego się w kościach czy też szkliwie zębów. Na rysunku 2 przedstawiono porównanie struktury fazowej syntecznego nanoproszku o różnej wielkości cząstek z tkanką kostną oraz szkliwem różnych zwierząt. Badania te wykonane przy pomocy dyfrakcji rentgenowskiej (XRD). Widmo oznaczone jako HAP Type 1 to syntecznym hydroksyapatytem o wielkości ziarna 9 nm, którego struktura podobna jest do apatyty w tkance kostnej zwierząt. Natomiast widmo HAP Type typ 6 to nanocząstki o wielkości ziarna 42 nm, których struktura jest zbliżona do apatyty ze szkliwa w zębie [8].



Rysunek 2. Porównie struktury nanometrycznego hydroksyapatytu do apatyty znajdującego się w kościach i zębach zwierząt- Figure 3 w pracy [8]

Poliestry takie jak polilaktyd (PLA) oraz polikaprolakton (PCL) to bioresorbowalne termoplastyczne polimery. Są one powszechnie stosowane w medycynie i zatwierdzone przez FDA (U.S. Food and Drug Administration) do stosowania na implanty ortopedyczne. Są hydrofobowe i mają niższy moduł Younga niż kość co nie sprzyja regeneracji tkanki kostnej [1, 2].

Polilaktyd jest semikrystalicznym polimerem o średnim module sprężystości wynoszącym 3,5- 4,8 GPa, czyli ok. 10-krotnie wyższym niż dla PCL. Proces degradacji wynosi do 6 lat, przy czym właściwości mechaniczne traci po 6 miesiącach. Jest materiałem sztywnym i wytrzymałym, o charakterystyce naprężeniowo-odkształceniowej typowej dla tworzywa kruchego.

Degradacja PLA następuje poprzez rozpad wiązania estrowego, a powstały kwas mlekowy jest włączany do naturalnego szlaku przemian metabolicznych odbywających się głównie w tkance mięśniowej. Polimer ten charakteryzuje się również dobrymi

właściami mechanicznymi czy też plastycznością termiczną. To właśnie z wyżej wymienionych powodów PLA jest jednym z najczęściej stosowanych w medycynie biodegradowalnych polimerów. Jego zastosowanie obejmuje trzy obszary: inżynierię tkankową, medycynę rekonstrukcyjną, farmację [9-11].

PCL to polimer o właściwościach elastomeru, który ma około 45% fazy krystalicznej. Charakteryzuje się niską wytrzymałością na rozciąganie (ok. 23 MPa) przy ogromnej wartości wydłużenia przy zerwaniu (700%), wynikającym z dłuższego łańcucha węglowego. PCL degraduje do 2 lat. Kwas powstający z rozkładu PCL, nie jest toksyczny, uważa się, że jest 8 razy słabszy niż te powstające przy rozkładzie polilaktydów [12].

Główną zaletą poliestrów jest ich dostępność oraz łatwość przetwarzania. Z drugiej strony mają ograniczone powinowactwo do komórek, stosunkowo niską sztywność i hydrofobowy charakter. Dlatego też, aby poprawić ich właściwości biologiczne, modyfikuje się je bioaktywną ceramiką jak hydroksyapatyt [10].

Kompozyty na bazie polilaktydu oraz hydroksyapatytu są obiecującymi materiałami na implanty ortopedyczne. Łączenie ich właściwościami fizykochemicznymi daje wiele możliwości w sterowaniu ich właściwościami. Głównymi zaletami są ich właściwości biologiczne oraz zdolność do biodegradacji. Poliestry ulegają w środowisku biologicznym hydrolizie wynikającej z kontaktu z płynami ustrojowymi oraz degradacji enzymatycznej związanej z enzymami i mikroorganizmami. Oczekuje się, że w kompozytach poliestrów z fosforanami wapnia (CaP) zasadowe produkty resorpcji CaP będą buforować kwasowe produkty degradacji [11].

W literaturze badano mechanizm degradacji bioresorbowalnych kompozytów z fosforanów wapnia i poliestrów. Jest on skomplikowany i zależy od wielu czynników [1, 2, 14]:

- rodzaju i wielkości cząstek fosforanów wapnia;
- sposobu dyspersji cząstek w kompozycie;
- udziału objętościowego cząstek w kompozycie;
- metody otrzymania i formowania kompozytu;
- właściwości polimeru-osnowy;
- połączenia między cząstkami a polimerem.

2. Mechanizm degradacji bioresorbowalnych kompozytów z hydroksyapatytem i polilaktydem

Bioresorbowlane kompozyty z hydroksyapatytem i polilaktydem możemy podzielić na dwie grupy. Pierwsza grupa to materiały o małym udziale hydroksyapatytu, w tym przypadku cząstki HAP stanowią kilka procent wagowych kompozytu i z założenia mają poprawić właściwości mechaniczne [12]. Druga grupa to materiały, w których mamy wysoki udział cząstek ceramicznych, które mają zapewnić im unikalne właściwości biologiczne. Jednak wysoki udział cząstek ceramicznych i ich wpływ na osnowę w czasie formowania może być niekorzystny, a mechanizm degradacji gwałtowny i katastrofalny [13].

2.1. Kompozyty o niskim udziale hydroksyapatytu w osnowie polimerowej

Z założenia napełniacz ma nadawać kompozytowi nowe właściwości lub/i je polepszać np. moduł sztywności, wytrzymałość na rozciąganie, granice plastyczności.

W przypadku bioresorbowalnych materiałów na bazie fosforanów wapnia i poliestrów istnieją sprzeczne wyniki w kwestii wpływu cząsteczek HAP na właściwości kompozy-

tów. Odpowiednio wprowadzone cząstki HAP do osnowy PLA poprawiają właściwości mechaniczne. Z drugiej strony mogą neutralizować kwaśne produkty degradacji lub odwrotnie zwiększać tempo degradacji.

Perez opisuje różnice w kompozytach o zawartości HAP między 2,5 a 20% dla włókien i litych próbek (cienkich filmów). Badane kompozyty składały się z 50 μm aglomeratów HAP w osnowie PLA. Autor zwrócił uwagę, że przy większej zawartości HAP w osnowie występują większe aglomeraty cząstek. Wraz ze wzrostem ilości HAP w kompozycie wzrósł moduł sprężystości i spadała wytrzymałość na rozciąganie. Modyfikowane włókna wykazywały wyższą wytrzymałość na rozciąganie w porównaniu do filmów. Z drugiej strony miały szybszą degradację, zgodnie z cieńszym przekrojem poprzecznym. Natomiast filmy z 2,5% HAP mają zwiększoną odporność na pękanie. We wszystkich kompozytach po immersji w medium następuje spadek właściwości mechanicznych. Mniejsza powierzchnia przekroju włókien znacząco skraca czas ich degradacji. W materiałach o większej zawartości HAP autor stwierdził przedwczesną degradację matrycy polimerowej, a im większa była zawartość HAP w matrycy, tym drastyczniejszy spadek wytrzymałości. Perez i in. opisał mechanizm degradacji w trzech etapach: początkowy po immersji w medium, stabilizacji, ciężki (utrata właściwości mechanicznych). Nie we wszystkich kompozytach występują wszystkie etapy np. w tych o dużej zawartości 20% HAP, występuje tylko pierwszy etap, który jest katastrofalny. W takich kompozytach w krótkim czasie od zanurzenia w medium próbka rozpada się i traci właściwości mechaniczne [15].

Diaz i in. zbadał mechanizm degradacji PLA oraz PCL z dodatkiem nHAP. W swoich publikacjach opisuje degradację porowatych kompozytów (90%) z nanometrycznego HAP o wielkości >200 nm. Udział nHAP wynosi: 10, 30, 50% wagowo.

Proces degradacji kompozytu z osnową PLA Diaz i in. opisuje w czterech etapach:

- pęcznienia i hydratacji polimeru;
- zerwania wiązań estrowych;
- dyfuzji rozpuszczonych produktów degradacji;
- zanikania rusztowania.

Zauważa przy tym, że wyższa zawartość cząstek nHAP w kompozycie, powoduje niższą krystaliczność i entalpię topnienia PLA. Zwraca też uwagę w swojej pracy, że faza amorficzna jest bardziej podatna na degradację hydrolityczną. Z drugiej strony wyższa zawartość nHAP powoduje wzrost właściwości mechanicznych (modułu sprężystości oraz granicy plastyczności). Trzeba podkreślić, że przy zastosowanej przez niego metodzie wytwarzania kompozytu wielkość porów spada wraz ze wzrostem nHAP, co wpływa korzystnie na wytrzymałość w stanie suchym.

Właściwości mechaniczne wszystkich badanych przez niego kompozytów zarówno z PLA jak PCL spadają w czasie degradacji w PBSie w 37°C. PBS (*Phosphate-Buffered Saline*) jest to roztwór soli fizjologicznej powszechnie stosowany w badaniach degradacji biomateriałów. Autor w badaniu degradacji zauważył, że największy spadek był dla kompozytów o zawartości 50% nHAP. Sugeruje, że cząsteczki nHAP działają jako akcelerator degradacji kompozytów w PBSie.

W przypadku kompozytów o udziale nHAP powyżej 30% z PLA spadek właściwości mechanicznych jest gwałtowniejszy. Kompozyty o zawartości 30 oraz 50% nHAP w PLA w pierwszych 4 tygodniach tracą około 50% wytrzymałości. Po 8 tygodniach

właściwości mechaniczne spadają drastycznie w okolice zera. Przy czym próbki czystego PLA zachowują stabilność w tym okresie.

Diaz i in. przedstawił zmiany pomiarów pH w PBSie w czasie degradacji kompozytów. Wszystkie kompozyty o różnej zawartości nHAP z PLA w badaniu zachowywały się podobnie w pierwszym tygodniu, mianowicie pH spadło bardzo nieznacznie. Następnie pH stabilizowało się dla PLA oraz kompozytu o niskiej wartości HAP, a dla kompozytów o zawartości nHAP powyżej 30% rosło. Spadek pH najprawdopodobniej wynika z obecności kwasu mlekowego, będącego produktem degradacji PLA, a wzrost pH spowodowany jest rozpuszczaniem nHAP. W przypadku kompozytów z PCL Diaz i in. obserwował wzrost pH od samego początku, co tłumaczył neutralizacją produktów degradacji polimeru na skutek rozpuszczania nHAP.

Absorpcja wody jest pierwszym zdarzeniem, które występuje, gdy wszczep jest w kontakcie z medium wodnym. Degradacja hydrolytyczna kompozytów jest jej konsekwencją, jest to ważny proces. Diaz i in. pisze, że wysoko porowate próbki z PLA i nHAP od pierwszego tygodnia absorbowaly wodę. Początkowo proces ten był stabilny, następnie po 6 tygodniu przyspieszył. Im większa była zawartość nHAP tym mniejsza absorpcja wody.

Wzrost absorpcji wody odzwierciedla szybkość degradacji. Akumulacja hydrofilowych produktów degradacji wewnątrz rusztowania prowadzi do wzrostu absorpcji wody podczas procesu degradacji. Prędkość absorpcji wody stabilizuje się w wyniku rozpuszczania produktów degradacji. Cząsteczki nHAP spowalniają szybkość degradacji rusztowań PLA, ponieważ są roztworem alkalicznym, który działa jak fizyczna bariera powodująca zmniejszenie szybkości degradacji.

Utrata masy kompozytów jest jedną z oznak jego degradacji. Diaz i in. opisują, że w PLA rozpoczęła się dopiero po drugim tygodniu, podczas gdy rusztowania kompozytowe zaczęły ulegać degradacji po pierwszym tygodniu. Pod koniec ósmego tygodnia wszystkie rusztowania uległy podobnej utracie masy wynoszącej około 22%. Wyniki te mogą wskazywać, że cząstki nHAP powodują utratę masy od początku procesu degradacji, ale szybkość degradacji jest wolniejsza w porównaniu z rusztowaniami PLA. Mechanizm degradacji polilaktydów, takich jak PLA, polega na degradacji masowej. Gdy zwiększa się pobór wody, szybkość degradacji przyspiesza [13, 14].

Delabarde i in. badał kompozyty z nHAP (0,5 do 10% wagowych, 200 nm), które były tłoczone w temperaturze 200°C. Wytworzone z medycznego polilaktydu o lepkości 1,6 dL/g. Materiały te wykazały wyraźne zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie i odkształcenia po przyspieszonym starzeniu w wodnym roztworze NaOH w temperaturze 50°C. Degradacji kompozytów o zawartości 10% wagowych nHAP towarzyszyła utrata masy, erozja powierzchni, zwiększona hydrofilowość. Dodanie dobrze zdyspergowanych cząstek nanoziarnistego hydroksyapatytu spowodowało wzrost szybkości utraty masy podczas starzenia. Autor utożsamia przyspieszoną degradację z oddziaływaniami na granicy faz matryca/cząstki. Spadki wytrzymałości na rozciąganie i odkształcenia do zniszczenia wraz z czasem starzenia były znacznie mniej wyraźne w obecności nHAP niż w niezmodyfikowanych próbkach. Sugeruje to, że nHAP może działać jako bufor. Warto dodać, że amorficzne próbki traciły masę szybciej niż w pełni sferulityczne próbki polilaktydu. Absorpcja wody początkowo wzrastała wraz z czasem starzenia w amorficznych filmach, osiągając plateau na poziomie około 4% wag. (między 2 i 3 tygodniem), następnie wzrastała dalej osiągając około 7% wag. po tygodniu 5 [16].

Wytworzenie kompozytów z HAP wymaga kontrolowania właściwości przetworzonego polimeru, co jak widać z opisanych publikacji jest skomplikowane i wiele czynników wpływa na ostateczne właściwości kompozytu. Pomimo tego, że HAP jest uważany za jeden z najbardziej bioaktywnych fosforanów wapnia, kompozyty takie mogą wymagać dodatkowych czynników wspomagających formowanie nowej tkanki kostnej, takich jak białko morfogenetyczne kości (BMP). 5% wagowych HAP jest uważane za niewystarczające do przekształcenia materiału w naturalną tkankę. Bonfield i in. wykazali, że minimalny udział objętości HAP, który jest korzystny pod względem wzrostu kości i konwersji, wynosi ~20% [17].

2.2. Kompozyty o wysokim udziale hydroksyapatytu w osnowie polimerowej

Właściwości kompozytów o wysokim udziale ponad 50% HAP w szczególności tych o mikronowym ziarnie HAP są opisane w literaturze. Mało jest jednak znany mechanizm degradacji tej grupy kompozytów w szczególności z nanohydroksyapatytem. Toms i in. w swojej pracy z 2006 roku opisał, że kompozyty z mikronowym hydroksyapatytem, o zawartości powyżej 70% HAP (wagowo) mają właściwości mechaniczne, które odpowiadają właściwościom ludzkiej kości korowej. Autor zauważył, że właściwości te ulegają pogorszeniu po zanurzeniu w zrównoważonym roztworze soli Hanksa z powodu degradacji fazy polimerowej. A degradacja jest bardziej wyraźna w próbkach o większej zawartości ceramiki ze względu na mniejszą zawartość polimeru pomiędzy cząstkami ceramicznymi [18]. Rakovsky i in. w swojej pracy ocenił, że problem kompozytów o wysokiej dyspersji nHAP, wynikają z nanometrycznej warstwy polimeru, której właściwości są za słabe [19].

Pomimo wysokiego udziału nHAP, właściwości takiego kompozytu determinują właściwości oraz struktura polimeru, który otacza ziarna bądź aglomeraty HAP. Należy zwrócić szczególną uwagę na wpływ dużego udziału nanocząsteczek hydroksyapatytu na strukturę osnowy polimerowej w czasie przetwarzania. Pietrzykowska i in. opisali wpływ nHAP w trakcie prasowania na ciepło na polilaktyd. Wykazano, że większy udział nHAP w osnowie, zaburza krystalizację polimeru, a niższy stopień krystaliczności powoduje niższe właściwości mechaniczne. W bioresorbowalnych kompozytach z fosforanami wapnia mogą występować różne rodzaje dyspersji cząstek: kilku mikronowe granule, spieczone aglomeraty, agregaty czy też materiały o wysokim stopniu dyspersji. W zależności od rodzaju dyspersji otrzymywana jest różna grubość warstwy polimeru, przy tym samym składzie kompozytu [20].

Właściwości mechaniczne oraz wpływ tygodniowej inkubacji w PBS kompozytów o różnej dyspersji z wysokim udziałem nHAP powyżej 70% wagowych przedstawiono w tabeli 1. Rodzaj dyspersji nHAP miał znaczący wpływ na właściwości mechaniczne oraz porowatość otrzymanych materiałów. Materiał o wysokiej dyspersji mają wytrzymałość na ściskanie 370 MPa i porowatości rzędu 1%. Natomiast drugi rodzaj kompozytu o niższej dyspersji, gdzie nHAP jest w postaci aglomeratów ma wytrzymałość na ściskanie 99 MPa oraz porowatość rzędu 25%. Dla tych kompozytów zbadano właściwości mechaniczne, nasiąkliwość oraz zmiany pH i przewodności płynu po imersji ich w płynie PBS w 37°C.

Dla obu kompozytów w pomiarach pH oraz przewodności w płynie PBS zauważono, że największe zmiany zachodzą w pierwszym tygodniu. W kompozytach przetwarzanych w temperaturze 165°C zaobserwowano w pierwszym tygodniu spadek pH do 5,8 w PBSie,

czyli powstał odczyn lekko kwaśny. Najprawdopodobniej związane jest to z degradacją polimeru i „wyrzutem” produktów degradacji termicznej polimeru. W kolejnych tygodniach po zmianie PBSu co tydzień zaobserwowano, że pH rośnie. Przewodność PBSu wzrasta, choć widoczny jest chwilowy spadek w drugim tygodniu. Wyniki przedstawiono na rysunku 3. Na wykresie przedstawiono także zmiany dla czystego nHAP oraz PLA. Zaobserwowano, że pH oraz przewodność czystego PLA w czasie 21 dni są stabilne. Natomiast w przypadku czystego nHAP w pierwszym tygodniu obserwujemy wzrost pH, które w późniejszych etapach jest już stabilne na poziomie 7.2. Według Smoleń i in. największy „wyrzut” jonów wapnia w nanohydroksyapatycie następuje w pierwszym okresie degradacji. Następnie w okresie 21 dni rozpuszczalność nHAP i ilość uwalnianych jonów wapnia jest na tym samym poziomie. Należy zwrócić uwagę, że HAP w środowisku kwaśnym rozpuszcza się szybciej [25].

Tabela 1. Porównie właściwości kompozytów o różnej dyspersji

		Wytrzymałość na ściskanie (wyznaczona na sucho)	Nasiąkliwość [%]	Wytrzymałość na ściskanie po umieszczeniu w PBS	Zmiana masy po 4 tyg.
Kompozyt NISKA DYSPERSJA uzyskany metodą kriomielenia	Prasowane izostaticznie w 165°C 75 MP	99 MPa	13	10 ±2 MPa	6%
Kompozyt WYSOKA DYSPERSJA (uzyskany z infiltrowanego granulatu)	Prasowane izostaticznie w 165°C 75MP	100 MPa	-	Próbka uległa katastrofalnie zniszczeniu po imersji w PBS	-
	Prasowane dwuetapowo	370 MPa	-		-
GoHAP	Prasowane izostaticznie w 165°C 75 MP	24 MPa	30	Próbka uległa zniszczeniu katastrofalnie po imersji w PBS	-

Źródło: wyniki własne na podstawie [24, 26]

Wytrzymałość kompozytów po imersji w PBSie zmienia się w zależności od rodzaju kompozytu, a sposób degradacji tych materiałów jest inny. Największe zmiany zauważono w pierwszym dniu po zanurzeniu ich w PBSie.

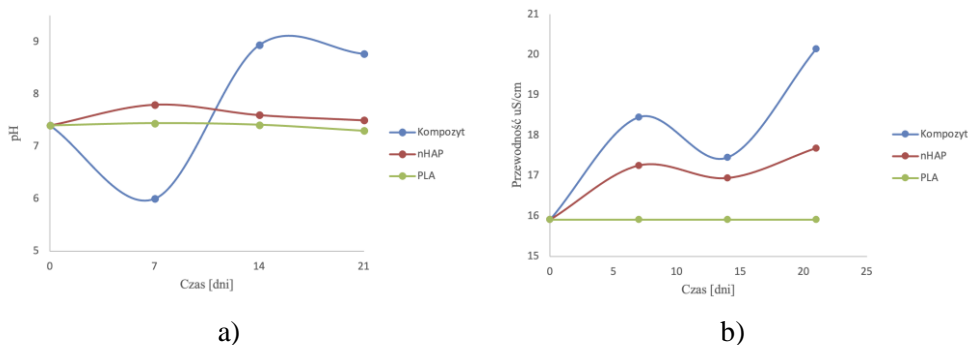
Kompozyty o wysokim poziomie dyspersji i wytrzymałości mechanicznej (370 MPa i porowatości 1%) po zanurzeniu w medium wodnym pękają i rozpadają się.

Natomiast kompozyty o niskiej dyspersji (wytrzymałość 99 MPa) zachowują spójność po imersji w PBSie. Ich wytrzymałość na ściskanie spada po pierwszym tygodniu do 20 MPa i utrzymuje się już na tym poziomie w okresie 21 dni.

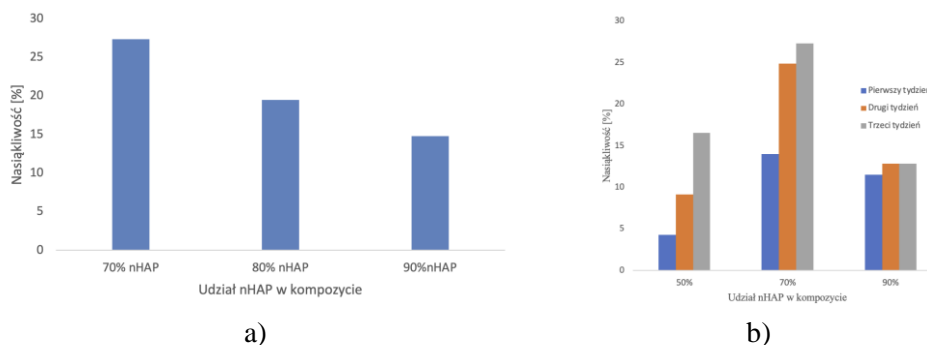
Wzrost zawartości cząstek nHAP w przedziale 70- 90% w kompozytach o wysokiej dyspersji powoduje spadek nasiąkliwości materiału, jest w przedziale 15- 27%. Dla PLA nasiąkliwość jest niska i wynosi kilka procent (rys. 4a).

Podobny eksperyment przeprowadzony dla kompozytów o niższej dyspersji i różnej zawartości nHAP (50%, 70%, 90%) w okresie 3 tygodni (21 dni), wykazał, że nasiąkliwość zwiększa się w pierwszych tygodniach znacznie. Jedynie dla kompozytów 90%

różnica ta nie jest wielka, ale wynika to z przewagi udziału w składzie nHAP. Kompozyt o zawartości nHAP 50% w pierwszym tygodniu ma niską nasiąkliwość około 4%, w drugim i trzecim tygodniu wzrasta do 24%. Podobnie jest z kompozytem o zawartości nHAP 70% pierwszego tygodnia nasiąkliwość wynosi 14% a kolejnego 24%. Podsumowując kompozyty o wyższej dyspersji mają większą nasiąkliwość. Dla 70% nHAP różnica wynosi 13%, czyli 14% dla niskiej dyspersji i 27% dla wysokiej (rys. 4b).



Rysunek 3. Zmiany w PBSie w czasie 21 dni w temp. 37 °C dla kompozytu o zawartości nHAP 70% oraz czystego nHAP i PLA, a) pH, b) przewodność [opracowanie własne]



Rysunek 4. Nasiąkliwość kompozytów o osnowie PLA, a) o wysokiej dyspersji nHAP, b) niższej dyspersji nHAP [opracowanie własne]

3. Podsumowanie

Kompozyty poliester/HAP mają wiele korzystnych właściwości, takich jak odpowiednia wytrzymałość mechaniczna, biodegradowalność, bioaktywność. Zróżnicowane geometrie kompozytów poliester/HAP zostały wykorzystane jako wszczepy kostne, śruby i płytki. Konieczne są dalsze prace w celu kontrolowania szybkości degradacji oraz poprawy połączenia między cząstkami hydroksyapatytu a polimerem.

Biodegradacja biomateriałów hydroksyapatytu i poliestrów polega na hydrolitycznej degradacji polimeru oraz rozpuszczaniu hydroksyapatytu w ludzkim organizmie. Tempo degradacji powinno odpowiadać tempu wzrostu tkanki kostnej w warunkach *in vivo*.

Degradacja bioresorbowalnych kompozytów na bazie fosforanów wapnia i poliestrów wynika z wielu czynników:

- rodzaju i wielkości fosforanów wapnia;

- właściwości polimeru (masy cząsteczkowej, stopnia krystaliczności);
- sposobu dyspersji fosforanów wapnia w osnowie;
- wpływu cząstek na polimer w trakcie formowania;
- porowatości materiału;
- połączenia między osnową ceramiczną a polimerem.

Literatura

1. Shikunami Y., Okuno M., *Bioresorbable devices made of forged composites of hydroxyapatite (HA) particles and poly-L-lactide (PLLA), part I. Basic characteristics*, *Biomaterial*, 20, 1999, s. 859-877.
2. Fu Z., Cui J., Zhao B., Shen S.G., Lin K., *An overview of polyester/hydroxyapatite composites for bone tissue repairing*, *Journal of Orthopaedic Translation*, 28, 2021, s. 118-130.
3. Jaiswal S., Dubey A., Lahiri D., *In Vitro Biodegradation and Biocompatibility of Mg-HA-Based Composites for Orthopaedic Applications: A Review*, *Journal of the Indian Institute of Science*, 99, 2019, s. 303-327.
4. Ignjatović N., Tomić S., Dakić M., Miljković M., Plavšić M., Uskoković D., *Synthesis and properties of hydroxyapatite/ poly-l-lactide composite biomaterials*, *Biomaterials*, 20 1999, s. 809-816.
5. Zhou H., Lawrence J.G., Bhaduri S.B., *Fabrication aspects of PLA-CaP/PLGA-CaP composites for orthopedic applications: a review*, *Acta Biomaterialia*, 8, 2012, s. 1999-2016.
6. Kothapalli C.R., Shaw M.T., Wei M., *Biodegradable HAP/PLA 3-D porous scaffolds: effect of nano-sized filler content on scaffold properties*, *Acta Biomaterialia*, 1, 2005, s. 653-662.
7. Sonseca A., Peponi L., Sahuquillo O., Kenny J.M., Gime'nez E., *Electrospinning of biodegradable polylactide/hydroxyapatite nanofibers: study on the morphology, crystallinity structure and thermal stability*, *Polymer Degradation and Stability*, 97, 2012, s. 2052-2059.
8. Kusnieruk S., Wojnarowicz J., Chodara A., Chudoba T., Gierlotka S., Łojkowski W., *Influence of hydrothermal synthesis parameters on the properties of hydroxyapatite nanoparticles*, *Beilstein Journal Nanotechnology*, 7, 2016, s. 1586-1601.
9. Castro-Aguirre E., Iniguez-Franco F., Samsudin H., Fang X., Auras R., *Poly(lactic acid) – Mass production, processing, industrial applications, and end of life*, *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 2016, s. 333-366.
10. Weiler W., Gogolewski S., *Enhancement of the mechanical properties of polylactides by solid-state extrusion: I. Poly(D-lactide)*, *Biomaterials*, 17, 1996, s. 529-535.
11. Elsayy M. A., Kim K.H., Park J.W., Deep A., *Hydrolytic degradation of polylactic acid (PLA) and its composites*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 2017, s. 1346-1352.
12. Bartnikowski M., Dargaville T.R., Ivanovski S., Dietmar W., Huttmacher D.W., *Degradation mechanisms of polycaprolactone in the context of chemistry, geometry and environment*, *Progress in Polymer Science*, 96, 2019, s. 1-20.
13. Díaz E., Sandonis I., Valle M.B., *In Vitro Degradation of Poly(caprolactone)/nHA Composites*, *Journal of Nanomaterials*, 2014, s. 1-8.
14. Diaz E., Sandonis I., Puerto I., Ibanez I., *In vitro degradation of PLLA/nHA composite scaffolds*, *Polymer Engineering and Science*, 54, 2014, s. 2571-2578.
15. Perez E., *Mechanical performance of in vitro degraded polylactic acid/hydroxyapatite composites*, *Journal of Materials Science*, 56, 2021, s. 19915-19935.
16. Delabarde C., Plummer J.G.C., Bourban P.E., Manson A.E.J., *Accelerated ageing and degradation in poly-L-lactide/hydroxyapatite nanocomposites*, *Polymer Degradation and Stability*, 96, 2011, s. 595-607.
17. Bonfield W., *Hydroxyapatite-Reinforced Polyethylene as an Analogous Material for Bone Replacement*, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 523, 1988, s. 173-177.

18. Russias J., Saiz E., Nalla R.K., Gryn K., Ritchie R.O., Tomsia A.P., *Fabrication and mechanical properties of PLA/HA composites: A study of in vitro degradation*, *Materials Science and Engineering C*, 26, 2006, s. 1289 -1295.
19. Rakovsky A., Gotman I., Rabkin E., Gutmanas E.Y., *β -TCP-poly lactide composite scaffolds with high strength and enhanced permeability prepared by a modified salt leaching method*, journal of the mechanical behavior of biomedical materials, 32, 2014, s. 89-98.
20. Pietrzykowska E., Romelczyk-Baishya B., Chodara A., Koltsov I., Smogór H., Mizeracki J., Pakieła Z., Łojkowski W., *Microstructure and Mechanical Properties of Inverse Nanocomposite Made from Poly lactide and Hydroxyapatite Nanoparticles*, *Materials*, 15, 184, 2022, s. 1-23.
21. Biernat M., Rudnicka K., Ciołek L., *Porowate biokompozyty na bazie polilaktydu z udziałem cząstek stałych jako materiały do regeneracji kości*, [w:] Mołdoch-Mendoń I., Maciąg K. (red.), *Technologie XXI wieku – aktualne problemy i nowe wyzwania. Tom 1*, Wydawnictwo Naukowe TYGIEL sp. z o.o., Lublin 2020, s. 249-265.
22. Gazińska M., Krokos A., Kobielarz M., Włodarczyk M., Skibińska P., Stępak B., Antończak A., Morawiak M., Płociński P., Rudnicka, K., *Influence of hydroxyapatite surface functionalization on thermal and biological properties of poly(l-lactide)-and poly(l-lactide-co-glycolide)-based composites*, *International Journal of Molecular Sciences*, 21, 18, 2020, s. 1-21
23. Antosik A., Woźniak A., Najmrodzki A., Tymowicz-Grzyb P., Szterner P., Kurzyk A., Biernat M., *Wpływ procesu degradacji na właściwości fizykomechaniczne kompozytów PCL/HA*, *Szkło i Ceramika*, 3, 2022, s. 38-42.
24. Pietrzykowska E., Mukhovskiy R., Chodara A., Wojnarowicz, J., Koltsov I., Chudoba T., Łojkowski W., *Composites of poly lactide and nano-hydroxyapatite created by cryomilling and warm isostatic pressing for bone implants applications*, *Materials Letters*, 236, 2018, s. 625-628.
25. Smolen D., Chudoba T., Gierlotka S., Kedzierska K., Łojkowski W., Sobczak K., Świeszkowski W., Kurzydłowski K.J., *Hydroxyapatite Nanopowder Synthesis with a Programmed Resorption Rate*, *Journal of Nanomaterials*, 2012, s. 1-9.
26. Pietrzykowska E., Romelczyk-Baishya B., Wojnarowicz J., Sokolova M., Szlaza K., Świeszkowski W., Locs J., Łojkowski W., *Preparation of a Ceramic Matrix Composite Made of Hydroxyapatite Nanoparticles and Polylactic Acid by Consolidation of Composite Granules*, *Nanomaterials*, 10 (6), 2020, s. 1-14.

Degradacja bioresorbowalnych kompozytów z hydroksyapatytu i poliestrów stosowanych na implanty kostne

Streszczenie

Jest duże zainteresowanie bioresorbowalnymi kompozycjami na implanty ortopedyczne. Choć w ostatnich latach powstało wiele opracowań dotyczących bioresorbowalnych implantów to wciąż nie ma materiału na bioresorbowalny wysokowytrzymały implant. Wiadomo, że z poliestrów i fosforanów wapnia można otrzymać implant o właściwościach mechanicznych zbliżonych do tkanki kostnej, jednak mechanizm ich degradacji nie pozwala na samodzielne ich zastosowanie jako wszczepy przenoszące naprężenia. Bioresorbowalne implanty wymagają wzmocnienia miejsc implantacji tytanowymi płytami. Obecna wiedza nie jest wystarczająca do wytworzenia kompozytu o kontrolowanym tempie degradacji, który będzie kompensowany przez wzrost tkanki kostnej.

Niniejsza praca stanowi opis degradacji kompozytów o różnej zawartości i dyspersji hydroksyapatytu w osnowie polimerowej z polilaktydu.

Hydroksyapat w niewielkich ilościach poprawia wytrzymałość kompozytu, natomiast wysoki udział nadaje mu silne właściwości osteoindukcyjne. Z drugiej strony wysoki udział bioaktywnej ceramiki może negatywnie wpływać na właściwości polimeru stanowiącego osnowę. Chociaż hydroksyapat może neutralizować produkty degradacji poliestrów, to trzeba liczyć się, że może przyspieszać degradację polilaktydu, a nawet czynić ją katastrofalną.

W przypadku kompozytów o wysokim udziale fosforanów wapnia istotna jest zarówno dyspersja jak i połączenie na granicy faz ceramika/polimer. Słabe połączenie może skutkować katastrofalną degradacją wszczepu. Rozwiązaniem może być zarówno modyfikowanie powierzchni hydroksyapatytu w celu polepszenia połączenia z osnową polimerową, ale także wytworzenie kompozytu z kontrolowanym aglomeratem i zapewnienie odpowiedniej grubości warstwy polimeru go otaczającego.

Słowa kluczowe: bioresorbowalne kompozyty, nanohydroksyapatyt, degradacja

Degradation of bioresorbable hydroxyapatite and polyester composites used for bone implants

Abstract

There is great interest in bioresorbable composite materials for orthopaedic implants. Although there have been many studies on bioresorbable implants in recent years, there is still no material for a bioresorbable high-strength implant. It is known that implants with bone-like mechanical properties can be obtained from polyesters and calcium phosphates, but their degradation mechanism does not allow them to be used as stress-bearing implants on their own. Bioresorbable implants require reinforcement of the implant sites with titanium plates. This knowledge is not sufficient to produce a composite with a controlled degradation rate that will be compensated by bone growth.

The present study is a description of the degradation of composites with different contents and dispersions of hydroxyapatite in a polylactide polymer matrix.

Hydroxyapat, in small amounts, improves the strength of the composite, while a high proportion gives the composite its osteoinductive properties. On the other hand, a high proportion of bioactive ceramic may negatively affect the properties of the matrix polymer. Although hydroxyapat can neutralise the degradation production of polyesters, it must be reckoned with that it can accelerate the degradation of the polylactide and even make it catastrophic.

For composites with a high proportion of calcium phosphates, both dispersion and bonding at the ceramic/polymer interface are important. Poor bonding can result in catastrophic degradation of the implant.

The solution may be both to modify the surface of the hydroxyapatite to improve the bonding to the polymer matrix, but also to produce a composite with a controlled agglomeration and to ensure that the surrounding polymer layer is sufficiently thick.

Keywords: bioresorbable composites, nanohydroxyapatite, degradation

Elektrochemiczna metoda otrzymywania bimetalicznych nanodrutów Ni-X w membranach anodowego tlenku glinu

1. Wstęp

Powszechnie uważa się, że nanotechnologia stanowi podstawę kolejnej rewolucji technologicznej, będącej kontynuacją rewolucji przemysłowej, która rozpoczęła się około 1750 roku wraz z wprowadzeniem maszyny parowej [1]. Nanotechnologię można zdefiniować jako projektowanie, charakteryzację, produkcję oraz zastosowanie materiałów i urządzeń w skali nano. Materiały nanostrukturalne zwane inaczej nanomateriałami to grupa materiałów o co najmniej jednym wymiarze nieprzekraczającym 100 nm [2-4].

Synteza nanostruktur quasi jednowymiarowych (1D), takich jak: nanodruły [5], nanorurki [6, 7], nanowstążki [8] cieszy się dużym zainteresowaniem od czasu odkrycia nanorurek węglowych przez Iijima [9]. Materiały jednowymiarowe swoje szczególne właściwości elektryczne [10], optyczne [11], magnetyczne [12] zawdzięczają wysokiemu stosunkowi powierzchni do objętości, a także bardzo dużej anizotropii kształtu. Zastosowania nanodrutów można znaleźć w wielu dziedzinach, takich jak biomedycyna [13,14], ochrona środowiska [15], spintronika [16, 17] czy optyka [18].

Rozwój nowych technik syntezy nanostruktur pozwolił na wytwarzanie nanodrutów w połączeniu z różnymi materiałami takimi jak materiały półprzewodnikowe [19], metale [12, 20], tlenki [14, 21] itp. W ten sposób można uzyskać jednoelementowe [12] lub złożone z kilku materiałów nanodruły [22] oraz kompozyty „nanodrut-nanocząstka” [23]. Istnieje wiele metod zarówno fizycznych jak i chemicznych wytwarzania nanodrutów, w tym m.in. techniki litograficzne [24], szerokie spektrum metod kontrolowanego wzrostu w fazie gazowej lub ciekłej [25, 26], oraz najbardziej rozpowszechniona technika osadzania elektrochemicznego z wykorzystaniem szablonu (membrany) [5, 27-30]. Cechami wpływającymi na atrakcyjność tej techniki są przede wszystkim możliwość uzyskiwania dobrze zdefiniowanych obiektów o relatywnie łatwo kontrolowanych parametrach, a także niskie koszty, prostota, wysoka wydajność oraz produkcja na dużą skalę. Nanodruły uzyskiwane tą techniką cechuje dobrze określona morfologia i struktura, które determinują właściwości fizyczne decydujące o specyficznych zastosowaniach nanodrutów. Wspomniana wcześniej łatwość kontrolowania parametrów procesu pozwala sprostać wymaganiom stawianym przez rynek.

Jedną z metod syntezy nanodrutów jest połączenie techniki elektroosadzania z wykorzystaniem membran jako matrycy. Najbardziej rozpowszechnione w użyciu są membrany poliwęglanowe (PC) i membrany z porowatego tlenku glinu (AAO). Membrany poliwęglanowe są uzyskiwane poprzez naświetlanie warstw poliwęglanu ciężkimi jonami o określonej gęstości wiązki, a następnie trawienie śladów jonowych. Otrzymane w ten sposób kanały są nieregularnie rozmieszczone i niejednokrotnie wykazują odchylenie

¹ iwona.dobosz@agh.edu.pl, Wydział Metali Nieżelaznych, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, www.agh.edu.pl.

od kierunku normalnego [30]. W przeciwieństwie do tego, membrany AAO cechuje jednorodne, heksagonalne rozmieszczenie porów, jednorodna średnica na całej długości oraz duży współczynnik długości do średnicy, co pozwala uzyskać powtarzalne matryce nanodrutów o wysokim stopniu uporządkowania [27].

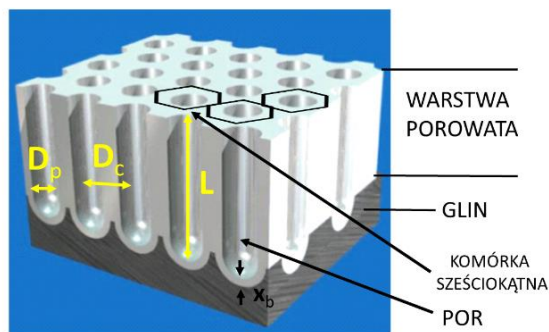
Technika elektroosadzania z zastosowaniem matrycy po raz pierwszy została opisana przez Possina [31] i rozwijana w kolejnych latach przy użyciu różnych szablonów [32-34]. Niemniej jednak samoorganizujący się porowaty anodowy tlenek glinu (AAO) stał się najczęściej stosowanym szablonem do wytwarzania nanostrukturalnych materiałów [35].

Nanodrutury uzyskane w procesie elektrolitycznego osadzania mogą zawierać fazy nierównowagowe, o różnym stopniu krystalicznego rozdrobnienia ziaren i różnych udziałach niewynikających z układów równowagi fazowej [36]. Ponadto materiały metaliczne stopowe osadzone elektrolitycznie mogą wykazywać większy zakres rozpuszczalności w ciele stałym, co zaobserwowano m.in. w stopach Zn-Ni [37], Ni-Mo [38].

Przedstawiona praca poświęcona jest analizie parametrów depozycji oraz właściwości bimetalicznych nanonodrutów stopowych na bazie niklu osadzanych za pomocą technik elektrolitycznych w nanoporowatych membranach tlenku glinu.

2. Charakterystyka porowatych matryc tlenkowych

Membrany porowatego anodowego tlenku glinu są otrzymywane na drodze kontrolowanej anodyzacji. Poprzez odpowiedni dobór parametrów procesu można uzyskać membrany charakteryzujące się określonymi parametrami geometrycznymi, determinującymi kształt i rozmiar nanodrutów. Na rysunku 1 przedstawiono wyidealizowany obraz struktury porowatego tlenku glinu powstały w wyniku anodyzacji glinu. Warstwa porowata zbudowana jest z heksagonalnych komórek zawierających w swym centrum pory o rozmiarach od kilkudziesięciu do kilkuset nanometrów, które ciągną się przez całą długość warstwy tlenku i są do siebie równoległe. Wyróżnia się kilka dobrze zdefiniowanych parametrów charakteryzujących porowatą strukturę tlenku glinu, tj.: średnica porów (D_p), odległość między porami (D_c), grubość warstwy zaporowej na dnie porów (x_b), grubość warstwy tlenku (L). Obecność warstwy zaporowej, która jest słabo przewodząca, znacząco utrudnia proces elektrodepozycji [39].



Rysunek 1. Schemat idealnie uporządkowanej struktury porowatego tlenku glinu – opracowanie własne na podstawie [39]

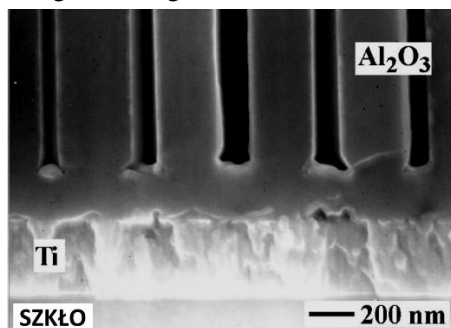
Innym wariantem matrycy tlenkowej jest dwustronnie otwarta membrana tlenku glinu (rys. 2). Taką membranę uzyskuje się po usunięciu warstwy podłoża (glin) oraz warstwy zaporowej. Następnie, na jedną ze stron nanosi się warstwę metaliczną stano-

wiącą kontakt elektryczny, a także zamykającą pory. Zwykle nanosi się warstwy złota lub miedzi o grubości rzędu kilkuset nanometrów, uzależnionej od średnicy porów. Naniesiona warstwa musi być ciągła, żeby zapobiec wyciekaniu materiału podczas procesu elektrodopozycji. Alternatywnym rozwiązaniem jest usunięcie materiału, który wydostał się poza pory. Warstwy uzyskuje się techniką osadzania z fazy gazowej.



Rysunek 2. Schemat ilustrowujący przekrój poprzeczny membrany porowatego tlenku glinu – opracowanie własne

Kolejnym wariantem szablonu, który wykorzystuje się w syntezie nanostruktur jest porowaty tlenek powstały w wyniku anodyzacji warstwy Al/Ti nałożonej techniką osadzania z fazy gazowej na szklanym podłożu. Na rysunku 3 przedstawiono obraz SEM przełomu matrycy porowatego tlenku glinu.



Rysunek 3. Obraz SEM porowatej matrycy tlenku glinu/tytan/szkło – przekrój poprzeczny [40]

3. Charakterystyka osadzania elektrolitycznego w szablonychach

Głównymi wymaganiami stawianymi przed producentami materiałów wykazujących tak szeroki wachlarz zastosowań jak nanostruktury jest ich powtarzalność i możliwość wytwarzania na dużych powierzchniach obiektów o ściśle określonych parametrach. Powyższe wymagania okazują się być trudne do realizacji, gdyż wzrost nanodrutów w szablonychach często przebiega w sposób niejednorodny, dlatego też konieczne są intensywne badania w celu zoptymalizowania parametrów procesu [41, 42] i eliminacji lub częściowego ograniczenia czynników blokujących jednorodny wzrost nanodrutów. Do czynników tych należą opisane poniżej wydzielanie wodoru, transport masy, anomalna kodepozycja [42].

