TECHNOLOGIE XXI WIEKU

AKTUALNE PROBLEMY I NOWE WYZWANIA

TOM 2

Redakcja:
Alicja Danielewska
Izabela Mołdoch-Mendoń

Lublin 2021

Technologie XXI wieku – aktualne problemy i nowe wyzwania. Tom 2

Technologie XXI wieku – aktualne problemy i nowe wyzwania. Tom 2

Redakcja:
Alicja Danielewska
Izabela Mołdoch-Mendoń

Lublin 2021

Wydawnictwo Naukowe TYGIEL składa serdecznie podziękowania dla zespołu Recenzentów za zaangażowanie w dokonane recenzje oraz merytoryczne wskazówki dla Autorów.

Recenzentami niniejszej monografii byli:

- prof. dr hab. inż. Eugeniusz Mokrzycki
- dr hab. inż. Leszek Łatka, prof. PWr
- dr hab. inż. Piotr Mrozek, prof. PB
- dr hab. inż. Tadeusz Szymczak
- dr inż. Tomasz Bradecki
- dr inż. Bartłomiej Dybowski
- dr Aneta Kondrzycka-Dąda
- dr inż. Sebastian Lipa
- dr inż. Marta Moczko
- dr Grzegorz Skrobotowicz
- dr inż. Agnieszka Żelazna

Wszystkie opublikowane rozdziały otrzymały pozytywne recenzje.

Skład i łamanie:
Monika Maciąg

Projekt okładki:
Marcin Szklarczyk

Korekta:
Magdalena Krysińska

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

ISBN 978-83-66489-73-8

Wydawca:
Wydawnictwo Naukowe TYGIEL Sp. z o.o.
ul. Głowackiego 35/341, 20-060 Lublin
www.wydawnictwo-tygiel.pl

Spis treści

Tadeusz Kałdoński, Jarosław Juda, Tomasz Jan Kałdoński
Właściwości elektroreologiczne i tribologiczne quasihomogenicznych mieszanin węglowodorowych z domieszką cieczy jonowej 7

Tadeusz Kałdoński, Tomasz Jan Kałdoński
Procesy zużywania ściernego par precyzyjnych nurnik-tuleja: badania, modelowanie, predykcja 36

Krzysztof Dutkowski
Współczesne trendy w wykorzystaniu materiałów zmiennofazowych jako dodatku do cieczy roboczych w układach wymiany ciepła 61

Piotr Eliasz, Maciej Bara, Zbigniew Buliński, Zofia Szweda
Opracowanie modelu numerycznego wnikania jonów chlorkowych do wnętrza betonu 74

Karolina Czerwińska, Andrzej Pacana
Analiza oraz doskonalenie poziomu jakości tłoków ze stopu aluminium 90

Krzysztof Dutkowski
Powietrzny kolektor słoneczny – niedoceniany element regulacji komfortu cieplnego w pomieszczeniach 101

Łukasz Skroński, Jerzy Winczek, Marek Gucwa
Objętościowe ujęcie energii spawania 114

Patrycja Pokora, Malwina Sikora, Damian Wojcieszak
Wpływ srebra na właściwości optyczne cienkowarstwowych powłok TiO_2 128

Tomasz Śliwa, Kamil Zdziebko, Tomasz Kowalski
Badania otworowych wymienników ciepła w Laboratorium Geoenergetyki na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie 143

Marcin Kryjak
Rola architekta w wyborze i stosowaniu odnawialnych źródeł energii 163

Antonina Chłopecka
Problematyka odpowiedzialności cywilnoprawnej za ruch autonomicznych samochodów 177

Alicja Nowakowska
Modelowanie sieciowe w analizie interakcji międzybiałkowych 192

Indeks Autorów 203

Tadeusz Kałdoński[1], Jarosław Juda[2], Tomasz Jan Kałdoński[3]

Właściwości elektroreologiczne i tribologiczne quasihomogenicznych mieszanin węglowodorowych z domieszką cieczy jonowej

1. Wstęp

Ciecze jonowe, ze względu na swoje różnorodne i bardzo często unikatowe właściwości są bardzo interesujące dla obszaru zwanego techniką smarowniczą, której fundamentem jest rzetelna wiedza reologiczna i tribologiczna [1-7]. Obowiązująca obecnie definicja cieczy jonowych głosi, że: *są to wszystkie substancje ciekłe składające się wyłącznie z jonów (kationów i anionów), których temperatura topnienia jest mniejsza od 100°C* [9]. Zaliczają się do nich również stopione sole. Przyjęta definicja wiąże się z występowaniem w cieczach jonowych silnych oddziaływań jon-jon poniżej granicy wrzenia wody, co różni je od zwykłych stopionych soli. Najczęściej wykorzystywane w różnych aplikacjach i w badaniach naukowych ciecze jonowe powstają w wyniku kombinacji dużego organicznego kationu oraz nieorganicznego lub organicznego anionu. Nieograniczone możliwości modyfikacji budowy kationu i anionu dostarczają współczesnej technologii dużą liczbę potencjalnych pochodnych o różnorodnych właściwościach fizykochemicznych. Możliwość kombinacji jest ogromna i ocenia się ją na 10^{18} [10]. Realne staje się w niedalekiej przyszłości manipulowanie właściwościami cieczy jonowych wytwarzanych w określonym celu [7, 9]. Do podstawowych, najważniejszych właściwości cieczy jonowych, najczęściej wymienianych w literaturze [np. 4-12] i równocześnie istotnych z punktu widzenia tematu tego rozdziału, należy zaliczyć m.in.:

- lepkość, której wartość może być bardzo zróżnicowana w zależności od konkretnej kompozycji kationów i anionów o różniących się rozmiarach; ciecze jonowe w warunkach normalnych są cieczami newtonowskimi, więc ich lepkość zależy od zmian temperatury; lepkość absolutna (dynamiczna) niektórych cieczy jonowych w temperaturze pokojowej może być bardzo mała, np. ok. 10 cP (10 mPa·s), a innych cieczy w tych samych warunkach może przekraczać nawet 500 cP (500 mPa·s);
- gęstość cieczy jonowych jest także zdeterminowana budową chemiczną i kompozycją zastosowanych do jej wytworzenia kationów i anionów; gęstość cieczy jonowych jest z reguły znacznie większa od gęstości wody (nawet dwukrotnie), chociaż istnieją też ciecze jonowe, których gęstość jest mniejsza od jedności;
- temperatura topnienia (płynięcia) to szczególnie ważny parametr determinujący stosowanie cieczy w ujemnych temperaturach; wiele cieczy jonowych ma bardzo szeroki zakres występowania w stanie ciekłym i bardzo niską temperaturę topnienia;

[1] tadeusz.kaldonski@wat.edu.pl, Zakład Materiałów Pędnych i Smarów, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Wojskowa Akademia Techniczna, www.wat.edu.pl.
[2] jaroslaw.juda@wp.pl, Zakład Materiałów Pędnych i Smarów, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Wojskowa Akademia Techniczna, www.wat.edu.pl.
[3] tomasz.kaldonski@wat.edu.pl, Zakład Materiałów Pędnych i Smarów, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Wojskowa Akademia Techniczna, www.wat.edu.pl.

- znikoma (pomijalna) prężność par cieczy jonowych sprawia, że są one nielotne (nie parują); cecha ta powoduje, że praktycznie nie ubywają z układu, w którym się znajdują;
- hydrofobowość wielu cieczy jonowych sprawia, że przy równocześnie znikomej lotności, są one bardzo stabilne termicznie, tj. charakteryzują się bardzo wysoką temperaturą dekompozycji, co umożliwia stosowanie ich w wysokich temperaturach pracy;
- wreszcie wysoka polarność cieczy jonowych określa ich podatność do adsorbowania na powierzchniach ciał stałych – ich stała dielektryczna jest wielokrotnie większa od innych cieczy smarujących.

Wymienione właściwości mają bezpośredni i zdecydowany wpływ na funkcjonowanie wszelkich systemów tribologicznych. Właściwości te są także bardzo ważne dla układów elektroreologicznych, które mogą być elementem składowym systemów tribologicznych. Biorąc pod uwagę zespół unikatowych właściwości cieczy jonowych, można przypuszczać, że odpowiednio dobrana ciecz jonowa wprowadzona do oleju (bazowego, hydraulicznego, maszynowego…) w małym stężeniu może pozwolić na wytworzenie cieczy o właściwościach elektroreologicznych (ER) i równocześnie o lepszych właściwościach tribologicznych od oleju niezawierającego domieszki cieczy jonowej. W kilku ośrodkach na świecie (Japonia, Chiny, USA…), w tym także w Polsce (m.in. w Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie) prowadzono badania właściwości tribologicznych cieczy jonowych jako samodzielnych substancji smarujących lub jako dodatków poprawiających właściwości tribologiczne olejów przemysłowych [m.in. 1-7, 11, 13]. Niestety, w nielicznych pracach dotyczących stosowania określonej cieczy jonowej jako domieszki do oleju smarującego, autorzy z reguły nie podają jego rodzaju: nie opisują także sposobu i stanu uzyskanej mieszaniny (roztwór czy emulsja?). Zatem nie wiadomo, czy przedstawione przez nich wyniki dotyczą mieszaniny całkowicie homogenicznej (roztworu), czy mieszaniny, która była emulsją koloidalną, tj. cieczą quasihomogeniczną. Zarówno ze względu na właściwości tribologiczne, jak i właściwości elektroreologiczne, dla każdej cieczy smarującej bardzo ważna jest określona mieszalność cieczy jonowej ze smarującym olejem bazowym. Tymczasem, nadal brak jest zadowalających odpowiedzi na pytania dotyczące rozpuszczalności i mieszalności różnych substancji w cieczach jonowych i odwrotnie. Niektóre dane literaturowe [9] podważają powszechnie uznaną przez chemików zasadę, że „podobne rozpuszcza podobne" („like dissolves like"). Z jednej strony ciecze jonowe wykazują zdolność rozpuszczania wielu materiałów organicznych i nieorganicznych, z drugiej strony większość cieczy jonowych nie miesza się z większością ciekłych węglowodorów [9].

Z punktu widzenia tematu obecnego rozdziału chodzi o dokładne określenie mieszalności wybranych (dostępnych) cieczy jonowych z konwencjonalnymi organicznymi i syntetycznymi olejami smarującymi, a następnie o ocenę właściwości elektroreologicznych i smarnościowych uzyskanych mieszanin. Informacje o znakomitych właściwościach tribologicznych cieczy jonowych są podawane w literaturze, np. [1-7, 11-14]. Natomiast brak jest informacji na temat ewentualnego zastosowania cieczy jonowej jako składnika aktywnego elektrycznie w mieszaninie o właściwościach elektroreologicznych (ER). Zatem podstawowym celem opisanych w tym rozdziale badań było

sprawdzenie, czy olej węglowodorowy zawierający niewielką ilość dobranej (dobrze mieszalnej) cieczy jonowej, będąc pod wpływem działającego zewnętrznego pola elektrycznego, może wykazać efekt ER.

2. Metody badań i wyniki

2.1. Ocena mieszalności cieczy

Szczegółowym badaniom mieszalności poddano pięć olejów smarujących i siedem cieczy jonowych [15] mianowicie:

- olej syntetyczny perfluoropolieterowy Fomblin PFPE Y04 [16, 17];
- silikonową ciecz tłumiącą GP-1 (MPS S-91715) będącą mieszaniną polimetylosiloksanów [18];
- olej bazowy polialfaolefinowy PAO-6 [19];
- mineralny olej bazowy z destylacji próżniowej ropy naftowej SN-650 [20];
- olej przekładniowy Hipol 15F SAE 85W/90 [21];
- ciecz jonową CJ001, tj. tetrafluoroboran 1-metylo-3-oktyloksymetyloimidazolowy [22];
- ciecz jonową CJ002, tj. bis(trifluorometylosulfonylo)imid 1-metylo-3-oktyloksyimidazolowy [22];
- ciecz jonową CJ003, tj. bis(trifluorometylosulfonylo)imid 1-metylo-3-butoksymetyloimidazolowy [22];
- ciecz jonową CJ004, tj. bis(trifluorometylosulfonylo)imid 3-butoksymetylo-1-butyloimidazolowy [22];
- ciecz jonową CJ006, tj. 3-metylo-1-propylopirydynowy bis(trifluorometylosulfonylo)imid [10];
- ciecz jonową CJ007, tj. 1,2-dimetylo-3-propyloimidazolowy bis(trifluorometylosulfonylo)imid [10];
- ciecz jonową CJ008, tj. triheksylotetradecylofosfonowy bis(trifluorometylosulfonylo)imid [10].

Podstawą do takiego wyboru olejów i cieczy jonowych były wcześniejsze badania, w których potwierdzono znakomite właściwości tribologiczne cieczy jonowych [1-4].

Wstępną ocenę mieszalności przeprowadzono przy użyciu mikroskopu, na szkiełkach zegarkowych, obserwując „łączenie się" cieczy jonowej z olejem znajdującym się na dnie szkiełka. W przypadku, gdy zaobserwowano, że oleje i ciecze jonowe skutecznie zmieszały się wykonano w kolbach szklanych próbki 50 ml z 5% (v/v) zawartością dobranej cieczy jonowej. Następnie w ciągu 20 minut mieszano ciecze za pomocą mieszadła mechanicznego i w ciągu kolejnych 20 minut w myjce ultradźwiękowej VTU SCB przy temperaturze 50°C. Po zmieszaniu próbki odstawiono na 48 godzin, obserwując, czy nie występują jakiekolwiek wytrącenia i sedymentacja. W przypadku braku takich objawów kwalifikowano taką mieszaninę do dalszych badań. Stwierdzono, że w większości próby mieszania były nieskuteczne. Uzyskano tylko dwie jednorodne mieszaniny. Pierwszą mieszaniną był olej hydrauliczny GP-1 z cieczą jonową CJ001, a drugą olej bazowy PAO-6 z cieczą jonową CJ008. Te dwie mieszaniny oraz ich składniki były poddane kolejnym badaniom.

2.2. Identyfikacja podstawowych właściwości fizykochemicznych cieczy

Określono gęstość (ρ), lepkość kinematyczną (ν) i dynamiczną (η), wskaźnik lepkości (*VI*), napięcie powierzchniowe (σ'), współczynnik załamania światła (n_D) i refrakcję właściwą (r_D) cieczy. Istotna jest znajomość zmienności tych właściwości w przypadkach olejów zawierających określoną ilość cieczy jonowej o zdecydowanie odmiennych właściwościach. Bezpośrednio przed pomiarami próbki mieszanin olejów z cieczami jonowymi ponownie mieszano przez 20 minut w myjce ultradźwiękowej w temperaturze pokojowej (ok. 22°C).

Do pomiaru gęstości (ρ) i napięcia powierzchniowego (σ') użyty został fiński tensjometr KSV Sigma 701. Cały przebieg pomiarów był sterowany za pomocą oprogramowania komputerowego, zgodnie z instrukcją tego urządzenia [23] w temperaturze 25°C. Próbki termostatowane były za pomocą łaźni Julabo F-12 [24].

Pomiar lepkości kinematycznej cieczy (ν) wykonano zgodnie z PN-EN ISO 3104:2004 [25], natomiast wskaźnik lepkości (*VI*) obliczono zgodnie z PN-EN ISO 2909:2009 [26]. Do pomiarów lepkości kinematycznej olejów posłużono się popularną łaźnią termostatującą TAMSON TV 2000 z wiskozymetrem Pinkiewicza [27], wykonując pomiary w temperaturze 25°C, 40°C i 100°C. Ze względu na ograniczoną ilość posiadanych, drogich cieczy jonowych, pomiar ich lepkości wykonano za pomocą mikrolepkościomierza AMVn austriackiej firmy Anton-Paar [28].

Do określenia współczynnika załamania światła (n_D) użyto refraktometr laboratoryjny Abbego (model RL1-PZO – polskiej produkcji) [29]. Pomiary wykonano w temperaturze 25°C. Natomiast refrakcję właściwą obliczono ze wzoru:

$$r_D = \frac{n_D^2 - 1}{n_D^2 + 2} \cdot \frac{1}{\rho} \,. \tag{1}$$

W tabeli 1. zgromadzono wyniki badań podstawowych właściwości przygotowanych mieszanin oraz ich składników, istotne w analizie właściwości elektroreologicznych i tribologicznych cieczy smarujących [1, 15, 35].

Tabela 1. Podstawowe właściwości mieszanin oraz ich składników

Ciecz	ρ [g/cm^3]	ν [mm^2·s^{-1}]	η [mPa·s]	VI [-]	σ' [mN·m^{-1}]	n_D [-]	r_D [cm^3·g^{-1}]
CJ001	1,116	495,00	552,42	110	26,032	1,4304	0,2317
CJ008	1,061	308,43	327,24	127	28,099	1,4480	0,2523
GP-1	0,823	15,33	12,61	264	19,547	1,4039	0,2971
PAO-6	0,816	58,05	47,36	144	27,523	1,4558	0,3298
GP-1 + CJ001	0,826	20,05	16,56	218	20,601	1,4061	0,2978
PAO-6 + CJ008	0,820	61,08	50,08	140	27,998	1,4540	0,3302

Źródło: Opracowanie własne

2.3. Ocena właściwości elektroreologicznych mieszanin

Do takiej oceny niezbędny jest wiskozymetr przystosowany do rejestracji zmian naprężeń ścinających (lepkości) cieczy pod wpływem działania zewnętrznego stałego pola elektrycznego. Wobec braku dostępu do takiego specjalistycznego urządzenia, zaprojektowano, zbudowano i uruchomiono własne stanowisko do badań elektroreologicznych na bazie dostępnego standardowego lepkościomierza rotacyjnego Brookfield DV-III Ultra, który umożliwił spełnienie podstawowych wymagań dotyczących prowadzenia tego typu badań, m.in.:

- parametry przepływu cieczy w szczelinie pomiarowej reometru i warunki pomiaru powinny być tak dobrane, aby przepływ był ustalony, laminarny i izometryczny;
- konstrukcja reometru powinna zapewnić jednorodne pole elektryczne w całej szczelinie;
- reometr musi umożliwić pomiar przy bardzo małych szybkościach ścinania, gdy efekt ER jest najbardziej widoczny;
- powinno być możliwe sterowanie pracą wiskozymetru za pomocą komputera PC ze specjalistycznym oprzyrządowaniem.

Szczegóły modyfikacji i przystosowania do badań ER lepkościomierza rotacyjnego Brookfield DV-III Ultra podano w pracach [15, 30]. Na rysunku 1 przedstawiono stanowisko wykorzystane do badań właściwości elektroreologicznych sporządzonych mieszanin olejów z cieczami jonowymi.