3.1. Wydzielanie wodoru w nanoporach

W procesie elektrolitycznego osadzania metali w tym także niklu i jego stopów zachodzi reakcja uboczna polegająca na wydzielaniu gazowego wodoru na katodzie (reakcja 1).



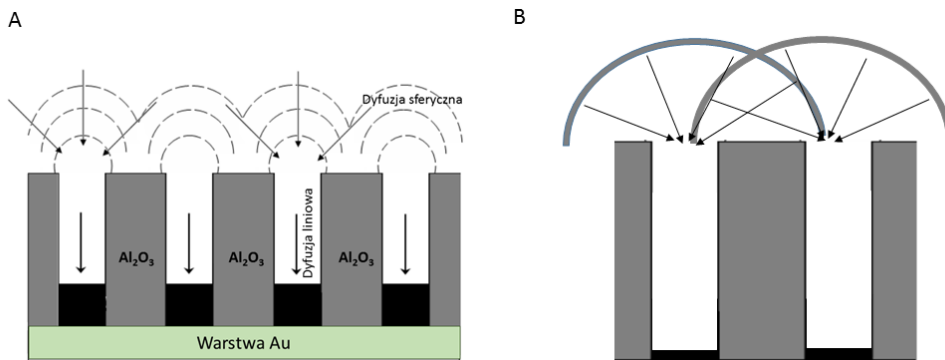
Podczas osadzania wspomaganego szablonem, pęcherzyki gazowego wodoru rosnące w nanoporach mogą je blokować utrudniając lub nawet uniemożliwiając wzrost nanodrutów metalu. Wynikiem tego, może być niejednorodne wypełnienie porowatej membrany. Co więcej, gdy gazowy wodór wydzielą się w pobliżu elektrody, lokalne pH może ulec zmianie i wpłynąć na mechanizm elektrolitycznego osadzania metalu. Może to prowadzić do zmiany struktury nanodrutów [43], a w przypadku osadzania stopów metali do zmian jego składu. W skrajnym przypadku nadmierny wzrost pH roztworu w pobliżu powierzchni elektrody sprzyja powstawaniu pośrednich i słabo rozpuszczalnych hydrozwiązków metali [44]. Jednym ze sposobów uniknięcia niekorzystnych reakcji i stabilizacji pH roztworu jak również zminimalizowania szybkości reakcji ubocznej wydzielania wodoru jest dodatek związków buforujących, którymi mogą być m.in.: kwas borowy, laurylosiarczan sodu, amoniak i związki amonowe, węglan sodu itp. [45-47]. Innym sposobem zminimalizowania wpływu reakcji wydzielania wodoru jest zastosowanie techniki elektroosadzania prądem pulsacyjnym [42, 48, 49]. Technika prądu pulsacyjnego dzięki możliwości zastosowania odpowiednio długiego czasu relaksacji lub jego wyłączenia ułatwia dyfuzję jonów oraz gazowego wodoru zarówno z wnętrza nanoporów jak i do wewnątrz.

Z drugiej strony reakcja uboczna wydzielania gazowego wodoru jest istotnym czynnikiem w wytwarzaniu nanorurek. W literaturze [50] została opisana rola pęcherzyków wodoru podczas formowania rurek w nanoporowatych membranach. Wewnętrzna średnica nanorurki jest zależna od rozmiaru pęcherzyków wodoru znajdujących się wewnątrz nanoporu dzięki czemu grubość ściany nanorurki można regulować poprzez zmianę parametrów wpływających na wydzielanie wodoru takich jak pH elektrolitu lub/i potencjału katodowego. Co więcej, Philippe i Michler [51] zaproponowali model przewidujący geometrię tworzonej nanostruktury (rurki lub druty) zależny od przyłożonego potencjału, czasu elektroosadzania, pH roztworu oraz gęstości porów. Model zakładał przebieg reakcji redukcji metali wewnątrz szablonu w obszarze kontroli dyfuzyjnej zależny od pH elektrolitu. Dla wyższych wartości pH grubość ściany nanorurki zbliżała się do promienia porów tworząc druty. Podobnych obserwacji dokonali Davis i Podchala [52] wnioskując na podstawie swoich badań że do formowania się struktur rurowych dochodzi w procesie osadzania kontrolowanego przez transport masy, reakcję wydzielania wodoru oraz niską wydajność prądową procesu. Wzrost wydajności prądowej sprzyjał tworzeniu się drutów. Celis i inni pokazali że technika elektroosadzania może wpływać na postać nanoobjektów [53]. W procesie elektroosadzania z roztworu wieloskładnikowego w AAO techniką prądu pulsacyjnego przebiegającym przy minimalnym udziale reakcji wydzielania wodoru uzyskali nanodruły, natomiast techniką prądu stałego otrzymali nanorurki.

3.2. Transport masy

Jedną z przyczyn nierównomiernego wypełnienia porów membrany oraz niejednorodnego wzrostu nanodrutów jest zaburzony transport jonów zarówno na zewnątrz, jak i wewnątrz porów szablonu. Transport masy odgrywa istotną rolę podczas elektrolitycznego osadzania metalu szczególnie na podłożu jakim jest matryca cylindrycznych porów [54]. Proces osadzania kontrolowany dyfuzyjnie (najwolniejszym etapem procesu jest wędrówka jonów przez warstwę dyfuzyjną) jest związany z możliwością wyczerpania jonów w warstwie przeelektrodowej oraz nadmiernym udziałem reakcji ubocznych. Dlatego też, korzystniejszym jest prowadzenie procesu elektroosadzania w obszarze kontroli aktywacyjnej (tj. o szybkości przebiegu procesu decyduje szybkość reakcji elektrodowych, a więc w przypadku katody, redukcja jonów na jej powierzchni).

W procesach elektrolitycznego osadzania metali w porowatych membranach przebiegających z ograniczoną szybkością transportu jonów obserwujemy dwie warstwy dyfuzyjne [54]. Jedna z nich znajduje się na powierzchni membrany w górnej części porów tzw. warstwa zewnętrzna, natomiast druga wewnątrz porów tlenku AAO jak przedstawiono na rysunku 3a. Przyjmuje się, że w zewnętrznej warstwie dyfuzyjnej, która jest cienka w porównaniu z wewnętrzną, dominuje dyfuzja sferyczna natomiast wewnątrz porów transport jonów odbywa się poprzez dyfuzję liniową. Przy różnych profilach stężeń można uzyskać odmienną szybkość wzrostu drutów, co wiąże się z nakładaniem się na siebie obszarów dyfuzji sferycznej (rys 3b), powodującym powstawanie większych strumieni dyfuzyjnych wokół niektórych porów, które tym samym zyskują preferencyjne warunki dla depozycji. Może to skutkować niejednorodnym wzrostem przejawiającym się dużymi różnicami w długości nanodrutów [55].



Rysunek 3. Schemat przedstawiający rodzaje dyfuzji podczas procesu elektrolitycznego osadzania metalu w matrycy porowatego tlenku glinu – opracowanie własne na podstawie [56]

Na zwiększenie szybkości transportu jonów metali do powierzchni, a co za tym idzie uzyskiwanie bardziej jednorodnych drutów, mają wpływ takie czynniki jak: podwyższona temperatura elektrolitu, zastosowanie techniki osadzania pulsacyjnego, mieszanie, przyłożenie odpowiednio skierowanego pola magnetycznego czy konfiguracja elektrody [41, 48, 57]. Wpływ wzajemnego ułożenia elektrod był badany przez Konishi i in. podczas osadzania nanodrutów miedzi [58] dla dwóch równoległych konfiguracji katody i anody: katoda nad anodą i anoda nad katodą. W wyniku uzyskano znaczący wzrost gęstości prądu, dla układu z katodą na dole celki, co wyjaśniono zwiększonym transportem

masy wspieranym siłą grawitacji. Podobny efekt polegający na zwiększeniu transportu masy można uzyskać stosując odpowiednio zorientowane pole magnetyczne [41, 58].

Belevskii i Cesiulis [59] zaobserwowali, że elektrolityczne osadzanie stopu Co-W w porowatej matrycy tlenkowej jest kontrolowane poprzez transport masy, natomiast osadzanie na płaskiej elektrodzie zachodzi w obszarze kontroli aktywacyjnej. W celu uzyskania podczas osadzania metalu w porowatych membranach kontroli aktywacyjnej stosuje się technikę prądu pulsacyjnego, która przy odpowiednim doborze impulsów, może wpływać na poprawę morfologii, składu chemicznego oraz wielkość krystalitów itp.

3.3. Anomalne współosadzanie metali

Proces osadzania elektrolitycznego stopów metali może zachodzić gdy w roztworze znajdują się przynajmniej dwa rodzaje jonów, które będą mogły się współosadzać z jednej kąpeli na powierzchni katody. Procesy osadzania jednego, dwóch lub kilku metali z pojedynczej kąpeli nie różnią się zasadniczo między sobą, jednak w złożonych układach mogą ulec zmianie warunki redukcji poszczególnych jonów wynikające ze wzajemnych relacji reagentów [60]. W przypadku osadzania stopów w porowatych matrycach tlenkowych, oprócz wyzwań takich jak reakcja uboczna współwydzielania gazowego wodoru, pojawia się konieczność kontroli składu stopu, związana z występowaniem zjawiska nazywanego anomalnym osadzaniem. Proces anomalnego współosadzania metali po raz pierwszy opisał Brener [60]. Anomalne osadzanie charakteryzuje się tym, że w określonych warunkach w sposób uprzywilejowany ulega redukcji metal mniej szlachetny przed bardziej szlachetnym. Innymi słowy w procesie anomalnego współosadzania zawartość metalu mniej szlachetnego w stopie jest wyższa w porównaniu z jego zawartością w roztworze. W przypadku anomalnego współosadzania można zahamować szybkość reakcji redukcji jednego rodzaju jonów metalu lub można ją przyspieszyć, podobnie jak ma to miejsce w osadzaniu indukowanym. Proces anomalnej kodepozycji charakteryzuje parametr SR (ang. selectivity ratio) definiowany jako stosunek stężenia atomowego danego pierwiastka w osadzonym materiale do stężenia molowego tego pierwiastka w elektrolicie. W przypadku normalnej kodepozycji parametr ten przyjmuje wartość równą 1, natomiast dla $SR > 1$ mamy do czynienia z anomalną kodepozycją [61]. Jednym z czynników decydującym o pojawieniu się anomalnej kodepozycji jest pH [62], który to parametr może wpływać na szybkość redukcji jonów metali, a tym samym na skład osadzonego materiału. Z uwagi na fakt, że magnetyczne, katalityczne i termiczne właściwości stopu w dużym stopniu zależą od składu stopu ważne jest przeanalizowanie mechanizmu anomalnego osadzania. Jest on wyjaśniany głównie w oparciu o procesy zachodzące przy osadzaniu metali na płaskich powierzchniach i jest bardzo słabo zbadany w nanodrutach [63-65].

Dahms i Croll [62] jako pierwsi w 1965 roku podjęli próbę wyjaśnienia mechanizmu anomalnych zachowań podczas osadzania stopu Ni-Fe na płaskiej powierzchni. W swoich badaniach przyjęli, że anomalne osadzanie związane jest z lokalnym wzrostem pH w okolicy katody, co skutkuje powstawaniem wodorotlenków żelaza $Fe(OH)_2$, które adsorbując na powierzchni blokowały osadzanie niklu, pozwalając jednocześnie na szybką redukcję żelaza. Przedstawiony model okazał się być mało przekonujący ponieważ wzrost pH w pobliżu elektrody płaskiej zazwyczaj nie jest wystarczająco duży aby utworzyć wspomniane wodorotlenki, chociaż głęboko w nanoporach można spodziewać się, znacznie większego lokalnego wzrostu pH w porównaniu z płaską elektrodą. Ponadto,

anomalną kodepozycję obserwowano także przy wartościach pH niższych niż zakładane w modelu Dhams i Croll [62].

Innym mechanizmem zaproponowanym także dla płaskich układów był model matematyczny bazujący na podstawowych zasadach transportu masy i kinetyki reakcji, w którym oszacowano stężenie jonów metali i jonów wodorotlenkowych na katodzie a także powierzchniowe zmiany pH. W modelu tym anomalna kodepozycja została wyjaśniona w oparciu o względne stężenia pośrednich form hydrolizy metali, [64] takich jak jony FeOH^+ oraz NiOH^+ w pobliżu powierzchni elektrody. Jony wodorotlenkowe żelaza i niklu mają znacznie większą stałą dysocjacji niż ich wodorotlenki (np. $K_{\text{Fe}(\text{OH})_2} = 4,84 \times 10^{-17}$, $K_{\text{FeOH}^+} = 5,78 \times 10^{-8}$), dzięki czemu są termodynamicznie stabilne w znacznie niższych pH niż wodorotlenki. Oznacza to także, że do wytworzenia wodorotlenku konieczne jest wyższe pH niż do powstania jonów wodorotlenkowych, co wskazuje na ich preferencyjne tworzenie podczas wzrostu pH spowodowanego redukcją wodoru. Za względu na fakt, że stała dysocjacji jonów FeOH^+ ($K = 5,78 \times 10^{-8}$) jest trzy rzędy wielkości mniejsza od stałej dysocjacji NiOH^+ ($K = 4,5 \times 10^{-5}$) stężenie jonów wodorotlenkowych żelaza jest znacznie większe niż niklu. Skutkuje to przewagą jonów żelaznych na powierzchni katody, co blokuje jony niklowe, prowadząc do preferencyjnej redukcji jonów żelaza.

Grande i Tablota [67] potwierdzili, że za proces anomalnego współosadzania odpowiedzialne są jony FeOH^+ oraz NiOH^+ . Na podstawie matematycznych obliczeń dowiedli, że stężenie jonów FeOH^+ oraz NiOH^+ przy powierzchni elektrody jest większe o kilka rzędów wielkości w porównaniu z wodorotlenkami $\text{Fe}(\text{OH})_2$ oraz $\text{Ni}(\text{OH})_2$. Co więcej FeOH^+ posiada wyższy współczynnik przenoszenia ładunku katodowego zatem jest faworyzowany podczas osadzania przy tych samych warunkach prądowych.

Odmienne zdanie na temat mechanizmu anomalnej kodepozycji prezentował Maltos [68] uważał on że wysoka zawartość żelaza w stopie spowodowana jest preferencyjnym pokryciem powierzchni związanym z odmiennymi zależnościami szybkości reakcji elektrochemicznej od nadpotencjału dla niklu i żelaza, niezależnie od obecności wodorotlenkowych jonów metali i lokalnych zmian pH.

Znacznie mniej uwagi poświęcono w literaturze analizie procesu osadzania stopów Ni-Co. Fan i Piron [69] zauważyli, że proces anomalnego współosadzania niklu i kobaltu różni się od układów Ni-Fe, gdyż występuje już przy niskiej gęstości prądu. Ponadto Fan i Piron wskazywali, że w układzie Co-Ni osadzanie stopu przy wyższej gęstości prądu zachodzi już jako normalne. Anomalna kodepozycja w tych układach była wyjaśniona w oparciu o bardzo szybką depozycję kobaltu przy niskich potencjałach i dramatycznie niską prędkość osadzania niklu w obecności kobaltu. Jednocześnie autorzy zaznaczają, że jest mało prawdopodobne, aby taka kinetyka reakcji była związana z tworzeniem się wodorotlenkowych jonów metali.

Mechanizm anomalnego osadzania metalu nadal nie jest dokładnie poznany i pozostaje jeszcze wiele kwestii do wyjaśnienia. Parametr pH nie jest jedynym czynnikiem decydującym o anomalnej kodepozycji, na którą wpływa także wartość nadpotencjału, obecność organicznych domieszek, stężenie elektrolitu, temperatura, a także metoda elektrodepozycji (tryb potencjostatyczny, galwanostacyjny, pulsacyjny) oraz grubość osadzonej warstwy [61]. Przytoczone modele pokazują jak istotna w anomalnej kodepozycji jest reakcja uboczna wydzielania wodoru, która silnie zależy od potencjału osadzania oraz lokalnego pH przy powierzchni elektrody. Poznanie mechanizmu anomalnego współ-

osadzania, a także wpływu poszczególnych czynników na przebieg procesu jest niezbędne w precyzyjnym wyznaczeniu składu osadzanego materiału. Chociaż przedstawione badania anomalnego współosadzania koncentrowały się na płaskich elektrodach, modele te można również wykorzystać do przewidywania przebiegu procesów zachodzących podczas osadzania metali w membranach porowatego tlenku AAO.

4. Dwuskładnikowe nanodrutu elektrolitycznie osadzone w matrycy AAO

Proces elektrolitycznego osadzania wspomagany szablonem jest główną techniką pozwalającą na produkcję nanodrutów z szerokiej gamy materiałów. W literaturze można znaleźć przykłady elektrolitycznego osadzania zarówno pojedynczych metali m.in. Au, Pt, Ag, Cu, Ni, Co, Fe [29,35,47,56,58], stopów metali np. Au-Ag, Ni-Fe, Fe-Ni-Co [26, 27, 41, 52, 61] jak również tlenków metali m. in. TiO_2 , ZnO, MnO_2 [14, 21]. Wśród układów stopowych szczególnym powodzeniem cieszą się materiały na bazie niklu z dodatkiem innych ferromagnetyków jak żelazo lub kobalt. Jednym z przykładów może być inwar – stop Ni i Fe z dodatkiem węgla i chromu wykazujący niski współczynnik rozszerzalności cieplnej [70] lub np. permaloj – stop Ni i Fe wykazujący interesujące z punktu widzenia zastosowań, właściwości magnetyczne [71]. Z kolei stopy NiCo są materiałami magnetycznie miękkimi posiadającymi właściwości katalityczne, ponadto są badane pod kątem zastosowań jako nośniki pamięci magnetycznej lub wykorzystania w biomedycynie jako magnetyczne nośniki leków oraz do separacji komórek [72, 73]. Interesującą grupę stopów dwuskładnikowych na bazie Ni stanowią także związki niklu z metalami należącymi do grupy platynowców lub metalami ziem rzadkich. Takie materiały (Cu-Ni, Au-Ni, Ru-Ni, Pd-Ni) chociaż stosunkowo rzadko opisywane w literaturze mają szeroki wachlarz zastosowań począwszy od właściwości katalitycznych [74] po zastosowania jako czujniki do wykrywania wycieków wodoru oraz do produkcji wodoru o wysokiej czystości [75].

4.1. Nanodrutu metali z grupy żelaza Ni-Co, Ni-Fe

Spośród nanodrutów stopowych na bazie niklu najszerszej badaną grupą materiałów są nanodrutu Fe-Ni. Poniżej przedstawiono przykłady prezentujące wyniki badań takich stopów otrzymanych metodą elektrodepozycji w membranach AAO o średnicach od 70 do 200 nm. Dragos i in. [61] w nanodrutach osadzanych techniką prądu pulsacyjnego z elektrolitu siarczanowego o $\text{pH} = 3$ uzyskali matrycę jednorodnych nanodrutów o strukturze regularnej ściennie centrowanej. W swoich badaniach analizowali wpływ prądu katodowego na skład stopu, w którym zawartość żelaza zmieniała się w zakresie od 5 do 55%. Dla niskich wartości potencjału katodowego obserwowano anomalną kodepozycję z zawartością Fe zwiększającą się wraz ze wzrostem napięcia. Po przekroczeniu wartości potencjału równej -1.05V wzg. NEK zawartość Fe w stopie spadała, zmniejszała się także wartość parametru SR, który dla napięcia -1.4V wzg. NEK osiągnął wartość bliską 1 wskazującą na normalny proces depozycji. Zwiększanie zawartości Fe wpływało znacząco na własności magnetyczne nanodrutów powodując zmniejszanie koercji przy jednoczesnym wzroście namagnesowania nasycenia. Obserwowany spadek zawartości Fe jest częściowo tłumaczony w oparciu o ograniczenia w transporcie jonów Fe^{2+} . Mechanizm anomalnej kodepozycji jest przypisywany wzrostowi stężenia jonów H^+ , które działają katalitycznie na proces dysocjacji jonów NiOH^+ przechodzących tym samym do roztworu podczas gdy jony FeOH^+ adsorbują na powierzchni elektrody, przy czym szybkość procesu redukcji jest proporcjonalna do względnego stężenia jonów na powierzchni.

Zhao i in. w swojej pracy badali wpływ gęstości prądu, pH stężenia oraz temperatury elektrolitu na skład i właściwości stopu Ni-Fe osadzanych techniką pulsacyjną [71]. Optymalizując parametry depozycji uzyskali nanodrutu o wysokim stopniu jednorodności pod względem geometrii i składu chemicznego wykazujące pożądane właściwości magnetyczne. Wzrost gęstości prądu powodował wzrost zawartości Fe, ponadto przy niskich wartościach gęstości prądu nanodrutu wykazywały strukturę monokrystaliczną regularną ściennie centrowaną, która dla wyższych wartości prądu przechodziła w strukturę polikrystaliczną. Oznacza to, że na uporządkowanie strukturalne istotny wpływ miał skład chemiczny nanodrutów. Wpływ pH był bardziej skomplikowany, do wartości $\text{pH} = 2,5$ zawartość Fe w stopie delikatnie wzrastała, następnie spadała w zakresie między 2,5 a 3 i stabilizowała się na poziomie około 15% dla wyższych pH. Takie zmiany tłumaczono konkurencyjnymi procesami tworzenia się wodorotlenków żelaza i szybkości redukcji jonów niklowych. Analiza wpływu temperatury pokazała wzrost zawartości Fe dla temperatur poniżej $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ i ustabilizowaną zawartość Fe dla temperatur do $64\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Atalay i in. badali wpływ czasu i pH elektrolitu na skład nanodrutów Ni-Fe, które osadzali w warunkach stałego potencjału (-2V wzg. Ag/AgCl) z elektrolitu o pH równym 2 lub 2.6 [76]. Analiza składu nanodrutów wykazała, że stosunek niklu do żelaza w osadach wzrastał wraz ze wzrostem czasu osadzania, wskazując na zmianę składu wzdłuż osi drutu. Ponadto autorzy zaobserwowali, że przy wyższym pH elektrolitu proces depozycji miał bardziej anomalny charakter, co potwierdza istotny wpływ pH elektrolitu na skład stopu. Mechanizm anomального osadzania był tłumaczony w oparciu o redukcję wodoru i związany z tym lokalny wzrost pH, sprzyjający tworzeniu się jonów wodorotlenkowych Fe i Ni z preferencyjną adsorpcją na powierzchni jonów FeOH^+ a co za tym idzie ich preferencyjna redukcja. Nanodrutu osadzone przy wyższym pH wykazywały mniejsze wartości koercji.

Innym przykładem stopów niklowych są nanodrutu Ni-Co osadzone potencjostaticznie w funkcji napięcia przy $\text{pH} = 3.0$ przez Hu i in. [77]. W zakresie napięć od $-0,9\text{V}$ do $-1,6\text{V}$ wzg. NEK zaobserwowano anomalną kodepozycję, natomiast przy napięciu -3V kodepozycja przebiegała normalnie. Autorzy zaproponowali mechanizm odnoszący się do powstawania heksagonalnej fazy CoNi, która blokuje krystalizację niklu z powodu ograniczonej rozpuszczalności niklu w tej fazie. Podczas normalnego przebiegu procesu stop CoNi krystalizuje w fazie kubicznej ściennie centrowanej, w której Ni wykazuje nieograniczoną rozpuszczalność, wobec tego nic nie blokuje jego depozycji.

Zhu i in. badali wpływ pola magnetycznego przyłożonego w kierunku wzrostu nanodrutów na strukturę i własności magnetyczne nanodrutów $\text{Co}_{67}\text{Ni}_{33}$ o średnicy 200 nm i długości $30\text{ }\mu\text{m}$ [78]. Przyłożenie pola wpływało korzystnie na krystaliczność układu, a także modyfikowało własności magnetyczne powodując pojawienie się anizotropii magnetycznej wzdłuż osi nanodrutów.

Nanodrutu CoNi badane były także przez Vilana i in. [79]. Dla różnych wartości potencjałów katodowych. Autorzy również zaobserwowali, że nanodrutu krystalizują w strukturze heksagonalnej dla niskich wartości napięć katodowych podczas gdy przy wyższych napięciach preferowana jest struktura kubiczna ściennie centrowana. Ponadto zarówno nanodrutu o średnicy 20 nm jak i 100 nm wykazywały anizotropię właściwości magnetycznych z osią łatwą prostopadłą do nanodrutów, co przypisano anizotropii magnetokrystalicznej i oddziaływaniom dipolowym.

4.2. Nanodrutu Ni-M

Nanodrutu otrzymywane w procesie elektrolitycznego osadzania bogate w Ni współosadzane z metalami takimi jak Cu, Au, Pd, Ru, Rh itp. są rzadko spotykane w literaturze. Tian ze swoją grupą badał nanodrutu NiCu otrzymywane techniką pulsacyjną pod kątem ich wykorzystania do katalitycznego utleniania etanolu [74]. Uzyskane materiały wykazywały zadowalające właściwości katalityczne dla tego procesu z wyraźnie większą stabilnością obserwowaną dla układów zawierających miedź.

Kumar i in. badali nanodrutu Au-Ni o średnicy 100 nm Au-Ni osadzane prądem pulsacyjnym [80]. Autorzy pracy zaobserwowali równomierny wzrost nanodrutów o strukturze regularnej ściennie centrowanej z wysoką zawartością Au powyżej 93%. Pomimo niskiej zawartości niklu, nanodrutu wykazały sygnał ferromagnetyczny z anizotropią magnetyczną i osią łatwą wzdłuż osi nanodrutów.

Du i in. osadzali elektrolitycznie nanodrutu Ni-Pd o średnicy 60 nm do zastosowań jako czujniki w detekcji wycieków wodorowych oraz źródła do produkcji wodoru o wysokim stopniu czystości [75]. Nanodrutu osadzane zostały przy stałym potencjale równym -2,0 V wzgl. NEK z roztworu chlorkowo-siarczanowego o pH równym 8. Charakteryzowały się znacznym stopniem chropowatości powierzchni, zawartość palladu wahała się na poziomie ok. ~78%, nanodrutu krystalizowały w strukturze regularnej ściennie centrowanej.

5. Właściwości nanostruktur

Jak wspomniano we wstępie szczególnie istotne z punktu widzenia zastosowań są nanodrutu magnetyczne uzyskiwane na bazie ferromagnetyków Fe, Co lub Ni. Materiały o odpowiednio dobranych właściwościach magnetycznych znajdują zastosowania w spintronice, biotechnologii, elektronice użytkowej, optoelektronice, ochronie środowiska i wielu innych dziedzinach. Jako przykłady zastosowań można wymienić: nośniki magnetyczne w technologii zapisu informacji 3D, terapię nowotworową w procesie hipertermii, transport leków w organizmie, neutralizowanie toksyn, czujniki pola magnetycznego, czujniki korozji, igły do mikroskopów sił magnetycznych, separatory molekuł i wiele innych [81, 82]. W poszczególnych zastosowaniach wymagane są różne formy nanodrutów począwszy od prostych obiektów, poprzez nanodrutu stopowe, wielowarstwowe, segmentowe lub o strukturze typu rdzeń-powłoka [16, 22, 55, 83]. Ten szeroki wachlarz zastosowań wynika z odmiennych właściwości nanodrutów w porównaniu do ich makroskopowych odpowiedników.

Ograniczone rozmiary nanodrutów determinują szczególny typ konfiguracji magnetycznej np. typu vortex, który pojawia się w postaci ściany pomiędzy domenami lub na końcach nanodrutów. Nanodrutu posiadają też inny ważny parametr, którym jest stosunek długości do średnicy. Parametr ten przyjmuje wartości nawet powyżej 1000, co uprawnia do zakwalifikowania takich obiektów do struktur jednowymiarowych. Wydłużony kształt nanodrutów jest odpowiedzialny za ich szczególne właściwości magnetyczne, na które dominujący wpływ ma anizotropia kształtu. Ten typ anizotropii dąży do ułożenia osi łatwej namagnesowania wzdłuż osi nanodrutów. W zależności od właściwości strukturalnych a także oddziaływań pomiędzy nanodrutami na efektywną anizotropię mogą mieć wpływ także anizotropia magnetokrystaliczna oraz oddziaływania dipolowe. Anizotropia magnetokrystaliczna daje niezerowy przyczynek do efektywnej anizotropii magnetycznej tylko dla układów monokrystalicznych, bądź silnie stekstrowanych

i w zależności od orientacji krystalitów i typu struktury, może faworyzować zarówno ułożenie wzdłuż osi nanodrutu jak i prostopadłe do niej. Oddziaływania dipolowe zwiększają swój wkład wraz ze wzrostem długości nanodrutów i zmniejszaniem się odległości między nimi i dają przyczynek do namagnesowania w kierunku prostopadłym do nanodrutów. Oddziaływania dipolowe wpływają także na zmniejszanie wartości pola koercji oraz na pochylenie pętli histerezy [81, 84].

Ważnym aspektem badań nanodrutów jest ich wykorzystanie do produkcji wodoru o wysokim stopniu czystości jako alternatywy dla konwencjonalnych źródeł energii [85]. Zastosowanie nanodrutów metalicznych na bazie niklu w postaci tzw. nanoszczotki jako elektrody do reakcji wydzielania wodoru umożliwi redukcję kosztów syntezy związaną z eliminacją platyny lub znaczącymi ograniczeniami w jej zastosowaniu. Aktywność elektrokatalityczna elektrod na bazie niklu, w tym stopów, wobec elektrolizy wody, była szeroko badana przez wiele grup badawczych [86]. Jednym z czynników wpływających na aktywność katalityczną a tym samym specyficzną adsorpcję wodoru, jest geometria powierzchni elektrody, zatem nanostruktury w postaci nanodrutów lub nanorurek wydają się być obiecujące w porównaniu do płaskich warstw. Pęcherze gazu generowane na elektrodzie nanostrukturalnej okazały się być mniejsze oraz posiadały bardziej równomierny rozkład wielkości. Na płaskiej powierzchni większe pęcherze gazu rosły dłużej blokując przy tym powierzchnię elektrody i tym samym zmniejszały jej aktywność katalityczną.

Drugą cechą, mającą znaczenie we własnościach elektrokatalitycznych jest dobór odpowiedniego materiału nanodrutu. Przykładem poprawy własności katalitycznych, może być zastąpienie nanodrutów niklu stopem Ni-P [87]. Lepsza aktywność katalityczna stopów niklowo-fosforowych w porównaniu z Ni, może być związana z przenoszeniem elektronów w stopie oraz powstawaniem tekstury w obecności fosforu [88].

Ponadto, w celu poprawy własności katalitycznych elektrod stosuje się pole magnetyczne, wpływające na konwekcje elektrolitu dzięki działaniu siły Lorentza [89]. W efekcie działanie siły magneto-hydrodynamicznej ułatwia odpływ zaadsorbowanych pęcherzy wodoru z powierzchni katody i sprzyja reakcji wydzielania wodoru, co potwierdziły badania.

6. Podsumowanie

W pracy dokonano przeglądu literatury w zakresie elektroosadzania bimetalicznych nanodrutów na bazie niklu w procesie wspomaganym szablonem. Przeanalizowano problem wydzielania wodoru, procesu anomalnego współosadzania metali, transportu masy wewnątrz porów oraz jego znaczenia w celu uzyskania jednorodnych nanostruktur. Pomimo przeprowadzonych intensywnych badań mechanizm anomalnego współosadzania nadal nie został dokładnie poznany i należy go dalej rozwijać. Przegląd ujawnił jak istotna w procesie anomalnego współosadzania i tym samym w uzyskaniu jednolitych nanodrutów o ściśle określonych parametrach jest reakcja uboczna wydzielania wodoru, która silnie zależy od potencjału osadzania oraz lokalnego pH przy powierzchni elektrody.

Ponadto dokonano przeglądu wcześniejszych prac dotyczących elektrolitycznego osadzania dwuskładnikowych stopów niklowych w postaci powłok, które potwierdzają, że kontrolowanie składu stopu w porowatych matrycach tlenkowych nadal jest wyzwaniem. Spośród kolejnych aspektów, które dalej należałoby rozwijać są: struktura krystalograficzna nanodrutów oraz bardziej ścisła kontrola nad parametrami procesu elektro-

osadzania. Pozwoliłoby to rozszerzyć wachlarz zastosowań, zwłaszcza nanodrutów wykorzystywanych jako elektrody.

W obszarze badań magnetycznych nanodrutu w porównaniu z powłokami zyskały szczególne znaczenie wynikające z możliwości nakładania anizotropii magnetokrystalicznej lub magnetosprężystej na anizotropię kształtu co skutkuje silniejszą całkowitą anizotropią magnetyczną. Jednak całkowita anizotropia magnetyczna drutów stopu jest nadal niska w porównaniu z anizotropią w stopach z udziałem metali ziem rzadkich. Z punktu widzenia właściwości katalitycznych nanostruktury w postaci nanodrutów na bazie niklu wydają się być obiecujące w porównaniu do płaskich warstw. Zastosowanie struktur periodycznie rozmieszczonych o wysokim stopniu uporządkowania może polepszyć działanie takiego elektro katalizatora. Dodatkowo umożliwia redukcję kosztów syntezy związanej z użyciem niewielkiej ilości materiału oraz eliminacją platyny. Aktywność katalityczną można poprawić poprzez odpowiedni dobór składu stopu oraz długości drutów. Zasadnym zatem jest prowadzenie dalszych badań w celu poprawy własności magnetycznych oraz katalitycznych tych nanostruktur.

Podziękowania

Pragnę złożyć serdeczne podziękowania Pani dr hab. Małgorzacie Kąc za merytoryczne dyskusje naukowe oraz pomoc w pracy redakcyjnej nad niniejszym rozdziałem.

Literatura

1. Al-Bathi S.A.M., *Electrodeposition of nanostructure materials*, [w:] Aliofkhaezraei M. (red.), *Electroplating of nanostructures*, IntechOpen, London 2015, s. 1-24.
2. Seigel R.W., *Nanostructured materials-mind over matter*, *Nanostructured Materials*, 3, 1993, s. 1-18.
3. Kelsall R.W., Hamley I.W., Geoghegan M., *Nanotechnologie*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2008.
4. Lee S.A., Yang J.W., Choi S., Jang H.W., *Nanoscale electrodeposition: Dimension control and 3D conformality*, *Exploration*, 1, 20210012, 2021, s. 1-22.
5. Meng Z.H., Gao L.Y., Liu Z.Q., *Synthesis of Cu nanowires by template electrodeposition and their application in pressure sensors*, *Journal of Electronic Materials*, 52, 2023, s. 3463-3471.
6. Bandaru P.R., *Electrical Properties and Applications of Carbon Nanotube Structures*, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 7, 2007, s. 1239-1267.
7. Dai H., *Carbon Nanotubes: Synthesis, Integration, and Properties*, *Accounts of Chemical Research*, 35, 2002, s. 1035-1044.
8. Wang Y., Zhang L., Meng G., Liang C., Wang G., Suna S., *Zn nanobelts: A new quasi one-dimensional metal nanostructure*, *Chemical Communications*, 24, 2001, s. 2632-2633.
9. Iijima S., *Helical microtubules of graphitic carbon*, *Nature*, 354, 1991, s. 56-58.
10. Wang J.L., Hassan M., Liu J.W., Yu S.H., *Nanowire Assemblies for Flexible Electronic Devices: Recent Advances and Perspectives*, *Advanced Materials*, 30, 2018, s. 1803430
11. Hamans R.F., Parente M., Garcia-Etxarri A., Baldi A., *Optical properties of colloidal silver nanowires*, *The journal of Physical Chemistry C*, 126, 2022, s. 8703-8709
12. Kac M., Mis A., Dubiel B., Kowalski K., Zarzycki A., Dobosz I., *Template-assisted iron nanowire formation at different electrolyte temperatures*, *Materials*, 14, 2021, s. 1-19.
13. Hultgren A., Tanase M., Chen C.S., Meyer G.J., Reich D.H., *Cell manipulation using magnetic nanowires*, *Journal of Applied Physics*, 93, 2003, s. 7554.
14. Lupan O., Postica V., Wolff N., Polonskyi O., Duppe V., Kaidas V., Lazari E., Ababii N., Faupel F., Kienle L., Adelung R., *Localized synthesis of iron oxide nanowires and*

- fabrication of high performance nanosensors based on a single Fe₂O₃ nanowire*, Small, 13, 2017.
15. Pinheiro P.C., Tavares D.S., Daniel-Da-Silva A.L., Lopes C.B., Pereira E., de Araújo J.P.E., Sousa C.T., Trindade T., *Ferromagnetic sorbents based on nickel nanowires for efficient uptake of mercury from water*, ACS Applied Materials and Interfaces, 6, 2014, s. 8274-8280.
 16. Piraux L., Renard K., Guillemet R., Mátéfi-Tempfli S., Mátéfi-Tempfli M., Antohe V.A., Fusil S., Bouzehouane A.K., Cros V., *Template-grown NiFe/Cu/NiFe nanowires for spin transfer devices*, Nano Letters, 7, 2007, s. 2563-2567.
 17. Yang Z., Heischmidt B., Gazibegovic S., Badawy G., Car D., Crowell P.A., Bakkers E. P.A.M., Pribiag V.S., *Spin transport in ferromagnet-InSb nanowire quantum devices*, Nano Letters, 20, 2020, s. 3232-3239.
 18. Lee H.Y., Kim S., *Nanowires for 2D material-based photonic and optoelectronic devices*, Nanophotonics, 11, 2022, s. 2571-2582.
 19. Chen L., Lu W., Lieber C.M., *Chapter 1. Semiconductor Nanowire Growth and Integration*, in *RSC Smart Materials*, Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2014, s. 1-53.
 20. Shah K.W., Xiong T., *Multifunctional metallic nanowires in advanced building applications*, Materials MDPI, 12, 2019, s. 1-37.
 21. Han D., Zhang X., Wu Z., Hua Z., Wang Z., Yang S., *Synthesis and magnetic properties of complex oxides La_{0.67}Sr_{0.33}MnO₃ nanowire arrays*, Ceramic International, 42, 2016, s. 16992-16996.
 22. Caspani S., Moraes S., Navas D., Proenca M.P., Magalhães R., Nunes C., Araújo J.P., Sousa C.T., *The magnetic properties of Fe/Cu multilayered nanowires: the role of the number of Fe layers and their thickness*, Nanomaterials, 11, 2021, s. 1-12.
 23. Vernickaite E., Bubniene U., Cesiulis H., Ramanavicius A., Podlaha E.J., *A hybrid approach to fabricated nanowirenanoparticle composites of a Co-W alloy and Au nanoparticles*, Journal of the Electrochemical Society, 163, 2016, s. 1-5.
 24. Lee S.H., Shin S.H., Madsen M., Takei K., Nah J., Lee M.H., *A soft lithographic approach to fabricate InAs nanowire field-effect transistors*, Scientific Reports, 8, 2018, s. 1-6.
 25. Li Y., Wang Y., Ryu S., Marshall A.F., Cai W., McIntyre P.C., *Spontaneous, defect-free kinking via capillary instability during Vapor-Liquid-Solid nanowire growth*, Nano Letters, 16, 2016, s. 1713-1718.
 26. Liu X., Hu S., Hong, Y., Li Z., Luo J., Li K., Song L., Zhang Y., Younis U., Botcha V.D., *Growth of necklace-like In₂Se₃ nanowires using MoS₂ seed layer during PVD method*, Journal of Crystals Growth, 256, 2019, s. 125215.
 27. Dobosz I., Gumowska W., Wrzozszyk B., *The morphology of the alumina films formed in the anodization process of aluminium in the orthophosphoric acid solution. the Co-Fe alloys electrodeposition into obtained alumina pores*, Archives of Metallurgy and Materials, 59, 2014, s. 137-143.
 28. Zagorskiy D.L., Korotkov V.V., Frolov K.V., Sulyanov S.N., Kudryavtsev V.N., Kruglikov S.S., Bedin S.A., *Track pore matrixes for the preparation of Co, Ni and Fe nanowires: electrodeposition and their properties*, Physics Procedia, 80, 2015, s. 144-147.
 29. Saeki R., Ohgai T., *Determination of activation overpotential during the nucleation of hcp-cobalt nanowires synthesized by potentiostatic electrochemical reduction*, Materials, 11, 2018, s. 1-13.
 30. Kac M., Zarzycki A., Kac S., Kopec M., Perzanowski M., Dutkiewicz E.M., Suchanek K., Maximenko A., Marszalek M., *Effect of the template-assisted electrodeposition parameters on the structure and magnetic properties of Co nanowire arrays*, Materials Science and Engineering B, 211, 2016, s. 75-84.
 31. Possin G.E., *A method for forming very small diameters wires*, Review of Scientific Instruments, 41, 1970, s. 772-774.

32. Prida V.M., Hernandez-Velez M., Cervera M., Pirota K., Sanz R., Navas D., Asenjo A., Aranda P., Ruiz-Hitzky E., Batallan F., Vazquez M., Hernando B., Menendez A., Bordel N., Pereiro R., *Magnetic behaviour of arrays of Ni nanowires by electrodeposition into self-aligned titania nanotubes*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 294, 2005, s. 69-72
33. Schonenberger C., van der Zande B.M.I., Fokkink L.G.J., Henny M., Schmid C., Kruger M., Bachtold A., Huber R., Birk H., Staufer U., *Template synthesis of nanowires in porous polycarbonate membranes: Electrochemistry and morphology*, The Journal of Physical Chemistry B, 101, 1997, s. 5497-5505.
34. Gerngross M.-D., Carstensen J., Föll H., *Electrochemical growth of Co nanowires in ultra-high aspect ratio InP membranes: FFT-impedance spectroscopy of the growth process and magnetic properties*, Nanoscale Research Letters, 9, 2014, s. 316-325.
35. Stepniowski W.J., Salerno M., *Fabrication of nanowires and nanotubes by anodic alumina template-assisted electrodeposition*, In: *Manufacturing Nanostructures*, One Central Press, 2014, s. 321-357.
36. Erb U., Palumbo G., Szpunar B., Aust K.T., *Electrodeposited vs. consolidated nanocrystals: Differences and similarities*. Nanostructured Materials, 9, 1997, s. 261-270.
37. Alfantazi A.M., Erb U., *Synthesis of nanocrystalline Zn-Ni alloy coatings*, Journal of Materials Science Letter, 15, 1996, s. 1361-1363.
38. Ohgai T., Tanaka Y., Washio R., *Nanocrystalline structure and soft magnetic properties of nickel-molybdenum alloy thin films electrodeposited from acidic and alkaline aqueous solutions*, Journal of Solid State Electrochemistry, 17, 2013, s. 743-750.
39. Sulka G., Stroobants S., Moshehalkov V., Borghs G., Celis J.P., *Synthesis of well-ordered nanopores by anodizing aluminum foils in sulfuric acid*, Journal of the Electrochemical Society, 149, 2002, s. 97-103.
40. Chu S.Z., Inoue S., Wada K., Hishita S., Kurashima K., *A new electrochemical lithography fabrication of self-organized titania nanostructures on glass by combined anodization*, Journal of The Electrochemical Society, 152, 2005, s. 116-124.
41. Dobosz I., Kutyla D., Kac M., Wloch G., Zabiński P., *The influence of homogenous external magnetic field on morphology and magnetic properties of CoRu nanowire arrays*, Materials Science and Engineering B, 262, 2020, s. 114795.
42. Inguanta R., Piazza S., Sunseri C., *Influence of electrodeposition techniques on Ni nanostructures*, Electrochimica Acta, 53, 2008, s. 5766-5773.
43. Darques M., Encinas A., Vila L., Piroux L., *Controlled changes in the microstructure and magnetic anisotropy in arrays of electrodeposited co nanowires induced by the solution pH*, Journal of Physics D: Applied Physics, 37, 2004, s. 1411-1416.
44. Hessami, S., Tobias C.W., *In situ measurement of interfacial pH using a rotating-ring-disk electrode*, AIChE Journal, 39, 1993, s. 149-162.
45. Cesiulis H., Podlaha-Murphy E.J., *Electrolyte considerations of electrodeposited Ni-W alloys for microdevice fabrication*, Materials Science-Medziagotyra, 9, 2003, s. 324-327.
46. Wu W., Huang J., Nather J., Omar N.A.B., Koster F., Lampke T., Liu Y., Pan H., Zhang Y., *Texture orientation, morphology and performance of nanocrystalline nickel coatings electrodeposited from a Watts-type bath: Effects of H3BO3 concentration and plating time*, Surface and Coating Technology, 424, 2021, s. 1-14.
47. Yin K.M., Lin B.T., *Effects of boric acid on the electrodeposition of iron, nickel and iron-nickel*, Surface and Coating Technology, 78, 1996, s. 205-210.
48. Ramazani A., Kashi M.A., Alikhani M., Erfanfiam S., *Fabrication of high aspect ratio Co nanowires with controlled magnetization direction using ac and pulse electrodeposition*, Materials Chemistry and Physics, 112, 2008, s. 285-289.
49. Xu J., Wang K., *Pulsed electrodeposition of monocrystalline Ni nanowire array and its magnetic properties*, Applied Surface Science, 254, 2008, s. 6623-6627.