Rysunek 1. Stanowisko do badania cieczy ER: 1-reometr Brookfield DV-III Ultra z odizolowanym obrotowym wrzecionem, 2-przystawka izolująca z cylindrami zaopatrzonymi w elektrody, 3-zasilacz wysokiego napięcia HCP 14-6500, 4-komputer PC z oprogramowaniem sterującym Reocalc 32 v.2.6 [opracowanie własne]

Dzięki wykorzystaniu specjalistycznego oprogramowania Reocalc 32 v.2.6 możliwa była praca w trybie pomiarów zautomatyzowanych, który jest zalecany, gdyż umożliwia pomiary z automatycznym zadawaniem wybranych prędkości kątowych wirowania wrzeciona, aktywizację zmierzonych danych oraz rejestrację wyników w zbiorach dyskowych. Na przygotowanym stanowisku (rys. 1) wykonano badania rozruchowo-kontrolne, których celem było potwierdzenie poprawności oraz prawidłowości działania układu pomiarowego. Do tych badań wykorzystano komercyjną dwufazową ciecz ER LID 3354S angielskiej firmy SMART TECHNOLOGY Ltd. składającą się z oleju silikonowego i z cząstek polimerowych o średnicy 45 μm w ilości 37,5% (m/m) [31]. Rezultat tych badań był bardzo pozytywny – uzyskano w obecności stałego pola elektrycznego charakterystykę Binghama ($\tau = \tau_o + \eta_p \cdot \gamma'$) typową dla takiej heterogenicznej cieczy ER. Stwierdzono, że stanowisko pokazane na rysunku 1 działa poprawnie i może być wykorzystane do badań porównawczych różnych cieczy ER. W związku z tym pokazany na rysunku 1 „Zestaw badawczy" został zgłoszony

25 czerwca 2015 r. do Urzędu Patentowego RP pod numerem W124200, który 10 lutego 2017 roku wydał decyzję o udzieleniu Prawa Ochronnego.

Szczegółowe badania właściwości elektroreologicznych mieszanin GP-1 + CJ001 oraz PAO-6 + CJ008 należało poprzedzić badaniami wstępnymi w celu dobrania odpowiedniego zestawu „wrzeciono wiskozymetru/cylinder z elektrodami" (rys. 1) umożliwiającego optymalną realizację badań. W tabeli 2. zaprezentowano możliwe do zastosowania w zmodernizowanym wiskozymetrze zestawy „wrzeciono/cylinder" oraz ich oznaczenia [15].

Tabela 2. Oznaczenia zestawów „wrzeciono/cylinder"

Średnica cylindra D [mm]	Średnica wrzeciona d [mm]	
	3,2	11,7
20	JJ1	JJ2
17	JJ3	JJ4
15	JJ5	JJ6
13,5	JJ7	JJ8

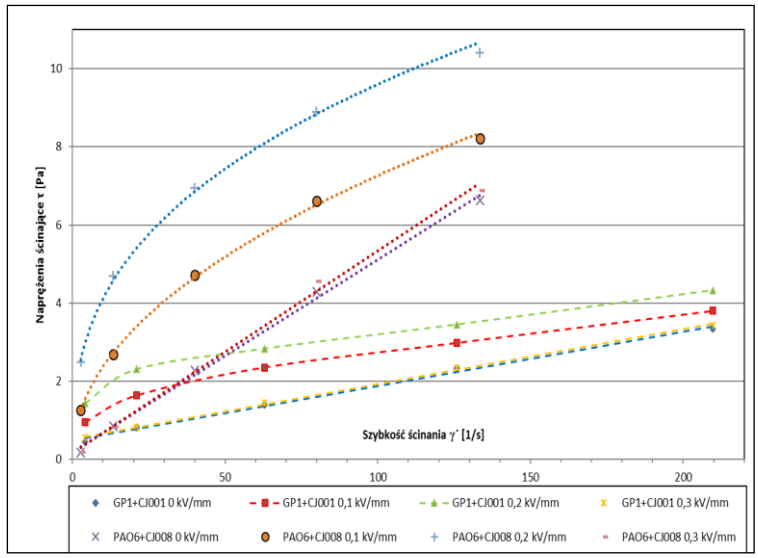
Źródło: Opracowanie własne

Do realizacji badań właściwych przygotowanych mieszanin dobrano zestawy JJ6 i JJ8, które pozwalały uzyskać najmniejsze szybkości ścinania γ' [s^{-1}]. Podczas badań okazało się, że wytworzone mieszaniny z 5% (v/v) zawartością cieczy jonowej mają zbyt dużą przewodność elektryczną, co prowadziło do zwarcia. W związku z tym do badań efektu ER zmniejszono zawartość cieczy jonowej do 2% (v/v), uzyskując pozytywny efekt. Zarejestrowane w programie Reocalc 32 v.2.6 wyniki przedstawiono w tabeli 3. Charakterystyki reologiczne $\tau = f(\gamma')$ skonstruowane na podstawie uzyskanych wyników pokazano na rys. 2.

Tabela 3. Wyniki badań ER mieszanin GP-1+CJ001 i PAO-6+CJ008

E [kV·mm^{-1}]	n [obr·min^{-1}]	JJ 8	τ [Pa]	γ´ [s^{-1}]	η [mPa·s]	JJ6	τ [Pa]	γ´ [s^{-1}]	η [mPa·s]
0	5	Mieszanina GP-1 + CJ001	0,44	4,20	128,57	Mieszanina PAO-6 + CJ008	0,18	2,67	67,41
0,1			0,95		261,90		1,25		468,16
0,2			1,43		435,71		2,48		1247,19
0,3			0,45		130,95		0,19		71,16
0	25		0,81	20,98	39,08		0,84	13,33	63,01
0,1			1,63		77,69		2,69		186,80
0,2			2,30		109,63		4,70		323,33
0,3			0,81		38,61		0,83		63,01
0	75		1,40	62,93	22,25		2,27	39,98	56,78
0,1			2,35		33,53		4,72		105,55
0,2			2,83		44,97		6,94		131,06
0,3			1,44		22,88		2,28		57,03
0	150		2,33	125,85	18,51		4,28	79,95	53,53
0,1			2,98		23,68		6,61		73,29
0,2			3,45		27,41		8,89		89,93
0,3			2,35		18,67		4,33		53,78
0	250		3,34	209,75	15,92		6,63	133,50	49,66
0,1			3,80		18,12		8,21		60,75
0,2			4,33		20,64		10,41		74,31
0,3			3,39		16,02		6,69		49,89

Źródło: Opracowanie własne



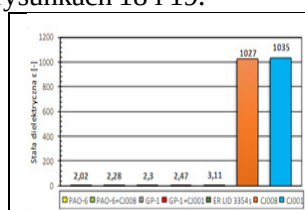
Rysunek 2. Charakterystyki $\tau = f(\gamma')$ mieszanin GP-1+CJ001 oraz PAO-6+CJ008 [opracowanie własne]

2.4. Badania cieczy w spektroskopii dielektrycznej

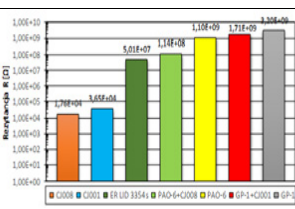
Badania takie pozwalają oceniać zmienność stałych dielektrycznych (ε) w funkcji częstotliwości (f) stałego pola elektrycznego BIAS (DC) dla różnych wartości przyłożonego napięcia prądu (U), a także równoczesną zmienność rezystancji (R) i konduktywności (σ). Zaplanowano także powtarzanie testów na tych samych próbkach w celu zaobserwowania jak wpływa pierwotnie przyłożone pole BIASu na dalsze zachowanie cieczy w polu elektrycznym. Spodziewano się, że badania takie pozwolą na zarejestrowanie ewentualnych symptomów zmian struktury wewnętrznej badanych mieszanin, będących wynikiem działania zewnętrznego pola elektrycznego i porównanie ich z wynikami uzyskanymi dla cieczy komercyjnej LID 3354S. Badania te wykonano za pomocą analizatora impedancji HP4192 firmy Hewlett Packard (USA) [32], w zakresie częstotliwości 100 Hz do 10 MHz. Przykładane o różnej wartości, stałe pole elektryczne BIAS (DC), dla napięcia U = 0÷35 V, umożliwiło określenie wpływu czynnika zewnętrznego na badaną próbkę. Zmienne pole pomiarowe (AC) określone było napięciem 0,1V. Pomiary wykonano w stałej temperaturze pokojowej (ok. 22°C). Do wykonania pomiarów zostały użyte komórki z elektrodami ITO (z tlenku cynowo-indowego In_2O_3 domieszkowanego 10% (m/m) SnO_2 o rezystancji rzędu 100 Ω). Częstotliwość odcięcia f_0 dla komórek ITO wynosiła ok. 400 kHz. Jest to częstotliwość, dla której możliwość ładowania i rozładowania kondensatora ulega zmniejszeniu. Powyżej tej częstotliwości kondensator nie może w pełni naładować się. W badaniach stosowano komórki o różnej grubości (ok. 5 μm, 12 μm i 50 μm) ze względu na różny skład i rodzaj badanych mieszanin oraz ich składników, np. w przypadku cieczy referencyjnej LID 3354S, zawierającej cząstki polimerowe o średnicy 45 μm, stosowano najgrubsze komórki. Komórki wykonywano z dwóch płasko-równoległych płytek szklanych. Do uzyskania różnej grubości komórek pomiarowych stosowano tzw. dystansery szklane. Na szkło napylone były elektrody, które przyjmowały sygnał z analizatora. Ze względu na

specyfikę komórek pomiarowych do lutowania kontaktów zastosowano lutownicę ultradźwiękową USS 9200 szwajcarskiej firmy MBR Electronics. Przewody o średnicy 0,25 mm, doprowadzające sygnał pomiarowy o różnej częstotliwości, były wykonane z posrebrzanej miedzi beztlenowej.

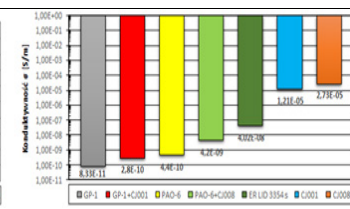
Na kolejnych rysunkach przedstawiono wybrane wyniki badań w spektroskopii dielektrycznej przygotowanych mieszanin oraz ich składników, a także dodatkowo cieczy referencyjnej LID 3354S. Na rysunkach 3-5 przedstawiono tzw. „wartości rzeczywiste" zarejestrowane dla częstotliwości f = 1 kHz. Takie wartości są najczęściej wymieniane w literaturze, w celu porównania wartości tzw. stałych dielektrycznych różnych cieczy. Taka wstępna ocena może być adekwatna tylko w przypadku czystych cieczy dielektrycznych i izolujących o bardzo małej i stabilnej wartości (ε) i konduktywności (σ) oraz dużej oporności (R). W przypadku badanych cieczy jonowych oraz ich mieszanin z olejami węglowodorowymi musi być przeprowadzona szczegółowa analiza przebiegu charakterystyk (ε), (R) i (σ) w funkcji częstotliwości (f) i napięcia (U) przyłożonego prądu. Na rysunkach 6-19 przedstawiono przykładowo wybrane charakterystyki $\varepsilon = f(f)$ i $\sigma = f(f)$ przy różnych wartościach napięcia BIASu (DC): dla cieczy jonowych CJ001 i CJ008 na rysunkach 6-9, dla bazowych olejów węglowodorowych GP-1 i PAO-6 na rysunkach 10-13, oraz ich mieszanin GP-1 + CJ001 i PAO-6 + CJ008 na rysunkach 14-17, a także dla referencyjnej cieczy LID 3354S na rysunkach 18 i 19.



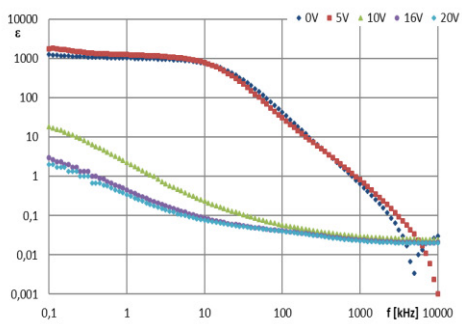
Rysunek 3. Stała ε olejów bazowych, cieczy jonowej oraz ich mieszanin [opracowanie własne]



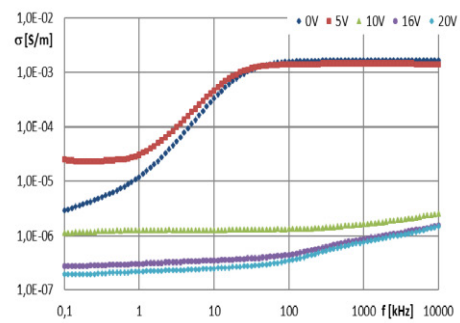
Rysunek 4. Rezystancja R olejów bazowych, cieczy jonowej oraz ich mieszanin [opracowanie własne]



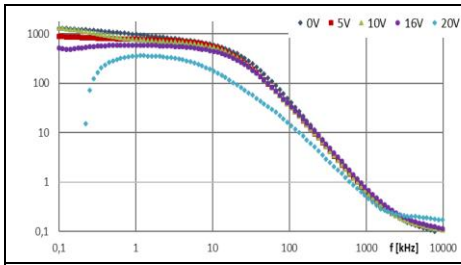
Rysunek 5. Konduktywność σ olejów bazowych, cieczy jonowej oraz ich mieszanin [opracowanie własne]



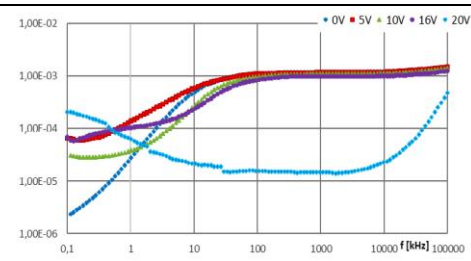
Rysunek 6. Zależność ε = f(*f*) cieczy CJ001 dla różnych wartości U [opracowanie własne]



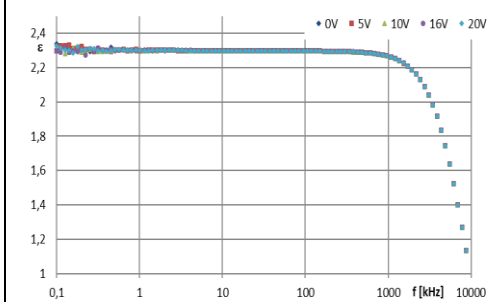
Rysunek 7. Zależność σ = f(*f*) cieczy CJ001 dla różnych wartości U [opracowanie własne]



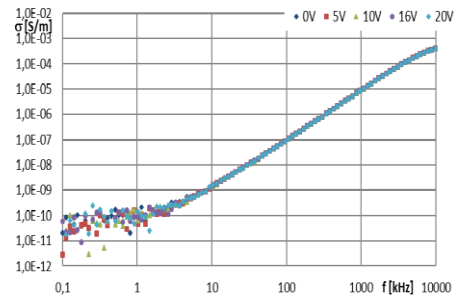
Rysunek 8. Zależność ε = f(*f*) cieczy CJ008 dla różnych wartości U [opracowanie własne]



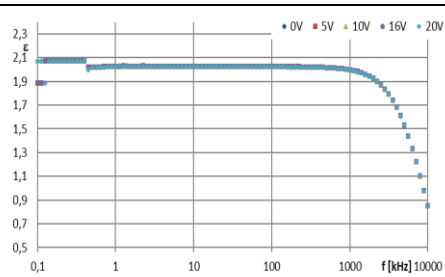
Rysunek 9. Zależność σ = f(f) cieczy CJ008 dla różnych wartości U [opracowanie własne]



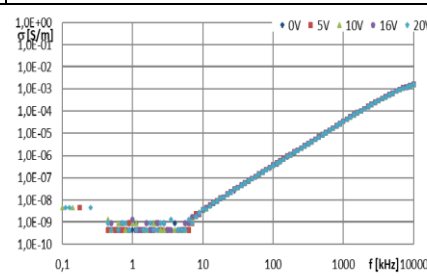
Rysunek 10. Zależność ε = f(*f*) oleju GP-1 dla różnych wartości U [opracowanie własne]



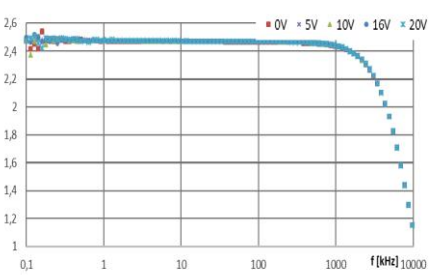
Rysunek 11. Zależność σ = f(f) oleju GP-1 dla różnych wartości U [opracowanie własne]



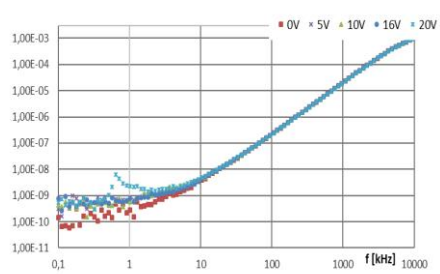
Rysunek 12 Zależność ε = f(*f*) oleju PAO-6 dla różnych wartości U [opracowanie własne]



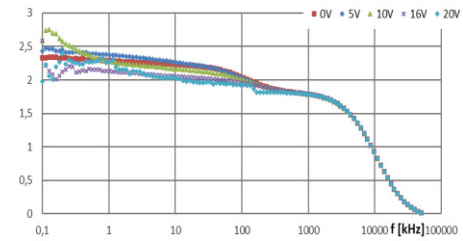
Rysunek 13 Zależność σ = f(*f*) oleju PAO-6 dla różnych wartości U [opracowanie własne]



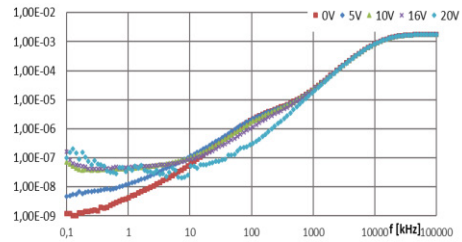
Rysunek 14. Zależność ε = f(*f*) mieszaniny GP-1 + CJ001 dla różnych wartości U [opracowanie własne]



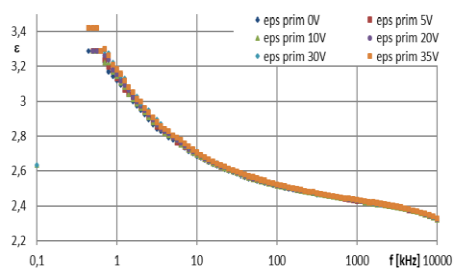
Rysunek 15. Zależność σ = f(*f*) mieszaniny GP-1 + CJ001 dla różnych wartości U [opracowanie własne]



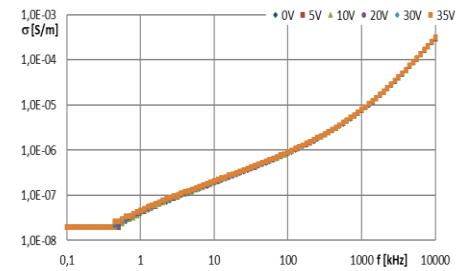
Rysunek 16. Zależność ε = f(*f*) mieszaniny PAO-6 + CJ008 dla różnych wartości U [opracowanie własne]



Rysunek 17. Zależność σ = f(*f*) mieszaniny PAO-6 + CJ008 dla różnych wartości U [opracowanie własne]

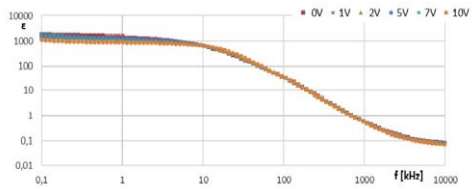


Rysunek 18. Zależność ε = f(*f*) cieczy referencyjnej LID 3354S dla różnych wartości U [opracowanie własne]

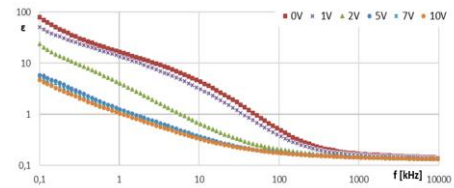


Rysunek 19. Zależność σ = f(f) cieczy referencyjnej LID 3354S dla różnych wartości U [opracowanie własne]

W celu dokładniejszego rozpoznania wpływu mniejszych wartości napięcia BIASu (DC) na przebieg charakterystyki ε = f(*f*) przebadano dodatkowo ciecz jonową CJ008 w spektroskopii dielektrycznej z komórkami ITO o grubości 12 μm. Pomiar wykonano w zakresie częstotliwości takiej samej jak poprzednio, tj. 0,1-10000 kHz, ale dla mniejszych napięć BIASu (DC), tj. od 0 do 10 V (0; 1; 2; 5; 7; 10). Do tej próby wykorzystano ciecz jonową CJ008 o mniejszej skłonności do zmian ε pod wpływem napięcia pola BIASu (DC) niż ciecz CJ001 (rys. 6 i 8) i dającej w mieszaninie z PAO-6 trzykrotnie większy efekt ER niż mieszanina oleju GP-1 z cieczą jonową CJ001 (rys. 2). Poniżej przedstawiono wybrany przykład pomiarów części rzeczywistej przenikalności elektrycznej ε cieczy jonowej CJ008 w funkcji częstotliwości f pola pomiarowego dla małych napięć BIASu (DC) w zakresie U = 0 ÷ 10 V (rys. 20). W celu zaobserwowania czy przyłożone pole BIASu (DC) wpływa na dalszą historię próbki wykonano drugi (kolejny) pomiar dla tej samej próbki cieczy jonowej CJ008 – dla tych samych pól BIASu (DC) – rysunek 21.