50. Fukunaka Y., Motoyama M., Konishi Y., Ishii R., *Producing shape-controlled metal nanowires and nanotubes by an electrochemical method*, *Electrochemical Solid-State Letters*, 9, 2006, s. 62-64.
51. Philippe L., Michler J., *A kinetic model enabling controlled electrosynthesis of stacked metallic nanotubes and nanowires*, *Small*, 4, 2008, s. 904-907.
52. Davis D., Podlaha E.J., *CoNiCu and Cu nanotube electrodeposition*, *Electrochemical Solid State*, 8, 2005, s. 1-4.
53. Cesiulis H., Xie X.G., Podlaha-Murphy E., *Electrodeposition of Co-W alloys with P and Ni*, *Materials Science-Medziagotyra*, 15, 2009, s. 115-122.
54. Lopes M.C., de Oliveira C.P., Pereira E.C., *Computational modelling of the template-assisted deposition of nanowires*, *Electrochimica Acta*, 53, 2008, s. 4359-4369
55. Reddy S.M., Park J.J., Na S.M., Maqableh M.M., Flatau A.F., Stadler B.J.H., *Electrochemical synthesis of magnetostrictive Fe–Ga/Cu multilayered nanowire arrays with tailored magnetic response*, *Advanced Functional Materials*, 24, 2011, s. 4677-4683.
56. Ghahremaninezhad A., Dolati A., *Diffusion-controlled growth model for electrodeposited cobalt nanowires in highly ordered aluminum oxide membrane*, *ECS Transactions*, 28, 2010, s. 13-25
57. Hamid Z.A., *Electrodeposition of cobalt-tungsten alloys from acidic bath containing cationic surfactants*, *Materials Letters*, 57, 2003, s. 2558-2564.
58. Konishi Y., Motoyama M., Matsushima H., Fukunaka Y., Ishii R., Ito Y., *Electrodeposition of Cu nanowire arrays with a template*, *Jornal Electroanalytical Chemistry*, 559, 2003, s. 149-153.
59. Belevskii S.S., Cesiulis H., Tsyntaru N.I., Dikumar A.I., *The role of mass transfer in the formation of the composition and structure of CoW coatings electrodeposited from citrate solutions*, *Surface Engineering. Applied Electrochemistry*, 46, 2010, s. 570-578.
60. Brenner A., *Electrodeposition of Alloys*, Academic Press, New York 1963.
61. Dragos O., Chiriac H., Lupu N., Grigoras M., Tabakovic I., *Anomalous codeposition of fcc NiFe nanowires with 5-55% Fe and their morphology, crystal structure and magnetic properties*, *Journal of the Electrochemical Society*, 163, 2016, s. 83-94.
62. Dahms H., Croll I.M., *The anomalous codeposition of iron-nickel alloys*, *Journal of the Electrochemical Society*, 112, 1965, s. 771-775.
63. Larson R.S., *The role of homogeneous chemical kinetics in the anomalous codeposition of binary alloys*, *Journal of the Electrochemical Society*, 154, 2007, s. 427-434.
64. Sasaki K.Y., Talbot J.B., *Electrodeposition of iron-group metals and binary alloys from sulfate baths I. Experimental study*, *Journal of the Electrochemical Society*, 145, 1998, s. 981-990.
65. Golodnitsky D., Gudin N.V., Volyanuk G.A., *Study of nickel-cobalt alloy electrodeposition from a sulfamate electrolyte with different anion additives*, *Journal of the Electrochemical Society*, 147, 2000, s. 4156-4163.
66. Hessami S., Tobias C.W., *A mathematical-model for anomalous codeposition of nickel-iron on a rotating-disk electrode*, *Journal of the Electrochemical Society*, 136, 1989, s. 3611-3616.
67. Grande W.C., Talbot J.B., *Electrodeposition of thin-films of nickel-iron .2. Modeling*, *Journal of the Electrochemical Society*, 140, 1993, s. 675-681.
68. Matlosz M., *Competitive adsorption effects in the electrodeposition of iron-nickel alloys*, *Journal of the Electrochemical Society*, 140, 1993, s. 2272-2279.
69. Fan C., Piron D.L., *Study of anomalous nickel-cobalt electrodeposition with different electrolytes and current densities*, *Electrochimica Acta*, 10, 1996, s. 1713-1719.
70. Kim H., Soper S.A., Podhala E.J., *Pulse electrodeposition of multi-segmented super Invar/Au nanowires*, *ECS Transactions*, 53, 2013, s. 9-14.

71. Zhao Y., Liu L., Zhou X., Xie L., Zhang H., Piao H.-G., Sun H., Pan L., *Preparation and magnetic properties of cylindrical permalloy nanowire arrays*, MRS Communications, 11, 2021, s. 902-909.
72. Mendéz M., González S., Vega V., Teixeira J.M., Hernando B., Luna C., Prida V.M., *Ni-Co alloy and multisegmented Ni/Co nanowire arrays modulated in composition: structural characterization and magnetic properties*, MDPI Crystals, 7, 2017, s. 1-16.
73. Gao X., Wang Y., Li W., Li F., Arandiyani H., Sun H., Chen Y., *Free-standing Ni-Co alloy nanowire arrays: Efficient and robust catalysts toward urea electro-oxidation*, Electrochimica Acta, 283, 2018, s. 1277-1283.
74. Tian X., Zhao X., Zhang L., Yang C., Pi Z.-B., Zhang S.-X., *Performance of ethanol electro-oxidation on Ni-Cu alloy nanowires through composition modulation*, Nanotechnology, 19, 2008, s. 1-6.
75. Du L., Feng D., Xing X., Wang C., Armatas G.S., Yang D., *Uniform palladium-nickel nanowires arrays for stable hydrogen leakage detection and efficient hydrogen evolution reaction*, Chemical Engineering Journal, 400, 2020, s. 1-7.
76. Atalay F.E., Kaya H., Atalay S., Tari, S., *Influences of deposition time and pH on magnetic NiFe nanowires fabrication*, Journal of Alloys and Compounds, 469, 2009, s. 458-463.
77. Hu H., Tan M., Liu L., *Anomalous codeposition mechanism of Co-Ni alloy nanowires*, Journal of Alloys and Compounds, 715, 2017, s. 384-389.
78. Zhu H., Yang S., Ni G., Yu D., Du Y., *Fabrication and magnetic properties of Co₆₇Ni₃₃ alloy nanowire array*, Scripta Materialia, 44, 2001, s. 2291-2295.
79. Vilana J., Gomez E., Valles E., *Electrochemical control of composition and crystalline structure of CoNi nanowires and films prepared potentiostatically from a single bath*, Journal of Electroanalytical Chemistry, 703, 2013, s. 88-96.
80. Kumar S., Saini D., *Large-scale synthesis of Au-Ni alloy nanowires using electrochemical deposition*, Journal of Electroanalytical Chemistry, 703, 2013, s. 88-96.
81. Irshad M.I., Ahmad F., Mohamed N.M., *A review on nanowires as an alternative high density magnetic storage media*, AIP Conference Proceedings, 1482, 2012, s. 625-632.
82. Özkale B., Shamsudhin N., Chatzipirpiridi, G., Hoop M., Gramm F., Chen X., Martí X., Sort J., Pellicer E., Pané S., *Multisegmented FeCo/Cu nanowires: Electrosynthesis, characterization, and magnetic control of biomolecule desorption*, ACS Applied Materials & Interfaces, 7, 2015, s. 7389-7396.
83. Salazar-Alvarez G., Geshev J., Agramunt-Puig S., Navau C., Sanchez A., Sort J., Nogués J., *Tunable high-field magnetization in strongly exchange-coupled freestanding Co/CoO Core/Shell Coaxial nanowires*, ACS Applied Materials & Interfaces, 8, 2016, s. 22477-22483.
84. Sellmyer D.J., Zheng M., Skomski R., *Magnetism of Fe, Co and Ni nanowires in self-assembled arrays*, Journal of Physics Condensed Matter, 13, 2001, s. 433-460.
85. Anantharaj S., Ede S.R., Sakthikumar K., Karthick K., Mishra S., Kundu S., *Recent trends and perspectives in electrochemical water splitting with an emphasis on sulfide, selenide, and phosphide catalysts of Fe, Co, and Ni: A review*, ACS Catalysis, 6, 2016, s. 8069-8097.
86. Lu G., Evans P., Zangari G., *Electrocatalytic properties of Ni based alloys toward hydrogen evolution reaction in acid media*, Journal of the Electrochemical Society, 150, 2003, s. 551-557.
87. Hsu C.S., Lee H.B., Lin C.S., Lee C.Y., *Study on the electrodeposition of Ni-P nanowires and their electrocatalytic properties*, Metallurgical and Materials Transactions A, 41, 2010, s. 768-774.
88. Burchardt T., Hansen V., Valand T., *Microstructure and catalytic activity towards the hydrogen evolution reaction of electrodeposited NiPx alloys*, Electrochimica Acta, 46, 2001, s. 2761-2766.
89. Lee H.B.; Tsau J.C.; Lee C.Y. *HER catalytic activity of electrodeposited Ni-P nanowires under the influence of magnetic field*, Journal of Nanomaterials, 2013, Article ID 191728.

Elektrochemiczna metoda otrzymywania bimetalicznych nanodrutów Ni-X w membranach anodowego tlenku glinu

Streszczenie

Jedną z metod syntezy nanostrukturalnych materiałów w postaci nanodrutów jest połączenie techniki elektroosadzania z wykorzystaniem matrycy porowatego tlenku glinu, który zawiera dużą liczbę prostych cylindrycznych otworów o nanowymiarowej średnicy. Omówiono ogólne zasady osadzania elektrolitycznego metali w nanoporowatych membranach tlenkowych. Wskazano środki mające na celu zminimalizowanie niejednorodności osadów wewnątrz porów, aby kontrolować wydzielanie wodoru i poprawić transport masy w porach. Przedstawiono przykłady dwuskładnikowych stopów na bazie niklu osadzonych w nanoporowatych szablona AAO oraz omówiono ich właściwości.

Słowa kluczowe: nanostruktury, stop, membrana tlenku glinu AAO

Electrochemical method of obtaining bimetallic Ni-X nanowires into anodic alumina membranes

Abstract

One of the methods of synthesis of nanostructured materials in the form of nanowires is a combination of electrodeposition techniques using a matrix of porous alumina, which contains a large number of simple cylindrical holes with a nano-sized diameter. General principles of metal electrodeposition into nanoporous oxide membranes are discussed. Measures to minimize the nonuniformity of deposits are indicated to control hydrogen evolution and improve pore mass transport inside the pores. Examples of binary nickel-based alloys deposited in nanoporous AAO templates are presented and their properties are discussed.

Keywords: nanostructures, alloy, AAO alumina membrane

Opracowanie technologii wytwarzania aluminiowych słupów oświetleniowych, charakteryzujących się bezpieczeństwem biernym

1. Wstęp

Normy Unii Europejskiej wymuszają wprowadzanie zmian, które niejednokrotnie wymagają dużych nakładów finansowych. Taką sytuację można zaobserwować w nierozwiązanym obecnie w wielu krajach europejskich, problemie wyrobów stosowanych w pasie drogowym, szczególnie na terenach miejskich. Konieczne jest zatem dostosowanie do wymogów nowych regulacji prawnych, wyrobów niespełniających wymogów normy PN-EN 12767 „Bierne bezpieczeństwo konstrukcji wsporczych dla urządzeń drogowych. Wymagania i metody badań”. Przytoczona norma klasyfikuje, m.in. słupy oświetlenia drogowego, według ich potencjalnego zagrożenia dla uczestników ruchu drogowego. Omawiany problem dotyczy między innymi bezpieczeństwa biernego słupów oświetleniowych. Należy nadmienić, że w tym przypadku pod pojęciem bezpieczeństwa biernego rozumie się słup oświetleniowy pochłaniający w trakcie kolizji część energii. W zależności od wilkości pochłanianej energii bezpieczeństwo bierne można podzielić na 3 kategorie: słupy pochłaniające energię w wysokim stopniu (HE); pochłaniające energię w niskim stopniu (LE); nie pochłaniające energii (NE). Celem jest zwiększenie bezpieczeństwa osób znajdujących się w pojeździe. Często wzdłuż drogi można zaobserwować zainstalowane betonowe, czy stalowe słupy oświetleniowe, które podczas kolizji powodują nagłe zatrzymanie pojazdu, w efekcie czego, dochodzi do dużej penetracji słupa w samochód, a to z kolei zwiększa ryzyko wypadków śmiertelnych. Co raz częściej słupy stalowe oraz betonowe zastępowane są słupami aluminiowymi, czy też słupami z kompozytu wzmocnionego włóknem szklanym. Zazwyczaj słupy kompozytowe charakteryzujące się cechami bezpieczeństwa biernego, montowane są w aglomeracjach miejskich, natomiast problem bezpieczeństwa biernego na drogach ekspresowych, czy autostradach nie jest w pełni rozwiązany.

Aktualny aspekt bezpieczeństwa (zwłaszcza dla HE i NE) przy zderzeniu nie jest rozwiązywalny dla niskich prędkości, przy których przeszkoda nie poddaje się, nie ulega złamaniu, czy ścięciu. Dlatego większość słupów posiada certyfikaty jedynie na wyższe prędkości, przy których energia zderzenia jest wystarczająco duża do zainicjowania procesów zniszczeniowych.

¹ tomasz.gadek@pit.lukasiewicz.gov.pl, Centrum Obróbki Plastycznej, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny, www.pit.lukasiewicz.gov.pl.

² mhojny@agh.edu.pl, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej Katedra Informatyki Stosowanej i Modelowania, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, www.agh.edu.pl.

³ jaroslaw.mac@pit.lukasiewicz.gov.pl, Centrum Pojazdów Rolniczych, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny, www.pit.lukasiewicz.gov.pl.

⁴ daniel.andrzejewski@pit.lukasiewicz.gov.pl, Centrum Obróbki Plastycznej, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny, www.pit.lukasiewicz.gov.pl.

Rezultatem projektu, którego wyniki przedstawiono poniżej będą natomiast wsporniki aluminiowe spełniające warunki bezpieczeństwa biernego w pasie drogowym dla prędkości 35-100 km/h. W rezultacie planowanych prac B+R powstanie konstrukcja w której, dzięki odpowiednio dobranemu przekrojowi i kształtowi konstrukcji elementu nośnego, będzie można uzyskać odpowiednie zachowanie (sztywność) elementu przy zderzeniu. Jednocześnie uzyskana będzie bardzo korzystna wartość krytycznego dla bezpieczeństwa wskaźnika ASI (wskaźnika intensywności przyspieszenia – zgodnie z normą EU 1317). Wskaźnik ten powinien być kilkukrotnie niższy, niż dla rozwiązań ze stali czy betonu i znacznie poniżej wartości granicznej, dla której zderzenie może nieść skutki śmiertelne.

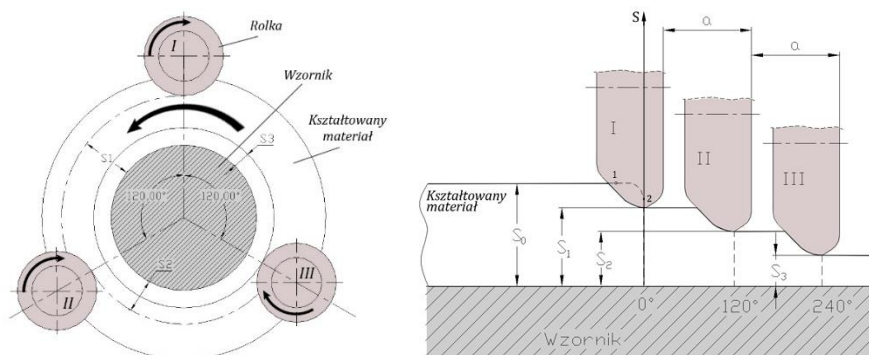
2. Wprowadzenie

Wyniki badań przedstawione w artykule, dotyczą procesu kształtowania stopów aluminium metodą kształtowania obrotowego. Technologia kształtowania obrotowego obejmuje przede wszystkim metody [1]:

- wyoblanie;
- zgniatanie obrotowe (współbieżne i przeciwbieżne);
- kombinację obu tych metod.

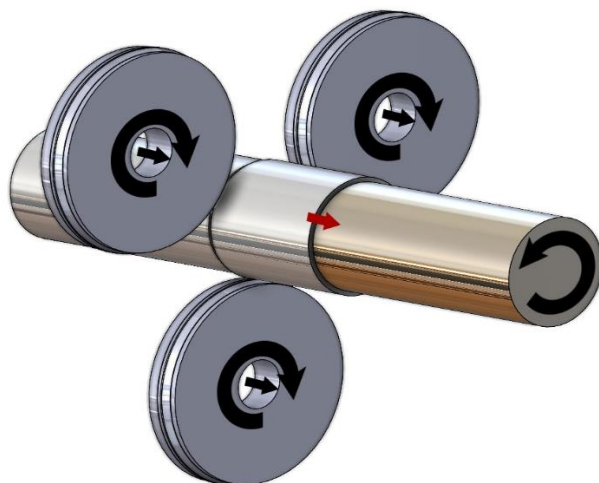
W celu przybliżenia oraz zobrazowania technologii zgniatania obrotowego, poniżej omówiono główne cechy tej technologii.

Zgniatanie obrotowe jest procesem kształtowania części obrotowo-symetrycznych ze wstępniaka, w tym przypadku w postaci rury kształtowanej na obracającym się wzorniku za pomocą rolek. Schemat procesu zgniatania obrotowego zobrazowano na rysunku 1.



Rysunek 1. Schemat strefy kształtowania wzdluznego z zastosowaniem osiowego przemieszczenia rolek, a – przesunięcie rolek względem siebie, S_1-3 – wielkość przeformowania materiału [2]

Proces zgniatania obrotowego polega na kształtowaniu obrabianego materiału poprzez wywieranie nacisku rolką/rolkami zgniatającymi (rys. 2). Materiał montowany jest na wzorniku, a następnie wzornik wraz z materiałem wprowadzany jest w ruch obrotowy. Rolki zgniatające w skutek kontaktu z obracającym się materiałem, wprowadzane są w ruch obrotowy. Podczas zgniatania obrotowego następuje odkształcenie plastyczne materiału w skutek bezpośredniego styku rolek zgniatających z kształtowanym materiałem. Zgniatana obrotowo rura odkształcana jest w trzech kierunkach: promieniowym, osiowym oraz obwodowym (rys. 1) [3]. W trakcie procesu kształtowany materiał ulega umocnieniu, następuje wzrost m.in. granicy plastyczności oraz wytrzymałości na rozzerwanie.



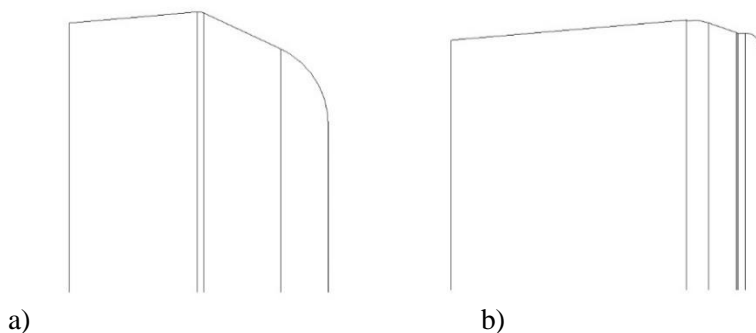
Rysunek 2. Schemat kinematyczny procesu zgniatania obrotowego [opracowanie własne]

3. Cel badań

Celem badań było wyznaczenie na podstawie badań numerycznych parametrów procesu technologicznego zgniatania obrotowego stopu aluminium serii 6xxx, a następnie przeprowadzenie weryfikacyjnych badań na laboratoryjnej zgniatarce obrotowej. Dodatkowo mając na uwadze bezpieczeństwo bierne słupów aluminiowych, przeprowadzono numeryczne badania zderzeniowe, których celem była analiza zachowania się słupa w trakcie kolizji oraz określenie klasyfikacji bezpieczeństwa biernego.

4. Metodyka badawcza

Bazując na wieloletnim doświadczeniu związanym ze zgniataniem obrotowym zaprojektowano w programie SolidWorks wzronik oraz dwa zestawy rolek do badań zgniatania (rys. 3). Wyznaczono również parametry procesu zgniatania dla których prowadzono numeryczne badania, tj.: prędkość posuwu 1000 mm/min oraz prędkość obrotową wrzeciona w zakresie 200÷600 obr./min. Następnie narzędzia wraz parametrami mechanicznemu stopu z serii 6xxx przekazano do AGH, gdzie zaimplementowano dane do programu symulacyjnego Impetus [4] oraz DEFFEM 3D [5, 6]. Materiałem kształtowanym był odcinek rury o średnicy 120 mm i grubości 4 mm.



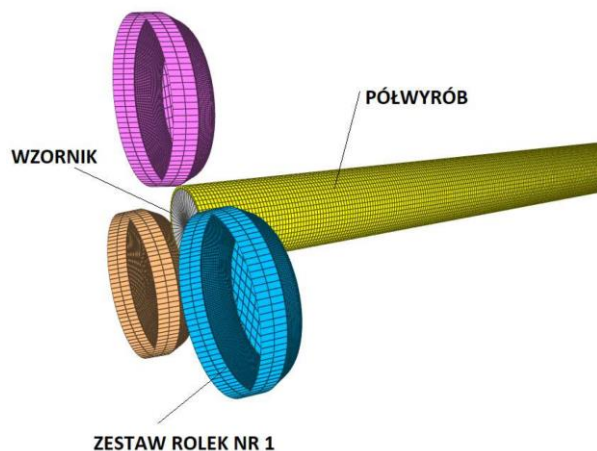
Rysunek 3. Kształt powierzchni roboczej rolek do zgniatania, a) zestaw nr 1; b) zestaw nr 2 [opracowanie własne]

Badania dążyły do uzyskania grubości ścianki materiału po procesie zgniatania w zakresie $3 \pm 0,1$ mm. Na podstawie wyników badań MES zaprojektowano i wykonano zestaw rolek, dla którego otrzymano lepsze wyniki. Następnie dla tych samych parametrów technologicznych przeprowadzono laboratoryjne badania zgniatania obrotowego, w których zbadano zmianę grubości materiału na wzdłuż próbki, chropowatość powierzchni po zgniataniu oraz pomiar temperatury w trakcie procesu kształtowania. Dodatkowo przeprowadzono laboratoryjne badania materiałowe, tj. statyczną próbę rozciągania oraz badania mikrotwardości, na podstawie których określono umocnienie się materiału. W ostatnim etapie badań w programie SolidWorks zaprojektowano słup w skali 1:1 i zaimportowano wyniki do programu LS-Dyna, w którym przeprowadzono testy zderzeniowe, mające na celu określenie zachowania się słupa podczas zderzenia oraz zaklasyfikowanie go do kategorii bezpieczeństwa biernego.

5. Badania zgniatania obrotowego

5.1. Numeryczne badania kształtowania

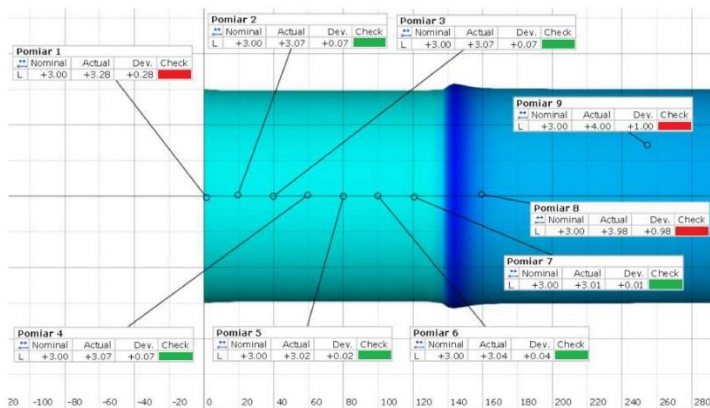
Do badań zgniatania obrotowego zastosowano 3 rolki o tym samym kształcie oraz wzornik, na którym zamontowano odcinek rury (półwyrob), któremu przypisano właściwości materiału serii 6xxx. Zestawienie modelu pokazano na rysunku 4.



Rysunek 4. Model numeryczny zgniatania obrotowego-wydułużającego (zestaw rolek nr 1) [7]

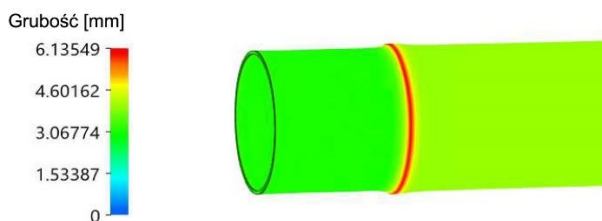
W obliczeniach numerycznych wzornik oraz rolki traktowane były jako sztywne (model konstytutywny nie uwzględnia analizy stanów odkształceń i naprężeń, siatka takiej domeny traktowana jest wyłącznie jako referencja do obliczeń oddziaływań kontaktowych między domenami obliczeniowymi). Geometria półwyrobu poddana została dyskretyzacji elementami 3D (8-węzłowymi), które w trakcie obliczeń poddane zostały automatycznej konwersji na elementy 64-węzłowe. W obliczeniach przyjęto izotropowy model konstytutywny odkształcanego półwyrobu [7].

Najlepsze wyniki badań uzyskano przy zastosowaniu prędkości obrotowej 600 obr./min i przedstawiono je na rysunkach 5-9.

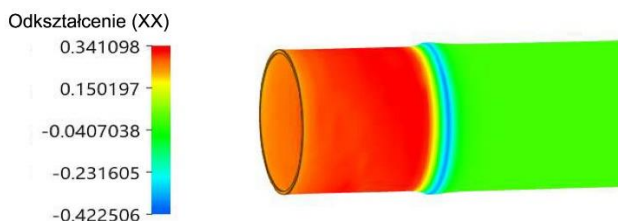


Rysunek 5. Mapa odchyłek rozkładu grubości pomiędzy geometrią otrzymaną w wyniku symulacji numerycznej a nominalnym [7]

Obszary zaznaczone kolorem czerwonym oznaczają uzyskanie zmiany grubości materiału w zakresie $3 \pm 0,1$ mm. Kolor czerwony natomiast oznacza przekroczenia dopuszczalnej tolerancji $\pm 0,1$ mm. Należy jednak nadmienić że obszar po prawej stronie dotyczy rury przed procesem kształtowania. Punkt oznaczony na rysunku 5 jako Pomiar 1, znajduje się poza tolerancją, gdyż jest to początek procesu zginięcia obrotowego i w obszarze tym proces nie jest stabilny. Ponieważ jest to nieodzowny element procesu MES należy ten punkt pominąć w dalszej analizie. Proces kształtowania numerycznego przebiegł poprawnie, a dokładność wymiarowa grubości materiału mieści się w przedziale $0,01 \div 0,07$ mm.

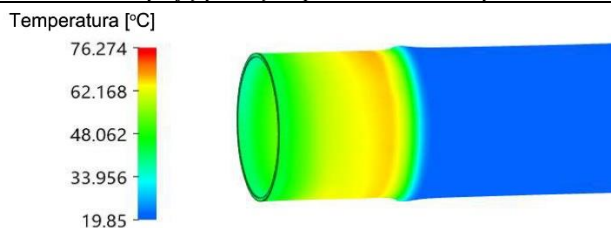


Rysunek 6. Mapa rozkładu grubości materiału [7]



Rysunek 7. Mapa rozkładu odkształceń (składowa XX) [7]

Rozkład grubości przebiega w całej strefie odkształcenia bardzo stabilnie i równomiernie, co potwierdza mapa odkształcenia materiału, która w całym procesie nie ulegała zmianie i ustabilizowała się na stałym poziomie.



Rysunek 8. Mapa rozkładu temperatury [7]

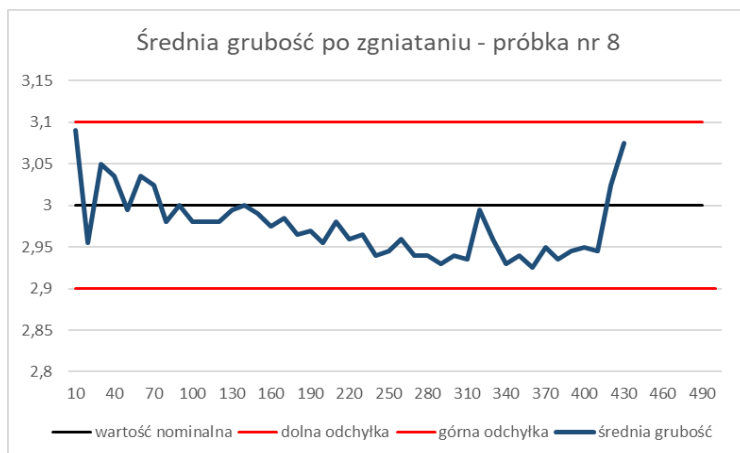
Temperatura w trakcie procesu stopniowo wzrastała i po odkształceniu odcinka ok. 120 mm uzyskała wartość ok. 70°C.

Po przeanalizowaniu wyników przystąpiono do weryfikacyjnych badań laboratoryjnych, w których przyjęto warunki brzegowe z badań numerycznych. Celem badań było określenie zbieżności wyników badań MES.

5.2. Laboratoryjne badania kształtowania

Podobnie, jak podczas badań numerycznych, tak i w badaniach laboratoryjnych niezależnie od kształtu rolki, najlepsze wyniki otrzymano stosując prędkość obrotową 600 obr./min.

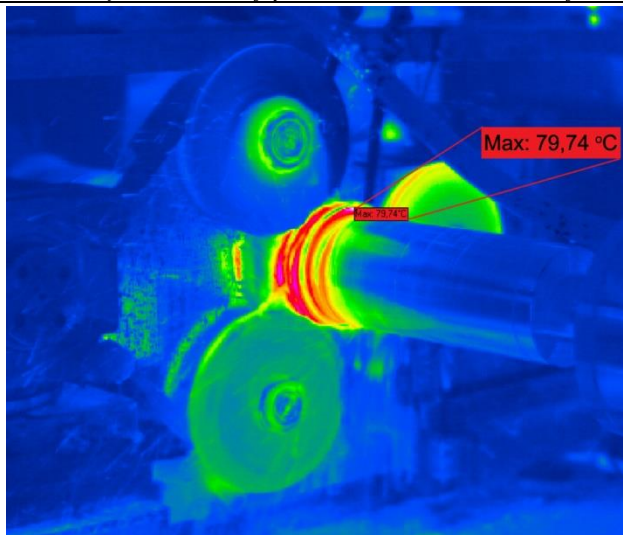
Na rysunku 9 przedstawiono w sposób graficzny rozkład grubości materiału po procesie zgniatania obrotowego. Przedstawione wyniki wykonano na odcinku pomiarowym o długości 430 mm.



Rysunek 9. Rozkład grubości materiału po procesie zgniatania obrotowego [opracowanie własne]

Uzyskane wyniki zgodne są z założeniami, tzn. znajdują się w przedziale $3 \pm 0,1$ mm. Dodatkowo dokonano pomiaru chropowatości, który dla pierwszego zestawu rolek mieścił się w przedziale $Ra = 7,49 \div 11,11 \mu m$, natomiast dla zestawu drugiego $Ra = 5,72 \div 6,19 \mu m$.

Na rysunku 10 przedstawiono za pomocą kamery termowizyjnej mapę temperatury występującą podczas procesu zgniatania obrotowego.



Rysunek 10. Mapa gradientu temperatury podczas procesu zgniatania obrotowego [opracowanie własne]

Podobnie jak podczas badań numerycznych zaobserwowano wzrost temperatur wraz z długością trwania procesu. Zamieszczono na rys. 10 obraz, został zarejestrowany po odkształceniu odcinka o długości ok. 300 mm. Podczas badań zaobserwowano, że w trakcie trwania całego procesu kształtowania, następował nieznaczny wzrost temperatury. Oznacza to że zastosowane chłodziwo ustabilizowało temperaturę na stałym poziomie. Nie zaobserwowano natomiast wpływu kształtu roelek na zmianę temperatury występującą podczas kształtowania.

Przykładowe wyroby zaprezentowano na rysunku 11.



Rysunek 11. Detale po procesie zgniatania obrotowego [opracowanie własne]

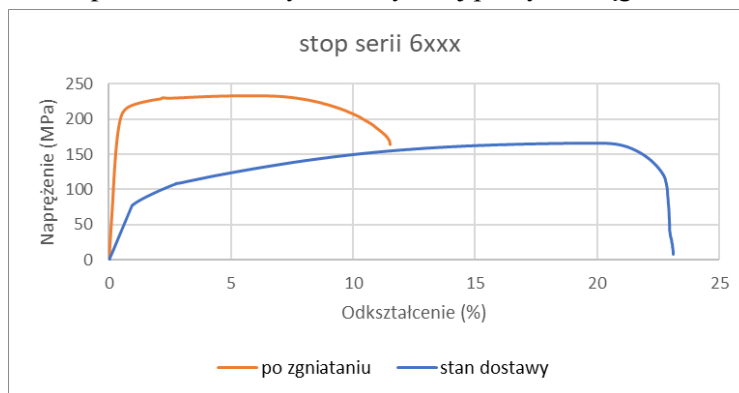
Z otrzymanych wyrobów wycięto próbki do badań statycznej próby rozciągania oraz badań mikrotwardości. Przykładowe wyniki zamieszczono w tabeli 1 oraz na rysunku 12.

Tabela 1. Wyniki badań mikrotwardości na przekroju grubości próbki

Dystans	HV0,1		
	Stan dostawy	Po zgniataniu obrotowym – zestaw rolek 1	Po zgniataniu obrotowym – zestaw rolek 2
0,15	50,6	78,9	87,0
0,30	48,8	79,1	86,3
0,45	48,2	77,7	90,8
0,60	50,7	80,4	91,1
0,75	53,3	79,3	88,0
0,90	52,6	77,8	91,6
1,05	54,9	77,6	85,9
1,20	55,3	81,2	84,2
1,35	53,0	80,3	86,6
1,50	62,0	80,8	85,0
1,65	58,9	83,4	88,0
1,80	54,9	81,8	84,6
1,95	61,8	80,1	88,4
2,10	60,5	78,6	88,2
2,25	64,5	78,2	91,1
2,40	62,9	75,3	80,3
2,55	67,6	78,6	80,8
2,70	61,0	76,4	83,4
2,85	66,3	78,3	87,0
Średnia	57,2	79,1	86,7

Źródło: opracowanie własne.

Nieznaczny wzrost twardości zaobserwowano dla drugiego zestawu rolek. Na rysunku 12 przedstawiono wyniki statycznej próby rozciągania.



Rysunek 12. Wyniki statycznej próby rozciągania [opracowanie własne]

W trakcie procesu zgniatania dochodzi do znacznego umocnienia się materiału, co obrazuje rysunek 12. Granica wytrzymałości na rozerwanie R_m wzrasta ze 166 MPa do 233 MPa, natomiast granica plastyczności R_e wzrasta z 78 MPa do 207 MPa. Ponadto następuje niemalże 60% zmniejszenie wydłużenia.

5.3. Weryfikacja zbieżności wyników

Otrzymane wyniki badań laboratoryjnych pozwoliły na określenie zbieżności z wynikami numerycznymi. W tym celu porównano rozkład temperatury w trakcie procesu, zmianę grubości materiału po zgniataniu oraz chropowatość. W celu łatwiejszego i pełnego zobrazowania zagadnienia, część wyników zestawiono obok siebie.

W przypadku pomiaru temperatury, uzyskano bardzo dużą zgodność. Badania numeryczne wskazały wzrost temperatury do ok 70°C , natomiast badania laboratoryjne niepełna 80°C . Należy pamiętać że temperatura w trakcie procesu nieznacznie wzrastała, a pomiary laboratoryjne dokonano na odcinku dłuższym o ok. 200 mm. Nie mniej jednak, tak niska temperatura nie wpływa na zmiany mechaniczne zachodzące w materiale w trakcie trwania procesu.

Zarówno w przypadku badań MES jak i laboratoryjnych uzyskano grubość ścianki materiału po zgniataniu rzędu $3 \pm 0,1$ mm. W przypadku badań MES największ odchyłka wynosiła 0,07 mm, a w przypadku badań laboratoryjnych 0,06 mm.

Weryfikacja chropowatości materiału była możliwa dzięki autorskiemu podejściu do tematu badań numerycznych, polegającym na zaimplementowaniu modelu numerycznego do wirtualnej rzeczywistości VR i analizie jakości powierzchni z wykorzystaniem lamp PDR. Na rysunkach 13 i 14 zestawiono próbki po zgniataniu metodą MES oraz laboratoryjną.



Rysunek 13. Powierzchnia wyrobu po zgniataniu obrotowym dla posuwu 200 obr./min [7]

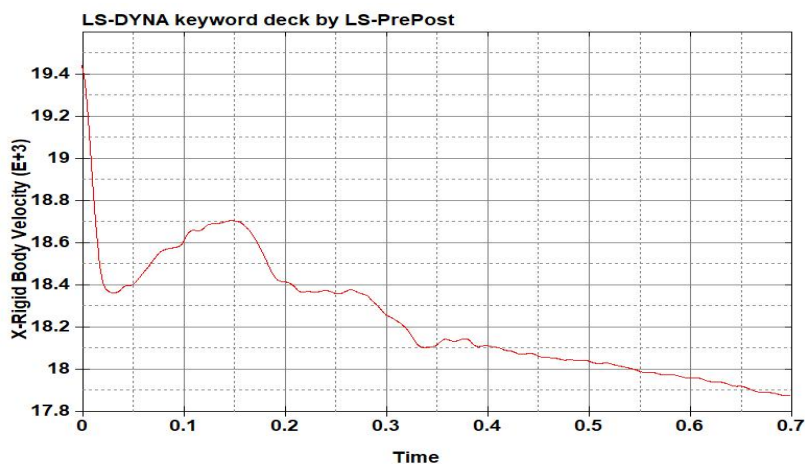


Rysunek 14. Powierzchnia wyrobu po zgniataniu obrotowym dla posuwu 600 obr./min [7]

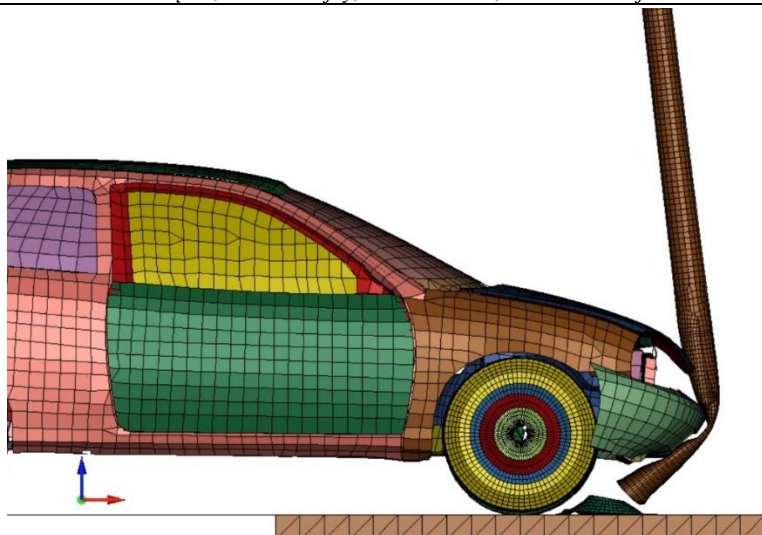
Zarówno badania numeryczne, jak i laboratoryjne potwierdziły uzyskanie gorszej jakości powierzchni dla wyrobów kształtowanych przy wolniejszej prędkości zgniatania. W przypadku badań laboratoryjnych dla parametru 200 obr./min uzyskano chropowatość na poziomie $Ra = 12,37 \mu\text{m}$, zaś dla 600 obr./min chropowatość zmniejszyła się do wartości $Ra = 8,25 \mu\text{m}$. Mimo iż nie było możliwości pomiaru chropowatości w badaniach numerycznych, to wizualizacja VR jednoznacznie wskazuje na gorszą jakość powierzchni dla mniejszej prędkości obrotowej.

6. Testy zderzeniowe

W celu określenia klasy bezpieczeństwa biernego oraz zachowania się słupa podczas kolizji, przeprowadzono numeryczne testy zderzeniowe w programie LS-Dyna. Badania przeprowadzono na podstawie normy *PN-EN 12767 Bierne bezpieczeństwo konstrukcji wsporczych dla urządzeń drogowych*. Wymagania i metody badań. Badania prowadzono dla prędkości zderzeniowej równej 70 km/h. Przeprowadzone badania wykazały, że podczas kolizji dochodzi do zerwania słupa przy podstawie, w efekcie czego samochód nieznacznie wytraca prędkość. Na rysunkach 15 i 16 przedstawiono wynik zmiany prędkości oraz wizualizację testu tuż po zderzeniu samochodu ze słupem.



Rysunek 15. Zmiana prędkości samochodu w chwili zderzenia



Rysunek 16. Wizualizacja zachowania się słupa w chwili zderzenia

Podczas kolizji dochodzi do oderwania się słupa w miejscu podstawy, a co za tym idzie, niewielkiej zmianie prędkości auta z 70 km/h do 64 km/h. Taki wynik badania pozwala na zaklasyfikowanie słupa do klasy NE bezpieczeństwa biernego, gdzie NE (ang. *no energy*) oznacza nie pochłaniające energii. Taki słup jest znacznie bardziej bezpieczny od słupów stalowych, czy betonowych, gdyż nie dochodzi do nagłego zatrzymania auta w miejscu zderzenia. Przeprowadzono również badania zderzenia dla stopu aluminium charakteryzującego się zwiększoną plastycznością materiału, dzięki czemu sprawdzono jak podatność słupa do odkształceń plastycznych wpływa na jego zachowanie podczas kolizji. Efekt testu przedstawiono na rysunku 17.



Rysunek 17. Wizualizacja zachowania się słupa w chwili zderzenia dla materiału o zwiększonej plastyczności

Zmiana plastyczności materiału również spowodowała wyrwanie słupa z podstawy, jednakże nastąpiło to znacznie później niż w poprzednim przypadku. Wpłynęło to również na większe zniszczenie auta oraz większe wytracenie prędkości. W tym przypadku samochód z prędkości początkowej 70 km/h zwolnił do 54 km/h. W efekcie nadal klasyfikuje auto do tej samej kategorii bezpieczeństwa biernego, jednakże pokazuje, jak duży wpływ na zachowanie się auta w chwili zderzenia ma plastyczność stopu aluminium, z którego wykonany jest słup.

7. Podsumowanie

1. Laboratoryjna weryfikacja badań numerycznych pozwoliła jednoznacznie stwierdzić poprawność uzyskanych wyników oraz możliwość wykorzystania symulacji numerycznych, jako wiarygodnego badań.
2. Wykorzystanie wirtualnej rzeczywistości do oceny jakości powierzchni wyrobu po numerycznym zginiataniu obrotowym jest bardzo dobrym narzędziem obrazującym zgodność z wynikami rzeczywistymi.
3. Numeryczne badania crash testów, pozwoliły sklasyfikować słup do odpowiedniej kategorii bezpieczeństwa biernego
4. Zmiana parametrów mechanicznych materiału bezpośrednio wpływa na zachowanie się słupa w trakcie uderzenia.

Podziękowania

Badania prowadzone w ramach projektu: „Opracowanie technologii wytwarzania wyrobów długich o zmiennym przekroju ze stopów aluminium do zastosowań między innymi w słupach oświetleniowych” w ramach Poddziałania 1.1.1 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego na podstawie umowy o dofinansowanie nr POIR.01.01.01-00-1337/20-00.

Literatura

1. Wiśniewski J., Drenger T., Perkowski A., *Badania technologii miejscowego zginiatania obrotowego wyrobów rurowych*, Obróbka Plastyczna Metali, t. XXII nr 1, 1982, s. 5-15.
2. Kopp R., *Der Werkstofflug bein Dreirollen-Druckwalzen*, Archiv fur das Wisenhtutenwesen, Heft, 5, 1972.
3. Jacob H., Garreis F., *Berechnung der auftretenden Krafte beim Fliessdrucken zylindrischer Hohlkorper*, Fertigungstechnik und betrieb, Jahrgang, Heft, 1964.
4. <http://www.impetus-afea.com/> [data dostępu: 15.12.2022].
5. Hojny M., *Modeling of Steel Deformation in the Semi-Solid State*, Wydawnictwo Springer, Szwajcaria, 2018.
6. Hojny M., *Projektowanie dedykowanych systemów symulacji odkształcania stali w stanie półciekłym*, Wydawnictwo Wzorek, Kraków 2014.
7. Hojnt M., Dębiński T., Marynowski P., *Opracowanie technologii wytwarzania wyrobów długich o zmiennym przekroju ze stopów aluminium do zastosowań między innymi w słupach oświetleniowych*, Raport z realizacji prac.

Opracowanie technologii wytwarzania aluminiowych słupów oświetleniowych, charakteryzujących się bezpieczeństwem biernym

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań opracowania procesu technologicznego zgniatania obrotowego wyrobów długich ze stopu aluminium serii 6xxx. Celem badań było opracowanie optymalnych parametrów procesu zgniatania obrotowego, które umożliwią kształtowanie stopu aluminium w celu uzyskania wyrobu charakteryzującego się grubością ścianki w zakresie 3 mm \pm 0,1 mm. Wspierając się badaniami numerycznymi opracowano proces kształtowania wyrobów w postaci rur aluminiowych. Na podstawie otrzymanych wyników symulacji numerycznych wybrano najbardziej korzystne z analizowanych parametry procesu. W celu weryfikacji wyników badań numerycznych w Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny w warunkach laboratoryjnych przeprowadzono badania zgniatania obrotowego. Do badań zaprojektowano rolki, których kształt określono na podstawie analiz numerycznych. W celu określenia wpływu procesu zgniatania na zmiany właściwości mechanicznych stopu aluminium, przeprowadzono próby rozciągania próbek aluminiowych przed i po procesie kształtowania. Przeprowadzenie analizy rozkładu grubości ścianki, pozwoliło zweryfikować zbieżność wyników badań uzyskanych w procesie MES. Dodatkowo przeprowadzono numeryczne badania testów zderzeniowych w celu określenia klasy bezpieczeństwa biernego.

Słowa kluczowe: zgniatanie obrotowe, badania numeryczne, crash testy, badania laboratoryjne

Development of technology for the production of lighting poles characterized by passive safety

Abstract

The paper presents the results of research on the development of a technological process for flow forming of long products made of aluminum alloy of the 6xxx series. The aim of the research was to develop the optimal parameters of the flow forming process, which will enable the shaping of the aluminum alloy in order to obtain a product with a wall thickness in the range of 3 mm \pm 0.1 mm. Supported by numerical research, a process of shaping products in the form of aluminum pipes was developed. Based on the results of numerical simulations, the most favorable of the analyzed process parameters were selected. In order to verify the results of numerical tests in Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny, rotary crushing tests were carried out in laboratory conditions. Rollers were designed for the tests, the shape of which was determined on the basis of numerical analyses. In order to determine the impact of the crushing process on changes in the mechanical properties of the aluminum alloy, tensile tests of aluminum samples were carried out before and after the shaping process. The analysis of the wall thickness distribution made it possible to verify the convergence of the test results obtained in the FEM process. In addition, numerical crash tests were carried out to determine the passive safety class.

Keywords: flow forming, numerical test, crash tests, laboratory tests

Analiza systemu ochrony konstrukcji inżynierskich przed spadającymi odłamkami skalnymi na przykładzie elastycznej bariery Geobrugg GBE500A

1. Wprowadzenie

Rozwój technologii oraz wiedzy geotechnicznej, głównie w sektorze nowych materiałów oraz technologii cyfrowej pozwala, a wręcz zobowiązuje do lepszego zapewnienia bezpieczeństwa ogólnych interesów publicznych. W szczególności zalicza się do nich zapewnienie bezpieczeństwa dla zdrowia i życia, ochrona infrastruktury przed zniszczeniem, ochrona naturalnego środowiska oraz minimalizacja kosztów wytworzenia i utrzymania infrastruktury.

Pomimo w głównej mierze nizinnego charakteru ukształtowania terenów Polski nie brakuje w niej, szczególnie w południowej części kraju, rejonów górskich. Trudne warunki pod względem geotechnicznym występujące w środowisku górskim, takie jak duże różnice wysokości, mała ilość miejsca możliwego do wykorzystania, występowanie osuwisk czy skarp stwarzają większe niebezpieczeństwo dla interesów publicznych. Szczególnie groźnym zjawiskiem występującym w górach są spadające odłamki skalne. Zjawisko to może być ogromnym zagrożeniem, ponieważ możliwe zniszczenia spowodowane przez niekontrolowany i nagły ruch skał mogą prowadzić do poważnych lub nawet całkowitych zniszczeń obiektów inżynierskich, a w najniebezpieczniejszych przypadkach nawet do poważnych strat ludzkich.

Aby móc sprostać wymaganiom społeczeństwa opracowano szereg metod pozwalających na zabezpieczenie jej interesów, które można podzielić na te niwelujące przyczyny i te niwelujące skutki zjawiska spadających odłamków. Pośród nich szczególnie warto przyjrzeć się metodzie wykorzystania barier energochłonnych, ponieważ dzięki ich zastosowaniu można zapewnić w dużej mierze wszystkie niezbędne elementy ważne dla ludzi i środowiska naturalnego, którymi są ochrona ludności i infrastruktury, stosunkowo niski nakład na budowę i utrzymanie oraz niewielka ingerencja w środowisko.

2. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest analiza systemu ochrony konstrukcji inżynierskich przed spadającymi odłamkami skalnymi. Zakres pracy obejmuje analizę przyczynowo-skutkową oraz projekt elastycznej bariery GEOBRUGG GBE500A w miejscowości Czernichów. Szczegółowy zakres pracy obejmuje:

- przeprowadzenie inwentaryzacji zbocza góry przy Drodze Wojewódzkiej nr 948 od km 30+590,00 do 30+630,00 z uwzględnieniem topografii istniejących skał oraz erozji gruntu stanowiącej zagrożenie dla ruchu i infrastruktury;

¹ mgwozdz@ubb.edu.pl, Katedra Budownictwa, Wydział, Inżynierii Materiałowej, Budownictwa i Środowiska, Uniwersytet Bielsko-Bialski, <https://ubb.edu.pl/>.

² wb051656@student.ubb.edu.pl, Katedra Budownictwa, Wydział, Inżynierii Materiałowej, Budownictwa i Środowiska, Uniwersytet Bielsko-Bialski, <https://ubb.edu.pl/>.

- wizja lokalna z fotodokumentacją zinventaryzowanych miejsc;
- wykonanie analizy występowania obrywu odłamków skalnych na odcinku od km 30+590,00 do 30+630,00 z uwzględnieniem:
 - zagrożeń oraz możliwością nasienia wystąpienia obrywów skalnych,
 - prawdopodobieństwa wystąpienia i podatności na potencjalne zranienie,
 - określona możliwej energii potencjalnych obrywów z podziałem na ich prawdopodobieństwo wystąpienia oraz siłę uderzeniową;
- określenie stref zagrożenia i przyjęcia rozwiązań umożliwiających zabezpieczenie infrastruktury oraz osób korzystających z niej przed możliwością wystąpienia obrywów w strefach zagrożeń.

Na zakres przedmiotowej pracy składa się również:

- charakterystyka projektowania w technologii barier elastycznych;
- obliczenie zaprojektowanego rozwiązania ochrony przed spadającymi odłamkami skalnymi w miejscowości Czernichów przy DW 948 od km 30+590,00 do 30+630,00.

Przyjęta hipoteza badawcza niniejszej pracy, to stwierdzenie, że optymalnym rozwiązaniem inżynierskim dla ochrony konstrukcji linowych przed niekorzystnymi losowymi oddziaływaniami spadających odłamków skalnych jest elastyczna bariera ochronna.

3. Problematyka obrywów

Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 roku w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych – artykuł 4, oraz Eurokod PN-EN 1997-1 różnią trzy kategorie geotechniczne obiektu budowlanego. Prawidłowe dobranie kategorii geotechnicznej jest niezbędne do określenia zakresu obowiązkowych badań oraz formy przedstawienia geotechnicznych warunków posadawiania. Przy ustalaniu kategorii geotechnicznej według EC7 uwzględnia się:

- warunki miejscowe terenu budowy, wraz z rozpatrzeniem stateczności i możliwych przemieszczeń podłoża;
- rodzaj oraz wymiary konstrukcji, a także czas użytkowania i inne charakterystyczne wymagania;
- okoliczności zależne od otoczenia, takie jak np.: ruch pojazdów, istniejące instalacje podziemne, warunki wegetacyjne czy występowanie agresywnych substancji;
- warunki gruntowe, wodne i sejsmiczne.

Dodatkowo rozporządzenie [2] w celu klasyfikacji kategorii geotechnicznej uzależnia ją od:

- stopnia złożoności oddziaływań;
- stopnia zagrożenia życia i mienia awarią konstrukcji;
- wartości historycznej oraz technicznej;
- potencjalnego oddziaływania na środowisko;
- stopnia skomplikowania warunków gruntowych;

Stopień skomplikowania warunków gruntowych różniony jest w powyższym rozporządzeniu na warunki proste, złożone i skomplikowane. O warunkach prostych mówi się, gdy nie występują niekorzystne sytuacje geologiczne, grunty są jednorodne, woda gruntowa ma swój poziom poniżej poziomu projektowanego posadawienia, a grunty nie są organiczne ani mineralne słabonośne [1, 2].

Złożone warunki gruntowe obejmują grunty niejednorodne, słabonośne mineralne oraz organiczne, a także podczas występowania zwierciadła wody gruntowej powyżej poziomu projektowanego posadowienia, lecz przy braku występowania sytuacji niekorzystnych zjawisk i form geologicznych [1-3].

Niekorzystne zjawiska geologiczne, które klasyfikują grunt do warunków skomplikowanych, wyróżnione w rozporządzeniu to między innymi: zjawiska krasowe, osuwiska, działania sufozji i kurzawek, aktywność lodowcowa, możliwe występowanie szkód górniczych, działalność wody w dolinach i dorzeczach oraz na terenach morskich [1, 2, 4].

Tereny znajdujące się w miejscach możliwego występowania spadających odławków skalnych zgodnie z powyższym podziałem znajdują się w trzeciej, a więc najtrudniejszej kategorii geotechnicznej. Wszelkie działania inżynierskie podejmowane w warunkach aktywnych ruchów masowych wymagają szczególnej oceny przed rozpoczęciem prac, ostrożności w trakcie wykonawstwa oraz jak najstaranniejszej ochrony podczas całego cyklu procesu budowlanego, a więc od przygotowania, wykonania i użytkowania obiektu [1, 4].

Na podstawie zdefiniowania kategorii geotechnicznej możliwe jest opracowanie planu niezbędnych badań, w którym wraz ze wzrostem kategorii wzrasta stopień szczególności – ma to wpływ między innymi na gęstość punktów pomiarowych i ich głębokość, czy także dokładność [1, 5].

Aby otrzymane wyniki badań z punktów pomiarowych, takich jak wiercenia, odkrywki czy sondowania, były dokładne zalecany jest szczególnie dla III kategorii geotechnicznej rozdział badań na poszczególne stadia. Dzięki wynikom uzyskanym w danym stadium badawczym możliwe jest ustalenie optymalnego rozmieszczenia kolejnych punktów pomiarowych, tak aby ocena geologiczno-inżynierska była poprawna, a pracochłonność i koszty zminimalizowane. Do opisanego warunków panujących na danym terenie potrzebne jest określenie:

- charakterystyka lokalnej topografii;
- rozpoznanie rodzaju gruntów i skał i ich przestrzenne zlokalizowanie;
- określenie cech i parametrów geotechnicznych występujących gruntów i skał;
- rozeznanie warunków hydrologicznych;
- scharakteryzowanie aktualnych procesów geologicznych oraz możliwie występujących oddziaływań [1, 4, 6].

3.1. Metody ochrony przeciw obrywom skalnym

Aby chronić ludność oraz infrastrukturę techniczną przed obrywami skalnymi i spadającymi odławkami skalnymi stosuje się wiele rozwiązań inżynierskich. Głównie możemy je podzielić na metody aktywne i pasywne. Różnica pomiędzy nimi polega na sposobie niwelowania ryzyka.

Aktywne metody ochrony polegają na ograniczeniu możliwości powstania zjawiska obrywu poprzez stabilizację skarp. W tej metodzie wyróżniamy [7, 8]:

- stabilizację biologiczną – zalesienie skarp lub pokrycie jej roślinnością, której korzenie tworzą swoistą „siatkę zbrojeniową” wzmacniającą grunt;
- stabilizację poprzez metody inżynierskie – np. gwoździowanie, przekrycie stoku siatkami i kurtynami powierzchniowymi, natrysk betonem, gabiony.

Ochrona bierna w odróżnieniu do aktywnej polega na kontrolowaniu trajektorii spadających głazów lub przejęciu na siebie energii kinetycznej odłamków i ich zatrzymaniu. Zaliczamy do niej między innymi:

- mury oporowe i nasypy wolnostojące;
- rowy przeciwoślankowe;
- zadaszzenia i galerie betonowe;
- bariery przeciwoślankowe;
- odstrzeliwanie i skuwanie.

Dobór przez projektanta odpowiedniej metody zależy od wielu czynników, począwszy od:

- czynników ekonomicznych;
- czynników ekologicznych;
- dostępności i morfologii zbocza;
- przyczyn i rozmiarów zjawisk spadających odłamków;
- ilości miejsca możliwego do wykorzystania;
- walorów estetycznych;
- energii kinetycznej przewidywanych odłamków.

3.2. Odporność bariery na zniszczenie

Pojemność „nieodkształcalnej” bariery jest powiązana ze sprężystą odkształcalnością jego elementów. Ponieważ jej elementy są sztywne (kable, słupki), bariera „nieodkształcalna musi zmniejszyć prędkość (Δv) w bardzo krótkim czasie ($\Delta t = 0$). Według „Słownika tematycznego. Fizyka” [9] popęd, czyli wektorowa wielkość fizyczna, określająca działanie siły w danym przedziale czasu, jest równa iloczynowi średniej wartości siły F i czasu Δt jej działania :

$$\vec{I} = \vec{F} \Delta t \tag{1}$$

Dla siły zmieniającej się można wyrazić to za pomocą wzoru:

$$\vec{I} = \int \vec{F} dt \tag{2}$$

gdzie:

I – popęd siły F

F – siła [N]

t – czas [s]

Jednostką popędu jest $N \cdot s = kg \cdot m/s$.

Dzięki popędowi można podać inną definicję II zasady dynamiki Newtona: „zmiana pędu ciała jest równa popędowi siły”, co można wyrazić wzorem:

$$\Delta p = I \tag{3a}$$

$$\Delta \vec{p} = m \cdot \Delta \vec{v} \tag{3b}$$

$$m \cdot \Delta \vec{v} = \vec{F} \cdot t \tag{3c}$$

gdzie:

Δp – zmiana pędu [$kg \cdot m/s$]

m – masa [kg]

Δv – zmiana prędkości [m/s]

Wykorzystując tą zależność siła F uderzenia w bariery „nieodkształcalne”, kiedy to czas potrzebny do wyhamowania pędu spadających odłamków jest bliski zeru ($\Delta t = 0$) jest olbrzymia – dążąca do nieskończoności:

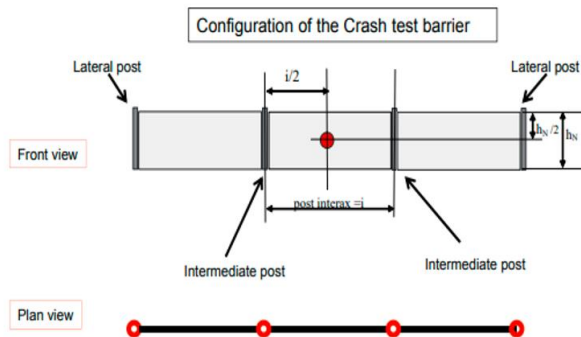
$$F = \frac{m \cdot \Delta v}{\Delta t} \quad (4)$$

Tak więc sztywna bariera zostanie przełamana, nawet jeżeli poziom energii spadającego odłamka skalnego jest niski [5]. Zasada ta jest najważniejszą przyczyną, a także zaletą odkształcalnych barier do stosowania przy ochronie przed spadającymi odłamkami skalnymi. Odkształcalność, a więc możliwość bariery do wyhamowania pędu skały w określonym czasie powoduje, że bariera jest znacznie bezpieczniejsza, oraz mniej narażona na zniszczenie.

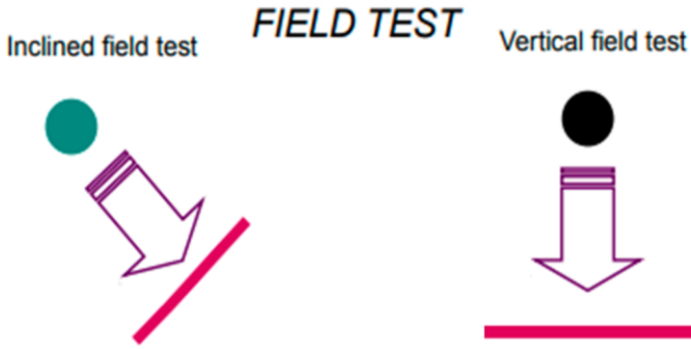
3.3. Testy zderzeniowe barier

Wytyczne do Europejskich Aprobatach Technicznych ETAG 027 (*Guideline for European technical approval of falling rock protection kits*) – wymagają dwóch testów: MEL – Maximum Energy Level (poziom maksymalnej energii) i SEL – Service Energy Level (poziom funkcjonalny energii). W teście MEL bariera musi złapać głaz o maksymalnym poziomie energii (100%). Rezydualna wysokość panelu po uderzeniu wskazuje na poziom jakości bariery. Test SEL wymaga, aby bariera musiała złapać dwa uderzenia głazu z 1/3 energią MEL bez uszkodzenia. Wysokość rezydualna po pierwszym uderzeniu musi być większa od 70% wysokości po teście MEL, drugi głaz musi tylko zostać złapany [10].

Test terenowy przeprowadzany jest na barierze z trzema modułami w linii prostej, jak przedstawiono na poniższym rysunku. Dopuszcza się przeprowadzenie testów pionowych i skośnych, lecz prędkość testowego głazu musi być większa bądź równa 25 m/s.

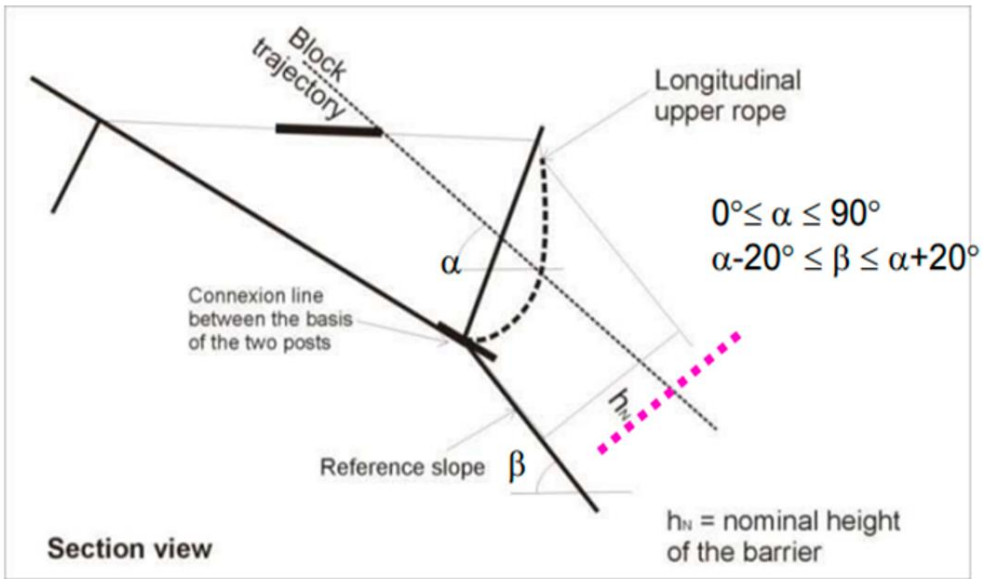


Rysunek 10. Widok z przodu i rzut z góry konfiguracji bariery w teście zderzeniowym, Configuration of the Crash test barrier – konfiguracja testu uderzeniowego bariery; Lateral post – słup zewnętrzny; Intermediate post – słup wewnętrzny; Post interax – odstęp między słupami; Front view – widok z przodu; Plan view – rzut z góry [10]

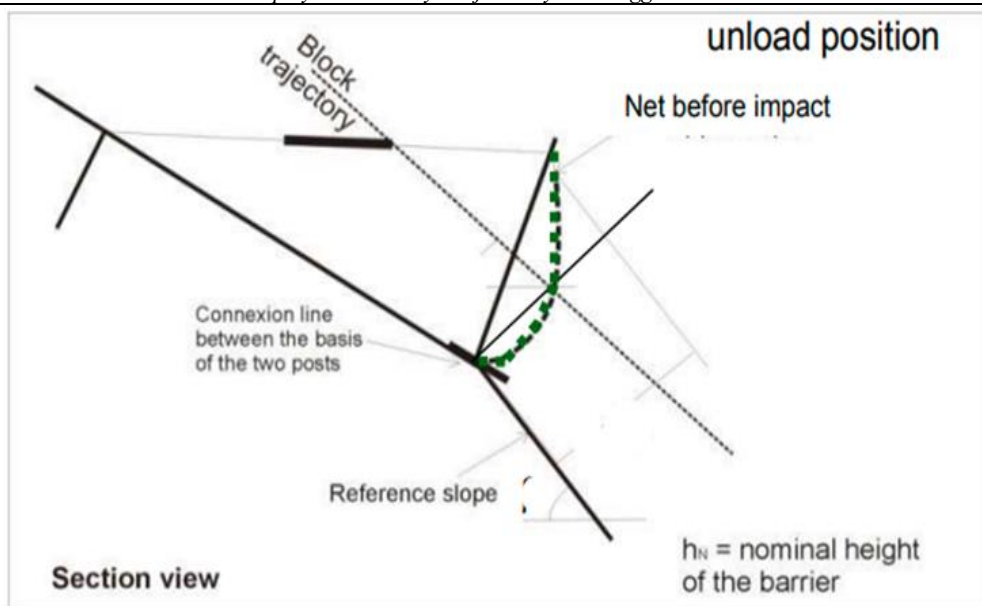


Rysunek 11. Test terenowy skośny (inclined field test) i pionowy (vertical field test) [10]

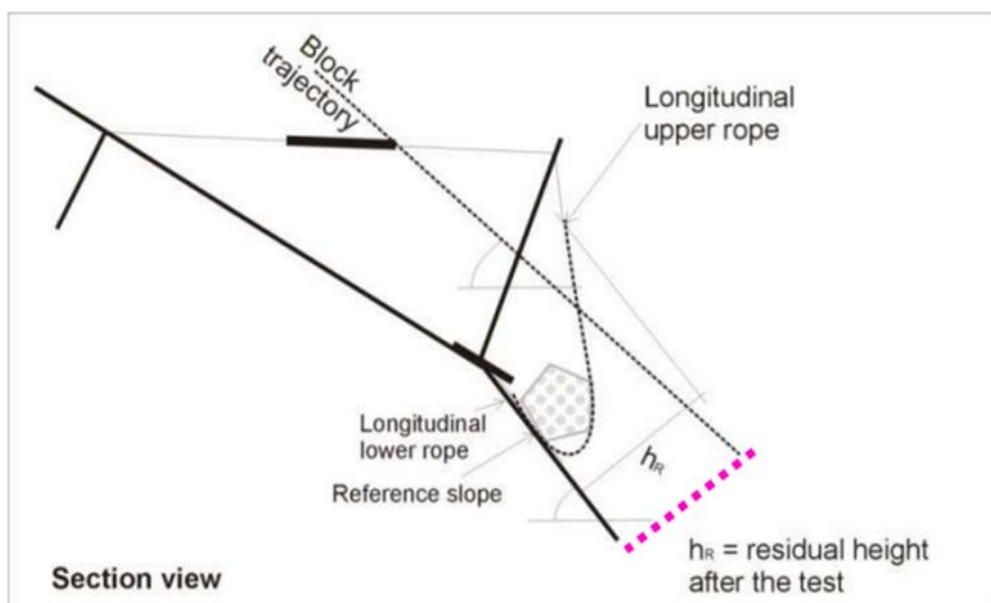
Do określania zmian wysokości i wydłużenia bariery należy korzystać ze schematów podanych w [10] – rysunki 3-6.



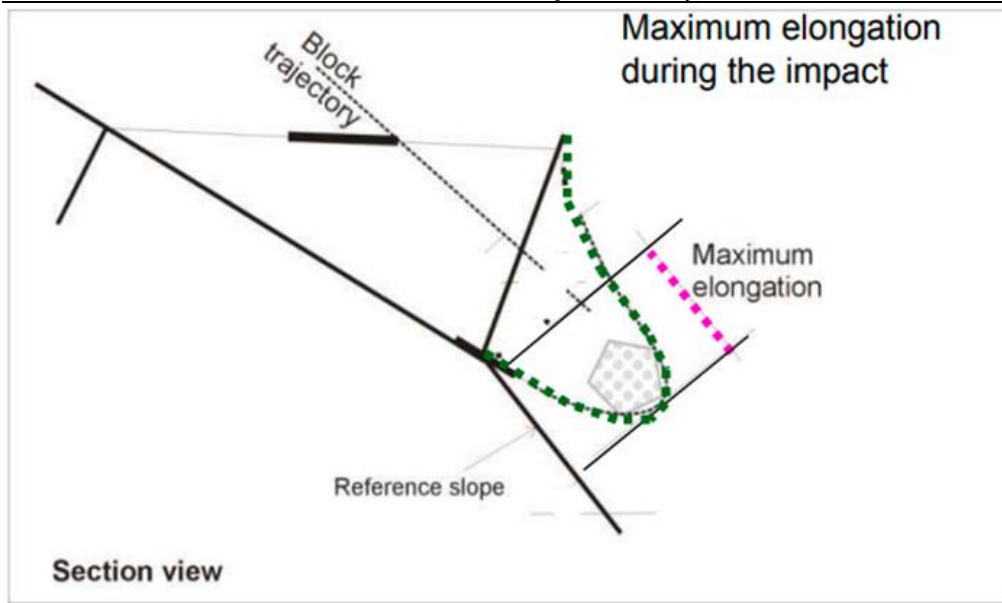
Rysunek 12. Określanie wysokości nominalnej bariery (przed uderzeniem), Section view – przekrój; Block trajectory – trajektoria odłamku; Longitudinal upper rope – podłużna linia górna; Connexion line between the basis of the two posts – linia łącząca podstawy dwóch słupów; Reference slope – spadek referencyjny; nominal height of the barrier – wysokość nominalna bariery [10]



Rysunek 13. Określanie długości nominalnej (przed uderzeniem), Section view – przekrój; unload position – pozycja przed obciążeniem; net before impact – siatka przed uderzeniem; Block trajectory – trajektoria odłamka; Connexion line between the basis of the two posts – linia łącząca podstawy dwóch słupów; Reference slope – spadek referencyjny; nominal height of the barrier – wysokość nominalna bariery [10]



Rysunek 14. Określanie wysokości rezydualnej bariery (po uderzeniu), Section view – przekrój; Block trajectory – trajektoria odłamku; Longitudinal upper rope – podłużna lina górna; Longitudinal lower rope – podłużna lina dolna; Reference slope – spadek referencyjny; residua height after the test – wysokość rezydualna po teście [10]



Rysunek 15. Określenie wydłużenia bariery (po uderzeniu), Section view – przekrój; Maximum elongation during the impact – maksymalne wydłużenie w trakcie uderzenia; Block trajectory – trajektoria odłamka; Maximum elongation – maksymalne wydłużenie; Reference slope – spadek referencyjny [10]

3.4. Klasyfikacja zestawów chroniących przed spadającymi kamieniami

Klasyfikacja wysokości rezydualnej dla MEL jest następująca:

- kategoria A: wysokość rezydualna jest $\geq 50\%$ nominalnej wysokości,
- kategoria B: 30% nominalnej wysokości $<$ wysokość rezydualna $<$ 50% nominalnej wysokości,
- kategoria C: rezydualna wysokość $\leq 30\%$ nominalnej wysokości.

Dwa główne podejścia projektowe do ochrony przed skałami to projekt:

- a) konstrukcji bariery dla stanu granicznego nośności oznacza odniesienie projektu do MEL (maksymalnego poziomu energii testu zderzeniowego). Należy wykorzystać maksymalną wydajność bariery, a projekt oparty jest na pojedynczych uderzeniach. Używane w warunkach, gdzie możliwe są częste przeglądy i wygodny dostęp. Wadami bariery, ze względu na jednorazowość są wysokie koszty utrzymania.
- b) konstrukcji bariery dla stanu granicznego użyteczności oznacza odniesienie projektu do SEL (poziomu funkcjonalnego energii = $1/3$ MEL). Projekt powinien uwzględniać brak zniszczenia po uderzeniu, podczas testu bariera wielokrotnie jest uderzana. Zaletą bariery są niskie koszty utrzymania – nie potrzeba wymiany bariery po każdym uszkodzeniu. Używane, gdy częste przeglądy i prace konserwacyjne są trudniejsze do wykonania. Klasy zestawów chroniących przed spadającymi odłamkami przedstawia tabela 1.

Tabela 2. Klasyfikacja zestawów barier ze względu na poziom energii

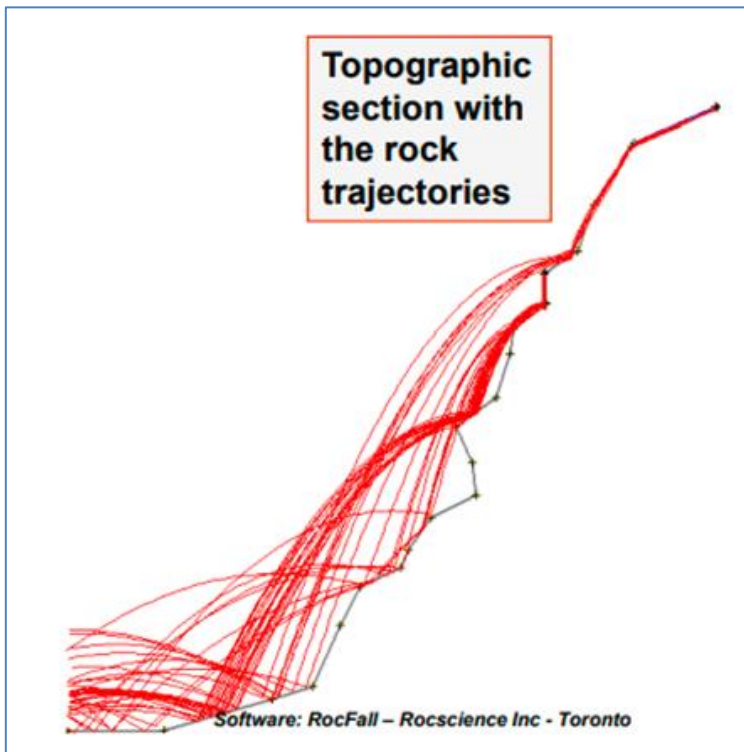
Klasyfikacja poziomu energii	0	1	2	3	4	5	6	7	8
SEL [kJ]	-	85	170	330	500	660	1000	1500	>1500
MEL [kJ] ≥	100	250	500	1000	1500	2000	3000	4500	>4500

Źródło: [10].

3.5. Inne czynniki wpływające na projekt bariery

Podczas projektowania bariery oprócz wytrzymałości na zniszczenie potrzeba uwzględnić dwa inne czynniki:

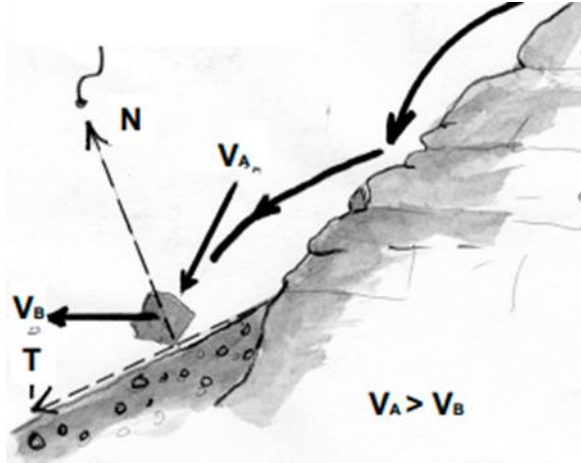
- odległość bariery od chronionej infrastruktury – musi być większa lub równa wydłużeniu bariery po uderzeniu, powiększona o współczynniki bezpieczeństwa;
- wysokość bariery – musi być większa lub równa od wysokości trajektorii ruchu odłamków, powiększona o współczynniki bezpieczeństwa [9-13].



Rysunek 16. Przekrój topograficzny z przykładowymi trajektoriami spadających odłamków skał z analizy programem RocFall [10]

Na podstawie przeprowadzonych analiz i schematów obliczeniowych wyselekcjonowano główne parametry, które muszą być uwzględniane przy projektowaniu barier tj.:

- nachylenie topograficzne;
- współczynnik opisujący energię rozpraszaną po uderzeniu bloku;
- współczynniki opisujące toczenie bloku wzdłuż zbocza;
- rozmiar głazu [9, 12, 14, 15].



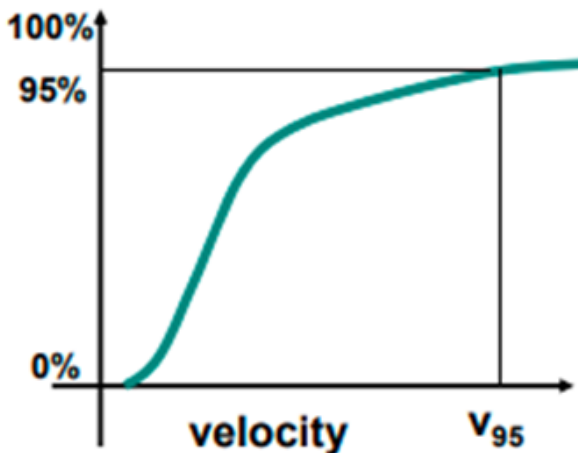
Rysunek 17. Schemat toczącego się głazu po zboczu: N – oś prostopadła do nachylenia, T – oś styczna do nachylenia [13]

Bariery muszą być wyższe niż ścieżka spadających głazów – podczas projektowania należy wziąć pod uwagę, że:

- podjęcie statystyczne nie prognozuje w 100% dokładnie możliwych wydarzeń,
- symulacja daje trajektorię bez uwzględnienia rzeczywistych rozmiarów głazów,
- istnieje związek między wysokością bariery i jej zdolności do rozpraszania energii [12, 13].

3.6. Symulacja spadania skał

Symulacja spadania skał jest wymagana, aby uzyskać prędkość i wysokość trajektorii ruchu spadających skał.



Rysunek 18. Skumulowana krzywa probabilistyczna prędkości /velocity - prędkość [2]

- Prędkość projektowa głazu:

Prędkość V_d jest przyjmowana na podstawie 95% obliczeniowej prędkości, pomnożonej o współczynniki bezpieczeństwa γF .

$$v_d = v_{95} \cdot \gamma_F = v_{95} \cdot (\gamma_{Tr} \cdot \gamma_{Dp}) \text{ [m/s]} \quad (6)$$

gdzie:

v_{95} – prędkość obliczeniowa z 95% prawdopodobieństwem wystąpienia;

γ_{Tr} – współczynnik bezpieczeństwa zależny od wiarygodności symulacji;

$\gamma_{Tr} = 1,02$ – dla symulacji 2D i 3D skalibrowanej przez analizę wsteczną;

$\gamma_{Tr} = 1,07$ – do symulacji 2D na podstawie wartości bibliograficznych;

γ_{Dp} – współczynnik bezpieczeństwa precyzji nachylenia;

$\gamma_{Dp} = 1,01$ – dla nachylenia wyznaczonego na podstawie pomiarów topograficznych;

$\gamma_{Dp} = 1,07$ – dla nachylenia śledzonego z małą dokładnością [16].

b) Projektowa wysokość trajektorii skały:

Wysokość h_d jest przyjmowana na podstawie 95% obliczeniowych trajektorii, pomnożonych o współczynnik bezpieczeństwa γ_F .

$$h_d = h_{95} \cdot \gamma_F = h_{95} \cdot (\gamma_{Tr} \cdot \gamma_{Dp}) \text{ [m]} \quad (7)$$

gdzie:

h_{95} – obliczeniowa wysokość trajektorii głazu nad zboczem z 95% prawdopodobieństwem wystąpienia;

γ_{Tr} – współczynnik bezpieczeństwa zależny od wiarygodności symulacji;

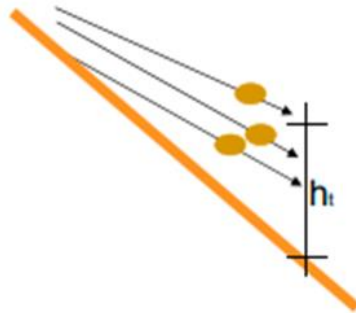
$\gamma_{Tr} = 1,02$ – dla symulacji 2D i 3D skalibrowanej przez analizę wsteczną;

$\gamma_{Tr} = 1,07$ – do symulacji 2D na podstawie wartości bibliograficznych;

γ_{Dp} – współczynnik bezpieczeństwa precyzji nachylenia;

$\gamma_{Dp} = 1,01$ – dla nachylenia wyznaczonego na podstawie pomiarów topograficznych;

$\gamma_{Dp} = 1,07$ – dla nachylenia śledzonego z małą dokładnością.



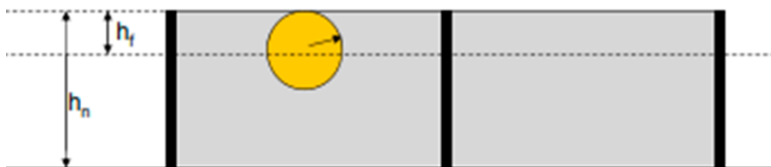
Rysunek 19. Wysokość trajektorii ruchu spadającego odłamka skalnego [13]

c) Projektowe wymiary głazu:

Do przyjęcia rozmiaru projektowego głazu należy przyjrzeć się górotworowiz którego pochodzą bloki, następnie wybrać głaz o największej średnicy spośród najczęściej występujących.

3.7. Ocenianie projektowanych barier

a) Ocena wysokości ogrodzenia:



Rysunek 20. Widok schematyczny projektowanej bariery [10]

$$(h_d - h_f) \leq 0 \quad (8a)$$

$$(h_d - h_n + h_b \cdot \gamma_b) \leq 0 \quad (8b)$$

gdzie:

h_n – nominalna wysokość według ETAG 027;

h_f – wolna granica, czyli wysokość strefy wolnej od uderzeń na granicy panelu;

h_b – średni promień spadającego głązu;

h_d – projektowana wysokość bariery;

γ_b – współczynnik bezpieczeństwa dla promienia głązu, zwykle równy 1,5.

- b) Ocena położenia bariery na zboczu w pobliżu istniejącej lub projektowanej infrastruktury:

$$(d_d - d_A) = (d_d - d_{maxMEL} \cdot \gamma_D) \geq 0 \quad (9)$$

gdzie:

d_A – obliczeniowe maksymalne odkształcenie bariery MEL;

d_{maxMEL} – maksymalne odkształcenie bariery MEL;

d_d – minimalna odległość projektowa między barierą, a infrastrukturą;

γ_D – współczynnik bezpieczeństwa;

$\gamma_D = 1,3$ – jeśli występuje tylko odkształcenie testu zderzeniowego MEL;

$\gamma_D = 1,2$ – jeśli istnieją obliczenia w celu weryfikacji wpływu na słup i strefę wolną (boczną i górną).

- c) Ocena poziomu energetycznego bariery

$$(E_d - E_{BTE,bariery} / \gamma_E) \leq 0 \quad (10a)$$

$$E_d = 0,5 \cdot v_d^2 \cdot m_d \quad (10b)$$

gdzie:

E_d – energia potencjalna;

v_p – prędkość projektowa;

m_p – masa projektowa;

$E_{BTE,bariery}$ – poziom energii, zmierzony podczas testu zderzeniowego;

γ_E – współczynnik bezpieczeństwa;

$\gamma_E = 1,2$ – w przypadku projektowania MEL;

$\gamma_E = 1,0$ – w przypadku projektowania SEL.

3.8. Elementy barier siatkowych

Główne elementy budowy elastycznych barier [10, 16-20]:

3.8.1. Elementy przechwytyjące

Sieć główna: składa się z metalowych kabli, drutów i/lub prętów różnych typów i materiałów (np. siatki kablowe połączone zaciskami, sieciami podwodnymi i sieciami pierścieniowymi. W ostatnich dwóch przypadkach pierścienie tworzące siatkę są ze sobą połączone). Dodatkowe warstwy: zwykle z drobniejszą siateczką niż główna sieć składająca się z kabli i/lub drutów lub inne materiałów. Do ich zadań należy: wytrzymać bezpośredni wpływ masy, odkształcać się elastycznie i/lub plastycznie i przenoszą naprężenia na połączone komponenty, konstrukcję wsporczą i fundamenty.



Rysunek 21. Zdjęcia przykładowych rodzajów siatek przechwytyjących [18]

3.8.2. Elementy wsporcze

Słupy wykonane z różnych materiałów, geometrii i długości (np. rury, metalowe kształtowniki) z zawiasem u dołu. Do ich zadań należy: zachować wzniesioną strukturę przechwytywania. Może być bezpośrednio połączone ze strukturą przechwytyjącą lub za pośrednictwem elementów łączących.



Rysunek 22. Zdjęcia przykładowych typów słupów [18]

3.8.3. Elementy łączące

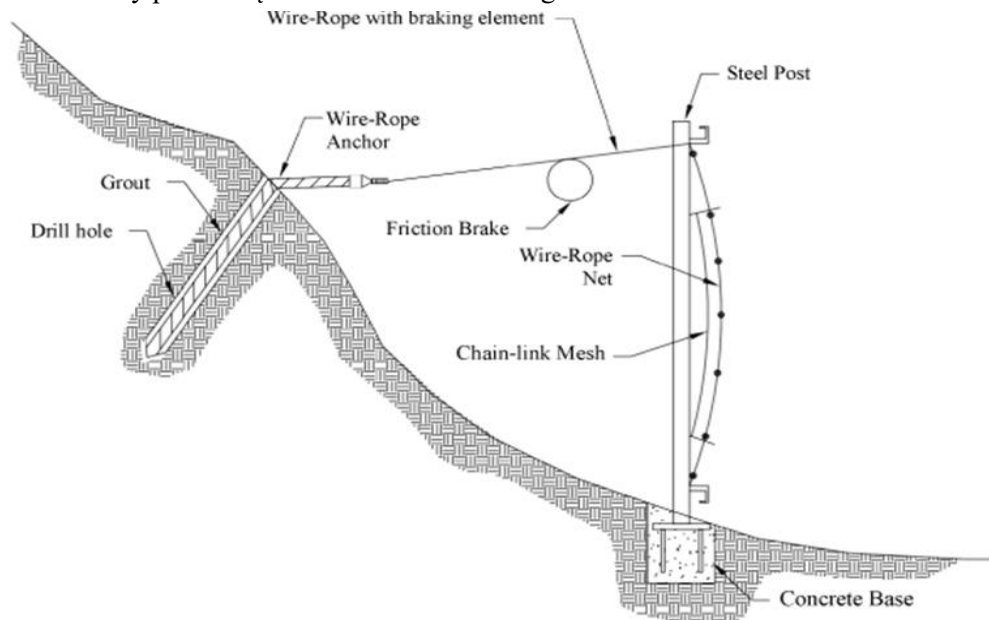
Łączące liny, stalowe kable, druty i/lub pręty różnych rodzajów i materiałów, złącza, zaciski, urządzenia rozpraszania energii (elementy zdolne do rozpraszania energii i/lub umożliwiają kontrolowane przemieszczenie pod naciskiem). Do ich zadań należy: przenieść naprężenia na konstrukcję fundamentu podczas uderzenia i/lub utrzymanie struktury przechwytywania na miejscu.



Rysunek 23. Zdjęcia przykładowych rodzajów pierścieni bezpieczeństwa [18]

3.8.4. Fundamenty

Kable lub pręty odpowiednio zakotwiczone w podłożu gruntowym. Do ich zadań należy przenieść siły pochodzące z uderzenia bloku na grunt.



Rysunek 24. Schemat budowy typowej bariery energochłonnej z zaznaczonymi elementami: drill hole – wywiercony otwór, grout – cement, wire-rope anchor – zakotwienie kabli, friction brake – hamulec cierny, wire-rope with braking element – kabel z elementem hamulcowym, steel post – słup stalowy, wire-rope net – siatka stalowa, chain-link mesh – siatka z ogniw łańcucha, concrete base – betonowy fundament [17]

4. Ochrona infrastruktury przed spadającymi odłamkami skalnymi przy Drodze Wojewódzkiej nr 948

4.1. Przedmiot opracowania

Przedmiotem opracowania jest przeprowadzenie badań oraz analizy występowania zagrożenia obrywami skalnymi infrastruktury i jej użytkowników znajdującej się w miejscowości Czernichów przy DW 948 na odcinku od km: 30+590,00 do 30+630,00, wraz z wykonaniem niezbędnych obliczeń oraz doboru odpowiedniej metody ochrony.