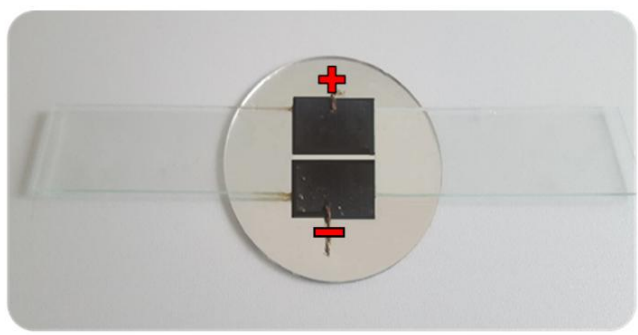
Rysunek 20. Wyniki pierwszego pomiaru zależności ε od częstotliwości *f* dla próbki CJ008 w polu BIASu o małym napięciu (0-10 V)



Rysunek 21. Wyniki drugiego (następnego) pomiaru ε od częstotliwości *f* dla próbki CJ008 w polu BIASu o małym napięciu (0-10 V)

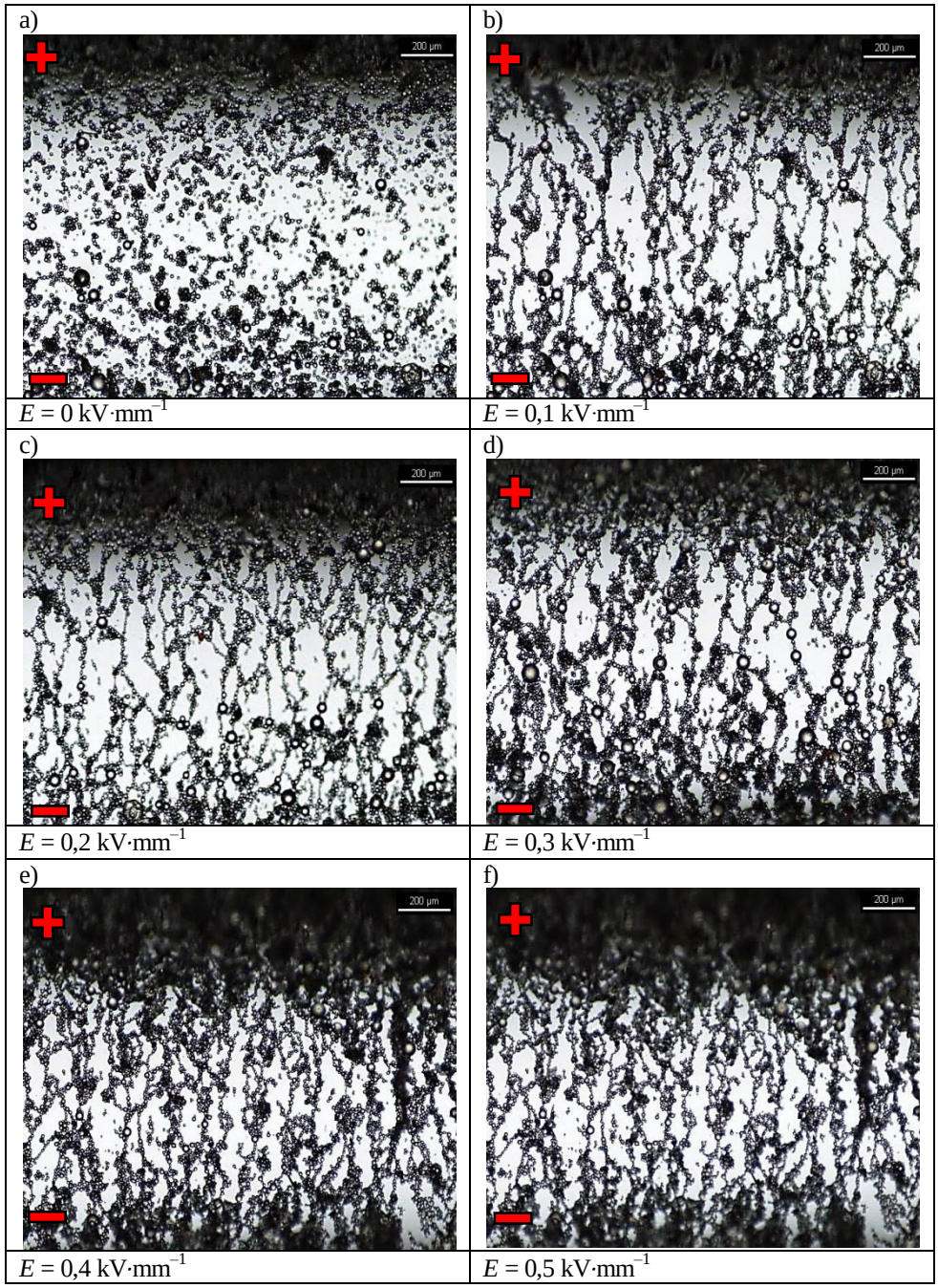
2.5. Mikroskopowe badania in situ mechanizmu efektu ER

W celu rozpoznania mechanizmu efektu ER, jego powstania i przebiegu, przeprowadzono badania mikroskopowe in situ przygotowanych mieszanin, podczas działania zewnętrznego stałego pola elektrycznego. Obserwacje mikroskopowe przeprowadzono na japońskim mikroskopie optycznym NIKON Eclipse LV100D [33]. Do rejestrowania fotografii oraz video mikroskop sprzężony był z komputerem PC z zainstalowanym oprogramowaniem do analizy obrazu NIS-AR. Do przeprowadzenia obserwacji in situ wykonano „naczynie" z elektrodami (rys. 22), które zapełniono badaną cieczą. Elektrody były zasilane prądem stałym przez zasilacz wysokonapięciowy HCP 14-6500 firmy FUG Elektronik GmbH, który był wcześniej elementem składowym stanowiska ze zmodernizowanym wiskozymetrem Brookfield DV-III Ultra (rys. 1). Obserwacja była prowadzona w świetle przechodzącym przy powiększeniu obiektywu x50 z wykorzystaniem techniki jasnego pola w temperaturze ok. 25°C i wilgotności powietrza ok. 55%.



Rysunek 22. Naczynie szklane z elektrodami do obserwacji mechanizmu ER [opracowanie własne]

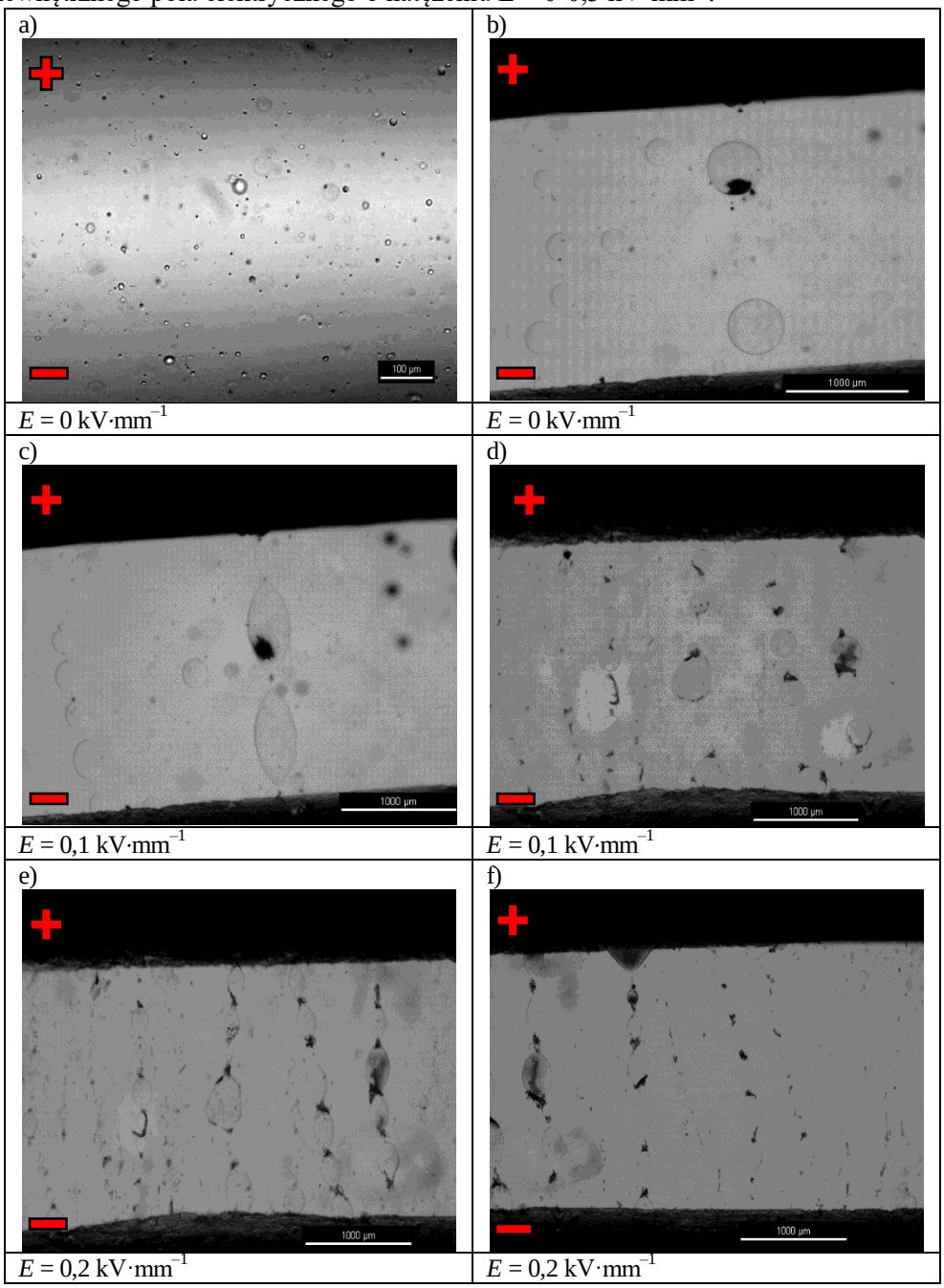
W pierwszej kolejności przeprowadzono obserwacje mikroskopowe *in situ* komercyjnej cieczy ER LID 3354S, która w opisywanych badaniach pełniła funkcję cieczy wzorcowej i referencyjnej. Na kolejnych zdjęciach przedstawiono wybrane, charakterystyczne sekwencje obrazujące zmiany struktury wewnętrznej cieczy ER LID 3354S w miarę wzrostu natężenia stałego pola elektrycznego (rys. 23a-f).



Rysunek 23. a)-f). Widok cieczy ER LID 3354S obserwowanej pod mikroskopem polaryzacyjnym Nikon Eclipse LV100D [opracowanie własne]

Procedura badania mieszanin zawierających ciecze jonowe była podobna. Na kolejnym rysunku 24 przedstawiono wybrane, charakterystyczne sekwencje zdjęć obrazujących zmiany struktury wewnętrznej mieszaniny ER skomponowanej z badanego oleju

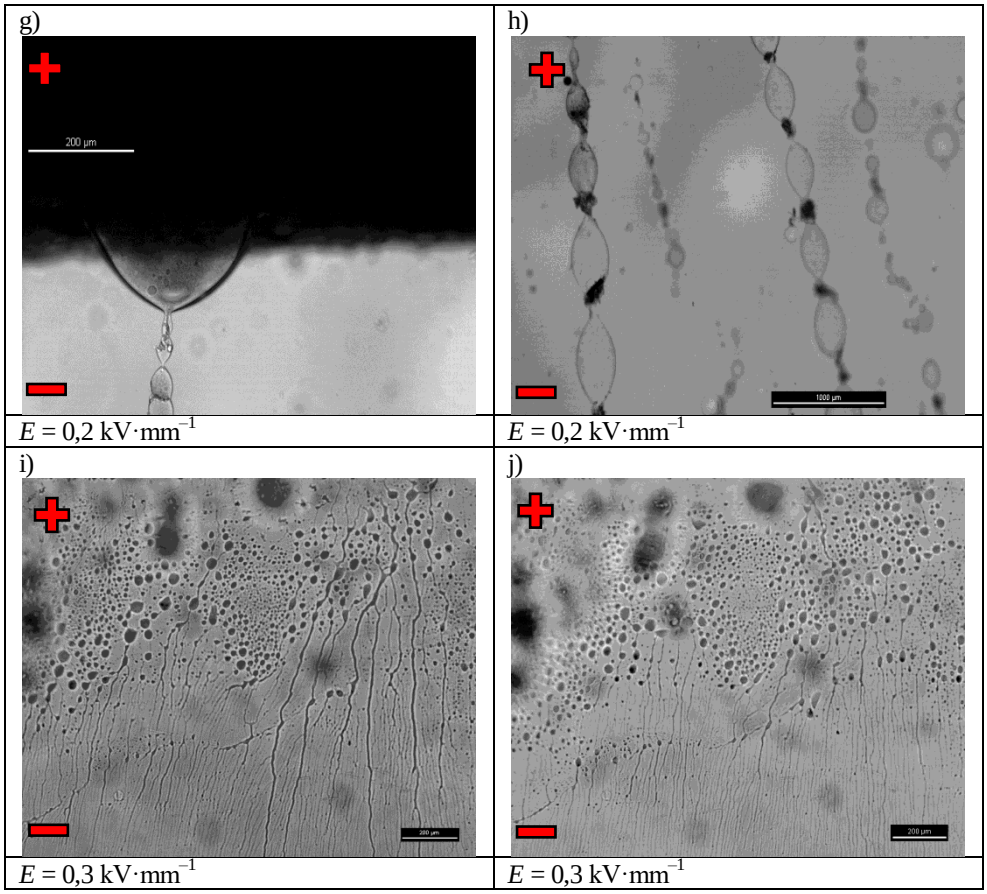
polialfaolefinowego PAO-6 jako matrycy i 2% (v/v) cieczy jonowej CJ008, tj. triheksylotetradecylofosfoniowego bis(trifluorometylosulfonylo)imidu, poddanej działaniu zewnętrznego pola elektrycznego o natężeniu E = 0-0,3 kV·mm^{-1}.



E = 0 kV·mm^{-1} | *E* = 0 kV·mm^{-1}

E = 0,1 kV·mm^{-1} | *E* = 0,1 kV·mm^{-1}

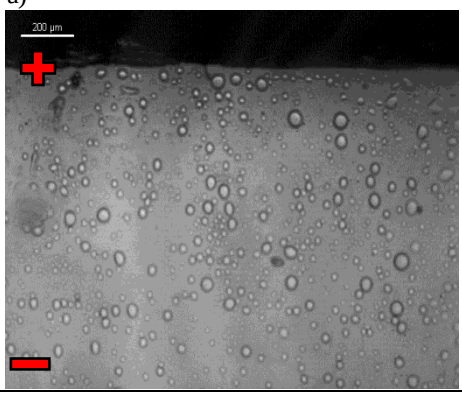
E = 0,2 kV·mm^{-1} | *E* = 0,2 kV·mm^{-1}



Rysunek 24. a)-j). Widok mieszaniny PAO-6 + CJ008 obserwowanej pod mikroskopem polaryzacyjnym Nikon Eclipse LV100D [opracowanie własne]

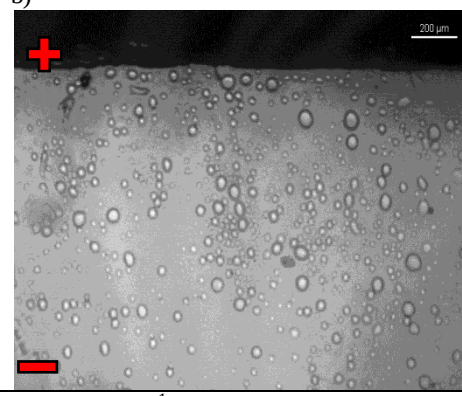
Na kolejnym rysunku 25 przedstawiono wybrane, charakterystyczne sekwencje zdjęć obrazujących zmiany struktury wewnętrznej mieszaniny ER skomponowanej z silikonowej cieczy tłumiącej GP-1 jako matrycy i 2% (v/v) cieczy jonowej CJ001, tj. tetrafluoroboranu 1-metylo-3-oktyloksymetyloimidazolowego, poddanej działaniu zewnętrznego pola elektrycznego o natężeniu E = 0-0,3 kV·mm^{-1}.

a)



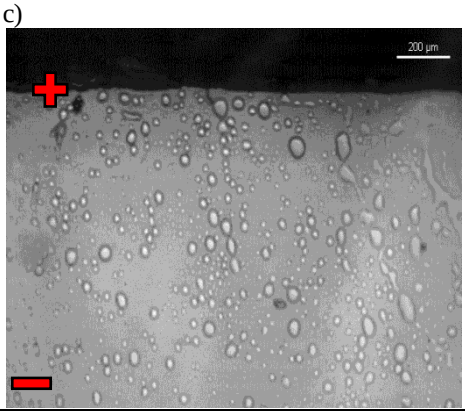
$E = 0\ \mathrm{kV \cdot mm^{-1}}$

b)



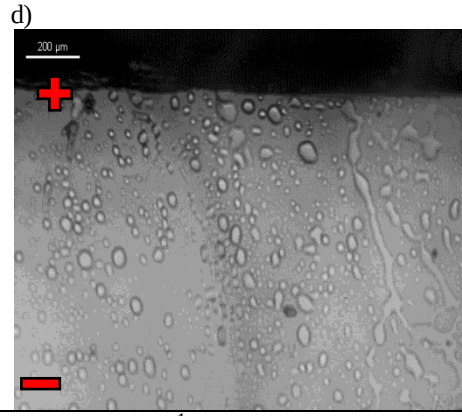
$E = 0\ \mathrm{kV \cdot mm^{-1}}$

c)



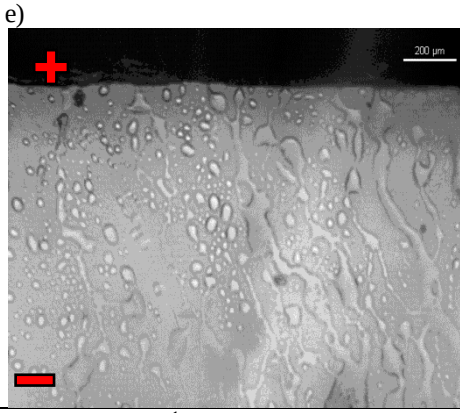
$E = 0{,}1\ \mathrm{kV \cdot mm^{-1}}$

d)