4.2. Opis stanu istniejącego

Przedmiotowy odcinek Drogi Wojewódzkiej nr 948 w km od 30+590,00 do 30+630,00 znajduje się w gminie Czernichów w odległości około 500m od centrum miejscowości. Powyżej DW nr 948 w km od 30+590,00 do 30+630,00 znajduje się północno-wschodnie zbocze góry Łysy Groń. U podstawy góry, a poniżej drogi, przepływa rzeka Soła, na której w odległości ok. 200 m od analizowanego odcinka znajduje się zaporę wodną wraz z elektrownią w Tresnej [21].

Góra Łysy Groń w znacznej części porośnięta jest drzewami i krzewami. Na zboczu góry widoczne są liczne wychodnie skał. Skały te w wyniku procesu wietrzenia, tj. rozkładu mechanicznego i chemicznego w skutek działania powietrza, wody, energii słonecznej i żywych organizmów ulegają odspojeniu od skały macierzystej i spadają ze zbocza

stanowiąc zagrożenie dla pojazdów i osób poruszających się po DW nr 948. Dodatkowo przez budowę zapory wodnej w Tresnej w latach 60 XX wieku naruszone zostało naturalne zbocze góry a zalanie doliny przez wodę z rzeki Soły i powstanie sztucznego jeziora Żywieckiego zaburzyły pierwotną strukturę hydrologiczną (znacznie wyższy poziom wód gruntowych). Na końcu zakresu analizowanego odcinka rozpoczynają się istniejące umocnienia ściany skalistej w sąsiedztwie zapory wodnej w Tresnej, zabezpieczonej gwoździami gruntowymi oraz siatką podatną. Liczne fragmenty odspojonych skał o wadze od kilku do kilkuset, a nawet kilku tysięcy kilogramów widoczne są na zboczu góry Łysy Groń oraz u jej podnóża. Wiele z odłamków skalnych uszkodziło lub połamało rosnące na zboczu góry drzewa. Widoczne są również liczne fragmenty odłamków skalnych, które zaklinowały się pomiędzy drzewami. Proces wietrzenia skał na zboczu trwa nadal. Można zaobserwować liczne fragmenty skalne, których ryzyko oderwania i stoczenia się ze zbocza jest duże lub bardzo duże. Zjawisko to może mieć poważne konsekwencje. Powyższy stan wymusza więc konieczność zastosowania zabiegów minimalizujących ryzyko zranienia ludzi lub uszkodzenia mienia przed zachodzącymi na przedmiotowym odcinku drogi procesami geodynamicznymi [21].



Rysunek 25. a b, c Odłamki skalne znajdujące się pod analizowaną skarpią, tak zwane „silent witness”
[fot. W. Błaszczyk]

4.3. Topografia i geologia

Analizowany fragment DW948 na odcinku od km: 30+590,00 do 30+630,00 znajduje się geograficznie i geologicznie na terenach Beskidu Małego. Jest to niewielkie pasmo górskie o długości ok. 35 km i szerokości 15 km znajdujące się w części Beskidów Zachodnich, położonych w obrębie Zewnętrznych Karpat Zachodnich. Beskid Mały graniczy od północy z Pogórzem Śląskim i Wielickim, od południ z Kotliną Żywiecką, od wschodu z Beskidem Makowskim, a od zachodu z Beskidem Śląskim.

Beskid Mały przedzielony został na dwie części przełomem na część wschodnią i zachodnią w jednym z okresów międzylodowcowych w plejstocenie (2,58-0,0117 mln lat temu) na skutek działania erozji wstecznej jednego z dopływów Wisły. Obecnie w przełomie tym znajduje się koryto rzeki Soły, na której w latach 1960-1966 wybudowano Zaporę Tresna, mającą chronić mieszkańców doliny przed powodzią. Powodzie w dolinie Soły wynikały z bardzo dużego wahaniami poziomu przepływu – od 1 m³/s latem w okresach suszy i do 1400 m³/s wczesną wiosną w okresach roztopów.

Beskid Mały zbudowany jest w większości z piaskowców płaszczowiny śląskiej w formacji skalnej zwanej fliszem karpackim. Budowa fliszu karpackiego skutkuje występowaniu osuwisk, zawałisk i złomisk powstałych w wyniku osunięć stoków. Utwory

skalne występujące w tym rejonie (piaskowo-lupkowe) wyróżniają się dużą zmiennością miąższości i wytrzymałości na ściskanie, co powoduje występowanie ich w stanie zaburzonych tektonicznie i silnie spękanych. Występowanie naturalnych procesów wietrzenia powoduje wraz z wysokim nachyleniem stoków do erozji podłoża, co powoduje przemieszczanie się gwałtownie zwietrzeliny [19-23].



Rysunek 26. a, b, c, d Zbocze przy DW948 na odcinku od km: 30+590,00 do 30+630,00 [fot. W. Błaszczuk]

4.4. Ocena ryzyka występowania obrywów skalnych i kamieni

4.4.1. Metodologia oceny ryzyka

Metoda oceny ryzyka wystąpienia obrywów i ich efektów wedle metody Tartarotti'ego polega na wyznaczeniu klas ryzyka według rozkładu punktów. Klasa ryzyka (RC) na podstawie, której wyznacza się rodzaj środka zapobiegawczego jest obliczana na podstawie sumy iloczynów punktów ryzyka w scenariuszu zniszczenia (RPz) i scenariusza incydentów (RPi) wedle wzoru:

$$\Sigma RP = \Sigma RPz \cdot \Sigma RPi \quad (11)$$

gdzie:

RP – punkty ryzyka;

RPz – punkty ryzyka scenariusza zniszczenia;

RPi – punkty ryzyka scenariusza incydentów.

Liczbę punktów ryzyka dobiera się na podstawie tabeli 2:

Tabela 4. Zakres punktów ryzyka

Σ punktów ryzyka (RP) = Σ RP (Scenariusz zniszczeń) x Σ RP (Scenariusz incydentów)		
Zakres punktów ryzyka		
Maksymalnie 1	Z uwzględnieniem bezpośredniego niebezpieczeństwa	$(81 + 81) \times (243 + 81) = 52488$
Maksymalnie 2	BEZ uwzględnienia bezpośredniego niebezpieczeństwa	$(81 + 81) \times (81 + 81) = 26244$
Minimalnie	Najniższy możliwy wskaźnik	$(3 + 3) \times (3 + 3) = 36$

Źródło: [22, 23].

Po wyznaczeniu punktów ryzyka można zaklasyfikować dane miejsce do odpowiedniej klasy ryzyka według tabeli 4.

Tabela 5. Podział klas ryzyka

Klasa ryzyka (RC)	RC I	RC II	RC III	RC IV	RC V
Punkty ryzyka	RP < 108	108 < RP < 648	648 < RP < 2916	2916 < RP < 17496	RP > 17496
Ryzyko	Tolerowalne	Przedział przejściowy, w którym subiektywna percepcja ryzyka jest ważniejsza od poziomu akceptacji ryzyka	Zwiększony interes publiczny co do wdrożenia działań ochronnych	Interes publiczny jest istotny	RC V osiągnięta tylko dla 4 pozycji po 81 pkt.
Publiczne działanie ochronne	Niekonieczne	Obiektywnie, samoochrona i działania techniczne zyskują znaczenie	W zakresie zarządzania ryzykiem, działania techniczne zyskują znaczenie	Wszystkie możliwości zarządzania ryzykiem mają być uwzględnione, a działania techniczne odgrywają zasadniczą rolę	Najwyższy priorytet zarządzania ryzykiem

Źródło: [22, 23].

4.4.2. Ocena ryzyka przedmiotowego odcinka

Po przeprowadzeniu obserwacji analizowanego odcinka DW948 na odcinku od km: 30+590,00 do 30+630,00 *in situ*, oraz wykonaniu wywiadu środowiskowego punkty ryzyka kształtują się następująco:

- dla scenariusza zniszczenia:
 - prawdopodobieństwo wystąpienia oceniono jako średnie – w bezpośredniej bliskości od zbrocza znajduje się często używana droga publiczna – 27 punktów;
 - opis zagrożenia oceniono jako średnie – zagrożenie występuje dla osób w pojazdach – 9 punktów;
- dla scenariusza incydentów:
 - prawdopodobieństwo obecności oceniono jako wyższe ukryte – można zaobserwować niedawne dowody tzw. „silent witness”, zdarzające się rzadziej niż raz na 10 lat – 9 punktów;
 - proces i klasa energetyczna oceniono jako średnie – widoczne są obrywy skalne i kamienne – 9 punktów.

Tabela 6. Zestawienie punktów ryzyka na odcinka DW948 na odcinku od km: 30+590,00 do 30+630,00

Oznaczenie kilometrażu	Scenariusz zniszczenia		Scenariusz incydentów		ΣRP = $\Sigma RPz \times \Sigma RPi$	Rc
	Prawdopodobieństwo wystąpienia	Opis zagrożenia	Prawdopodobieństwo obecności	Proces i klasa energetyczna		
30+590 30+630	27	9	9	9	648	RC III

Źródło: [21]

Klasa ryzyka dla analizowanego odcinka DW948 należy do przedziału RC III, której ryzyko zobowiązuje do podjęcia działań zmniejszających je. Zgodnie z tabelą klas ryzyka zwiększony interes publiczny obliguje co do wdrożenia działań ochronnych w zakresie zarządzania ryzykiem, gdzie działania techniczne zyskują znaczenie.



Rysunek 27. Pierwsze małe odłamki skalne przechwycone przez barierę na DW948 na odcinku od km: 30+590,00 do 30+630,00 [fot. W. Błaszczyk]

4.5. Ochrona przed spadającymi odłamkami skalnymi przedmiotowego odcinka DW948

Strome zbocze znajdujące się nad odcinkiem Drogi Wojewódzkiej nr od km: 30+590,00 do 30+630,00 po przeprowadzeniu analizy oceny ryzyka jest realnym zagrożeniem dla infrastruktury i osób z niej korzystających, dlatego w interesie publicznym należy je odpowiednio zabezpieczyć. Aktualnie spośród różnych metod ochrony przed spadającymi odłamkami skalnymi najefektywniejszym sposobem w tym przypadku jest zastosowanie elastycznych barier energochłonnych.

4.6. Bariera elastyczna GBE500A zabezpieczająca osuwisko w miejscowości Czernichów

4.6.1. Charakterystyka elementów bariery GBE500A

Elastyczna bariera Geobrugg GBE500A w systemie zaprojektowana jest na powstrzymanie przeciwołamkowe na poziomie 500 kJ, co pozwala na zatrzymanie głazu o masie 1 tony zrzuconego z wysokości 50,00 m, lub podobnie głazu o masie 1 tony pędzącego z prędkością 110 km/h.

System składa się ze słupków wysokości 3 m, montowanych przegubowo w systemowej płycie posadowienia na betonowym fundamencie (beton mostowy, klasa C30/37), w rozstawie co 10 m. Fundament betonowy posadowiony jest na parze mikropali $\varnothing 76$ mm dług. 9,0 m, jeden – pionowy: zbrojony prętem $\varnothing 25$ SAS670/800 lub $\varnothing 32$ (M30) B500 lub żerdzią samowiercą DSI R32-400/R38-400, drugi – o przebiegu równoległym do nachylenia słupa bariery, zbrojony żerdzią samowiercą DSI R32-400/R38-400. Mikropale wyprowadzone są ponad poziom fundamentu betonowego i zamocowane w systemowej płycie posadowienia. Powyżej głównej linii bariery znajdują się wiercone kotwy linowe, ulokowane według instrukcji producenta w stosownej odległości w górę zbocza, w połowie rozstawu sąsiadujących słupów oraz na dwusiecznej kąta skreśtu osi podłużnej bariery większego niż 30° . Bariera składa się głównie z siatki zabezpieczającej oraz lin głównych: dolnej i górnej. Na zakończeniach bariery znajdują się kotwy linowe (po dwie): jedna – zlokalizowana na przedłużeniu osi fundamentów ostatniego segmentu, kotwiąca górną linię główną, druga – odchylna o 1m do przodu względem pierwszej, kotwiąca główną linię dolną oraz kotwiącą boczną.



Rysunek 28. Łączenie słupka z linami odciągowymi [fot. W. Błaszczyk]



Rysunek 29. a, b. Łączenie kotew linowych i lin odciągowych [fot. W. Błaszczyk]



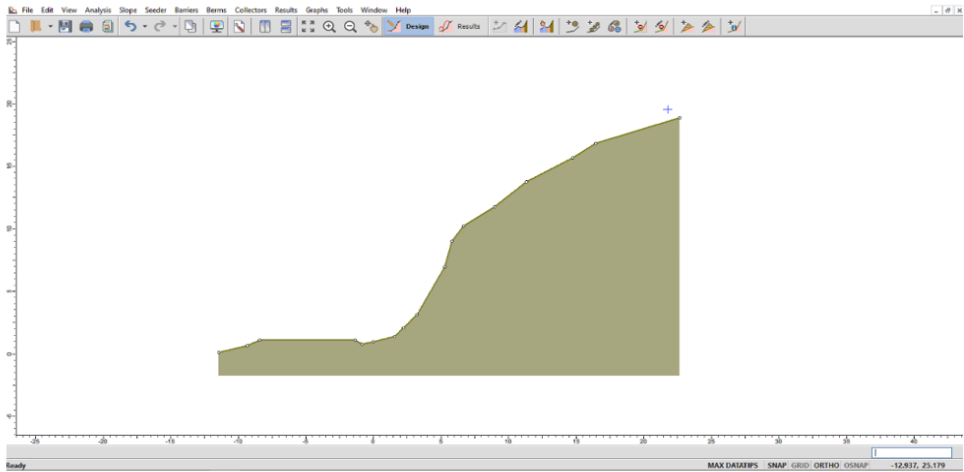
Rysunek 30. a, b Przegubowe połączenie słupków z fundamentem [fot. W. Błaszczyk]

4.6.2. Analiza spadających odłamków

Z uwagi na stosunkowo krótki odcinek analizowanej drogi – (40 m) pod względem możliwości wystąpienia zjawisko obrywów skalnych i spadających odłamków założono wykorzystanie jednego typu bariery energochłonnej. Pomimo nierówno występujących zagrożeń i ukształtowania terenu użycie jednej bariery jest najekonomiczniejszym rozwiązaniem z uwagi na niewielką powierzchnię terenu mogącego zostać zagospodarowanym pod względem montażu bariery, zmniejszenia skomplikowania budowy bariery oraz prostszym sposobem jej montażu i późniejszej konserwacji.

W celu wyznaczenia odpowiedniej wysokości i poziomu energochłonności bariery elastycznej wybrano najniekorzystniejszy przekrój znajdujący się na analizowanym odcinku – w okolicy km 30+610. Fragment ten wybrano po wcześniejszej analizie terenowej i geodezyjnej, z uwagi na jego budowę, bliskość do infrastruktury drogowej, wysokość i stopień nachylenia skarpy oraz ilość oraz wielkość widocznych odłamków skalnych będący w jej rejonie, tak zwanych „silent witness”, czyli odłamków które już spadły w niewielkiej odległości od docelowego przekroju.

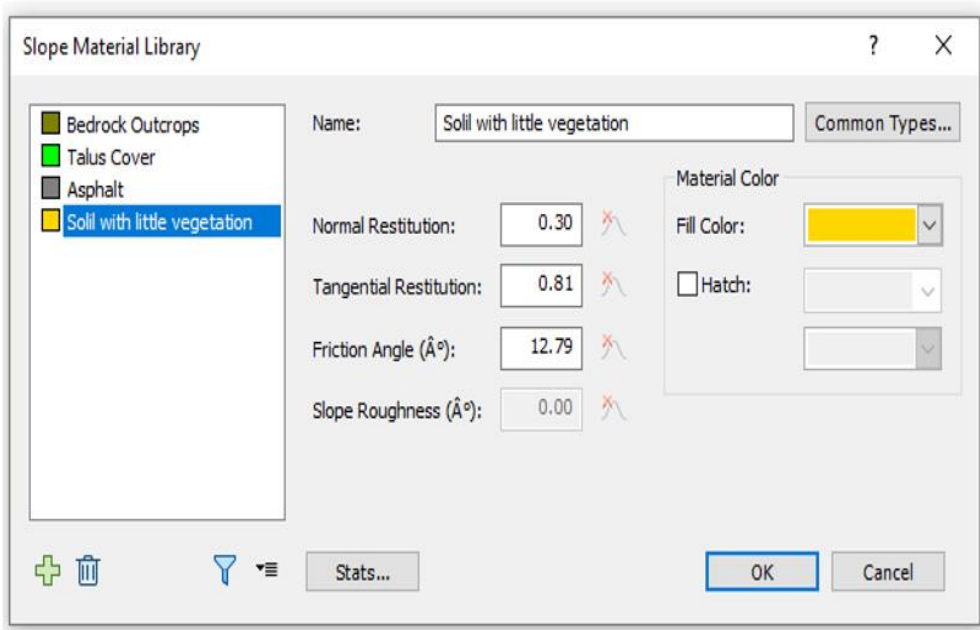
Do przeprowadzenia analizy możliwego wystąpienia spadających odłamków skalnych [21] przy DW948 na odcinku od km: 30+590,00 do 30+630,00 wykorzystano program RocFall2 – Statistical Analysis of Rockfalls. Za pomocą programu zamodelowano wybraną skarpe pod względem geologicznym i topograficznym – po ustaleniu geometrii przekroju, nadano odpowiednim fragmentom właściwości geotechniczne potrzebne do analizy. Na podstawie analizy wstecznej, po obserwacji znajdujących się poniżej skarpy odłamków skalnych dokonano nadania odpowiednich właściwości modelowanemu w programie obrywowi, takich jak kształt, masa czy prędkość początkowa. Program obliczeniowy po zadaniu odpowiednich danych wejściowych przeprowadza symulacje potencjalnego ruchu dla 50 przykładowych odłamków, dzięki czemu można określić energię kinetyczną poruszającego się odłamku oraz drogę jaką pokona.



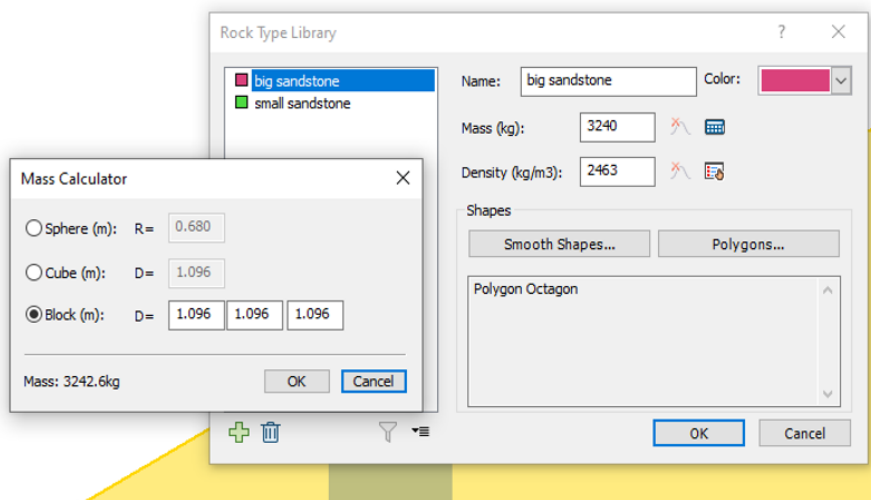
Rysunek 31. Model geometrii przekroju poprzecznego / RocFall2 [21]



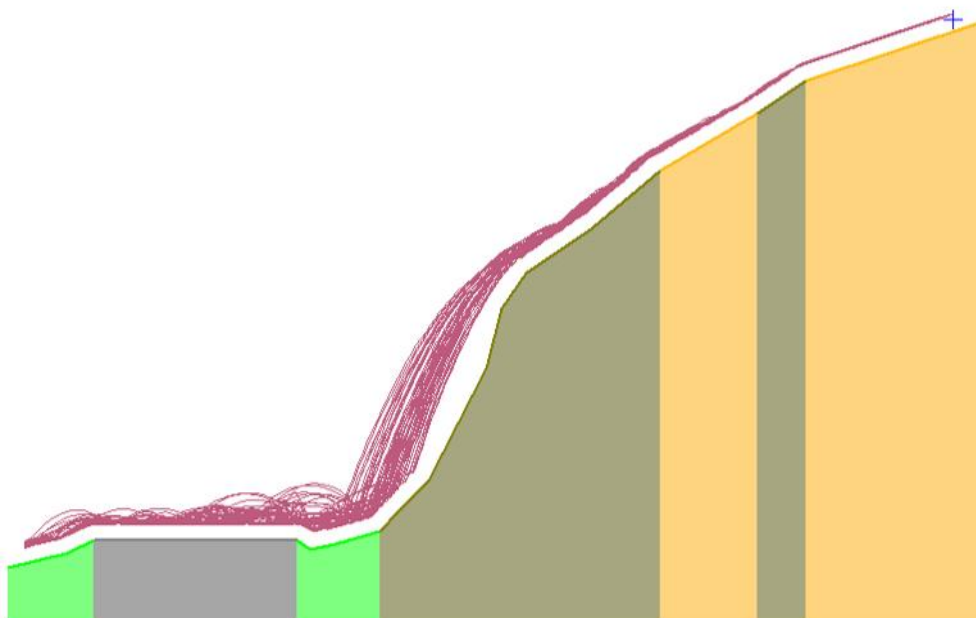
Rysunek 32. Podział zbocza ze względu na budowę / RocFall2 [21]



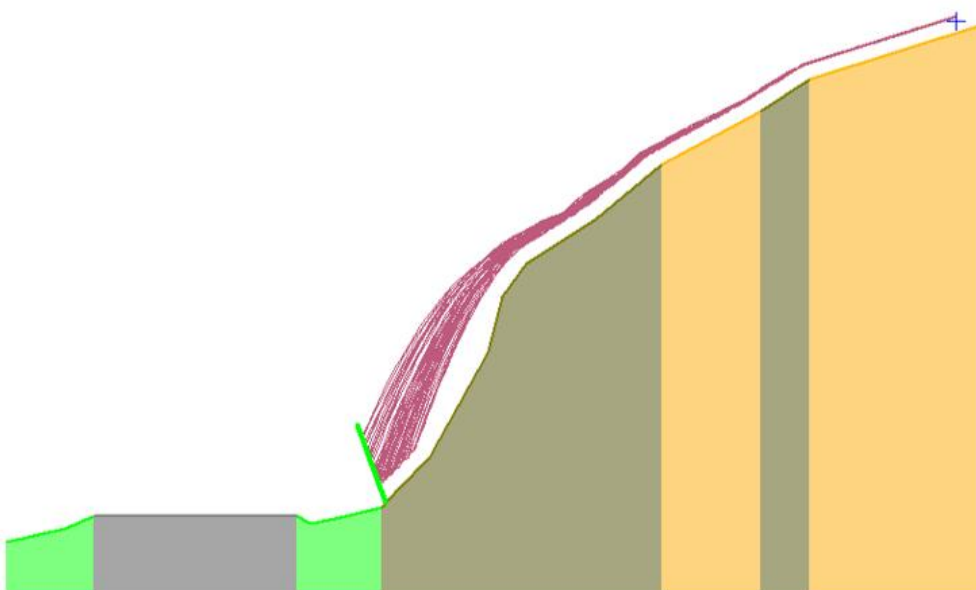
Rysunek 33. Nadanie odpowiednich danych geotechnicznych według materiału: Bedrock outcrops – wychodnie skalne, Talus cover – usypisko, Asphalt – asfalt, Soil with little vegetation – grunt pokryty niewielką roślinnością / RocFall2 [21]



Rysunek 34. Nadanie charakterystyk spadającym skałom poprzez masę (kg), gęstość (kg/m³), kształt – wielokąt osmiokątny / RocFall2 [21]



Rysunek 35. Trajektoria ruchu spadających skał bryły rzeczywistej / RocFall2 [21]



Rysunek 36. Przechwycenie spadających skał bryły modelowej przez barierę / RocFall2 [21]

4.6.3. Analiza wyników i podsumowanie

Tabela 6. Wyciąg z otrzymanych wyników zamodelowanego testu zderzeniowego / RocFall2

Wpływ zamodelowanej bariery na wyniki końcowe przeprowadzonej analizy				
Nazwa Bariery		Bariera 1		
Wysokość	[m]	3.00		
Uderzenia skalne		50 / 50		
Zatrzymane		50 / 50 = 100.0%		
Przechodzące		0 / 50 = 0.0%		
Wpływ statystyczny oparty na rzeczywistych wartościach dla wszystkich odłamków skalnych, które miały oddziaływanie uderzeniowe na barierę wzdłuż całej zadanej wysokości				
		średnia	minimum	maksimum
Wpływ z uwagi na wysokość	[m]	1.21	0.66	2.82
Translacja prędkości	[m/s]	11.07	7.74	14.52
Translacja energii	[kJ]	167.47	77.85	274.18

Źródło: [21].

Znajdujący się w miejscowości odcinek Drogi Wojewódzkiej numer 948 od kilometra 30+590,00 do 30+630,00 narażony jest na ryzyko spadających odłamków skalnych mogących zaszkodzić ogólnemu interesowi publicznemu, szczególnie narażając życie i zdrowie ludzi, mienie oraz infrastrukturę będącą w bezpośredniej bliskości z górskim zboczem. Zwiększony interes publiczny co do wdrożenia technicznych metod ochrony przed tym zagrożeniem zobowiązuje do zastosowania odpowiednich systemów i metod ochronnych.

Na podstawie aktualnej wiedzy technicznej oraz po przeanalizowaniu warunków jakie znajdują się na opisywanym fragmencie drogi słusznym założeniem jest zastosowanie elastycznych barier energochłonnych [21]. Ich użycie w omawianym miejscu szczególnie warunkują warunki topologiczne, geologiczna budowa otoczenia oraz warunki ekonomiczne. Przedmiotowy odcinek drogi z uwagi na niewielką szerokość możliwej do zagospodarowania przestrzeni – ograniczony z jednej strony doliną rzeki Soły, a z drugiej stromym zboczem górskim. Brak miejsca, bliskość do dużej budowli hydrotechnicznej jaką jest leżąca zaledwie 200 m dalej zapory wodnej Tresna, czy też trudne warunki geologiczne występujące we fliszu karpackim, a także walory krajobrazowe naturalnego środowiska (pobliski szlak turystyczny) jakie występują w okolicy nie pozwalają na użycie metod wywierających duże zmiany na otoczeniu. Aby zapewnić w odpowiednim stopniu bezpieczeństwo na tak wąskim fragmencie, najekonomiczniejszą metodą jest użycie barier elastycznych. Wszystkie te warunki spełnia użycie barier przeciwoślankowych.

Na podstawie przeprowadzonej symulacji najbardziej niekorzystnego zdarzenia, określono energię kinetyczną potencjalnego uderzenia odłamka skalnego oraz trajektorię ruchu. W chwili uderzenia o zaprojektowaną barierę w najwyższym punkcie odłamek znalazł się na wysokości 2,82 m nad poziomem terenu. Największa prędkość z jaką uderzył o przeszkodę wynosiła 14,52 m/s, a energia kinetyczna jaką posiadał w momencie spotkania z barierą wynosiła 274,18 kJ.

Bariera Geobrug GBE-500A mająca zabezpieczać infrastrukturę oraz osoby z niej korzystające przy DW948 na odcinku od km: 30+590,00 do 30+630,00 posiada wymagane właściwości pozwalające ograniczyć ryzyko związane z obrywami skalnymi mogącymi wystąpić w analizowanym miejscu. System bariery GBE-500A w najniższym punkcie ma wysokość 3 m nad poziom terenu, co pozwala na zatrzymanie modelowo najwyższego występującego odłamku. Odporność na uderzenia powyższej bariery energochłonnej według testu MEL wynosi 504kJ, co w bezpieczny sposób pozwala na rozproszenie energii i wyhamowanie głazu o obliczonej energii kinetycznej.

Analizując aktualny stan wiedzy na przedmiotowy temat na podstawie artykułów naukowych oraz wytycznych branżowych [1-24], a także mając na uwadze zakres i skalę niekorzystnego losowego oddziaływania spadających odłamków skalnych na różne konstrukcje inżynierskie przedstawione rozwiązanie projektowe jest optymalne dla zadanych danych początkowych zadania. Komfort, standard i bezpieczeństwo konstrukcji, a także odpowiednie współdziałanie inżyniersko-środowiskowe jest obecnie bardzo istotnym zadaniem dla inwestycji budowlanych. Rozwiązanie zaproponowane w pracy jest wynikiem analiz i porównań różnych możliwości oraz technik projektowych i wykonawczych. Badane atrybuty obliczeniowe, projektowe, materiałowe, wykonawcze oraz zmienne czasowe i finansowe w spójnej analizie przyczynowo-skutkowej dały optymalne rozwiązanie dla przedstawionej elastycznej bariery ochronnej.

Niniejszym postawiona na wstępie pracy hipoteza badawcza została potwierdzona tzn. przedmiotowa praca dowodzi, iż na chwilę obecną optymalnym rozwiązaniem inżynierskim dla ochrony konstrukcji linowych przed niekorzystnymi losowymi oddziaływaniami spadających odłamków skalnych jest elastyczna bariera ochronna.

Literatura

1. Lanczewska-Samotyja E., Łowkis A., Zdrojewska N., *Zarys geologii z elementami geologii inżynierskiej i hydrogeologii*, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2007.
2. Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych.
3. Pisarczyk S., *Mechanika gruntów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2010.
4. Eurokod PN-EN 1997-1 -2.
5. Wiłun Z., *Zarys geotechniki*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2000
6. Bzówka J., Juzwa A., Knapik K., Stelmach K., *Geotechnika komunikacyjna*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2013.
7. Kuźniak K. *Zabezpieczenia skarp przed obrywami*, Geoinżynieria: drogi, mosty, tunele, nr 9, 2006, s. 24-25.
8. Highland L., Bobrowsky P., *The landslide handbook – a guide to understanding landslides*, USA, Wirginia, Reston, U.S. Geological Survey, 2008.
9. *Słownik tematyczny. Fizyka*, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2011.
10. ETAG 027 – Guideline for European technical approval of falling rock protection kits, EOTA, Edition September 2012, Amended April 2013.
11. http://www.giigs.agh.edu.pl/html/komunikaty/Geodynamika_prezentacja.pdf - geodynamika, dr inż. Aleksandra Borecka, AGH [data dostępu: 11.12.2022].

12. Govoni L., de Miranda S., Gentilini C., *Modelling of falling rock protection barriers*, International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, Volume 11 Issue 2, Italy, Bologna 2011.
13. Jaccard C.J., Abbruzzese J.M., Howald E.P., *An evaluation of the performance of rock fall protection measures and their role in hazard zoning*, Natural Hazards, 104, 2020, s. 459-491.
14. Gwóźdź-Lasoń M., *Technologia BIM w projektowaniu geotechnicznym; Rozdział nr 8*, [w:] Urbański A. (red.), *Podstawy projektowania geotechnicznego: wprowadzenie do nowych technologii w geotechnice*, Rozdz. nr 8, ISBN 978-83-7242-924-7, Wydawca Politechnika Krakowska, 2016, s. 216-230.
15. Gwóźdź-Lasoń M., *Inwestycje budowlane na terenach osuwiskowych – analiza przyczynowo-skutkowa powstawania uszkodzeń w budynkach podczas wykonywania prac związanych z modernizacją sąsiedniej inwestycji*, Przegląd Budowlany, 9, 2016, s. 25-32, ISSN 0033-2038
16. https://www.marshall.edu/cegas/geohazards/2012pdf/presentations/S8/1_Rockfall%20Barrier%20Design.pdf *Design Guide for Rockfall Fences*, Ghislain Brunet, Gruppo Industriale Maccaferri [data dostępu: 15.12.2022].
17. https://www.fhwa.dot.gov/clas/ctip/context_sensitive_rock_slope_design/ch_6_2.aspx U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Center for local aid support, *Context sensitive rock slope design solutions* [data dostępu: 20.12.2022].
18. https://www.geobrugg.com/index_pl.html [data dostępu: 03.01.2023].
19. https://pl.wikipedia.org/wiki/Beskid_Ma%C5%82y [data dostępu: 03.01.2023].
20. <https://geology.com/articles/yosemite-rockfall.shtml> [data dostępu: 05.01.2023].
21. Błaszczyk W., *Analiza systemu ochrony konstrukcji inżynierskich przed spadającymi odłamkami skalnymi na przykład elastycznej bariery GEOBRUGG GBE500A i GBE100A-R*, Praca dyplomowa magisterska, Promotor: dr inż. Gwóźdź- Lasoń M., Promotor pomocniczy: mgr inż. Chammas F.P., Katedra Budownictwa, WIMBiŚ, ATH w Bielsku-Białej, 2023.
22. <https://www.rcrc.pl/pliki/ryzyko%20metody.pdf> [data dostępu: 11.01.2023].
23. Bielski S., Białoń K., *Projekt koncepcyjny wykonania badań oraz przeprowadzenia stępowania obrywu odłamkówprzeprowadzenia analizy występowania obrywu odłamków skalnych na odcinku od km: 25+500 do 26+900 drogi krajowej nr 87 w miejscowości Piwniczna Zdrój wraz z uwzględnieniem lokalizacji osłon wychwytyjących odłamki skalne*, Sosnowiec 2014.
24. Gwóźdź- Lasoń M., *Technologia BIM w projektowaniu geotechnicznym, rozdział w Podstawy projektowania geotechnicznego: wprowadzenie do nowych technologii w geotechnice*, praca zbiorowa; zesp. aut. Rafał Gwóźdź, Monika Gwóźdź-Lasoń, Karolina Łach, Aleksander Urbański; Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki. – Kraków Wydaw. PK, 2016. str 216-230, ISBN 978-83-7242-924-7

Analiza systemu ochrony konstrukcji inżynierskich przed spadającymi odłamkami skalnymi na przykładzie elastycznej bariery Geobrugg GBE500A

Streszczenie:

Problematyka spadających odłamków skalnych jest realnym zagrożeniem z jakim trzeba się zmierzyć w terenach górskich, aby zapewnić bezpieczeństwo dla infrastruktury i obiektów znajdujących się w bliskim sąsiedztwie ze skarpami, oraz przede wszystkim ludziom korzystających z nich. Dzięki zastosowaniu różnych metod inżynierskich w znaczący sposób można zmniejszyć niebezpieczeństwo lub całkowicie je wyeliminować – do tych metod zalicza się użycie elastycznych barier energochłonnych. Elastyczne bariery energochłonne dzięki swojej budowie w sposób kontrolowany wytracają energię kinetyczną poruszających się głazów i przechwytyją je zanim dotrą one do chronionej przestrzeni. Taki system zaprojektowano przy DW948 w miejscowości Czernichów. Praca badawcza związana z projektowaną barierą skupia się na dwóch głównych aspektach – analizie ryzyka i doborze odpowiedniej klasy bariery na podstawie symulacji potencjalnej trajektorii odłamków. Do przeprowadzenia analizy posłużono się metodą Tartarottiego, dzięki której potwierdzono słusz-

ność wdrożenia ochronnych metod inżynierskich zabezpieczenia infrastruktury. Przy doborze odpowiedniej klasy energetycznej bariery (jej zdolności do bezpiecznego przechwycenia energii kinetycznej odłamka) oraz lokalizacji i wysokości posłużono się oprogramowaniem RocFall2, w którym dla najbardziej niekorzystnego przekroju zbocza zamodelowano 50 potencjalnych trajektorii odłamków, co pozwoliło na otrzymanie niezbędnych wyników – poznaniu trasy gładów, ich prędkości i energii kinetycznej w trakcie zderzenia z przeszkodą. Słowa kluczowe: spadające odłamki, obryw, bariera przeciwoślamiowa, bariera energochłonna, zabezpieczenie skarp

Analysis of the protection system of engineering structures against falling rock fragments on the example of the flexible barrier Geobrugg GBE500A

Abstract

The problem of falling rock fragments is a real threat that must be faced in mountain areas to ensure safety for infrastructure and facilities located in close proximity to the slopes, and above all for people using them. Thanks to the use of various engineering methods, the danger can be significantly reduced or completely eliminated – these methods include the use of flexible energy-intensive barriers. Thanks to their construction, flexible energy-absorbing barriers lose the kinetic energy of moving boulders in a controlled manner and intercept them before they reach the protected space. Such a system was designed at DW948 in Czernichów. The research work related to the designed barrier focuses on two main aspects – risk analysis and selection of the appropriate barrier class based on the simulation of the potential fragment trajectory. The Tartarotti method was used to carry out the analysis, thanks to which the validity of the implementation of protective engineering methods of infrastructure security was confirmed. When selecting the appropriate energy class of the barrier (its ability to safely capture the kinetic energy of the fragment), as well as the location and height, the RocFall2 software was used, in which 50 potential trajectories of fragments were modeled for the most unfavorable cross-section of the slope, which allowed to obtain the necessary results – learning the route of the boulders, their speed and kinetic energy when colliding with an obstacle.

Keywords: falling debris, fallout, rockfall barrier, energy-intensive barrier, slope protection

Nowe algorytmy jazdy tramwaju z minimalnym zużyciem energii

1. Wprowadzenie

Dążenie do oszczędności energii należy obecnie do bardzo ważnych zadań w wielu dziedzinach. Pojazdy tramwajowe są powszechnie stosowane w ramach masowego transportu w wielu miastach. Okazuje się, że dla trasy o zadanej długości oraz dla określonego czasu przejazdu mogą być różne sposoby pokonania odległości międzyprzystankowej. Dzięki rozwiązaniu zadania optymalizacyjnego i określeniu najkorzystniejszego przebiegu rozruchu, jazdy ze stałą prędkością, wybiegu oraz hamowania staje się możliwa minimalizacja zużycia energii przez pojazd tramwajowy. W Polsce w literaturze [1, 2] po raz pierwszy opracowano podstawy optymalizacji ruchu pojazdu trakcyjnego w celu uzyskania energooszczędności. W Instytucie Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Poznańskiej w trzech pracach doktorskich [3-5] zajmowano się minimalizacją zużycia energii przez tramwaje. W ramach literatury zagranicznej dotyczącej oszczędności energii w ruchu pojazdów trakcyjnych można wyróżnić prace naukowe [6-17].

W rzeczywistości jazda tramwaju przy minimum zużycia energii jest realna tylko w przypadku półautomatycznego prowadzenia tramwaju. Z jednej strony możliwe jest automatyczne kierowanie pojazdem i komputerowe obliczanie w trybie online sposobu jazdy energooszczędnej. Z drugiej strony motorniczy musi ciągle obserwować trasę i w każdej chwili – gdy wymagać tego będzie bezpieczeństwo jazdy – może on przejąć prowadzenie tramwaju i sam określać nadrzędne parametry jazdy bezpiecznej.

Obliczenia optymalizacyjne w praktyce komplikuje możliwość występowania różnorodnych zakłóceń płynności ruchu tramwaju. Może pojawiać się konieczność ograniczenia prędkości, a nawet mogą występować na trasie wymuszone zatrzymania pojazdu na krótkie lub długie okresy. Wpływ miejskiej sygnalizacji świetlnej musi być również brany pod uwagę. Okazuje się, że po ustąpieniu zakłóceń ruchu należy sformułować nowy algorytm dalszej jazdy tramwaju, aby w nowych warunkach minimalizować zużycie energii. Z punktu widzenia wymagań społecznych istotna jest punktualna jazda zgodnie z rozkładem jazdy. W przypadku wpływu różnych zakłóceń ruchu należy opracować odpowiednie sposoby likwidacji powstałych opóźnień.

W niniejszym artykule analizuje się przejazdy tramwaju wyposażonego w napędowe trójfazowe silniki indukcyjne, które mają tzw. sterowanie połowo zorientowane. Dodatkowo warto zaznaczyć, że współczesne napędy asynchroniczne mają mniejsze wymiary oraz większą niezawodność. Ponadto dla etapu jazdy ze stałą prędkością można optymalizować wartość częstotliwości zasilania oraz dobór wartości napięcia zasilającego, aby uzyskać maksimum sprawności układu napędowego.

¹ stanislaw.rawicki@put.poznan.pl, Zakład Energetyki i Bezpieczeństwa Technicznego, Wydział Techniczny, Akademia im. Jakuba z Paradyża w Gorzowie Wielkopolskim, www.ajp.edu.pl.

² jertzypodh@o2.pl, Zakład Energetyki i Bezpieczeństwa Technicznego, Wydział Techniczny, Akademia im. Jakuba z Paradyża w Gorzowie Wielkopolskim, www.ajp.edu.pl.

Obliczanie energooszczędnych jazd pojazdów tramwajowych udoskonala się, jeżeli komputer pokładowy będzie odpowiednio współpracował z miejskim centralnym ośrodkiem sterującym, który może kontrolować ruch wielu tramwajów. Obliczenia szczegółowe wyraźnie pokazują, że wykorzystanie urządzeń do odzysku energii podczas fazy hamowania tramwaju umożliwi znaczne zaoszczędzenie energii.

Opracowanie nowych algorytmów energooszczędnej jazdy tramwaju przy występowaniu zakłóceń ruchu stanowi nowatorskie osiągnięcie niniejszego artykułu. Autorzy planują w przyszłości współpracę z przedsiębiorstwami komunikacyjnymi w celu praktycznego wdrożenia opisanych tutaj metod obliczeniowych.

2. Model matematyczny ruchu tramwaju

Model matematyczny ruchu pojazdu tramwajowego obejmuje odpowiedni układ równań obwodów elektrycznych silników trakcyjnych, parametry mechaniczne tramwaju oraz odpowiednie właściwości trasy, po której odbywa się ruch. Jazda bezkolizyjna tramwaju składa się z fazy rozruchu, po której jest etap jazdy ze stałą prędkością, a następnie występuje faza wybiegu oraz hamowanie pojazdu.

W niniejszym artykule zamieszczono opis matematycznego modelowania tramwaju, którego silnikami trakcyjnymi są trójfazowe silniki indukcyjne klatkowe zasilane z nowoczesnych układów falownikowych, umożliwiających płynną regulację prędkości w bardzo szerokim zakresie, a ponadto zwrot energii do sieci trakcyjnej podczas hamowania pojazdu.

Do sterowania silnikami indukcyjnymi zastosowano metodę orientacji wektora pola magnetycznego wirnika [18-20]. Przy takim nowoczesnym sterowaniu wektorowym dokonuje się transformacji, w której z wektora prądu stojana wyodrębnia się składową magnesującą i_{xs} oraz składową i_{ys} biorącą bezpośredni udział w tworzeniu napędowego momentu elektromagnetycznego. Należy zaznaczyć, że dzięki takiej oryginalnej strategii systemowej sterowanie strumieniem wirnika i momentem jest odsprężone. Układ współrzędnych x, y jest związany z zastępczą dwufazową maszyną indukcyjną, przy czym założono współbieżność wirowania osi x z magnetycznym strumieniem skojarzonym wirnika Ψ_w . Układ równań modelu trakcyjnego silnika indukcyjnego w zastępczym układzie dwufazowym x, y jest następujący:

$$\begin{aligned}
 D \Psi_{xs} &= u_x + \omega_k \Psi_{ys} - R_s i_{xs} \\
 D \Psi_{ys} &= u_y - \omega_k \Psi_{xs} - R_s i_{ys} \\
 D \Psi_{xw} &= (\omega_k - \omega) \Psi_{yw} - R_w i_{xw} \\
 D \Psi_{yw} &= -(\omega_k - \omega) \Psi_{xw} - R_w i_{yw} \\
 D \omega &= \frac{p}{J} (T - Th) \\
 i_{xs} &= \Lambda (L_w \Psi_{xs} - M \Psi_{xw}) \\
 i_{ys} &= \Lambda (L_w \Psi_{ys} - M \Psi_{yw}) \\
 i_{xw} &= \Lambda (L_s \Psi_{xw} - M \Psi_{xs}) \\
 i_{yw} &= \Lambda (L_s \Psi_{yw} - M \Psi_{ys}) \\
 \Lambda &= (L_s L_w - M^2)^{-1} \\
 T &= \frac{3}{2} p \frac{M}{L_w} (\Psi_{xw} i_{ys} - \Psi_{yw} i_{xs})
 \end{aligned} \tag{1}$$

gdzie: D oznacza symbol różniczkowania d/dt ; u_x, u_y – napięcia zasilające w układzie zastępczym x, y ; ωk – prędkość kątowna układu współrzędnych względem stojana; Ψ_{xs}, Ψ_{ys} oraz Ψ_{sw}, Ψ_{yw} – strumienie skojarzone uzwojenia stojana i wirnika w układzie x, y ; i_{xs}, i_{ys} oraz i_{xw}, i_{yw} – prądy uzwojenia stojana i wirnika w układzie x, y ; ω – elektryczna prędkość kątowna wirnika; p – liczba par biegunów magnetycznych; J – moment bezwładności układu wirującego; T – moment elektromagnetyczny silnika; Th – moment obciążenia; R_s, R_w – rezystancja uzwojeń fazowych stojana i wirnika; L_s, L_w, M – indukcyjność stojana, indukcyjność wirnika i indukcyjność wzajemna zastępczej dwufazowej maszyny indukcyjnej.