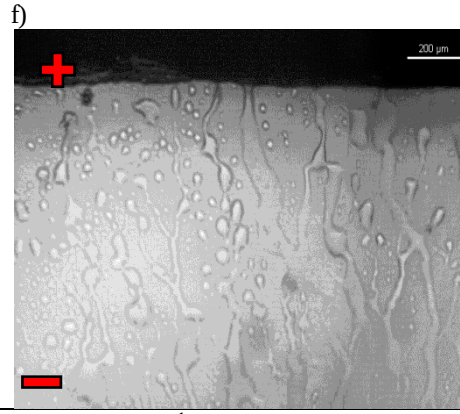
$E = 0{,}1\ \mathrm{kV \cdot mm^{-1}}$

e)

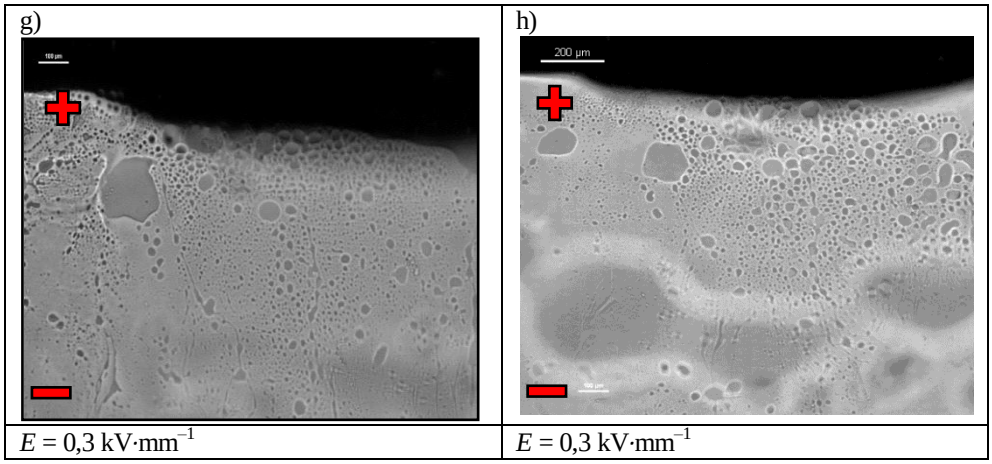


$E = 0{,}2\ \mathrm{kV \cdot mm^{-1}}$

f)



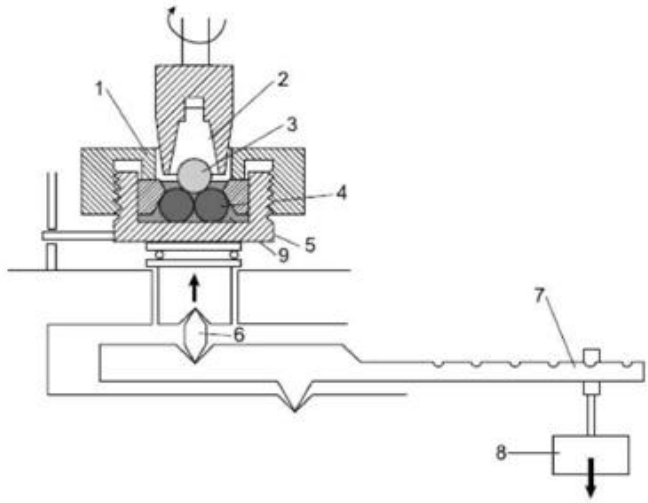
$E = 0{,}2\ \mathrm{kV \cdot mm^{-1}}$



Rysunek 25. a)-h). Widok mieszaniny GP-1 + CJ001 obserwowanej pod mikroskopem polaryzacyjnym Nikon Eclipse LV100D [opracowanie własne]

2.6. Ocena właściwości smarnościowych mieszanin

Do oceny właściwości smarnościowych olejów i smarów plastycznych powszechnie w świecie stosuje się aparaty czterokulowe według określonych w normach zasad. Autorzy prowadzili wcześniej [1-4, 7, 35] wiele badań właściwości smarnościowych olejów smarujących, cieczy jonowych, w tym cieczy jonowych zastosowanych obecnie do skomponowania mieszanin ER, zgodnie z metodyką opartą na normie PN-76/C-04147. Obecne badania postanowiono przeprowadzić według tych samych zasad. Stosując aparat czterokulowy T-02 (prod. ITeE w Radomiu), wyznaczone zostały trzy parametry: dwa normatywne, tj. obciążenie zacierające P_t i graniczne obciążenie zużycia G_{OZ} oraz dodatkowo nienormatywny parametr p_{oz} określający naciski jednostkowe po zacieraniu, osiągnięte po pełnych biegach płynnego obciążenia, aż do uzyskania maksymalnego dopuszczalnego obciążenia, przy którym aparat czterokulowy samoczynnie wyłączał się. Obciążenie zacierające P_t to obciążenie osiągnięte przy płynnie narastającym w sposób ciągły (liniowo) obciążeniu z określoną prędkością (409 $N \cdot s^{-1}$), przy którym w warunkach ustalonych, gdy prędkość obrotowa górnej kuli wynosi 500 $obr \cdot min^{-1}$ nastąpi wyraźny wzrost oporów w węźle tarcia (momentu tarcia) wskazujący na przerwanie warstwy smarującej, charakteryzujący się nagłym wzrostem skaz zużycia mierzonych na dolnych kulach aparatu czterokulowego (rys. 26). Natomiast parametr G_{OZ} to obciążenie jednostkowe ([$N \cdot mm^{-2}$]) określające naciski w węźle tarcia uzyskane na końcu testu przy stałym obciążeniu nadanym na dźwigni aparatu czterokulowego (rys. 26) – najczęściej P = 150 kG, tj. 1471,0 N, w warunkach ustalonych, gdy prędkość obrotowa górnej kuli wynosi n = 500 $obr \cdot min^{-1}$, obliczone na podstawie średniej średnicy skaz zużycia powstałych na nieruchomych, dolnych kulach po 60-sekundowym „biegu" aparatu czterokulowego [34].



Rysunek 26. a)-h). Schemat skojarzenia badawczego aparatu czterokulowego: 1 – pokrywa mocująca kule dolne, 2 – uchwyt obrotowy kuli górnej, 3 – kula górna, 4 – kule dolne nieruchome, 5 – naczynie z badaną cieczą, 6 – pryzmat, 7 – dźwignia, 8 – obciążenie, 9 – badana ciecz

Pierwszy parametr P_t charakteryzuje właściwości przeciwzatarciowe cieczy, a drugi G_{OZ} właściwości przeciwzużyciowe. Dodatkowy parametr p_{oz} pozwolił na obserwację zachowania się smarów w okresie zacierania przy wzrastającym nadal obciążeniu (po przekroczeniu P_t), aż do wartości maksymalnej, gdy aparat czterokulowy samoczynnie wyłączał się oraz na identyfikację odpowiednich wartości zużycia. Taki zestaw parametrów smarnościowych pozwolił na optymalną ocenę porównawczą badanych mieszanin oraz ich składników. Jako końcowe wyniki oznaczania P_t, G_{OZ} i p_{oz} przyjmowano, zgodnie z zaleceniem normy [34], średnie arytmetyczne wyników trzech kolejnych oznaczeń nie różniących się od ich średniej arytmetycznej więcej niż 10%.

W tabeli 4 zebrano wartości średnie parametrów smarnościowych badanych mieszanin oraz ich składników.

Tabela 4. Parametry smarnościowe mieszanin ER oraz ich składników

Rodzaj cieczy	Obciążenie zacierające P_t [N]	Czas do uzyskania P_t [s]	Graniczne obciążenie zużycia G_{oz} [N·mm^{-2}]	Średnica skaz zużycia pod obc. 1471 N [mm]	Nacisk po osiągnięciu P_{max} - P_{oz} [N·mm^{-2}]	Średnica skaz zużycia przy P_{max} [mm]
CJ001	4601,3	11,25	3186,9	0,49	6200,7	0,811
CJ008	3967,3	9,70	3060,7	0,50	5635,5	0,851
PAO-6	1165,7	2,85	452,8	1,30	4799,5	0,921
GP-1	736,2	1,80	378,7	1,42	4262,8	0,984
PAO-6 + CJ008	1881,4	4,60	522,5	1,21	5099,4	0,894
GP-1 + CJ001	777,1	1,90	432,4	1,33	4635,9	0,936

Źródło: Opracowanie własne

3. Analiza wyników badań

Zgromadzone wyniki badań skłaniają do stwierdzenia, że uzyskanie jednorodnej, homogenicznej mieszaniny o właściwościach ER, na bazie oleju węglowodorowego jako cieczy izolującej z dodatkiem niewielkiej ilości cieczy jonowej jako składnika aktywnego elektrycznie, napotyka na spore trudności. Po pierwsze bardzo trudno jest dobrać ciecz jonową dobrze mieszającą się w cieczy węglowodorowej będącej dobrym izolatorem elektrycznym. Nie ma większego problemu z dobraniem samej cieczy węglowodorowej o znakomitych właściwościach izolujących (np. dobrane tu PAO-6 i GP-1). Znacznie trudniej dobrać ciecz jonową, której niewielka ilość pozwoli wytworzyć jednorodną mieszaninę (roztwór lub emulsję koloidalną) o właściwościach ER. Ciecz taka powinna mieć małą lepkość w warunkach braku działania pola elektrycznego, duży przyrost naprężenia ścinającego (lepkości) podczas działania stałego pola elektrycznego, krótki czas reakcji, możliwość pracy w szerokim zakresie temperatur. W cieczach homogenicznych nie występują niekorzystne zjawiska typowe dla cieczy heterogenicznych, np. takie jak koagulacja i sedymentacja, związane z obecnością w nich cząstek stałych. Jednak znacznym ograniczeniem w zastosowaniu praktycznym homogenicznych cieczy ER jest ich znaczna wrażliwość na zanieczyszczenia oraz skłonność do przebicia elektrycznego (zwarcia).