Dynamiczny ruch tramwaju opisuje następujące równanie:

$$km m \frac{dv}{dt} = Fp - W(v) \quad (2)$$

gdzie m – masa pojazdu, km – współczynnik mas wirujących, v – prędkość pojazdu, Fp – siła pociągowa, $W(v)$ – opory trakcyjne.

Związek między siłą pociagową Fp a użytecznym momentem silnika Tu przedstawia następująca zależność:

$$Fp = \frac{ns Tu z \eta p}{r} \quad (3)$$

gdzie: ns – liczba silników napędowych, z – przełożenie przekładni mechanicznej, ηp – sprawność przekładni, r – promień koła napędowego.

Pomiędzy prędkością tramwaju v oraz elektryczną prędkością silników ω jest związek:

$$v = \frac{\omega r}{p z} \quad (4)$$

Zależność między momentem elektromagnetycznym T a momentem użytecznym Tu na wale silnika indukcyjnego przedstawia następujący wzór:

$$Tu = T - Tm \quad (5)$$

gdzie Tm oznacza wewnętrzny moment oporowy pochodzący od mechanicznych strat mocy.

Energię elektryczną E pobieraną przez silniki trakcyjne oblicza się jako całkę sumy odpowiednich iloczynów wartości napięć i prądów:

$$E = \frac{3}{2} ns \int_{t_1}^{t_2} (u_x i_{xs} + u_y i_{ys}) dt \quad (6)$$

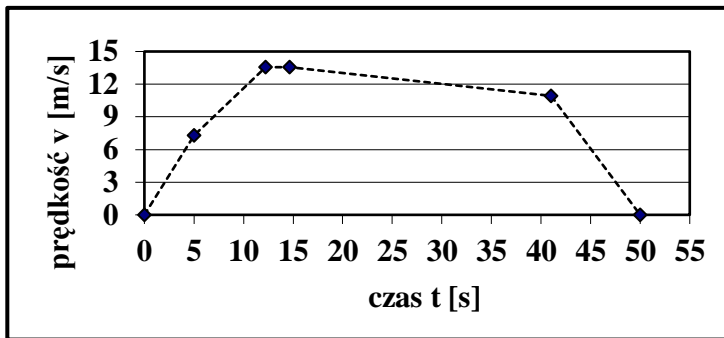
3. Przykłady energooszczędnych przejazdów

Przy planowaniu sieci tramwajowej istotnym parametrem jest odległość między przystankami. Jeżeli dystans pomiędzy przystankami jest większy, to z jednej strony tzw. prędkość komunikacyjna jest większa, ale z drugiej dłuższe są dwie istotne drogi: dojeżdżenie do przystanków oraz dojeżdżenie od przystanków do celu podróży.

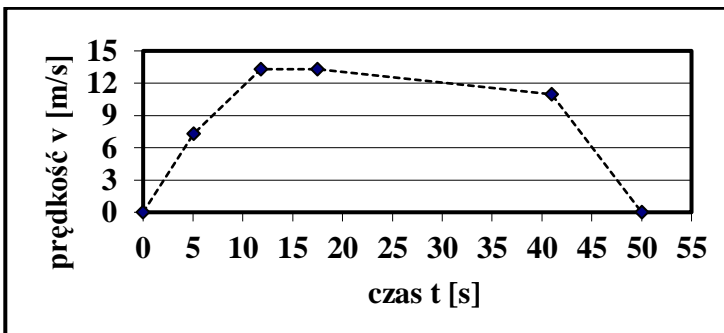
Obliczenia wykonano dla tramwaju z trójfazowymi silnikami indukcyjnymi z układami falownikowymi. Napęd stanowiły 4 równe silniki o łącznej mocy 160 kW. Dane pojazdu to: napięcie sieci trakcyjnej DC: 600 V, długość tramwaju: 13,5 m, masa własna: 16500 kg, obciążenie znamionowe: 8750 kg. Dane silnika: moc 40 kW, napięcie 380 V, częstotliwość 60 Hz, prąd 71,7 A, $\cos \varphi = 0,93$, sprawność 91%, prędkość 1724 obr./min. Tu podano rezultaty obliczeń dla tramwaju o masie 22000 kg (zapewnienie pojazdu liczbą 80 pasażerów, co stanowi 64% obciążenia nominalnego).

Przedstawiono wyniki obliczeń zużycia energii przez tramwaj na trasach krótkich (500 m), średnich (900 m) oraz długich (tutaj 1200 m). Na rysunkach 1 i 2 dla przejazdu odcinka o długości 500 m przyjęto czas jazdy tramwaju 50 s. Rysunek 1 dotyczy jazdy z minimalnym zużyciem energii, gdy nie ma odzyskiwania energii podczas hamowania (tzn. współczynnik rekuperacji $kr = 0$), natomiast rysunek 2 odnosi się do takiego przejazdu przy minimum energii, gdy w czasie hamowania występuje odzysk energii i współczynnik rekuperacji $kr = 1$. Współczynnik kr jest to stosunek rzeczywistej energii odzyskiwanej podczas hamowania do maksymalnej energii, która może być odzyskana. Dla zadanej długości trasy (tutaj 500 m) i określonego czasu przejazdu całego odcinka (tu 50 s) optymalizowano parametry przejazdu podczas rozruchu, etapu jazdy ze stałą prędkością, fazy wybiegu oraz hamowania, aby uzyskać minimalizację zużycia energii.

Na rysunku 1 ($kr = 0$), który prezentuje obliczoną energooszczędną jazdę tramwaju, zminimalizowane zużycie energii wynosi $E_{min} = 0,960$ kWh. Warto zamieścić też informacje dotyczące wariantu przejazdu najbardziej nieudanego, tzn. przypadku z tak dobranymi parametrami jazdy w czasie rozruchu, etapu jazdy ze stałą prędkością, wybiegu i hamowania, gdy zużycie energii jest największe. Podczas takiej najgorszej jazdy nie występowała faza wybiegu, a prędkość końcowa rozruchu była najmniejsza i wynosiła tylko 12,39 m/s (na rysunku 1 rozruch zakończył się dopiero przy prędkości 13,56 m/s). Jazda energochłonna była związana z maksymalnym poborem energii równym $E_{max} = 1,086$ kWh (wzrost o 13,13% w stosunku do jazdy energooszczędnej).



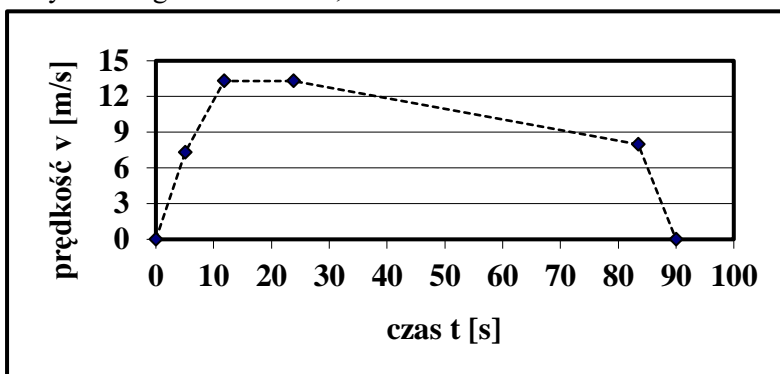
Rysunek 1. Przejazd tramwaju bez zakłóceń na trasie o długości 500 m według algorytmu jazdy z minimalnym zużyciem energii $E_{min} = 0,960$ kWh; czas przejazdu 50 s; współczynnik rekuperacji $kr = 0$ [opracowanie własne]



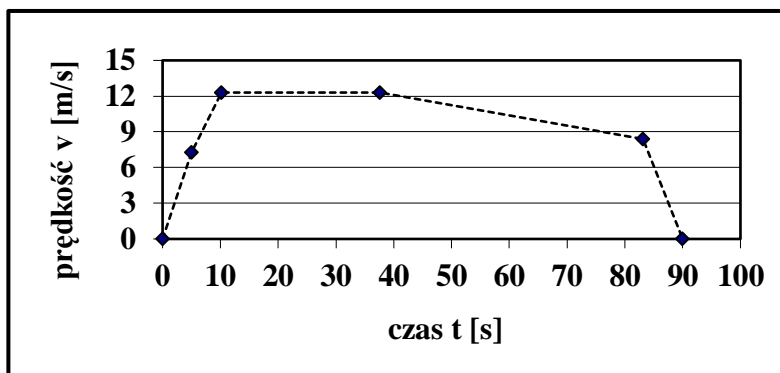
Rysunek 2. Przejazd tramwaju bez zakłóceń na trasie o długości 500 m według algorytmu jazdy z minimalnym zużyciem energii $E_{min} = 0,644$ kWh; czas przejazdu 50 s; współczynnik rekuperacji $kr = 1$ [opracowanie własne]

W ramach rysunku 2 ($kr = 1$) w procesie optymalizacyjnym tak dobrano czas przejazdu i długość trasy dla rozruchu, jazdy ze stałą prędkością, wybiegu i hamowania, aby uzyskać minimum zużytej energii, które tutaj wyniosło $E_{min} = 0,644$ kWh. Dla porównania w najgorszym wariancie przejazdu nie ma etapu wybiegu, a maksymalna pobrana energia jest równa $E_{max} = 0,683$ kWh (o 6,06% więcej niż dla przypadku jazdy z minimum zużycia energii). Porównanie wyników dla rysunków 1 i 2 wskazuje na celowość stosowania urządzeń do odzysku energii podczas hamowania tramwaju.

Na trasie o średniej długości 900 m przejazdu tramwaju z najmniejszym zużyciem energii ilustruje rysunek 3 (dla $kr = 0$) oraz rysunek 4 (dla $kr = 1$). Na rysunku 3 – gdy nie ma odzysku energii przy hamowaniu tramwaju – zużycie energii wynosi $E_{min} = 1,039$ kWh. Końcowa prędkość rozruchu wynosi tutaj 13,30 m/s. Najgorszy wariant przejazdu (maksimum zużycia energii) występuje przy prędkości końcowej dla fazy rozruchu równej 11,04 m/s. W tym najbardziej energochłonnym przejeździe tramwaju pobierana jest energia $E_{max} = 1,252$ kWh. Różnica dwóch charakterystycznych wartości energii: $E_{max} - E_{min} = 0,213$ kWh, a więc podczas jazdy energochłonnej, wobec braku etapu wybiegu, zużycie energii wzrasta o 20,5%.



Rysunek 3. Przejazd tramwaju bez zakłóceń na trasie o długości 900 m według algorytmu jazdy z minimalnym zużyciem energii $E_{min} = 1,039$ kWh; czas przejazdu 90 s; współczynnik rekuperacji $kr = 0$ [opracowanie własne]



Rysunek 4. Przejazd tramwaju bez zakłóceń na trasie o długości 900 m według algorytmu jazdy z minimalnym zużyciem energii $E_{min} = 0,869$ kWh; czas przejazdu 90 s; współczynnik rekuperacji $kr = 1$ [opracowanie własne]

Na rysunku 4 (współczynnik rekuperacji $kr = 1$) pokazano zależność od czasu t wartości prędkości granicznych v tramwaju w kolejnych fazach przejazdu, dla najmniejszego zużycia energii $E_{min} = 0,869$ kWh. Rozruch kończy się tutaj przy prędkości 12,30 m/s. Etap jazdy ze stałą prędkością trwa 27,43 s, a więc jest dłuższy niż na rysunku 3, gdzie ta faza jazdy trwała 12,03 s. Przejazd najbardziej energochłonny wiąże się z poborem energii równej $E_{max} = 0,930$ kWh, czyli ta maksymalna energia jest większa o 7,02% od energii E_{min} , spełniającej kryterium minimalnego zużycia energii.

Wykonano również obliczenia dla przejazdu na trasie długiej (tu 1200 m) i czasu przejazdu 105 s. Dzięki wykonaniu obliczeń optymalizacyjnych, w przypadku gdy nie jest odzyskiwana energia podczas hamowania (współczynnik rekuperacji $kr = 0$) uzyskano najmniejsze zużycie energii $E_{min} = 1,455$ kWh. W najgorszym wariancie przejazdu zużycie energii $E_{max} = 1,733$ kWh i jest o 19,11% większe.

Dla długiej jazdy na odcinku 1200 m w czasie 105 s, przy współczynniku rekuperacji $kr = 1$ po wyznaczeniu algorytmu najmniejszego zużycia energii elektrycznej uzyskano wartość pobranej energii równą $E_{min} = 1,240$ kWh. Dla jazdy energochłonnej, gdy nie ma etapu wybiegu, zużycie energii wynosi $E_{max} = 1,316$ kWh, a więc jest o 6,13% większe.

Tabele 1 i 2 ilustrują porównawcze podsumowanie wielkości energii dla różnych długości trasy i dwóch wariantów, gdy jest odzysk energii podczas hamowania tramwaju (współczynnik $kr = 1$) oraz gdy brak rekuperacji energii przy hamowaniu ($kr = 0$).

Tabela 1. Energia minimalna i maksymalna dla różnych sposobów przejazdu odcinka przy odzyskiwaniu energii podczas hamowania (współczynnik rekuperacji $kr = 1$)

długość odcinka	czas przejazdu	Energia minimalna	Energia maksymalna
500 m	50 s	0,644 kWh	0,683 kWh
900 m	90 s	0,869 kWh	0,930 kWh
1200 m	105 s	1,240 kWh	1,316 kWh

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 2. Energia minimalna i maksymalna dla różnych sposobów przejazdu odcinka przy braku odzysku energii podczas hamowania (współczynnik rekuperacji $kr = 0$)

długość odcinka	czas przejazdu	Energia minimalna	Energia maksymalna
500 m	50 s	0,960 kWh	1,086 kWh
900 m	90 s	1,039 kWh	1,252 kWh
1200 m	105 s	1,455 kWh	1,733 kWh

Źródło: opracowanie własne.

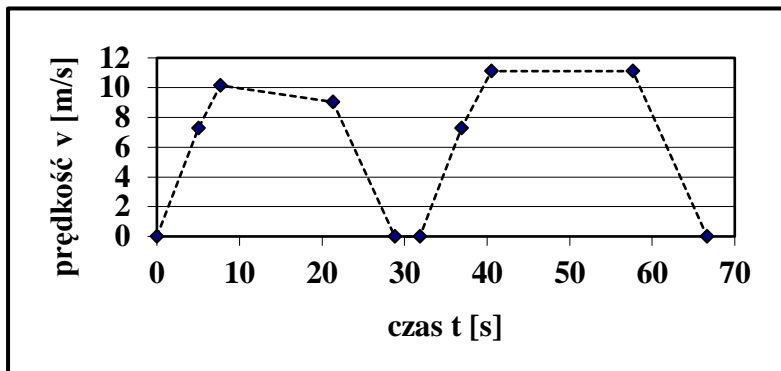
4. Jazda z zakłóceniami ruchu

Podczas dynamicznej jazdy tramwaju w ramach ruchu miejskiego mogą występować różnorodne zakłócenia, które wymagają dokonywania ciągłej aktualizacji procedury dalszej jazdy, w ramach której będzie zapewnione minimalne zużycie pobieranej energii elektrycznej.

Opisano w formie przykładu jazdę pojazdu tramwajowego z zakłóceniami na odcinku o długości 500 m, dla którego pierwotnie planowano bezkolizyjny przejazd w czasie równym 52 s.

Jazda bez zakłóceń ruchu trwała tylko na początkowym fragmencie odcinka. Motorniczy zauważył drogową sytuację niebezpieczną i został zmuszony do zatrzymania

tramwaju już po przejechaniu dystansu 210 m (tę część całego odcinka określono jako segment I). W prezentowanym przykładzie wystarczył postój 3 s, po którym tramwaj ruszył ponownie i odbył jazdę na pozostałej długości 290 m (segment II po postoju na rysunku 5).



Rysunek 5. Przejazd tramwaju przez pierwszy odcinek (500 m, 66,64 s) z krótkim (3 s) wymuszonym postojem po przejechaniu segmentu I (210 m) i nieplanowym ograniczeniem prędkości do 40 km/h w segmencie II (290 m) [opracowanie własne]

W ramach segmentu II – w związku z niebezpieczną sytuacją drogową – było obojętne ograniczenie prędkości tramwaju do 40 km/h.

Można stwierdzić, że zakłócenia ruchu są bardzo niekorzystne z punktu widzenia dążenia do minimalizacji zużycia energii oraz jazdy zgodnej z pierwotnym rozkładem jazdy, jednak w ruchu miejskim nie można uniknąć występowania różnorodnych perturbacji. W rozpatrywanym tutaj przykładzie jazdy na odcinku 500 m nieoczekiwana konieczność zatrzymania tramwaju oraz nieplanowe ograniczenie prędkości dalszej jazdy do 40 km/h spowodowało opóźnienie równe 14,64 s, gdyż czas przejazdu był równy 66,64 s, a planowano jazdę w ciągu 52 s.

Wskutek jazdy z dużymi zakłóceniami ruchu już na pierwszym odcinku wzrosło zużycie energii elektrycznej w stosunku do jazdy bezkolizyjnej. Przy braku odzysku energii podczas hamowania ($kr = 0$) wzrost zużycia energii wynosił aż 49%, natomiast przy współczynniku $kr = 1$ był równy 25,5%.

5. Likwidacja opóźnień ruchu

W poprzednim podrozdziale 4 opisano przykładową jazdę z dużymi zakłóceniami ruchu. Obecnie – dla tego samego przykładu – opisany będzie złożony proces likwidacji powstałego opóźnienia ruchu wynoszącego 14,64 s.

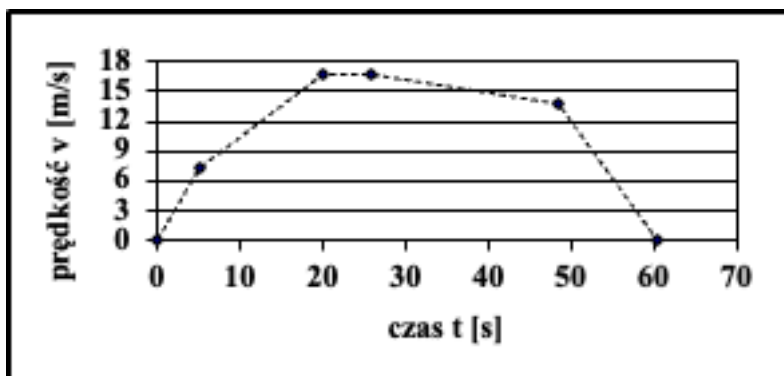
Na następnych odcinkach będzie wymagana jazda z większą prędkością niż to planowano pierwotnie, a to wiąże się nieuchronnie z koniecznością zużycia większej ilości energii elektrycznej pobieranej przez pojazd tramwajowy bezpośrednio z sieci trakcyjnej prądu stałego. Ponadto należy podkreślić, że trzeba dokonać wyboru liczby dalszych odcinków jazdy, na których będzie realizowane likwidowanie opóźnienia ruchu.

Wybór ten jest celowy, bo z jednej strony w interesie podróżnych jest ruch tramwajów zgodny z rozkładem jazdy, a z drugiej nie powinno być nieracjonalnego wzrostu zużycia energii i nadmiernego zwiększenia kosztów jazdy.

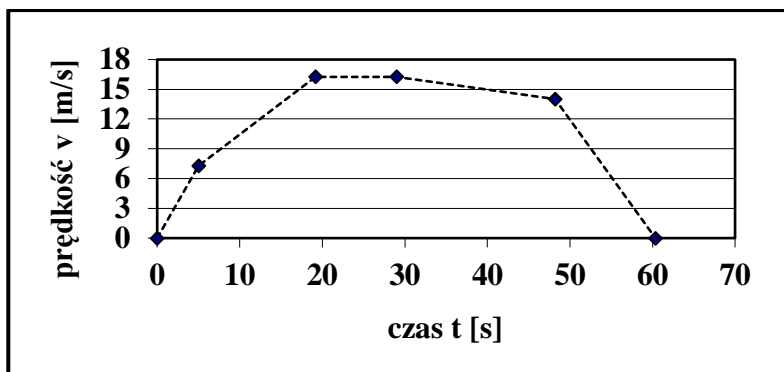
Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono przejazdy tramwaju, gdy likwidacja opóźnienia nastąpiła już na następnym drugim odcinku o długości 750 m, dla którego pierwotnie –

w ramach jazdy bezkolizyjnej na pierwszym odcinku – zaplanowano przejazd w ciągu 75 s; obecnie - po skróceniu jazdy o likwidowane opóźnienie 14,64 s – czas przejazdu wynosi tylko 60,36 s.

Rysunek 6 dotyczy przypadku jazdy bez odzysku energii przy hamowaniu ($kr = 0$); w wyniku procesu optymalizacji minimalne zużycie energii wynosi tutaj $E_{min} = 1,648$ kWh. Na rysunku 7 został zilustrowany wariant szybkiej jazdy tramwaju z odzyskiem energii podczas hamowania pojazdu, a wyznaczone w takich warunkach minimum zużycia energii jest równe $E_{min} = 1,125$ kWh.



Rysunek 6. Przejazd energooszczędny drugiego odcinka (750 m) z szybką likwidacją (już na drugim odcinku) opóźnienia; $kr = 0$; zużycie energii $E_{min} = 1,648$ kWh [opracowanie własne]

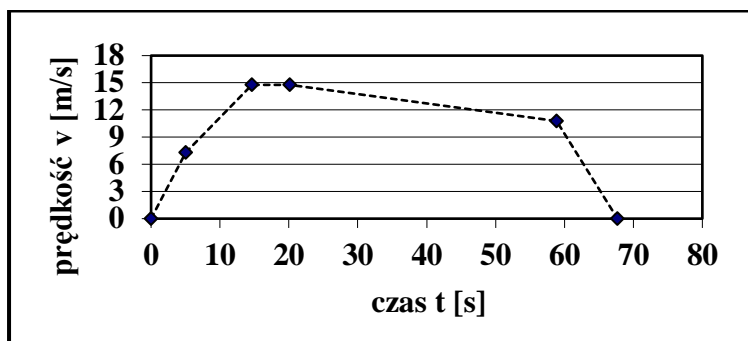


Rysunek 7. Przejazd energooszczędny drugiego odcinka (750 m) z szybką likwidacją opóźnienia z pierwszego odcinka; $kr = 1$; zużycie energii $E_{min} = 1,125$ kWh [opracowanie własne]

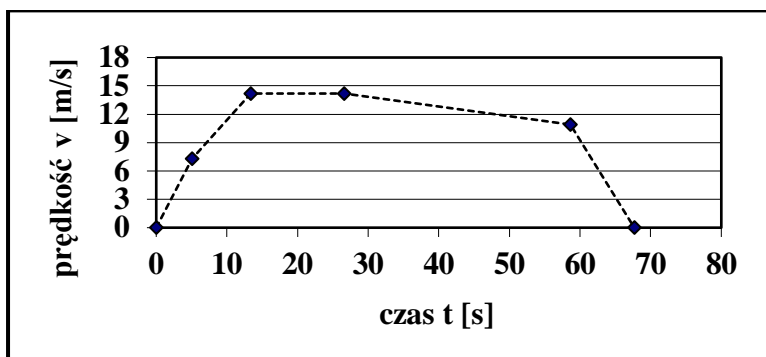
Na sumarycznej trasie, obejmującej łącznie pierwszy i drugi odcinek, wzrost zużycia energii w stosunku do jazdy bez zakłóceń komunikacyjnych na tych odcinkach wynosi 59,9% w wariantcie bez odzysku energii przy hamowaniu (współczynnik $kr = 0$), natomiast jest on wyraźnie mniejszy oraz równy 36,9%, gdy współczynnik rekuperacji $kr = 1$.

Rysunki 8 i 9 odnoszą się do wariantu, w którym przyjęto, że łączne opóźnienie w ruchu zostanie zlikwidowane podczas przyspieszonej jazdy przez dwa kolejne, równe odcinki – drugi i trzeci – o długości 750 m każdy, na których pierwotnie zaplanowano czas jazdy równy 75 s. Na każdym z tych dwóch jednakowych odcinków likwidowana jest połowa opóźnienia, a więc czas równy 7,32 s.

Łącznie na trasie obejmującej odcinki od pierwszego do trzeciego wzrost zużycia energii w stosunku do jazdy bezkolizyjnej wynosi 31,3% przy braku odzysku energii podczas hamowania ($kr = 0$), natomiast gdy współczynnik rekuperacji $kr = 1$, ten wzrost jest równy 18,4%.



Rysunek 8. Przejazd energooszczędny drugiego i trzeciego odcinka (każdy po 750 m) z likwidacją opóźnienia powstałego na pierwszym odcinku; współczynnik rekuperacji $kr = 0$; zużycie energii. $E_{min} = 1,202$ kWh [opracowanie własne]



Rysunek 9. Przejazd energooszczędny drugiego i trzeciego odcinka (każdy po 750 m) z likwidacją opóźnienia powstałego na pierwszym odcinku; współczynnik rekuperacji $kr = 1$; zużycie energii. $E_{min} = 0,893$ kWh [opracowanie własne]

Obliczano również przypadek, gdy całkowite opóźnienie w ruchu zostanie zlikwidowane podczas przejazdu przez trzy kolejne równe odcinki – drugi, trzeci i czwarty – długości 750 m każdy, na których początkowo zaplanowano czas jazdy równy 75 s. Na każdym z tych trzech odcinków jest likwidowana taka sama część opóźnienia, a więc 4,88 s. Łącznie na trasie obejmującej odcinki od pierwszego do czwartego wzrost zużycia energii w stosunku do jazdy bez zakłóceń wynosi 22,1%, gdy nie ma odzysku energii podczas hamowania ($kr = 0$), natomiast gdy współczynnik rekuperacji $kr = 1$ ten wzrost energii jest równy 12,9%.

Ponieważ dla podróży regularność ruchu pojazdów tramwajowych jest bardzo ważna, zaproponowano kompromisowe rozwiązanie, w którym uwzględniono ważny cel społeczny oraz koszty wynikające ze wzrostu zużycia energii elektrycznej spowodowanego jazdą ze zwiększoną prędkością. Ustalono, że liczba kolejnych odcinków, na których jazda z odpowiednio zwiększoną prędkością doprowadzi do likwidacji opóźnienia, będzie równa dwa (czyli będą to odcinki drugi i trzeci).

6. Podsumowanie

Równoległe z zastosowaniem trójfazowych silników indukcyjnych w napędach współczesnych pojazdów, które zostały wyposażone w energoelektroniczne systemy zasilania i sterowania, skomplikował się proces takiego prowadzenia tramwaju, aby było spełnione kryterium minimalnego zużycia energii. W ruchu miejskim parametry jazdy zmieniają się w sposób losowy wskutek zakłóceń ruchu. Konieczne jest stosowanie takich algorytmów sterowania, które umożliwiają określenie parametrów dalszej jazdy tramwaju po ustąpieniu zakłóceń i z minimalizacją zużycia energii. Do realizacji tego celu potrzebne jest półautomatyczne prowadzenie tramwaju, przy którym możliwe jest albo automatyczne sterowanie pojazdem przy minimum zużycia energii, albo kierowanie tramwajem przez człowieka. Ze względu na zasadnicze znaczenie bezpieczeństwa ruchu ostatecznie decyzję podejmuje zawsze motorniczy, który w sposób ciągły obserwuje warunki na drodze. Dodatkowo nowoczesne systemy umożliwiają ciągłą kontrolę sprawności motorniczego w czasie jazdy tramwaju.

W nowoczesnych rozwiązaniach pokładowy komputer pojazdu może współpracować z systemem komputerowym miejskiego centralnego ośrodka sterującego. Dzięki temu staje się możliwy nadzór nad ruchem wielu tramwajów i może być realizowany skoordynowany, energooszczędny ruch dużej liczby pojazdów.

Z symulacji wynika, że po wdrożeniu nowoczesnej metody sterowania tramwajami zużycie energii zmniejszyłoby się o 20-30% w stosunku do tradycyjnego prowadzenia pojazdów, opartego na umiejętnościach i subiektywnych decyzjach motornicznych.

Przedstawione w artykule nowe metody obliczeniowe, które uwzględniają zakłócenia płynności ruchu podczas jazdy miejskiej, w ramach współpracy z przedsiębiorstwami komunikacyjnymi będą w przyszłości wdrażane do półautomatycznego, energooszczędnego prowadzenia tramwajów.

Literatura

1. Kacprzak J., *Automatyka i sterowanie elektrycznych pojazdów trakcyjnych*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1981.
2. Kacprzak J., *Teoria trakcji elektrycznej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1996.
3. Zielińska M., *Racjonalizacja zużycia energii w ruchu miejskim elektrycznych szynowych pojazdów trakcyjnych*, praca doktorska, Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny, 1993.
4. Frąckowiak J., *Metoda obliczania jazd energooszczędnych pojazdu tramwajowego napędzanego trójfazowymi silnikami indukcyjnymi*, praca doktorska, Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny, 1995.
5. Glia R.S., *Investigation of the influence of disturbances of the traffic of tram vehicles with series direct current motors on the forecasting of the subsequent energy-saving run*, praca doktorska, Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny, 2005.
6. Finlayson A., Goodman C.J., White R.D., *Investigation into the computational techniques of power system modelling for a DC railway*, X International Conference „Computer in Railways”, COMPRAIL’2006, Prague 2006, s. 735-745.
7. Goodman C.J., Siu L.K., Ho T.K., *A review of simulation models for railway systems*, IEE International Conference „Developments in Mass Transit Systems”, London 1998, s. 80-85.
8. Albrecht T., Oettich S., *A new integrated approach to dynamic schedule synchronization and energy-saving train control*, International Conference on Computer Aided Design, Manufacture and Operation in the Railway and Other Advanced Mass Transit Systems, Lemnos (Greece) 2002.

9. Cao Z., Oghanna W., *An Intelligent PI Controller for Induction Motors*, III International Conference „Drives and Supply Systems for Modern Electric Traction”, MET'1997, Warszawa 1997, s. 30-33.
10. Murata S., Goodman C.J., *A Passenger-Oriented Traffic Regulation Method for Metro-Type Railways*, World Congress on Railway Research, Florence 1997, s. 757-764.
11. Murata S., Goodman C.J., *An optimal traffic regulation method for metro type railways based on passenger orientated traffic evaluation*, VI International Conference „Computer in Railways”, COMPRAIL'1998, Lisbon 1998, s. 573-584.
12. Sugimoto T., *Development of General-Purpose Personal Computer Simulation Program for DC Feeding Systems for Modern Electric Traction in Integrated XXIst Century Europe*, MET'1999, Warszawa 1999, s. 76-81.
13. Takagi R., Bouch C., Weston P., Goodman C.J., Armstrong J., *An Object-Oriented Signalling System Model for the Study of Delay Minimisation by On-line Train Control*, Conference „IRSE Aspect – 2006”, London 2006, s. 368-375.
14. Horn P., Zinke R., *Energieoptimale Zugsteuerung im Fernverkehr*, Wissenschaftliche Zeitschrift, Hochschule für Verkehrswesen, Vol. 40, No. 4, Dresden 1990, s. 627-632.
15. Ichikawa K., *Application of optimization theory for bounded state variable problems to the operation of train*, Bulletin of JSME, Vol. 11, No. 47, 1968.
16. Yasukawa S., Satoh K., *A study on energy saving train operation methods for the Shinkansen Express train service*, QR of RTRI, Vol. 30, No. 3, 1989.
17. Takagi R., Roberts C., Goodman C.J., *A Simplified Passenger Flow Model Using Coloured Petri Nets*, VIII International Conference „Computer in Railways”, COMPRAIL'2002, Lemnos (Greece) 2002, s. 481-488.
18. Orłowska-Kowalska T., *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
19. Dębowski A., *Automatyka – napęd elektryczny*, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2017.
20. Glinka T., *Maszyny elektryczne i transformatory*, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2018.

Nowe algorytmy jazdy tramwaju z minimalnym zużyciem energii

Streszczenie

Dla ruchu miejskiego opracowano nowe algorytmy takich przejazdów pojazdu tramwajowego, które umożliwiają minimalizację zużycia energii elektrycznej. Badania energooszczędnych przejazdów przeprowadzono na przykładzie tramwajów, które posiadają trakcyjne trójfazowe silniki indukcyjne klatkowe ze sterowaniem połowo zorientowanym. Uwzględniano to, że w warunkach ruchu miejskiego często występują różnorodne zakłócenia płynności ruchu. Mogą pojawiać się np. lokalne ograniczenia prędkości oraz losowo zdarzające się dodatkowe postoje. Pokazano na przykładach, że możliwe jest takie określanie parametrów dalszej jazdy tramwaju po ustąpieniu zakłóceń w ruchu miejskim, aby spełnione było kryterium minimalnej wartości zużycia energii. Zamieszczono przykład dotyczący optymalizacyjnego postępowania przy dużych opóźnieniach w ruchu. Przy znacznym opóźnieniu konieczne jest rozłożenie jego likwidacji na kilka kolejnych odcinków międzyprzystankowych. Aby uniknąć znacznego wzrostu zużycia energii potrzebny jest racjonalny wybór liczby kolejnych odcinków, na których jazda z odpowiednio większą prędkością umożliwi zlikwidowanie opóźnienia w stosunku do rozkładu jazdy. Pokazano, że stosowanie urządzeń do odzysku energii podczas hamowania tramwaju jest bardzo korzystne z punktu widzenia całkowitego bilansu zużycia energii elektrycznej. Słowa kluczowe: tramwaj, przejazdy, minimalizacja zużycia energii

New algorithms of tram traffic with minimum energy consumption

Abstract

For city traffic new algorithms of tram vehicle ride have been elaborated. These algorithms make minimization of energy use possible. Investigations of energy saving rides have been realized on the examples of trams with tractive three-phase induction squirrel-cage motors with field oriented control. It was taken into consideration that within city conditions different traffic disturbances occurred. For example the local speed limitations and additional stops can appear. On the ground of examples it was shown that it was possible to determine parameters of the subsequent ride of the tram after finish of the traffic disturbances taking minimization of the energy consumption into consideration. The example concerning optimization at the large time lag has been given. For large delay return to the tram ride according to the time-table can be realized within some succeeding traffic segments. To avoid the considerable increase of the energy use the rational number of tram ride segments with the speed increase ought to be chosen. It was shown that application of the energy recuperation system during the vehicle braking is very favourable to the total balance of the energy consumption.

Keywords: tram, running, minimization of energy use

Wpływ dodatku odpadowych wiórów stalowych na wartość współczynnika Poissona eko-fibrokompozytów cementowo-szklanych

1. Wstęp

Fibrokompozyty cementowe zbrojone komercyjnymi systemami makrowłókien o zmiennej geometrii, posiadających odmienne parametry fizykochemiczne i mechaniczne, stanowią szczególną rodzinę materiałów konstrukcyjnych z włóknistą matrycą nośną. Odstępując od konwencjonalnych rozwiązań zbrojenia rozproszonego na rzecz wdrażania odpadowych oraz porecyklingowych włókien lub wiórów, działamy w kierunku promowania zachowań proekologicznych, tj. ograniczenie eksploatacji surowców naturalnych, redukcja emisji CO₂ wpływającego negatywnie na środowisko przyrodnicze oraz zmniejszenie śladu węglowego w cyklu życia wyrobu lub konstrukcji („carbon footprint” oraz zasada „zero waste”).

Kierując się zasadami idei czystego środowiska, głównie w aspekcie wykorzystywania surowców odpadowych, uzyskujemy nowe rozwiązania materiałowe dla branży budowlanej i architektonicznej, tj. konstrukcyjne eko-fibrokompozyty o różnych poziomach modyfikacji materiałowej i chemicznej („low-carbon building materials”). Podstawowy skład eko-fibrokompozytów cementowo-szklanych opiera się na hybrydowych stosach okruchowych komponowanych z grup frakcji granulatów szkła sodowo-wapniowego i/lub organicznych uszczelnionych pyłami syntetycznymi (PMMA, PVDF, PTFE lub PEEK).

Materiały fibrokompozytowe charakteryzujące się niejednorodnością i brakiem powtarzalności składów surowcowych, każdorazowo wymagają oceny trwałości materiału i składników, analizy parametrów reologicznych oraz wytrzymałości mechanicznej. Dynamiczny rozwój w dziedzinie inżynierii materiałowej przyczynia się do powstawania materiałów o zróżnicowanych właściwościach opisanych stałymi materiałowymi, tj. aukseptyki z ujemną wartością współczynnika Poissona (NPR) dla oddziaływania naprężenia jednoosiowego [1-4].

Wymiarowanie przestrzennych ustrojów nośnych powiązane jest z koniecznością stosowania stałych materiałowych charakterystycznych dla danego rodzaju materiału. Jedną z fundamentalnych wielkości jest współczynnik (moduł) sprężystości podłużnej tj. moduł Younga (moduł odkształcalności liniowej). Moduł sieczny sprężystości podłużnej ($E_{c,s}$) definiowany jest jako iloraz wartości różnicy naprężenia ($\sigma_a - \sigma_b$) występujących wewnątrz rozpatrywanego materiału do wartości różnicy odkształceń liniowych ($\varepsilon_a - \varepsilon_b$) wyznaczonych z podłużnych przemieszczeń liniowych w zakresie określonej długości bazy pomiarowej (L_0) [5-7].

Projektowanie elementów konstrukcyjnych wymaga znajomości dodatkowej stałej materiałowej w postaci współczynnika Poissona (ν), stanowiącego bezwymiarową

¹ waldemarlasic@gmail.com, student energetyki jądrowej i atomistyki, badacz niezależny. (Nuclear and Atomic Engineering student, independent researcher).

wartość określoną doświadczalnie jako iloraz zmierzonej wartości odkształcenia poprzecznego (ε_{\perp}) do wartości odkształcenia podłużnego (ε_{\parallel}) dla jednoosiowego stanu naprężeń ściskających lub rozciągających [8, 9].

Powszechnie stosowaną praktyką jest przyjmowanie stałej wartości współczynnika Poissona z tablic inżynierskich dla poszczególnych materiałów konstrukcyjnych (wartość dodatnia z zakresu $\nu = 0,20 \pm 0,05$ dla kompozytów cementowych – betonów, wartość przyjmowana jako średnia arytmetyczna $\nu = 0,2$). Mając świadomość istnienia nieskończonej liczby kombinacji składów kompozytów cementowych, wpływających na charakterystykę naprężeń w funkcji odkształceń, należy obligatoryjnie dokonać oszacowania wartości współczynnika Poissona. Wyznaczenie wartości odkształceń poprzecznych (ε_{\perp} dla zadanej wartości naprężeń wewnętrznych) przy badaniu stałej materiałowej w postaci ustabilizowanego siecznego modułu sprężystości podłużnej $E_{c,s}$ (moduł Younga) umożliwia oszacowanie wartości współczynnika Poissona (liczba Poissona).

Doświadczenie własne wynikające z prowadzenia badań laboratoryjnych oraz informacje zawarte w zagranicznej literaturze naukowej, potwierdzają wpływ każdego składnika tworzącego mikrostrukturę kompozytu na zmianę wartości przemieszeń liniowych i odkształceń przy zadanym obciążeniu. Dodatkowo zaobserwować można zmienność wartości współczynnika Poissona dla serii reprezentatywnych próbek cylindrycznych pochodzących z jednej partii zarobu (próbki punktowe).

Celem pracy jest określenie wpływu poszczególnych modyfikacji materiałowych odpadowym dodatkiem wiórów stalowych na wytrzymałość mechaniczną eko-fibrokompozytów cementowo-szklanych wysokich wytrzymałości.

Badania laboratoryjne przeprowadzono na normowych próbkach cylindrycznych w zakresie statycznego oddziaływania obciążeń zewnętrznych. Wartości liczbowe współczynnika Poissona (ν) po wykonanych pomiarach przedstawiono do trzech cyfr znaczących (cyfry pewne, zaokrąglenie z nadmiarem).

2. Charakterystyka składników eko-fibrokompozytu cementowo-szklanego

Dokonano analizy wielokryterialnej w zakresie doboru jakościowego eko-spojwa hydraulicznego specjalnego zawierającego w składzie surowce porecyklingowe, tj. REA-gips syntetyczny (gips ekologiczny, generowany w procesie odsiarczania spalin w elektrociepłowniach). Wyselekcjonowano grupę eko-cementów wyróżniających się obniżonym śladem węglowym o co najmniej 40% w odniesieniu do cementów powszechnego użytku (wartość emisji CO_2 w zakresie $448 \pm 20 \text{ kgCO}_2\text{eq}$) [10]. Zastosowano w składach eko-fibrokompozytów niskoalkaliczny eko-cement pucolanowy rodzaju CEM IV/B(V) 42,5 N-LH/NA zawierający popiół lotny krzemionkowy o udziale masowym w zakresie $45,5 \pm 9,5\%$; charakteryzujący się niskim ciepłem hydratacji $251,5 \pm 6,5 \text{ J/g}$. Uwzględniono parametry fizyczne eko-spojwa pucolanowego, tj. gęstość właściwa $\rho_w = 2700 \pm 100 \text{ kg/m}^3$, wskaźnik wodożądności (wodny, ciekłości) ziaren cementu w zakresie $0,306 \pm 0,012$; powierzchnia właściwa (pomiar aparatem Blaine'a) równa $5160 \pm 20 \text{ cm}^2/\text{g}$, wytrzymałość rzeczywista określona po 28 dniach dojrzewania próbek zaprawy w zakresie $f_c = 46,0 \pm 2,0 \text{ MPa}$ ($f_c = 18,0 \pm 2,0 \text{ MPa}$ po 2 dniach pielęgnacji), zawartość chlorków równa $0,058 \pm 0,002\%$ i alkaliów jako ekwiwalent $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = 1,40 \pm 0,02\%$.

Rolę pomocniczego spojwa pucolanowego pełnił naturalny zeolit o uziarnieniu $0/50 \mu\text{m}$, którego główny składnik stanowił krystaliczny glinokrzemian w postaci klinoptilolitu (udział w składzie mineralnym równy $84,0 \pm 1,0\%$). Główne składniki mineralne zeolitu

to krystalalit (8,0 ±0,5%), plagioklas (3,5 ±0,5%), mika ilowa (4,0 ±0,5%) oraz rutil (0,2 ±0,1%). Przeprowadzono analizę składu granulometrycznego za pomocą analizatora cząstek stałych i elektrokinetycznego potencjału zeta (ζ), określono udział procentowy frakcji, tj. 0/6 μm w ilości 14,4 ±0,1%; 6/10 μm w ilości 10,8 ±0,1%; 10/25 μm w ilości 16,4 ±0,1%; 25/50 μm w ilości 58,4 ±0,1%. Przyjęto parametry fizyczne i chemiczne zeolitu klinoptilolitowego, tj. gęstość objętościowa $\rho_{zk}=2000\pm100\text{kg/m}^3$, gęstość nasypowa $\rho_{n-zk}=550\pm50\text{kg/m}^3$, pH = 7,0 ±0,2; porowatość ziaren w zakresie 28 ±4%, powierzchnia właściwa o wartości 1660 ±30 m²/kg, wilgotność w zakresie 3,4 ±0,6%, skład tlenkowy: SiO₂ (68,0 ±3,0%), Al₂O₃ (12,4 ±0,8%), CaO (3,9 ±1,2%), K₂O (2,8 ±0,6%), Fe₂O₃ (1,3 ±0,6%), MgO (0,9 ±0,3%), Na₂O (0,8 ±0,5%) oraz TiO₂ (0,2 ±0,1%).

Uzyskanie wyspecyfikowanych właściwości reologicznych (parametrów reologicznych analizowanych reometrem Brookfield'a) eko-fibromieszanek cementowo-szklanych umożliwił zestaw trzech płynnych domieszek chemicznych nowej generacji [11]. Zastosowano domieszkę wpływającą na upłynnienie z efektem wydłużenia urabialności eko-fibromieszanki na bazie wodnego roztworu modyfikowanych eterów polikarboksylowych [12]. Parametry fizyczne oraz chemiczne przyjęte dla superplastyfikatora, tj. gęstość $\rho_{d1}=1,06\pm0,02\text{g/cm}^3$ (określona w temperaturze powietrza T = 20,1 ±0,1°C i wilgotności względnej powietrza W = 45,5 ±0,1%), wartość pH = 4,5 ±1,0; zawartość alkaliów ≤1,9 ±0,1% i jonów chlorkowych ≤0,08 ±0,02% (dozowanie superplastyfikatora w ilości 0,50 ±0,05% masy zaprojektowanego układu eko-spoiw). Obniżenie ciepła hydratacji oraz zmniejszenie ryzyka powstawania rys termicznych zapewniła domieszka opóźniająca proces wiązania eko-spojwa cementowego na bazie wodnego roztworu fosforanu (domieszka kompatybilna z superplastyfikatorem) [13]. Uwzględniono w procesie projektowania parametry fizyczne i chemiczne domieszki, tj. gęstość $\rho_{d2}=1,14\pm0,03\text{g/cm}^3$ (określona w temperaturze powietrza T = 21,2 ±0,1°C i wilgotności względnej powietrza W = 46,4 ±0,1%), wartość pH = 10,0 ±1,0; zawartość jonów chlorkowych ≤0,08 ±0,02% i alkaliów ≤6,9 ±0,1% (domieszkę dozowano w ilości 0,25 ±0,05% masy zaprojektowanego układu eko-spoiw). Wzmocnienie działania upłynnienia mieszanki zagwarantowano domieszką plastyfikatora na bazie wodnego roztworu modyfikowanych lignosulfonianów [14]. Plastyfikator charakteryzował się parametrami fizycznymi i chemicznymi, tj. gęstość $\rho_{d3}=1,13\pm0,03\text{g/cm}^3$ (określona w temperaturze powietrza T = 20,4 ±0,1°C i wilgotności względnej powietrza W = 46,2 ±0,1%), wartość pH = 4,5 ±1,0; zawartość jonów chlorkowych ≤0,08 ±0,02% i alkaliów ≤0,9 ±0,1%. Domieszkę uplastyczniającą dozowano w ilości 0,30 ±0,05% masy zaprojektowanego układu eko-spoiw.

Wzrost wytrzymałości mechanicznej oraz trwałości stwardniałego eko-fibrokompozytu uzyskano dzięki domieszce pyłu krzemionkowego wytwarzany przy produkcji żelazokremu oraz krzemu. Dodatek pucolanowy dozowano w stałej ilości 3,0 ±0,2% masy układu spoiw (zawiesina woda-pył w proporcji 1:1) [15]. Krzemionka w formie amorficznego dwutlenku krzemu SiO₂ zawierała krystaliczny kwarc w ilości <0,4± 0,1% oraz frakcję respirabilną w ilości <0,05 ±0,01% masy domieszki. Pył krzemionkowy (kategoria 1, SiO₂ ≥ 85%) posiadał parametry fizyczne i chemiczne, tj. wartość pH = 7,0 ±0,2; gęstość względna $\rho_{pk}=2,25\pm0,05\text{kg/dm}^3$, gęstość nasypowa $\rho_{n-pk}=0,65\pm0,10\text{kg/dm}^3$, powierzchnia właściwa (określona aparatem Blaine'a) równa 23 ±3 m²/g oraz średni rozmiar cząstek wielkości 15 μm .

Założenia projektowe w zakresie konstrukcji stosów okrucowych uwzględniały recyklingowe granulaty szkła sodowo-wapniowego wytworzone w wyniku mechanicz-

nego kruszenia stłuczki odpadowej (szkło bezbarwne i/lub zielone). Źródło pozyskania granulatu stanowiła stłuczka szklana postkonsumpcyjna w postaci opakowań produktów spożywczych w postaci butelek i słoików. Wybrano mieszankę transparentnych grysów szklanych według systemu kodowania GLS70, GLS71 (substytut kruszywa skalnego łamanego jako autorskie rozwiązanie koncepcji szklanych stosów okrucowych). Wykorzystano szkło grupy frakcji 0/8,0 mm ($K^{0/8}$) zawierające nadziarno w ilości $2,4 \pm 0,2\%$ ($>16,0$ mm) oraz ziarna nieforemne w ilości $3,0 \pm 0,2\%$. Suwmiarką Schultz'a oznaczono wartość wskaźnika kształtu ziarna (badana frakcja 4,0/8,0 mm; $K^{4/8}$). Przyjęto parametry fizyczne i chemiczne asortymentu szklanego, tj. twardość w skali Mohsa równa 6, gęstość właściwa $\rho_k = 2,50 \pm 0,10$ kg/dm³, gęstość nasypowa $\rho_{n-k} = 1,50 \pm 0,30$ kg/dm³, SiO₂ (71,5 \pm 3,5%), Na₂O (15 \pm 3%), CaO (9,5 \pm 2,5%), MgO (4,8 \pm 0,2%), Al₂O₃ (2,4 \pm 0,1%), K₂O (1,4 \pm 0,1%), Fe₂O₃ (0,4 \pm 0,1%) [16, 17].

Wodociągowa woda zarobowa (woda efektywna, w_{eff}) spełniała wymagania normowe jak dla mieszanek betonowych na spoiwie cementowym [18]. Końcową masę wody efektywnej zredukowano o ilości $26 \pm 1\%$ względem masy referencyjnej ze względu na obecność domieszki uplastyczniającej i upłynniającej.

Skład eko-fibrokompozytu uwzględniał użycie zbrojenia rozproszonego w formie stalowych wiórów elementowych, spiralnych oraz łukowych luźnych. Zneutralizowano czynnik chłodząco-smarujący (przemysłowe koncentraty techniczne) obecny na powierzchni wiórów po procesie frezowania półproduktów stalowych. Mieszankę wiórów pozyskano z zakładów obróbki metali i tworzyw syntetycznych w technologii skrawania CNC (wieloosiowe frezowanie 3D, 4D i 5D). Określono parametry fizyczne zbrojenia rozproszonego, tj. gęstość objętościowa równa 7800 ± 50 kg/m³, długość mierzona wzdłuż osi środkowej wiórów elementowych, spiralnych oraz łukowych luźnych przyjęto odpowiednio 9 ± 2 mm, 20 ± 5 mm i 18 ± 3 mm (bez uwzględnienia długości dla uzwojenia wzdłuż osi środkowej).

3. Metodyka projektowania eko-fibrokompozytu cementowo-szklanego

Wybór metody projektowania poprzedzony został przeglądem publikacji i literatury naukowej w zakresie technologii i projektowania kompozytów cementowych. Kierowano się wytycznymi doboru jakościowego zawartymi w obowiązujących normach krajowych [19-21]. Koncepcja modyfikacji materiałowej mikrostruktury eko-fibrokompozytu składnikiem odpadowym ograniczyła obszar wyboru adekwatnej metody projektowej gwarantującej spełnienie wyspecyfikowanych założeń w zakresie wytrzymałości mechanicznej oraz trwałości eko-materiału.

Wykonano analizę porównawczą współczesnych metod doboru jakościowego i ilościowego składników fibrobetonów kruszywowych oraz hybryd fibrokompozytów z matrycami na bazie spoiw pucolanowych, hydraulicznych lub żywicznych [22-24]. Rozważano zastosowanie popularnych metod dla kompozytów cementowych średniej lub wysokiej wytrzymałości, tj. B. Kopycińskiego (metoda zaczynożądności), B. Bukowskiego (współczynnik „ ω ” [25-30]), W. Paszkowskiego (podwójne otulenie) [31-34]. Obszar dalszych rozważań obejmował współczesne metody projektowania kompozytów samozagęszczalnych (SCC/Eco-SCC/Green-SCC) lub prawie samozagęszczalnych (ASCC/Eco-ASCC/Green-ASCC) o zróżnicowanych parametrach reologicznych (metoda Okamury i Ozawy, metoda Vana i Montgomeryego) [35-37]. Przeprowadzona analiza wielokryterialna wykazała istotną lukę w zakresie zaadaptowania metod projektowych do potrzeb

związanych z użyciem składników odpadowych w charakterze makrozbrojenia rozproszonego. Materiały odpadowe lub porecyklingowe stanowią alternatywę w stosunku do komercyjnych włókien, tj. wióry i/lub kordy stalowe o nieregularnym kształcie oraz zmiennym przekroju i długości. Większość metod zakładała górną próg ilości użytych składowych receptur (objętych dokumentami normatywnymi w zakresie projektowanych kompozytów), tj. od 3 do 6 składników stanowiących aktywator/inicjator reakcji wiązania, twardnienia lub sieciowania, spoiwo, kruszywo/granulaty drobne i grube, dodatek mineralny oraz domieszka chemiczna.

Dokonano ostatecznego wyboru metody projektowej dla kompozytów o strukturze zwartej, tj. B. Bukowskiego wraz z autorskim innowacyjnym rozwiązaniem jako koncepcji równoległego zastosowania dwóch współczynników aktywności pucolanowej i/lub hydraulicznej „k2” i „k3” (dokonano walidację metody) [38-44]. Założenia autorskiej koncepcji dwóch współczynników „k2” i „k3” uwzględniały możliwość modyfikacji referencyjnego składu domieszkami lub dodatkami odpadowymi i/lub porecyklingowymi, tj. naturalne i/lub syntetyczne włókna poprodukcyjne (skala wymiaru włókien: mikro, makro lub nano) [45-50], wióry z obróbki skrawaniem [51], granulaty naturalne lub syntetyczne [52-54] oraz szkło [55-56]. Ideą nowej metody projektowej jest promowanie rozwiązań proekologicznych w obszarze ograniczenia zużycia surowców naturalnych oraz redukcji śladu węglowe w cyklu życia eko-kompozytu. Koncepcja metody dwóch współczynników „k2” i „k3” umożliwiła częściową substytucję cementów rodzaju CEM I poprodukcyjnymi spoiwami oraz wdrożenie nowej generacji eko-domieszek biopolimerowych na bazie chemicznej z agroodpadów lub bioodpadów.

Podstawowe wymaganie projektowe dla eko-fibrokompozytów cementowo-szkłanych stanowiło uzyskanie wytrzymałość charakterystyczna na ściskanie dla próbek cylindrycznych $f_{ck,cyl} > 60 \text{ MPa}$ badanej po 28 dniach dojrzewania próbek. Cementy wysoko-klinkierowe zastąpiono niskoemisyjnym eko-spoiwem hydraulicznym z obniżoną procentową zawartością klinkieru portlandzkiego. Założono wprowadzenie do składu makrozbrojenia w formie odpadowych wiórów stalowych z procesów frezowania półproduktów w technologii CNC. Przyjęto podwyższone wymagania w zakresie trwałości eko-materiału determinowane klasami ekspozycji środowiska (agresja: karbonatyzacja – XC4, chłorkowa – XD3, mrozowa – XF3, chemiczna – XA1 oraz ścieranie – XM2). Założono klasę konsystencji/ciekłości jako S2/S3, tj. przewidywany zakres opadu stożka eko-fibromieszanki w zakresie 50-90 mm ± 20 mm.

Wstępne (przed korektą ilościową) referencyjne składy receptur eko-fibrokompozytów wyznaczono według metody B. Bukowskiego w powiązaniu z autorską koncepcją dwóch współczynników „k2” i „k3” aktywności pucolanowej i/lub hydraulicznej odpadowych spoiw przemysłowych (popioły lotne krzemionkowe i wapienne, pyły krzemionkowe, pucolany naturalne wypalane). Dokonano wariantowania wartości granicznych wynikających z przyjętych klas ekspozycji, tj. minimalna zawartość procentowa powietrza w eko-fibromieszance (napowietrzenie uzyskane domieszką chemiczną $\geq 4,0\%$ dla klasy XF3, $p \geq 5,5\%$ dla granulatu frakcji $\leq 8,0 \text{ mm}$), minimalna masa spoiwa cementowego ($c \geq 320 \text{ kg/m}^3$), maksymalny wskaźnik wodno-cementowy lub wodno-spoiwowy ($w/c \leq 0,45$ lub $w/s \leq 0,45$), minimalna klasa wytrzymałości kompozytu (C35/45, $f_{ck,cyl} \geq 35 \text{ MPa}$).

Zaproponowano wymagania własne stawiane eko-fibrokompozytowi (rzutujące na trwałość eko-materiału), tj. klasa chlorków Cl0,1; sumaryczne maksymalne zawartości

siarczanów <1800 mg/l i alkaliów ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) <1300 mg/l ($\text{Cl} \leq 0,1\%$ – jako sumaryczna zawartość Cl dla wszystkich składników eko-fibrokompozytu, minimalizacja ryzyka skurczu żelu cementowego i rozwoju korozji chlorkowej). Uwzględniono rezerwę (nadatek) wytrzymałości charakterystycznej na ściskanie $f_{\text{ck,cyl}}$ (przyjęto relację: $f_{\text{ck,cyl}} = 0,8 \cdot f_{\text{ck,cube}}$) wynikającą z obecności powietrza (sumaryczna zawartość porów powietrznych $A > 300 \mu\text{m}$ i $A < 300 \mu\text{m}$) w eko-fibromieszance. Wyznaczono wartość parametru marginesu bezpieczeństwa $x = 22\text{MPa}$ dla 5,5% zawartości porów powietrznych. Dokonano korekty początkowej $f_{\text{ck,cyl}} \geq 35 \text{MPa}$ na wartość $f_{\text{ck,cyl}} = 57 \text{MPa}$ oraz korekty ostatecznej do wartości $f_{\text{ck,cyl}} = 54 \text{MPa}$ ze względu na nieliniową zależność spadku wytrzymałości $f_{\text{ck,cyl}}$ w funkcji zawartości porów powietrznych.

Proces projektowania zapoczątkował etap wstępnego (koncepcja uziarnienia) doboru zakresów procentowych frakcji i grup frakcji niezbędnych do opracowania szklanego stosu okrucowego o uziarnieniu 0/8,0 mm (przykłady dwóch projektowanych krzywych uziarnienia przedstawiono na rysunku 1). Zaproponowano dwa rozwiązania konstrukcji stosów okrucowych o założonych wartościach punktów charakterystycznych, tj. wariant nr 1: Pp = 4% (punkt pyłowy); PpP = 21% (punkt pyłowo-piaskowy); PP = 52% (punkt piaskowy), wariant nr 2: Pp = 7%; PpP = 35% oraz PP = 67% (mieszanka granulatu szklanego o podwyższonym punkcie piaskowym, rys. 1) [57, 58]. Wartości procentowe grup frakcji szkła odniesiono do normowych przedziałów granicznych (analiza pól uziarnienia dla optymalnego położenia ciągłych krzywych projektowanych). Dokonano weryfikacji wstępnie założonych wartości punktów piaskowych (PP) z krzywymi zależności jamistości stosu okrucowego w funkcji udziałów procentowych granulatu drobnego $K^{0/2}$ i $K^{0/4}$ (0/2,0 mm lub 0/4,0 mm) oraz grubego (0/8,0 mm; $K^{0/8}$).

Wskaźniki wodne dla ziaren eko-spojwa cementowego (w_c), szklanych stosów okrucowych ($w_k = w_{\text{kd}} + w_{\text{kg}} + w_{\text{msz}}$), dodatku odpadowego w postaci pyłu krzemionkowego (w_{pk}) oraz zeolitu klinoptilolitowego (w_{zk}), wyznaczono według empirycznego wzoru O. Sterna. Odstąpiono z przyjęcia wartości tablicowych wskaźników wodnych ze względu na niejednorodność i niestabilność składu granulometrycznego, stopnia miałości oraz wielkości powierzchni właściwej według Blainea ziaren eko-cementu pucolanowego rodzaju CEM IV. Wykonana weryfikacja eko-cementu analizatorem rozkładu cząstek stałych, pozwoliła wykazać brak powtarzalności składu granulometrycznego eko-spojwa (zmiennie dozowanie popiołu lotnego krzemionkowego z zakresu 36-55% masy eko-cementu). Określono minimalne wartości wskaźników wodnych (poziom stechiometryczny) niezbędnych to aktywacji reakcji hydratacji przy minimalnym zwilżeniu ziaren eko-cementu. Wskaźniki wodne dla stosu okrucowego (w_{kd} , w_{kg} , w_{msz}) zmodyfikowano określonymi doświadczalnie współczynnikami korekcyjnymi (α_1 , α_2 , β_1 i β_2) ze względu na kształt, rodzaj powierzchni (odłamy muszlowe), nasiąkliwość i gęstość objętościową ziaren szkła łamanego (kruszonego mechanicznie lub implozyjnie).

Wartość współczynnika „ ω ” (wymaganego do obliczenia wszystkich mas składników dla 1 m³ eko-fibromieszanki) odczytano z nomogramów zależności wytrzymałości charakterystycznej na ściskanie (f_{ck}^{28}) stwardniałego kompozytu cementowego w funkcji wskaźnika wodno-cementowego (w_{eff}/c) zastąpionego wskaźnikiem wodno-spojowego (w_{eff}/s). Odniesiono się do krzywej Waltza dedykowanej dla eko-cementów o deklarowanej minimalnej klasie wytrzymałości 42,5MPa (28 dni dojrzewania). Zastosowano normową wytrzymałość charakterystyczną na ściskanie dla eko-cementu klasy 42,5 oznaczaną na próbkach wzorcowej zaprawy cementowej o proporcjach jak dla składu

normowego (eko-cement z dynamiką narastania wytrzymałości wczesnej jako normalna – N). Zgodnie ze wzorami metody B. Bukowskiego wyznaczono masy składników podstawowych przypadające na objętość 1m³ eko-fibromieszanki cementowo-szkłanej (masy: eko-cementu, granulatów szkła drobnego grupy frakcji 0/2,0 mm i 0/4,0 mm; granulatu szkła grubego grupy frakcji 0/8,0mm; wody zarobowej efektywnej). Masy pyłu krzemionkowego, mączki szkła sodowo-wapniowego, zeolitu klinoptilolitowego oraz odpadowych wiórów stalowych wyznaczono metodą analityczno-doświadczalną.

Wyznaczone metodą B. Bukowskiego masy składników porównano do mas wyznaczonych metodą czterech równań. Warunek wytrzymałościowy w postaci dwóch wzorów Hummela (nie stosowano wzoru J. Bolomeya) pozwolił określić średnią wartość wytrzymałości charakterystycznej na ściskanie (R₂₈) po 28 dniach dojrzewania stwardniałych próbek cylindrycznych.

Wzory wytrzymałościowe Hummela w postaci ogólnej (1 i 3) oraz według modyfikacji własnej (2 i 4) przedstawiono poniżej.

$$R_{28} = \frac{1000}{9c} \div \frac{1000}{12c} \quad (1)$$

$$R_{28} = \frac{1000}{9 \frac{w_{eff}}{s}} \div \frac{1000}{12 \frac{w_{eff}}{s}} \text{ gdzie } s = c_1 + m_{pk} \cdot k_2 + m_{zk} \cdot k_3 \quad (2)$$

$$R_{28} = R_c^x \cdot \sqrt[3]{\frac{c}{w}} \quad (3)$$

$$R_{28} = R_s^x \cdot \sqrt[3]{\frac{s}{w_{eff}}} \text{ gdzie } s = c_1 + m_{pk} \cdot k_2 + m_{zk} \cdot k_3 \quad (4)$$

Opis symboliki użytej we wzorach (1-4): R₂₈ – przewidywana wytrzymałość charakterystyczna na ściskanie określona na próbkach cylindrycznych po 28 dniach dojrzewania kompozytu [MPa], w – masa wody (aktywatora) wyznaczona na 1m³ kompozytu [kg/m³], c – masa spoiwa hydraulicznego wyznaczona na 1m³ kompozytu [kg/m³], w_{eff} – masa wody efektywnej wyznaczona na 1m³ eko-fibrokompozytu [kg/m³], s – masa eko-spoiva pucolanowego rodzaju CEM IV wyznaczona na 1m³ eko-fibrokompozytu [kg/m³], R_c^x – wytrzymałość normowa spoiwa hydraulicznego określona po 28 dniach dojrzewania próbek zaprawy normowej [MPa], R_s^x – wytrzymałość normowa eko-spoiva rodzaju CEM IV określona po 28 dniach dojrzewania próbek zaprawy normowej [MPa], indeks górny „x” dla wytrzymałości normowej R_c^x i R_s^x – przyjmowany z zakresu 0,78-0,82 [bezwymiarowy], c₁ – zredukowana masa eko-spoiva cementowego pucolanowego rodzaju CEM IV poniżej granicznej wartości normowej wyznaczona na 1 m³ eko-fibrokompozytu [kg/m³], m_{pk} – masa pyłu krzemionkowego [kg/m³], m_{zk} – masa zeolitu klinoptilolitowego [bezwymiarowe].

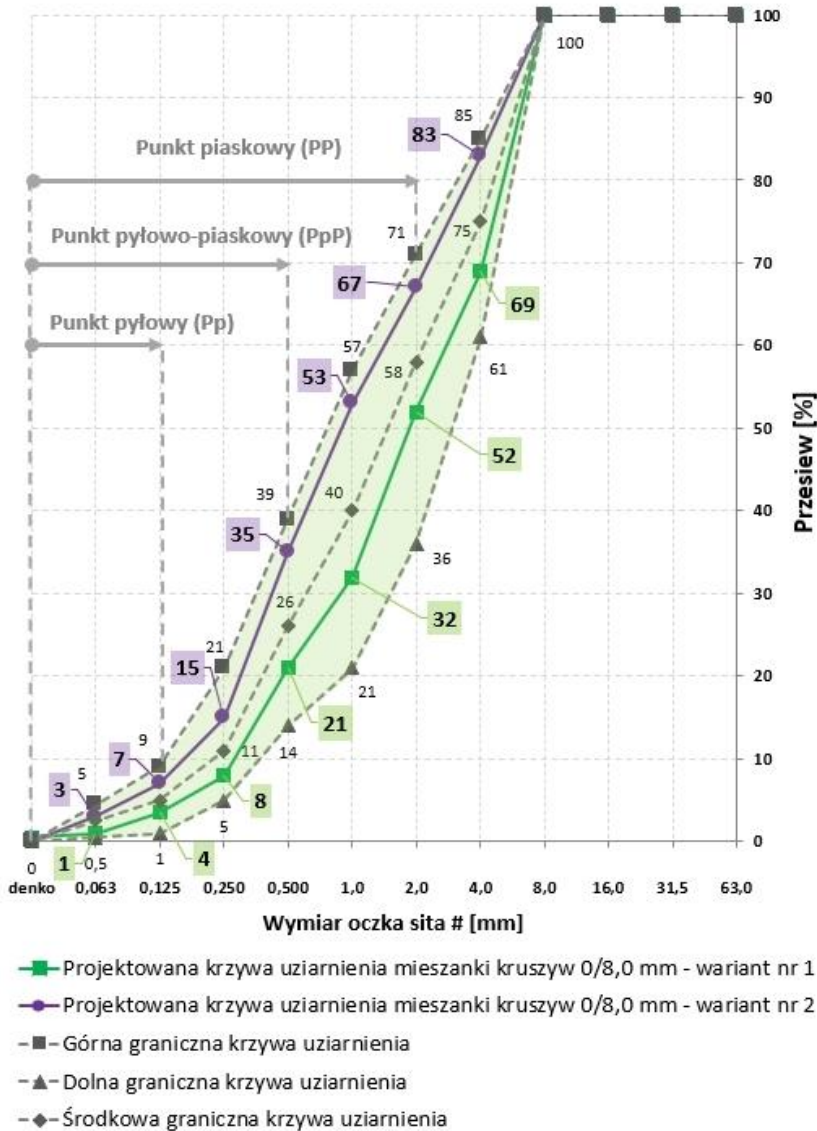
Równanie drugiej metody umożliwiło zweryfikowanie warunku szczelności, tj. suma absolutna objętości składowych, suma ilorazów mas i gęstości objętościowych wszystkich składników eko-fibromieszanki. Ilość efektywnej wody zarobowej, niezbędnej do uzyskania założonej klasy konsystencji (S2/S3), wyznaczono za pomocą równania trzeciego, tj. spełnienia warunku konsystencji dla eko-fibromieszanki. Stosując równanie czwarte metody wyznaczono objętość zaprawy w składach eko-fibrokompozytów.

Ostatecznej korekty składów ilościowych próbek referencyjnych oraz poddanych modyfikacji odpadowymi wiórami stalowymi dokonano po przeprowadzonej analizie

wyników badań w zakresie wytrzymałości mechanicznej. Ustalono wartość współczynnika tempa wzrostu wytrzymałości wczesnej dla eko-fibrokompozytu jako umiarkowane, tj. $f_{cm2}/f_{cm28} = 0,28 \pm 0,01$ ($f_{cm,2}$, f_{cm28} stanowią wytrzymałości średnie na ściskanie określone po 2 i 28 dniach pielęgnacji stwardniałych próbek cylindrycznych).

Przykłady dwóch wariantów projektowanych krzywych uziarnienia (konstrukcje szklanych stosów okruszowych) przedstawiono na rysunku 1.

Warianty projektowanych krzywych uziarnienia stosów okruszowych grupy frakcji 0/8,0 mm eko-fibrokompozytów cementowo-szklanych



Rysunek 1. Dwa warianty projektowanych krzywych uziarnienia szklanych stosów okruszowych eko-fibrokompozytów cementowo-szklanych (krzywe uziarnienia 0/8,0 mm) [opracowanie własne]

4. Metodyka badawcza

Dopuszczono do badań laboratoryjnych próbki cylindryczne spełniające wymagania w zakresie kształtu oraz wymiarów (uwzględniono tolerancje wymiarów rzeczywistych oraz dopuszczalne odchyłki w zakresie kształtu). Dokonano sprawdzenia próbek poprzez pomiar masy i gęstości w stanie pełnego nasycenia wodą w czasie nieprzekraczającym 1 h od zakończenia etapu pielęgnacji. Próbki nie spełniające wymagań normowych odrzucono z grupy reprezentatywnej lub poddano procesowi szlifowania precyzyjnego powierzchni podlegających działaniu obciążenia zewnętrznego (spełnienie warunku równoległości i płaskości podstaw próbek). Monitorowano za pomocą mobilnego rejestratora jakości zasilania wartości napięcia i natężenia prądu elektrycznego podczas pracy maszyny wytrzymałościowej. Przeprowadzono kontrolę ryzyka powstawania skokowych zmian parametrów zasilania negatywnie wpływających na jednostajność przyrostu obciążenia w funkcji czasu [59].

Podstawowe urządzenia miernicze, niezbędne do wyznaczenia wartości współczynnika Poissona ($\nu = (\varepsilon_{\perp} / \varepsilon_{\parallel})$), stanowił układ dwóch wzorcowanych samonośnych ekstensometrów określających przemieszczenia liniowe (konfiguracja ekstensometrów Epsilon 3975 i 3542RA to: 3975-150M-ST oraz 3542RA-150M-600M-ST). Próbki cylindryczne reprezentatywne wprowadzono w stan naprężeń ściskających (przyrost jednostajny obciążenia statycznego) przy użyciu maszyny wytrzymałościowej typu Controls 3000 kN (klasa I, maszyna z napędem hydraulicznym).

Badania wartości współczynnika Poissona (ν) określono dla normowych próbek cylindrycznych 150x300 mm po 28, 56 i 90 dniach dojrzewania eko-fibrokompozytu cementowo-szklanego w temperaturze wody $T_w = 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ (niepewność wymiaru średnicy $u = \pm 1,0$ mm; niepewność procentowa $u = \pm 0,7\%$; niepewność wymiaru wysokości $u = \pm 2,0$ mm; niepewność procentowa $u = \pm 0,7\%$). Zasadniczy etap pomiarów poprzedzono kalibracją ekstensometrów za pomocą wzorcowanego kalibratora oraz sprawdzeniem poprawności pracy czujników przemieszczeń liniowych (kalibrator Epsilon typu 3590AT wraz z adapterami, rozdzielczość urządzenia 0,001 mm). Przeprowadzona kalibracja ekstensometrów potwierdziła liniowy charakter pracy ekstensometrów dla danych warunków środowiskowych.

Określono zakres pomiarowy dla prasy hydraulicznej (klasa I) o wartości 30-3000 kN (zakres wzorcowany i sprawdzany dla obciążenia generującego naprężenia ściskające). Ekstensometr średnicowy ramkowy typu Epsilon 3975 (klasa urządzenia 0,2; błąd względny $q_{le} = \pm 0,2\%$) posiadał bazę pomiarową długości $L_0 = 2,0$ mm (L_{0B}), zamocowany został w odległości $150,0 \pm 1,5$ mm od górnej podstawy próbki cylindrycznej wycenowanej względem kolistych znaczników koncentrycznych dolnej płyty ściskającej. Przyjęto przemieszczenie maksymalne trzpienia ekstensometru Epsilon typu 3975 o wartości $\pm 1,5$ mm na teoretycznej długości bazy pomiarowej ($L_{0B} = 2,0$ mm) w czasie pracy urządzenia w zakresie temperatury (-40°C)-($+100^{\circ}\text{C}$). Pomiar przemieszczeń liniowych pionowych umożliwił ekstensometr osiowy uśredniający Epsilon typu 3542RA (klasa urządzenia 0,5; błąd względny $q_{le} = \pm 0,5\%$) z bazą pomiarową długości $L_0 = 150$ mm (baza teoretyczna z przemieszczeniem pionowym maksymalnym w górę $+6$ mm i w dół -6 mm, $L_{0A} = 150$ mm). Wykonano centrowanie próbki względem osi pionowej przestrzeni roboczej maszyny wytrzymałościowej z dokładnością do 1,0% średnicy cylindra.

Dobrano wartości współczynników rozszerzalności liniowej materiału tworzącego konstrukcję ramki ekstensometru (λ_1) oraz śruby dociskowej z trzpieniem polimerowy (λ_2) odpowiedzialnym za stabilizację urządzenia w płaszczyźnie poziomej próbki. Pierwotne wartości (λ_1 i λ_2 , rozszerzalność cieplna materiału) skorygowano współczynnikiem (γ_1) w funkcji zmian wilgotności względnej i temperatury powietrza w chwili badania (warunki środowiskowe odpowiednio: $T = 21,3 \pm 0,1^\circ\text{C}$; $W = 46 \pm 1\%$). Końcowe wartości (λ_1 i λ_2) zmodyfikowano współczynnikiem (γ_2) w funkcji wilgotności i temperatury pracy ekstensometrów w jakich zostało wykonane wzorcowanie czujników przemieszczeń liniowych oraz deklarowane długości baz pomiarowych. Wyznaczono wartości długości baz pomiarowych, tj. L_0 – długość bazy pomiarowej deklarowanej i $L_{0(R)}$ – długość rzeczywista bazy pomiarowej w funkcji zmiany warunków środowiskowych.

Pierwotne (referencyjne) wymiary liniowe ekstensometrów Epsilon typu 3975 i 3542RA zweryfikowano wzorcowaną suwmiarką elektroniczną (działka elementarna równa 0,01 mm) w celu dokonania porównania różnic zmian przed i po wykonanym badaniu (weryfikacja dla warunków środowiskowych w chwili dokonywania pomiarów).

Wartości odkształceń liniowych (ε_{\parallel}) i (ε_{\perp}) wyznaczono ze wzorów ogólnych ($\varepsilon = \Delta L/L_0$, gdzie: $\Delta L = L_1 - L_0$), tj. dla ekstensometru przemieszczeń liniowych pionowych (5 i 6) oraz dla ekstensometru przemieszczeń liniowych poprzecznych (7 i 8):

$$\varepsilon_{\parallel} = \frac{\Delta L_A}{L_{0A(R)}} \quad (5)$$

$$\Delta L_A = L_{1A} - L_{0A(R)} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{\perp} = \frac{\Delta L_B}{L_{0B(R)}} \quad (7)$$

$$\Delta L_B = L_{1B} - L_{0B(R)} \quad (8)$$

Opis symboliki użytej we wzorach (5-8): (ε_{\parallel}) i (ε_{\perp}) – wartości odkształceń liniowych podłużnych i poprzecznych [bezwymiarowe], ΔL_A – różnica pomiędzy długością przemieszczeń liniowych podłużnych (wzdłuż pobocznic próbki) po obciążeniu próbki cylindrycznej a wartością rzeczywistej długości bazy pomiarowej ekstensometri Epsilon typu 3975 [mm lub μm], ΔL_B – różnica pomiędzy długością przemieszczeń liniowych poprzecznych po obciążeniu próbki cylindrycznej a wartością rzeczywistej długości bazy pomiarowej ekstensometri Epsilon typu 3542RA [mm lub μm], L_{1A} – zmiana długości początkowej po obciążeniu próbki cylindrycznej (wzdłuż pobocznic próbki) zmierzonej ekstensometrem Epsilon typu 3975 [mm lub μm], L_{1B} – zmiana długości początkowej po obciążeniu próbki cylindrycznej zmierzonej ekstensometrem Epsilon typu 3542RA [mm lub μm], $L_{0A(R)}$ – rzeczywista długość bazy pomiarowej ekstensometri Epsilon typu 3975 [mm lub μm], $L_{0B(R)}$ – rzeczywista długość bazy pomiarowej ekstensometri Epsilon typu 3542RA [mm lub μm].

Bezwymiarowe wartości odkształceń liniowych podłużnych (ε_{\parallel}) obliczono na podstawie ilorazu zmiany wartości przemieszczeń liniowych podłużnych do rzeczywistej długości bazy pomiarowej $L_{0A(R)}$ ekstensometru Epsilon typu 3542RA. Analogicznie obliczono bezwymiarowe wartości odkształceń liniowych poprzecznych (ε_{\perp}), tj. iloraz zmiany wartości przemieszczeń liniowych poprzecznych do rzeczywistej długości bazy pomiarowej $L_{0B(R)}$ ekstensometru Epsilon typu 3975.

Wartości współczynnika Poissona wyznaczono podczas pomiarów siecznego modułu Younga (sieczny moduł sprężystości podłużnej $E_{c,s}$ oraz moduł sprężystości początkowy $E_{c,0}$) z zastosowaniem dodatkowego ekstensometru ramkowego typu 3975 rejestrującego wartości poprzecznych przemieszczeń liniowych odniesionych do długości bazy pomiarowej urządzenia [60]. Dokonano sprawdzenia komponentów maszyny wytrzymałościowej (łańcuch sprawdzeń między wzorcowaniami), tj. wartość siły wskazywanej i rzeczywistej, zakres wskazań, rejestr przesuwu tłoka (czujnik przemieszczeń liniowych), oraz płaskość, twardość i chropowatość powierzchni płyt dociskowych (pomocniczych i wkładek dystansowych).

Zamocowane próbki w przestrzeni testowej poddano obciążeniu generującego naprężenia $\sigma = 5,0 \pm 1,0$ MPa. Zastosowano sterowanie prędkością naprężeń w funkcji czasu o wartości $0,6 \pm 0,2$ MPa/s (przyrost jednostajny bez skoku siły). Wyznaczono wartość wytrzymałości średniej na ściskanie próbek cylindrycznych $f_{cm,cyl}$ oraz pojedyncze wyniki wytrzymałości $f_{ck,cyl}$ dla serii próbek (liczba próbek $n = 3$ dla każdej serii). Oceniono formy zniszczenia próbek jako prawidłowe, zgodne z standardowymi modelami normowymi (odpryski powierzchniowe oraz pionowe rysy niszczące propagujące wzdłuż poboczniczy cylindra).

Przeprowadzono badania siecznego ustabilizowanego modułu Younga oraz współczynnika Poissona metodą normową „A”. Wyznaczono wartości naprężeń górnych $\sigma_a = f_{cm,cyl}/3$, naprężeń dolnych $\sigma_b = (0,15 \pm 0,05) \cdot f_{cm,cyl}$ i naprężeń wstępnych $\sigma_p = 0,5 \pm 0,1$ MPa. Próbkę cylindryczną wprowadzono w stan wstępnych naprężeń ściskających (σ_p) w dwóch okresach po 20 ± 1 s i jednym okresie 60 ± 1 s (etap zawarty między 5 i 6) a następnie obciążono do wartości naprężeń dolnych (σ_b) oddziałujących w okresach 4×20 s (4 okresy wartości σ_b oraz 2 okresy po spadku wartości naprężeń z σ_a do wartości σ_b). Badanie kontynuowano do etapu wprowadzenia naprężeń górnych (σ_a) w okresach 3×20 s. Wykonano 3 cykle obciążenia próbek cylindrycznych do wartości (σ_a) i odciążenia do wartości (σ_b). Koniec badania określono w chwili osiągnięcia wartości naprężeń górnych (σ_a). Odstąpiono od wprowadzenia naprężeń (σ_{max}) równych wartości wytrzymałości charakterystycznej na ściskanie $f_{ck,cyl}$ ze względu na ryzyko przekroczenia dopuszczalnych wartości przemieszczeń dla trzpieni ekstensometrów [61].

Schemat procedury badawczej przy wyznaczaniu mierzonych wielkości dla wyznaczenia wartości współczynnika Poissona przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Rodzaje mierzonych wielkości dla pomiaru wartości współczynnika Poissona dla próbek cylindrycznych wykonanych z eko-fibrokompozytu cementowo-szkalanego

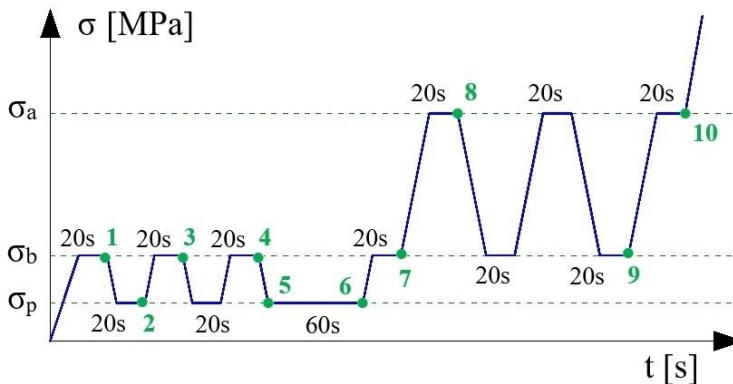
Lp.	Schemat procedury badawczej, mierzone wielkości dla przemieszczeń podłużnych i poprzecznych:
1.	Zapis wartości σ_b^m .
2.	Zerowanie dwóch ekstensometrów przemieszczeń liniowych.
3.	Wyznaczenie wartości $\varepsilon_{b,2i}$.
4.	Wyznaczenie wartości $\varepsilon_{b,3i}$.
5.	Pierwsze sprawdzenie warunku: $\varepsilon_{b,3i} - \varepsilon_{b,2i} \leq 10\%$.
6.	Drugie sprawdzenie warunku: $\varepsilon_{b,3i} - \varepsilon_{b,2i} \leq 20\%$.
7.	Wyznaczenie wartości $\varepsilon_{b,0i}$, wyznaczenie średniej wartości $\varepsilon_{b,0}$, zapis wartości $\sigma_{b,0}^m$.
8.	Wyznaczenie wartości $\varepsilon_{a,1i}$, wyznaczenie średniej wartości $\varepsilon_{a,1}$, zapis wartości $\sigma_{a,1}^m$.
9.	Wyznaczenie wartości $\varepsilon_{b,2i}$, wyznaczenie średniej wartości $\varepsilon_{b,2}$, zapis wartości $\sigma_{b,2}^m$.
10.	Wyznaczenie wartości $\varepsilon_{a,3i}$, wyznaczenie średniej wartości $\varepsilon_{a,3}$, zapis wartości $\sigma_{a,3}^m$.

11.	Wyznaczenie wartości siecznego ustabilizowanego modułu sprężystości podłużnej (moduł Younga) $E_{c,s} = \frac{(\sigma_{a,3}^m - \sigma_{b,2}^m)}{(\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{b,2})}$
12.	Wyznaczenie wartości współczynnika Poissona $\nu = \frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\parallel}}$

Źródło: Opracowanie własne.

Opis symboliki użytej we wzorach w tabeli 1: $\sigma_{a,3}^m$ – naprężenia odpowiadające nominalnemu górnemu naprężeniu (σ_a) [MPa], $\sigma_{b,2}^m$ – naprężenia odpowiadające nominalnemu dolnemu naprężeniu (σ_b) [MPa], $\varepsilon_{a,3}$ – średnia wartość odkształcenia przy górnym naprężeniu w cyklu trzeciego obciążenia [wartość bezwymiarowa]; $\varepsilon_{b,2}$ – średnia wartość odkształcenia przy dolnym naprężeniu w cyklu drugiego obciążenia [wartość bezwymiarowa]; $\sigma_{p,2}^m$ – naprężenie wstępne zarejestrowane po drugim cyklu obciążenia [MPa], $\varepsilon_{p,2}$ – średnia wartość odkształcenia przy wstępnym naprężeniu w cyklu drugiego obciążenia [wartość bezwymiarowa].

Szczegółowy przebieg badania (algorytm postępowania) zawarto na wykresie zależności naprężeń normalnych ściskających (σ_a , σ_b i σ_p) w funkcji czasu (t) przedstawiono na rysunku 2.



Rysunek 2. Wykres przebiegu badania modułu Younga i współczynnika Poissona metodą „A”. Opis punktów charakterystycznych [opracowanie własne]

5. Analiza wyników

Uzyskane wartości (odczyty) mierzonych wielkości w zakresie średniej wytrzymałości na ściskanie ($f_{cm,cyl}$) oraz współczynnika Poissona (ν , określonego metodą „A”), podlegały dalszej analizie, tj. przeprowadzono statystykę opisową oraz rachunek błędów (niepewność pomiaru). Próbkę cylindryczną otrzymały indywidualne, niepowtarzalne kody, jednoznacznie określające rodzaj procentowej modyfikacji materiałowej mikrostruktury eko-fibrokompozytu cementowo-szklanego. Dozowanie odpadowych wiórów stalowych odniesiono względem zaprojektowanej masy układu spoiw (całkowita masa składowych spoiwa), tj. procentowa wartość eko-cementu pucolanowego rodzaju CEM IV, pyłu krzemionkowego oraz zeolitu klinoptilolitowego (%m.s.). Nazewnictwo w przyjętym systemie kodowania przedstawiono w tabeli 2.

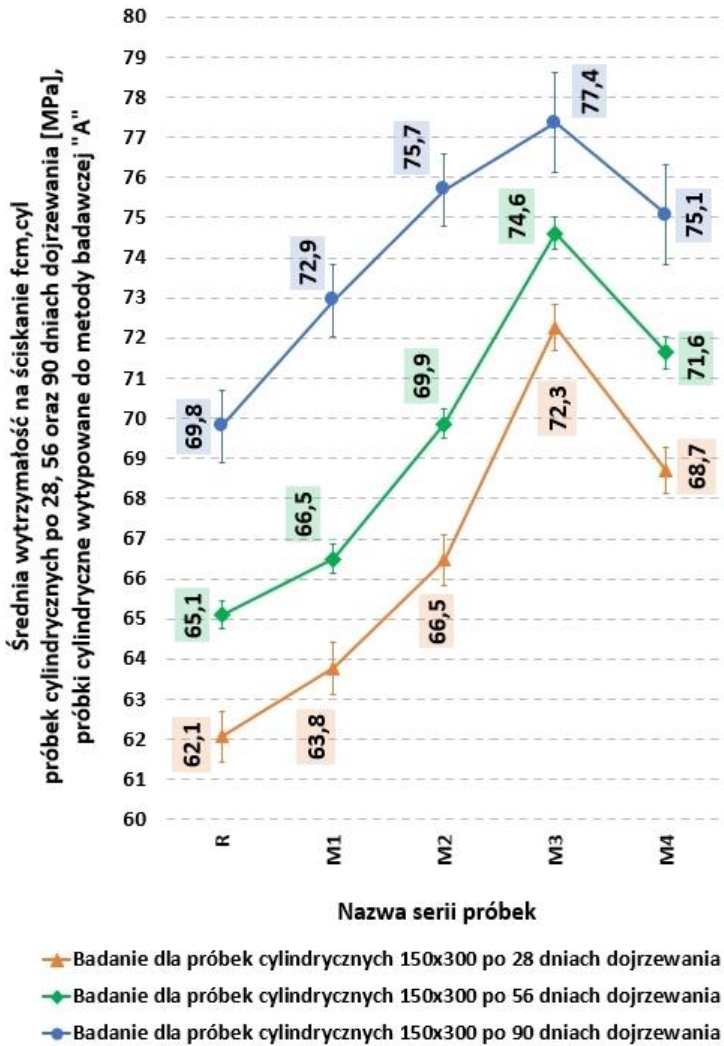
Tabela 2. System nazewnictwa próbek cylindrycznych 150x300mm eko-fibrokompozytu cementowo-szklanego, tj. R – seria próbek referencyjnych (n = 3), M1, M2, M3 i M4 – serie próbek modyfikowanych odpadowym dodatkiem wiórów stalowych (n = 3 dla każdej modyfikowanej serii próbek eko-fibrokompozytu cementowo-szklanego).

Lp.	Nazwa serii próbek:	Nazwa próbki w danej serii:	Ilość dozowanych odpadowych wiórów stalowych:	
			[% m. s.]:	[kg/m ³]:
1.	R	R.A	0	0
2.		R.B		
3.		R.C		
4.	M1	M1.A	5,0 ±0,5	23 ±1
5.		M1.B		
6.		M1.C		
7.	M2	M2.A	10 ±1	45 ±1
8.		M2.B		
9.		M2.C		
10.	M3	M3.A	15 ±1	68 ±1
11.		M3.B		
12.		M3.C		
13.	M4	M4.A	20 ±1	90 ±1
14.		M4.B		
15.		M4.C		

Źródło: Opracowanie własne.

Największą wartość średniej wytrzymałości na ściskanie ($f_{cm,cyl}$) uzyskała seria próbek cylindrycznych M3 po 28, 56 i 90 dniach dojrzewania w warunkach normowych, tj. $72,3 \pm 0,8$ MPa; $74,6 \pm 0,8$ MPa oraz $77,4 \pm 0,4$ MPa. Wartości przyrostów średniej wytrzymałości na ściskanie ($f_{cm,cyl}$) próbek cylindrycznych serii M3 w odniesieniu do serii referencyjnej R, uzyskanych po 28, 56 i 90 dniach dojrzewania, wyniosły odpowiednio +16,4%; +14,6% oraz +10,9%. Najmniejszą wartość średniej wytrzymałości na ściskanie ($f_{cm,cyl}$) zaobserwowano dla próbek serii referencyjnej R, tj. $62,1 \pm 0,6$ MPa (28 dni dojrzewania), $65,1 \pm 0,4$ MPa (56 dni dojrzewania) oraz $69,8 \pm 0,9$ MPa po 90 dniach dojrzewania eko-fibrokompozytu cementowo-szklanego.

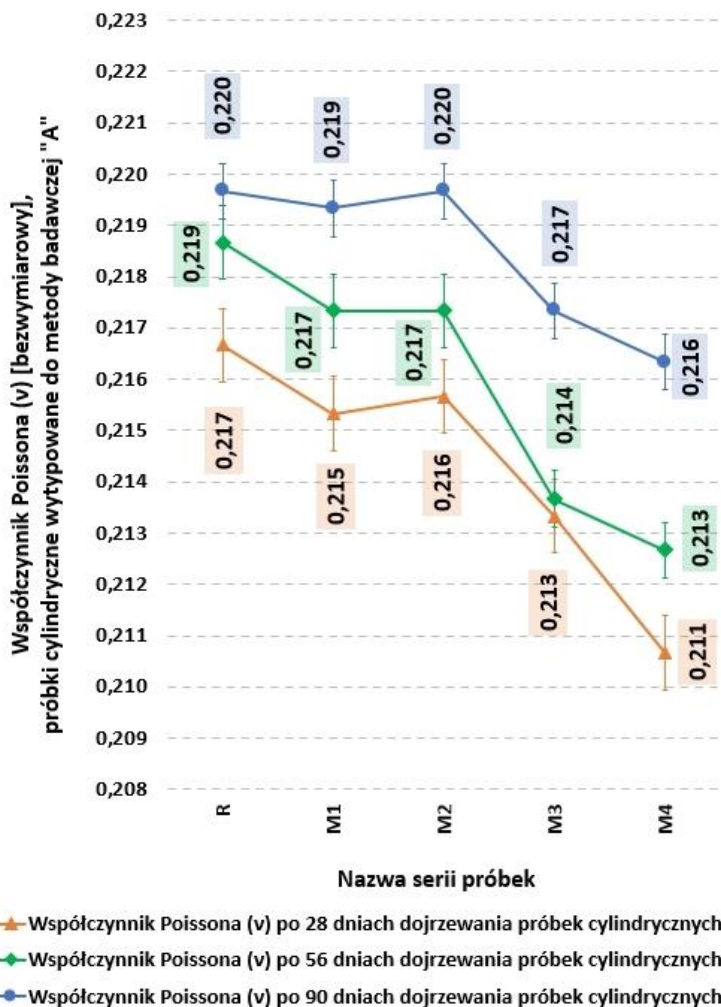
Zbiórce wyniki badań średniej wytrzymałości na ściskanie ($f_{cm,cyl}$) próbek cylindrycznych eko-fibrokompozytu cementowo-szklanego przedstawiono na rysunku 3.



Rysunek 3. Wyniki badań średniej wytrzymałości na ściskanie ($f_{cm,cyl}$) próbek cylindrycznych. Wartości mierzonych wielkości uzyskane po 28, 56 i 90 dniach dojrzewania eko-fibrokompozytu cementowo-szklanego [opracowanie własne]

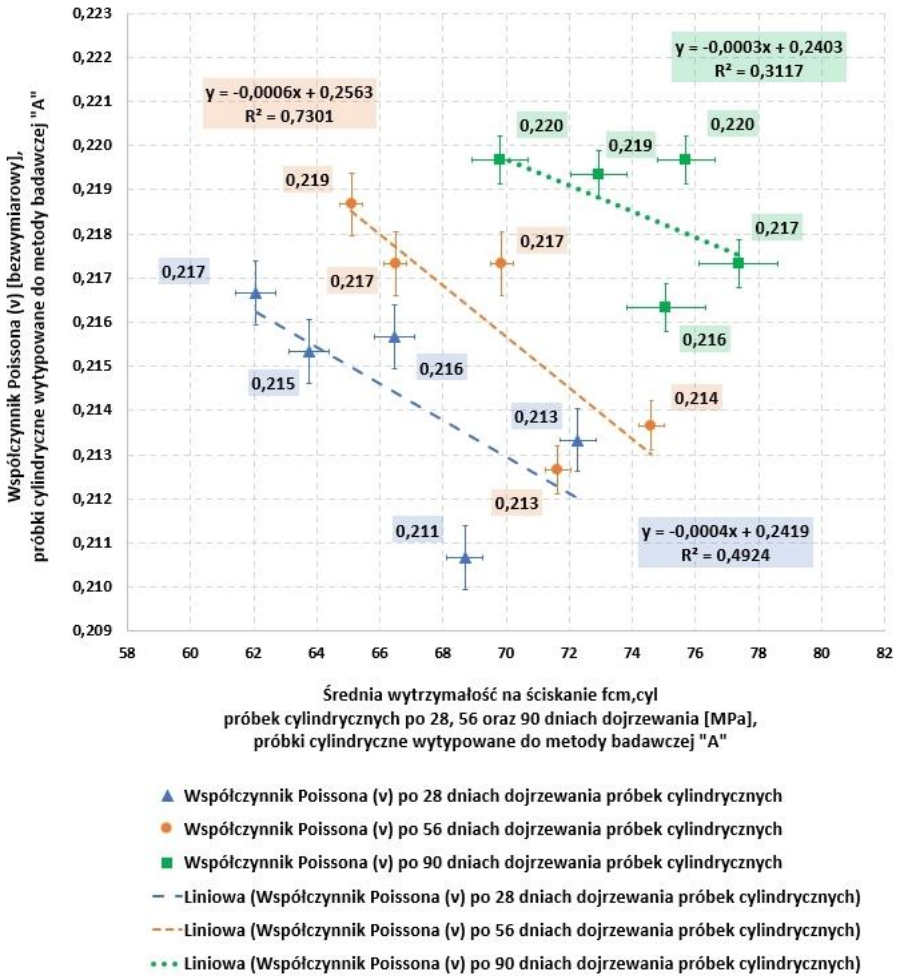
Wartości współczynnika Poissona (ν) próbek cylindrycznych, podlegających modyfikacji materiałowej odpadowymi wiórami stalowymi, wykazywały trend spadkowy dla wszystkich okresów badawczych. Największe wartości współczynnika (ν) uzyskały próbki serii referencyjnej R, odpowiednio po 28, 56 i 90 dniach dojrzewania eko-fibrokompozytu, tj. $0,217 \pm 0,001$; $0,219 \pm 0,001$ oraz $0,220 \pm 0,001$. Największe wartości spadków uzyskała seria próbek M4 po 28, 56 i 90 dniach dojrzewania eko-fibrokompozytu, tj. $0,211 \pm 0,001$; $0,213 \pm 0,001$ oraz $0,216 \pm 0,001$ (spadki w wartościach procentowych między serią referencyjną R i M4 wyniosły odpowiednio -2,8%; -2,8% oraz -1,8%).

Zbiorecze wyniki badań wartości współczynnika Poissona określone dla próbek cylindrycznych eko-fibrokompozytu cementowo-szklanego przedstawiono na rysunku 4.



Rysunek 4. Wyniki badań wartości współczynnika Poissona (ν) dla próbek cylindrycznych. Wartości mierzonej wielkości uzyskane po 28, 56 i 90 dniach dojrzewania eko-fibrokompozytu cementowo-szklanego [opracowanie własne]

Zbiorcze wyniki zależności wartości współczynnika Poissona (ν) w funkcji wartości średniej wytrzymałości na ściskanie ($f_{cm,cyl}$) próbek cylindrycznych eko-fibrokompozytu cementowo-szklanego przedstawiono na rysunku 5.



Rysunek 5. Wykres zależności wartości współczynnika Poissona (ν) w funkcji wartości średniej wytrzymałości na ściskanie ($f_{cm,cyl}$) eko-fibrokompozytowych próbek cylindrycznych [opracowanie własne]

Podstawowe wartości statystyk opisowych mierzonych wielkości (średnia wytrzymałość na ściskanie $f_{cm,cyl}$ oraz współczynnik Poissona) dla próbek cylindrycznych eko-fibrokompozytu cementowo-szklanego przedstawiono na rysunku 6.

*Wpływ dodatku odpadowych wiórów stalowych
na wartość współczynnika Poissona eko-fibrokompozytów cementowo-szkłanych*

Bł. std. (Skośność)	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,225	1,225	1,225	1,225	1,225
	Skośność	-0,7	-1,4	1,7	-1,6	0,0	-0,935	0,935	-0,935	-1,293
Standard. (Błąd)	0,8	0,7	1,0	1,0	0,5	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Wsp.zmn.	2,2	1,9	2,7	2,4	1,2	0,705	0,709	0,708	0,976	0,725
P. ufności odch. std. (+95,0%)	8,6	7,6	11,1	10,8	5,0	0,010	0,010	0,010	0,013	0,010
P. ufności odch. std. (-95,0%)	0,7	0,6	0,9	0,9	0,4	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Odch.std	1,4	1,2	1,8	1,7	0,8	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Wariancja	1,9	1,5	3,1	3,0	0,6	0,003	0,003	0,003	0,004	0,003
Kwartył. (Rozstęp)	2,7	2,3	3,2	3,2	1,6	0,003	0,003	0,003	0,004	0,003
Rozstęp	2,7	2,3	3,2	3,2	1,6	0,218	0,217	0,217	0,215	0,212
Percentyl (90,000)	63,3	64,7	68,5	73,5	69,5	0,218	0,217	0,217	0,215	0,212
Percentyl (80,000)	63,3	64,7	68,5	73,5	69,5	0,218	0,217	0,217	0,215	0,212
Percentyl (70,000)	63,3	64,7	68,5	73,5	69,5	0,217	0,215	0,216	0,214	0,211
Percentyl (60,000)	62,3	64,2	65,6	73,0	68,7	0,217	0,215	0,216	0,214	0,211
Percentyl (50,000)	62,3	64,2	65,6	73,0	68,7	0,217	0,215	0,216	0,214	0,211
Percentyl (40,000)	62,3	64,2	65,6	73,0	68,7	0,215	0,214	0,214	0,211	0,209
Percentyl (30,000)	60,6	62,4	65,3	70,3	67,9	0,215	0,214	0,214	0,211	0,209
Percentyl (20,000)	60,6	62,4	65,3	70,3	67,9	0,215	0,214	0,214	0,211	0,209
Percentyl (10,000)	60,6	62,4	65,3	70,3	67,9	0,218	0,217	0,217	0,215	0,212
Górny (Kwartył.)	63,3	64,7	68,5	73,5	69,5	0,215	0,214	0,214	0,211	0,209
Dolny (Kwartył.)	60,6	62,4	65,3	70,3	67,9	0,218	0,217	0,217	0,215	0,212
Maksimum	63,3	64,7	68,5	73,5	69,5	0,215	0,214	0,214	0,211	0,209
Minimum	60,6	62,4	65,3	70,3	67,9	0,650	0,646	0,647	0,640	0,632
Mediana	62,3	64,2	65,6	73,0	68,7	0,217	0,215	0,216	0,214	0,211
Harmon. (Średnia)	62,0	63,8	66,4	72,2	68,7	0,217	0,215	0,216	0,213	0,211
Geometr. (Średnia)	62,1	63,8	66,5	72,3	68,7	0,217	0,215	0,216	0,213	0,211
Średnia Winsora (5,0%)	62,1	63,8	66,5	72,3	68,7	0,217	0,215	0,216	0,213	0,211
Średnia przycięta (5,0%)	62,1	63,8	66,5	72,3	68,7	0,217	0,215	0,216	0,213	0,211
Ufność (95,0%)	65,5	66,8	70,9	76,5	70,7	0,220	0,219	0,219	0,219	0,214
Ufność (-95,0%)	58,7	60,8	62,1	68,0	66,7	0,213	0,212	0,212	0,208	0,207
Średnia	62,1	63,8	66,5	72,3	68,7	0,217	0,215	0,216	0,213	0,211
Okres badań	28 dni					28 dni				
Rodzaj badania	Wytrzymałość średnia na ściskanie $f_{cm,cyl}$ próbek cylindrycznych					Współczynnik Poissona				
Nazwa serii próbek	R	M1	M2	M3	M4	R	M1	M2	M3	M4
Lp.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.

Rysunek 6. Wartości statystyk opisowych mierzonych wielkości: średnia wytrzymałość na ściskanie eko-fibrokompozytowych próbek cylindrycznych ($f_{cm,cyl}$) oraz wartość współczynnika Poissona (ν) wyznaczona metodą pomiarową „A”. Statystyki dla mierzonych wielkości po 28 dniach dojrzewania próbek [opracowanie własne]

6. Dyskusja

Wyniki badań własnych porównano do danych zawartych w publikacjach naukowych dotyczących modyfikacji materiał mikrostruktury betonów cementowych. Wytypowane artykuły z przykładami wyników badań doświadczalnych poruszały ogólną problematykę współczynnika Poissona dla betonu wysokiej wytrzymałości jak również

wplywu nowej generacji zbrojenia rozproszonego na wytrzymałość mechaniczną fibrobetonu NPR-FRC (materiały auksetyczne w formie włókien NPRF o ujemnym współczynniku Poissona).

Zagadnienie wplywu rodzaju kruszywa mineralnego na wartość współczynnika Poissona poruszył Persson B. w artykule naukowym dotyczacym betonu cementowego wysokiej wytrzymałości (HPC) [62]. Naukowiec zaprojektował stopy okruchowe na bazie kruszywa naturalnego grupy frakcji 0/8,0 mm i 8,0/16,0 mm oraz kruszywa łamanego grup frakcji 8,0/11,0 mm i 11,0/16,0 mm (granit, piaskowiec kwarcytowy i piasek kwarcowy, zmienna wilgotność kruszyw). Naukowiec uzyskał wyniki wytrzymałości charakterystycznej na ściskanie ($f_{ck,cube}$) dla wysuszonych próbek betonu HPC w zakresie od 50-114 MPa (28 dni dojrzewania) [62]. Pomiar wartości współczynnika (ν) przeprowadzono po 28 dniach dojrzewania próbek cylindrycznych o średnicy 55 mm i wysokości 300 mm. Badacz uzyskał rozrzut wartości współczynnika (ν) w zakresie 0,11-0,18. Największe wartości (ν) określono dla betonu na kruszywie granitowym frakcji 11,0/16,0 mm ($\nu = 0,166-0,174$); najmniejsze wartości w przypadku kruszywa kwarcytowego frakcji 8,0/11,0 mm i 11,0/16,0 mm ($\nu = 0,110-0,136$). Uznano za wartości pomijalne wilgotność kruszyw łamanych oraz wiek dojrzewania betonu na zmiany współczynnika Poissona [62]. Badania własne wykazały spadki współczynnika Poissona (szczegółowo opisane w podrozdziale 7) spowodowany redukcją odkształceń w kierunku podłużnym i poprzecznym (kompensacja naprężeń ścisających przez szkielet zbrojenia rozproszonego).

Tematykę wplywu dodatku włókien auksetycznych w betonie cementowym (FRC) na wartość współczynnika Poissona poruszyli badacze w artykule naukowym (badania metodą cyfrowej korelacji plamkowej DSCM) [63]. Ma Y. wraz z zespołem badawczym określali wytrzymałość mechaniczną dla betonu zbrojonego włóknami (NPRF) o ujemnym współczynniku Poissona $\nu = -(\varepsilon_{\perp}/\varepsilon_{\parallel})$. Rdzeń włókna NPRF o średnicy nominalnej $\varphi = 2,88$ mm, stanowił materiał PVA z uzwojeniem węglowym o średnicy nominalnej włókna $\varphi = 0,96$ mm (uzwojenie w formie pojedynczej helisy, długość całkowita włókna $l = 320$ mm). Włókna rozmieszczona w czterech warstwach po 4 sztuki w rzędzie (rozstaw pionowy i poziomy $a_1 = a_2 = 20$ mm, otulina $b_1 = 20$ mm). Zastosowano stałe dozowanie włókien jako zbrojenie ciągłe w ilości 0,3% udziału objętościowego betonu. Zbrojenie włóknami NPRF wpłynęło na wzrost wytrzymałości charakterystycznej na ściskanie o 18,5%; wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu o 43,2% i przy zginaniu o 24,9% [63]. Ujemna wartość współczynnika (ν) wpłynęła na zmniejszenie wartości odkształcenia plastycznego oraz poprawy zdolności absorpcji energii. Wyniki końcowe badań wykazały redukcję liczby zarysowań betonu, poprawę ciągliwości kompozytu oraz zwiększoną powierzchnię kontaktową rozciąganego włókna do matrycy cementowej. Wartość współczynnika (ν) wynikała od dobranego kąta nachylenia (nawijania) uzwojenia (θ) względem rdzenia włókna PVA ($\theta = 5, 10, 15, 20$ i 25°), tj. największa wartość (ν) wyniosła 0,223 dla próbek serii referencyjnej. Probki modyfikacje włóknami NPRF uzyskały spadki współczynnika (ν) w zakresie 0,206-0,172 [63]. Dodatek włókien wpłynął na redukcję współczynnika Poissona, jednak główną rolę odgrywał kąt uzwojenia włókien. Zaobserwować można wspólną zależność między badaniami własnymi (szczegóły w podrozdziale nr 7) jak i prowadzonych przez Ma Y. wraz z zespołem naukowym, tj. odpadowe wióry stalowe rozproszone lub włókna zbrojenia ciągłego NPRF redukowały wartość współczynnika Poissona (odmienne koncepcje zbrojenia).

7. Podsumowanie

Odpadowe wióry stalowe elementowe, spiralne oraz łukowe luźne, użyte w roli makrobrojenia rozproszonego, wpłynęły na zmiany:

- właściwości reologicznych próbek eko-fibromieszanek cementowo-szklnych:
 - spadek urabialności wynikający z dłuższego czasu mechanicznego zagęszczania mieszanki (zakres czasu zagęszczania dla mieszanki referencyjnej ustalono na 25 ± 5 s, mieszanki modyfikowane dodatkiem wiórów stalowych wykazały dłuższy czas zagęszczania w zakresie 40 ± 5 s). Przyczynę stanowił „szkielet zbrojeniowy” z wiórów stalowych, wynikający z koncentracji i nierównomiernie rozmieszczonego makrobrojenia w przestrzeni mikrostruktury próbek (blokowanie równomiernego i swobodnego rozplywu zaprawy między wiórami stalowymi),
 - osiadanie wiórów stalowych (koncentracja, brak występowania aglomeracji wiórów) w dolnej warstwie stwardniałego eko-fibrokompozytu (obszar próbki na wysokości 40 ± 10 mm występowania koncentracji wiórów stalowych, brak zachowania jednorodności materiału i równomiernego rozmieszczenia wiórów w objętości próbki cylindrycznej, rozwarstwienie eko-materiału przy dłuższym czasie zagęszczania mechanicznego). Przyczynę stanowiła większa masa wiórów stalowych w odniesieniu do masy grubego granulatu szklanego (osiadanie pod wpływem drgań mechanicznych frakcji o większej masie, tj. wiórów stalowych elementowych),
 - zmniejszenie średniej wartości opadu stożka pomiarowego, uzyskano klasę konsystencji S2 z zakresem opadu 60 ± 10 mm. Zachowano projektowaną klasę konsystencji dla zwiększonego dozowania domieszki upłynniającej z ilości $0,50 \pm 0,05\%$ do $0,70 \pm 0,05\%$ masy zaprojektowanego układu eko-spoiw. Przyczynę zmniejszenia wartości opadu stożka eko-fibromieszanki stanowiła obecność wiórów stalowych o powierzchniach na których koncentrowała się woda efektywna. Uzyskano zmniejszony opad eko-fibromieszanki wywołany klinowaniem się ziaren granulatu w obszarach koncentracji wiórów stalowych. Zaobserwowano efekt „sita” dla granulatu szklanego frakcji 4,0/8,0mm (blokowanie ziaren szkła na wiórach elementowych i spiralnych). Wystąpiło ograniczenie przepływu zaczynu spoiwowego przez przestrzenny szkielet zbrojeniowy utworzony z wiórów stalowych (spadek otulenia zaprawą lub zaczynem spoiwowym granulatu grubego frakcji 4,0/8,0 mm w miejscach koncentracji wiórów stalowych).
 - podwyższony wskaźnik wodno-spoiwoy (wzrost z wartości $0,425 \pm 0,015$ do $0,455 \pm 0,015$ przy stałym dozowaniu plastyfikatora i superplastyfikatora),
- mikrostruktury po 28, 56 i 90 dniach dojrzewania stwardniałych próbek eko-fibrokompozytu:
 - wzrost zawartości negatywnych makroporów powietrznych ($>A300$, tj. zakres średnicy porów 300-3400 μm , wskaźnik rozmieszczenia porów w matrycy spoiwowej $L = 0,25 \pm 0,02$) z wartości $3,8 \pm 0,2\%$ do $6,4 \pm 0,2\%$; Główna przyczyna wzrastającej zawartości porów to spadek urabialności oraz trudności z wypełnieniem zaprawą wolnych przestrzeni między makroporami powietrznymi (miejsca osiadających i koncentrujących się wiórów stalowych, brak otoczenia zaprawą wiórów stalowych oraz brak zapewnienia ciągłości struktury eko-materiału).
- wytrzymałości mechanicznej po 28, 56 i 90 dniach dojrzewania stwardniałych próbek eko-fibrokompozytu:

- trend wzrostowy średniej wartości wytrzymałości na ściskanie ($f_{cm,cyl}$) dla trzech okresów badawczych po 28, 56 i 90 dniach, tj. wzrost w zakresie (62,1 ±0,6)-(72,3 ±0,8) MPa; (65,1 ±0,4)-(74,6 ±0,8) MPa; (69,8±0,9)-(77,4 ±0,4) MPa. Przyczynę wzrostu wartości ($f_{cm,cyl}$) stanowiło wprowadzenie do składów eko-fibrokompozytów dodatkowego zbrojenia rozproszonego o wyższej wytrzymałości mechanicznej w odniesieniu do granulatu szklanego drobnego i grubego. Frezowany półprodukt, stanowiący źródło pozyskania wiórów zbrojeniowych użytych w eko-fibrokompozycie, posiadał charakterystykę naprężenia w funkcji odkształcenia ($R = R(\epsilon)$, $\sigma = \sigma(\epsilon)$) jak dla stali o niskiej ciągliwości. Odnotowany spadek wartości ($f_{cm,cyl}$) przy dozowaniu wiórów stalowych w ilości 20 ±1% masy układu spoiw, wynikał ze zwiększonej zawartości negatywnych makroporów powietrznych (6,4 ±0,2% dla próbek serii M4; utrudniona urabialność) przerywających ciągłość mikrostruktury wewnętrznej eko-fibrokompozytu.
- wartości współczynnika Poissona tj. stałej materiałowej (ν), metoda pomiarowa „A” dla przemieszczeń i odkształceń liniowych:
 - spadek wartości współczynnika (ν , określonego po 28, 56 i 90 dniach dojrzewania eko-fibrokompozytu) odpowiednio w zakresach, tj. (0,217 ±0,001)-(0,211 ±0,001); (0,219 ±0,001)-(0,213 ±0,001) i (0,220 ±0,001)-(0,216 ±0,001). Zmniejszająca się wartości współczynnika Poissona wynikała z redukcji wartości odkształceń liniowych w kierunku podłużnym oraz poprzecznym analizowanych na długości bazy pomiarowej dwóch ekstensometrów (utworzony przestrzenny szkielet zbrojeniowy kompensujący naprężenia ściskające). Stwierdzono spadek wartości przemieszczeń liniowych w kierunku równoległym i prostopadłym do działającego obciążenia wynikający z obecności makrozbrojenia rozproszonego.

Literatura

1. Miller W., Hook P.B., Smith C.W., Wang X., Evans K.E., *The manufacture and characterisation of a novel, low modulus, negative Poisson's ratio composite*, Composites Science and Technology, 69, 2009, s. 651-655.
2. Prawoto Y., *Seeing auxetic materials from the mechanics point of view: A structural review on the negative Poisson's ratio*, Computational Materials Science, 58, 2012, s. 140-153.
3. Lu H., Xiaopeng Wang X., Chen T., *Design and quasi-static responses of a hierarchical negative Poisson's ratio structure with three plateau stages and three-step deformation*, Composite Structures, 291, 2022, 115591.
4. Akamatsu D., Noguchi Y., Matsushima K., Sato Y., Yanagimoto J., Yamada T., *Two-phase topology optimization for metamaterials with negative Poisson's ratio*, Composite Structures, 311, 2023, 116800.
5. Łasica W., *Wpływ dodatku odpadowych wiórów stalowych na wartości modułu Young'a eko-kompozytów cementowo-szklanych*, [w:] Danielewska A., Maciąg K. (red.), *Rozwiązania technologiczne XXI wieku – skutki i perspektywy rozwoju – Tom 3*, Wydawnictwo Naukowe TYGIEL sp. z o.o., Lublin 2023, s. 52-75, ISBN 978-83-67104-75-3.
6. Lin H., Takasu K., Suyama H., Koyamada H., Liu S., *A study on properties, static and dynamic elastic modulus of recycled concrete under the influence of modified fly ash*, Construction and Building Materials, 347, 2022, 128585.
7. Yoshitake I., Zhang W., Mimura Y., Saito T., *Uniaxial tensile strength and tensile Young's modulus of fly-ash concrete at early age*, Construction and Building Materials, 40, 2013, s. 514-521.
8. He H., Senetakis K., *A study of wave velocities and poisson ratio of recycled concrete aggregate*, Soils and Foundations, 56(4), 2016, s. 593-607.

9. Bahr O., Schaumann P., Bollen B., Bracke J., *Young's modulus and Poisson's ratio of concrete at high temperatures: Experimental investigations*, Materials and Design, 45, 2013, s. 421-429.
10. Strona internetowa: <https://www.lafarge.pl/cement-4b-cem-IV-b-v-42-5-nlhna> [data dostępu: 18.07.2023].
11. Strona internetowa: <https://www.atlas.com.pl/produkty/domieszki-pigmenty-dodatki-do-betonu-343/domieszki-do-betonu-towarowego-344/> [data dostępu: 18.07.2023].
12. Strona internetowa: <https://www.atlas.com.pl/produkt/atlas-durufLOW-rs-8012-347-3818/> [data dostępu: 18.07.2023].
13. Strona internetowa: <https://www.atlas.com.pl/produkt/atlas-ligoretard-of-610-352-1628/> [data dostępu: 18.07.2023].
14. Strona internetowa: <https://www.atlas.com.pl/produkt/atlas-primo-lm-135-346-2305/> [data dostępu: 18.07.2023].
15. Strona internetowa: <https://www.products.pcc.eu/pl/id/1271378/mikrokrzemionka-pyl-krzemionkowy/> [data dostępu: 18.07.2023].
16. Strona internetowa: <https://panglass.pl/> [data dostępu: 18.07.2023].
17. Strona internetowa: <https://pph-rewa.pl/produkt/granulat-szklany/> [data dostępu: 18.07.2023].
18. PN-EN 1008:2004, *Woda zarobowa do betonu – Specyfikacja pobierania próbek, badanie i ocena przydatności wody zarobowej do betonu, w tym wody odzyskanej z procesów produkcji betonu*, Polski Komitet Normalizacyjny.
19. PN-EN 934-2+A1:2012, *Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – Część 2: Domieszki do betonu – Definicje, wymagania, zgodność, oznakowanie i etykietowanie*, Polski Komitet Normalizacyjny.
20. PN-EN 206+A2:2021-08, *Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*, Polski Komitet Normalizacyjny.
21. PN-B-06265:2022-08, *Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność -- Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08*, Polski Komitet Normalizacyjny.
22. Łasica W., Małek M., *Wpływ dodatku odpadowego pyłu polieteroeteroketonowego (PEEK) na wytrzymałość mechaniczną oraz parametry cieplne eko-kompozytów cementowo-szklanych*, [w:] Szymczyk P., Maciąg M. (red.), *Najnowsze doniesienia z inżynierii materiałowej*, Wydawnictwo Naukowe TYGIEL sp. z o.o., Lublin 2022, s. 213-238, ISBN 978-83-67104-58-6.
23. Łasica W., Małek M., *Wpływ dodatku odpadowych mikrowłókien bambusa zwyczajnego na wytrzymałość mechaniczną oraz parametry cieplne kompozytów cementowo-szklanych*, [w:] Szymczyk P., Maciąg M. (red.), *Najnowsze doniesienia z inżynierii materiałowej*, Wydawnictwo Naukowe TYGIEL sp. z o.o., Lublin 2022, s. 108-135, ISBN 978-83-67104-58-6.
24. Łasica W., Małek M., *Wpływ domieszki odpowietrzającej na właściwości mieszanek oraz stwardniałych kompozytów cementowo-szklanych*, [w:] Szymczyk P., Maciąg M. (red.), *Najnowsze doniesienia z inżynierii materiałowej*, Wydawnictwo Naukowe TYGIEL sp. z o.o., Lublin 2022, s. 136-157, ISBN 978-83-67104-58-6.
25. Łasica W., Małek M., *Wpływ dodatku odpadowego pyłu polifluorku winylidenu (PVDF) na wytrzymałość mechaniczną oraz parametry cieplne eko-kompozytów cementowo-szklanych*, [w:] Szymczyk P., Maciąg M. (red.), *Najnowsze doniesienia z inżynierii materiałowej*, Wydawnictwo Naukowe TYGIEL sp. z o.o., Lublin 2022, s. 158-183, ISBN 978-83-67104-58-6.
26. Łasica W., Małek M., *Wpływ dodatku odpadowego pyłu polimetakrylanu metylu (PMMA) na wytrzymałość mechaniczną oraz parametry cieplne eko-kompozytów cementowo-szklanych*, [w:] Szymczyk P., Maciąg M. (red.), *Najnowsze doniesienia z inżynierii materiałowej*, Wydawnictwo Naukowe TYGIEL sp. z o.o., Lublin 2022, s. 184-212, ISBN 978-83-67104-58-6.
27. Małek M., Jackowski M., Życiński W., Łasica W., Owczarek M., *Influence of silicone carbide additions on the mechanical properties of concrete*, Materials in tehnologije / Materials and technology, 54, 5, 2020, s. 595-599.

28. Małek M., Życiński W., Jackowski M., Łasica W., Wachowski M., *Influence of new admixture addition on concrete mechanical properties*, Conference: 12th International Conference on Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems, ITELMS 2018, Lithuania, Panevezys 2018.
29. Małek M., Życiński W., Jackowski M., Łasica W., Wachowski M., *Effect of new filler addition on the mechanical properties of concrete*, Conference: 12th International Conference on Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems, ITELMS 2018, Lithuania, Panevezys 2018.
30. Małek M., Jackowski M., Życiński W., Łasica W., Wachowski M., *Effect of micrometakaolin addition on mechanical properties of concrete*, Conference: 12th International Conference on Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems, ITELMS 2018, Lithuania, Panevezys 2018..
31. Gantner E., Chojczak W., *Materiały budowlane. Spoiwa, kruszywa, zaprawy, betony. Ćwiczenia laboratoryjne*, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013, ISBN 978-83-7814-020-7.
32. Jamroży Z., *Beton i jego technologie*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 1, Warszawa 2021, ISBN:9788301182106, EAN:9788301182106.
33. Dondelewski H., Januszewski M., *Betony cementowe*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2019, EAN:9788301201678.
34. Januszewski M., *Beton towarowy*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2016, ISBN:9788301189013, EAN:9788301189013.
35. Okamura H., Ouchi M., *Self-Compacting Concrete*, Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 1, No. 1, 2003, s. 5-15.
36. Okamura H., Ozawa K., *Self-Compacting High Performance Concrete*, Structural Engineering International, Volume 6, Issue 4, 1996.
37. Okamura H., Ozawa K., *Mix-design for self-compacting concrete*, Concrete Library of JSCE, 25, 1995, s. 107-120.
38. Łasica W., Małek M., *Wpływ dodatku mączki szklanej oraz odpadowego kordu tekstylnego na wytrzymałość mechaniczną i właściwości cieplne kompozytów cementowo-szklanych*, [w:] Kalbarczyk K., Chodźko E. (red.), *Ochrona środowiska i gospodarka odpadami – współczesne rozwiązania i perspektywy na przyszłość*, Wydawnictwo Naukowe TYGIEL sp. z o.o., Lublin 2022, s. 211-240, ISBN 978-83-67104-29-6.
39. Łasica W., Małek M., *Wpływ domieszki biopolimerowej na bazie skrobi na właściwości mieszanek oraz stwardniałych kompozytów cementowo-szklanych*, [w:] Kalbarczyk K., Chodźko E. (red.), *Ochrona środowiska i gospodarka odpadami – współczesne rozwiązania i perspektywy na przyszłość*, Wydawnictwo Naukowe TYGIEL sp. z o.o., Lublin 2022, s. 241-266, ISBN 978-83-67104-29-6.
40. Łasica W., Małek M., *Wpływ dodatku odpadowych granulowanych lupin orzecha oraz kolb kukurydzy na właściwości mechaniczne kompozytów cementowych i betonów*, [w:] Jędrzejewska J., Danielewska A. (red.), *Nauki ścisłe i przyrodnicze – przegląd wybranych zagadnień*, Wydawnictwo Naukowe TYGIEL sp. z o.o., s. 158-177, Lublin 2021, ISBN 978-83-67104-13-5.
41. Łasica W., Małek M., *Kompozyt cementowo-szklany jako sposób wykorzystania szkła odpadowego*, [w:] Kalbarczyk K., Skrzątek K. (red.), *Współczesne problemy ochrony środowiska – wybrane aspekty*, Wydawnictwo Naukowe TYGIEL sp. z o.o., s. 60-79, Lublin 2021, ISBN 978-83-66489-86-8.
42. Łasica W., Małek M., *Kompozyt cementowo-szklany modyfikowany metalowymi materiałami odpadowymi*, [w:] Skrzątek K., Mołdoch-Mendoń I. (red.), *Wybrane zagadnienia z zakresu nanotechnologii, inżynierii materiałowej oraz termodynamiki*, Wydawnictwo Naukowe TYGIEL sp. z o.o., s. 142-158, Lublin 2021, ISBN 978-83-66489-95-0.

43. Łasica W., Małek M., *Wpływ dodatku pyłu szklanego odpadowego na wytrzymałość mechaniczną i właściwości cieplne kompozytów cementowo-szklanych*, [w:] Kalbarczyk K., Chodźko E. (red.), *Ochrona środowiska i gospodarka odpadami - współczesne rozwiązania i perspektywy na przyszłość*, Wydawnictwo Naukowe TYGIEL sp. z o.o., Lublin 2022, s. 188-210, ISBN 978-83-67104-29-6.
44. Łasica W., Małek M., *Zastosowanie stłuczki szklanej w kompozytach na spoiwie cementowym oraz w betonach*, [w:] Kalbarczyk K., Chodźko E. (red.), *Ochrona środowiska i gospodarka odpadami – współczesne rozwiązania i perspektywy na przyszłość*, Wydawnictwo Naukowe TYGIEL sp. z o.o., Lublin 2022, s. 167-187, ISBN 978-83-67104-29-6.
45. Małek M., Jackowski M., Łasica W., Kadela M., *Influence of polypropylene, glass and steel fiber on the thermal properties of concrete*, *Materials*, 14, 2021, 1888.
46. Małek M., Jackowski M., Łasica W., Kadela M., Wachowski M., *Mechanical and material properties of mortar reinforced with glass fiber: an experimental study*, *Materials*, 14, 2021, s. 698.
47. Małek M., Łasica W., Kadela M., Kluczyński J., Dudek D., *Physical and mechanical properties of polypropylene fibre-reinforced cement-glass composite*, *Materials*, 14, 2021, s. 637.
48. Małek M., Życiński W., Jackowski M., Łasica W., Wachowski M., *Effect of recycled fibers addition on mechanical properties of concrete*, Conference: 12th International Conference on Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems, ITELMS 2018, Lithuania, Panevezys 2018.
49. Almeshal I., Tayeha B.A., Alyousef R., Alabduljabbar H., Mohamed A.M., *Eco-friendly concrete containing recycled plastic as partial replacement for sand*, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 9, Issue 3, 2020, s. 4631-4643.
50. Małek M., Jackowski M., Łasica W., Kadela M., *Characteristics of Recycled Polypropylene Fibers as an Addition to Concrete Fabrication Based on Portland Cement*, *Materials*, 13, 2020, s. 1827.
51. Małek M., Kadela M., Terpiłowski M., Szewczyk T., Łasica W., Muzolf P., *Effect of Metal Lathe Waste Addition on the Mechanical and Thermal Properties of Concrete*, *Materials*, 14 (2760), 2021.
52. Życiński W., Małek M., Jackowski M., Łasica W., Owczarek M., *Study of the workability and mechanical properties of concrete with added ground corncobs*, *Materiali in tehnologije / Materials and technology*, 54, 4, 2020, s. 479-483.
53. Małek M., Jackowski M., Łasica W., Dydek K., Boczkowska A., *An Experimental Study of Possible Post-War Ferronickel Slag Waste Disposal in Szklary (Lower Silesian, Poland) as Partial Aggregate Substitute in Concrete: Characterization of Physical, Mechanical, and Thermal Properties*, *Materials*, 14(10), 2021, s. 2552.
54. Jackowski M., Małek M., Życiński W., Łasica W., Owczarek M., *Characterization of new recycled polymer shots addition for the mechanical strength of concrete*, *Materiali in tehnologije / Materials and technology*, 54, 3, 2020, s. 355-358.
55. Małek M., Łasica W., Jackowski M., Kadela M., *Effect of waste glass addition as a replacement for fine aggregate on properties of mortar*, *Materials*, 13, 2020, s. 3189.
56. Guo P., Meng W., Nassif H., Gou H., Bao Y., *New perspectives on recycling waste glass in manufacturing concrete for sustainable civil infrastructure*, *Construction and Building Materials*, 257, 2020, 119579.
57. Su Q., Xu J., *Compression behavior and permeability of concrete composed of glass sand and rice husk ash*, *Journal of Building Engineering*, 76, 2023, 107095.
58. Su Q., Xu J., *Mechanical properties of concrete containing glass sand and rice husk ash*, *Construction and Building Materials*, 393, 2023, 132053.

59. PN-EN 12390-4:2020-03, *Badania betonu – Część 4: Wytrzymałość na ściskanie – Wymagania dla maszyn wytrzymałościowych*, Polski Komitet Normalizacyjny.
60. PN-EN 12390-13:2021-12, *Badania betonu – Część 13: Wyznaczanie siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu*, Polski Komitet Normalizacyjny.
61. PN-EN 12390-3:2019-07, *Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań*, Polski Komitet Normalizacyjny.
62. Persson B., *Poisson's ratio of high-performance concrete*, Cement and Concrete Research 29, 1999, s. 1647-1653.
63. Ma Y., Yu X., Zhao F., Liu J., Xu Y., Zhang P., Zhang J., Wu L., *Negative Poisson's ratio design, static mechanical properties and deformation behaviors on PVA-carbon fiber reinforced concrete*, Springer, Composites & nanocomposites, J Mater Sci, 58, 2023, s. 1568-1585.

Wpływ dodatku odpadowych wiórów stalowych na wartość współczynnika Poissona eko-fibrokompozytów cementowo-szklanych

Streszczenie

Temat rozdziału dotyczy określenia wpływu odpadowego dodatku w postaci wiórów stalowych na wartość współczynnika Poissona eko-fibrokompozytów cementowo-szklanych wysokiej wytrzymałości. Modyfikator mikrostruktury ekomateriału stanowiły wióry stalowe elementowe, spiralne oraz łukowe generowane w procesach frezowania CNC. Składnik odpadowy dozowano w ilościach 5, 10, 15 i 20% masy spoiwa. Serie próbek cylindrycznych badano w zakresie wytrzymałości na ściskanie oraz dokonano pomiaru wartości współczynnika Poissona. Dokonano opisu metody projektowania składu eko-fibrokompozytu, metodyki badawczej wykorzystującej ekstensometrię przemieszczeń liniowych. Scharakteryzowano składniki eko-fibromieszanki, tj. granulaty szkła sodowo-wapniowego, pył krzemionkowy, zeolit, eko-cement, domieszki chemiczne i wióry stalowe. Opisano sposób wyznaczania wartości przemieszczeń i odkształceń liniowych w kierunku podłużnym i poprzecznym. Zawarto wyniki badań średniej wytrzymałości na ściskanie oraz wartości współczynnika Poissona określonych na próbkach cylindrycznych po 28, 56 i 90 dniach dojrzewania eko-fibrokompozytu cementowo-szklanego. Wartość współczynnika Poissona wyznaczono jako iloraz odkształceń poprzecznych do odkształceń podłużnych. Największe wartości współczynnika Poissona uzyskały próbki referencyjne, tj. 0,217; 0,219 i 0,220. Wartości współczynnika Poissona ulegały zmniejszeniu w funkcji zwiększonego dozowania wiórów stalowych. Najmniejsze wartości współczynnika wykazały próbki serii M4, zawierające wióry w ilości 20% masy spoiwa w składzie eko-fibrokompozytu cementowo-szklanego.

Słowa kluczowe: współczynnik Poissona, wióry stalowe, recykling, szkło, kompozyt

The impact of adding waste steel chips on the Poisson's ratio value of eco-glass-cement fiber composites

Abstract

The chapter focuses on determining the influence of waste steel chip additives on the Poisson's ratio value of high-strength eco-glass-cement fiber composites. The microstructure modifier of the eco-material consisted of element, spiral, and arc-shaped steel chips generated in CNC milling processes. The waste component was dosed in quantities of 5, 10, 15, and 20% of the binder mass. Series of cylindrical samples were tested for compressive strength and the Poisson's ratio value was measured. A description of the eco-fiber composite composition design method and a research methodology utilizing linear displacement extensometers were provided. The components of the eco-fiber mixture, such as soda-lime glass granules, silica dust, zeolite, eco-cement, chemical additives, and steel chips, were characterized. The method of determining linear displacements and strains in the longitudinal and transverse directions was described. The results of average compressive strength and Poisson's ratio values determined on cylindrical samples after 28, 56, and 90 days of maturity of the eco-glass-cement fiber composite were presented. The Poisson's ratio value was calculated as the ratio of transverse strains to longitudinal strains. The highest Poisson's ratio values were obtained by reference samples, i.e., 0.217, 0.219, and 0.220. The values of the Poisson's ratio decreased with increased dosage of steel chips. The lowest values of the coefficient were exhibited by samples from the M4 series, containing 20% of steel chips by binder mass in the composition of the eco-glass-cement fiber composite.

Keywords: Poisson's ratio, steel chips, recycling, glass, composite

Indeks Autorów

Andrzejewski D.	186
Błaszczuk W.	199
Bohdal Ł.	131
Cielibała M.	44
Cieślak S.	116
Czerniszewski P.	7
Dobosz I.	169
Gądek T.	186
Gwóźdź-Lasoń M.	199
Hojny M.	186
Kachel S.	7
Kęcik K.	23
Kostro R.	106
Kośka K.	131
Lijewski M.	61
Łasica W.	239
Łojkowski W.	158
Mac J.	186
Majkut L.	96
Miksza M.	131
Osełka M.	44
Pietrzykowska E.	158
Plewa K.	61
Podhajecki J.	227
Ramiączek P.	44
Rawicki S.	227
Rogólski R.	7
Różański S.A.	81
Skrzyniarz N.	44
Sołtysiak R.	116
Stężycka E.	23
Tomkiewicz D.	150
Waśniowska J.	33
Wronkowski P.	116