Dobrane do badań ER dwie mieszaniny, tj. GP-1 + CJ001 oraz PAO-6 + CJ008 spełniały niemal wszystkie wymagania. Okazało się jednak, że obie ciecze jonowe mają zbyt dużą przewodność elektryczną (rys. 3) co przy większej ich zawartości w oleju bazowym było przyczyną przebicia podczas oddziaływania pola elektrycznego. Jednakże zmniejszenie zawartości cieczy jonowej w oleju do 2% (v/v) umożliwiło uzyskanie mieszanin o właściwościach ER. Uzyskany efekt ER był jednak krótkotrwały i niepowtarzalny dla tej samej próbki cieczy, co sugerowało nieodwracalne zmiany struktury wewnętrznej tych mieszanin pod wpływem działania zewnętrznego pola elektrycznego. Lepszy efekt ER (większe wartości τ i η podczas działania zewnętrznego pola elektrycznego – tabela 3) uzyskano dla mieszaniny PAO-6 + CJ008.

Zbadane mieszaniny wykazały odmienne charakterystyki reologiczne $\tau = f(\gamma')$, zarówno w przypadku braku oddziaływania zewnętrznego pola elektrycznego, jak i w obecności tego pola (rys. 2). Mieszanina GP-1 + CJ001, przy braku pola elektrycznego zachowywała się jak ciecz Binghama ($\tau = \eta_p \cdot \gamma' + \tau_o$), chociaż jej naprężenie graniczne (τ_o) miało małą wartość (ok. 0,5 Pa). W obecności pola elektrycznego do wartości E = 0,2 kV·mm^{-1}, charakterystyka reologiczna tej cieczy mogła być opisana równaniem Herschela – Bulkley'a ($\tau = m_1 \cdot \gamma'^{n}_1 + \tau_o$) przy $n_1 < 1$ typowym dla lepkoplastycznej cieczy pseudoplastycznej. Druga mieszanina, tj. PAO-6 + CJ008 przy E = 0 V zachowywała się jak ciecz newtonowska ($\tau = \eta \cdot \gamma'$), a w obecności pola elektrycznego do wartości E = 0,2 kV·mm^{-1} jej charakterystyka reologiczna mogła być opisana równaniem Ostwalda – de Waele ($\tau = m_2 \cdot \gamma'^{n_2}$) przy $n_2 < 1$ typowym dla lepkiej cieczy pseudoplastycznej.

Po zwiększeniu natężenia pola elektrycznego do wartości E = 0,3 kV·mm^{-1} charakterystyki reologiczne obu mieszanin odpowiadały tym, które miały one przy braku oddziaływania pola elektrycznego, tzn. w przypadku mieszaniny GP-1 + CJ001 charakterystyce wg równania Binghama, a w przypadku mieszaniny PAO-6 + CJ008 charakterystyce wg równania Newtona. Należy w tym miejscu przypomnieć, że pomiary

właściwości ER tych mieszanin zmodernizowanym wiskozymetrem Brookfield DV-III Ultra były realizowane przy możliwie najmniejszej prędkości ścinania: w przypadku mieszaniny GP-1 + CJ001 była to wartość $\gamma'_{min} = 4{,}20\ s^{-1}$, a w przypadku mieszaniny PAO-6 + CJ008 - $\gamma' = 2{,}67\ s^{-1}$ (tab. 3). Uzyskanie jeszcze mniejszych prędkości ścinania, przy zdeterminowanym doborze zestawów „wrzeciono/cylinder" (tab. 2) nie było możliwe. Zatem rzeczywisty przebieg charakterystyki reologicznej $\tau = f(\gamma')$ dla jeszcze mniejszych wartości ścinania jest praktycznie niemożliwy do określenia, jednak ustalone dla obu mieszanin przebiegi $\tau = f(\gamma')$ są najbardziej prawdopodobne. W obu przypadkach przy $E = 0{,}3\ kV \cdot mm^{-1}$ wartość lepkości dynamicznej (η) znów odpowiadała wartości występującej przy E = 0. Maksymalne wartości lepkości spowodowane działaniem pola elektrycznego, uzyskiwano w obu przypadkach przy najmniejszych szybkościach ścinania, gdy natężenie pola elektrycznego wynosiło $E = 0{,}2\ kV \cdot mm^{-1}$. W przypadku mieszaniny GP-1 + CJ001 była to wartość $\eta = 435{,}71$ mPa·s, która przy tej samej szybkości ścinania była niemal 2,5 raza większa od lepkości rejestrowanej przy braku pola elektrycznego, gdy rejestrowano wartość $\eta = 128{,}57$ mPa·s (tab. 3). Natomiast w przypadku mieszaniny PAO-6 + CJ008, której składniki są bardziej polarne aniżeli GP-1 + CJ001 (tab. 1) efekt działania pola elektrycznego był większy. Uzyskano przyrost lepkości do wartości $\eta = 1247{,}19$ mPa·s (tab. 3), która była większa niemal 20 razy od wartości (η) przy braku pola elektrycznego. Zatem wielokrotnie lepszy efekt ER uzyskano dla mieszaniny PAO-6 + CJ008 opisanej równaniem potęgowym Ostwalda – de Waele ($\tau = m_2 \cdot \gamma'^{n_2}$), której składniki różniły się wartością lepkości o 279,88 mPa·s, tj. dwa razy mniej niż w mieszaninie GP-1 + CJ001 opisanej równaniem Herschela – Bulkley'a ($\tau = m_1 \cdot \gamma'^{n_1} + \tau_o$), gdzie różnica ta wyniosła 539,81 mPa·s. Należy równocześnie zauważyć, że w pierwszym przypadku bazowa ciecz izolująca, czyli PAO-6, miała lepkość $\eta = 47{,}36$ mPa·s, a w drugim przypadku bazowa ciecz izolująca, czyli GP-1, miała lepkość $\eta = 12{,}61$ mPa·s, tj. cztery razy mniejszą od PAO-6. Takie spostrzeżenia sugerują, że w omawianym przypadku wpływ na prawie trzykrotnie większą maksymalną wartość lepkości mieszaniny PAO-6 + CJ008 ($\eta = 1247{,}19$ mPa·s) przy $E = 0{,}2\ kV \cdot mm^{-1}$, od mieszaniny GP-1 + CJ001 ($\eta = 435{,}71$ mPa·s) przy tej samej wartości $E = 0{,}2\ kV \cdot mm^{-1}$ (tab. 3) miała m.in. większa lepkość cieczy bazowej PAO-6 od GP-1, a nie zróżnicowanie lepkości obu składników mieszaniny, co z kolei mogło wiązać się z występowaniem niewielkiego naprężenia granicznego (τ_o) w mieszaninie GP-1 + CJ001 (rys. 2).

Oceniane ciecze jonowe nie były zakupione celowo do badań właściwości elektroreologicznych mieszanin, do których je dodano. Stanowiły one zbiór posiadanych cieczy jonowych badanych wcześniej jako perspektywiczne oleje smarujące [25, 28]. W tamtych badaniach stwierdzono znakomite właściwości tribologiczne wielu cieczy jonowych, dlatego postanowiono podjąć próbę wykorzystania ich również jako cieczy aktywnych elektrycznie w mieszaninach, w których izolującym olejem bazowym są węglowodorowe oleje smarujące. W opisywanym przypadku stwierdzono powstawanie efektu ER i jego maksymalizację przy $E = 0{,}2\ kV \cdot mm^{-1}$, a następnie zanik przy $E = 0{,}3\ kV \cdot mm^{-1}$. W celu szczegółowego rozpoznania przyczyn powstawania i zaniku efektu ER postanowiono przeprowadzić dodatkowe badania w spektroskopii dielektrycznej składników obydwu omawianych mieszanin (rys. 3-21). Z uzyskanych wyników określających stałą dielektryczną (ε) wynika, że największą jej wartość

wykazała ciecz jonowa CJ008, tj. triheksylotetradecylofosfoniowy bis(trifluorometylosulfonylo)imid, która przy f = 1 kHz i zerowym napięciu BIASu (DC) wyniosła ε = 1127, natomiast ciecz jonowa CJ001, tj. tetrafluoroboran 1-metylo-3-oktyloksymetyloimidazolowy, miała tę wartość nieco mniejszą, tj. ε = 1035 (rys. 3, 6, 8). Zwiększenie napięcia BIASu (DC) powodowało spadek wartości (ε), znacznie bardziej intensywny w przypadku cieczy jonowej CJ001 (rys. 6), aniżeli cieczy jonowej CJ008 (rys. 8). To zróżnicowanie może wynikać z różnej liczby sparowanych jonów w obu cieczach [33]. Jony takie mają stosunkowo małą ruchliwość i dają wkład do przenikalności dla stosunkowo małych częstotliwości, przy większych częstotliwościach wpływ ten zanika – szybciej w cieczy jonowej CJ001 aniżeli w cieczy jonowej CJ008. Może to być kolejna pośrednia przyczyna uzyskania słabego efektu ER dla mieszaniny zawierającej ciecz jonową CJ001. Wartość (ε) tej cieczy, przy f = 1 kHz i dla U ≥ 10 V osiągały zakres typowy dla cieczy dielektrycznych i izolujących (rys. 6). W przypadku CJ008 dopiero napięcie U ≥ 16 V powodowało znaczący spadek (ε) – rysunek 8. Z charakterystyk ε = f(*f*) dla cieczy jonowych wynika, że pomiary powyżej 10 kHz mają już wątpliwą analityczną przydatność, a powyżej 100 kHz nie mają większego sensu, ponieważ są one zniekształcone przez specyficzne właściwości komórki ITO zdeterminowane przez tzw. częstotliwość odcięcia. Przebieg charakterystyk ε = f(*f*) (rys. 6 i 8) świadczy o silnym wpływie pola BIASu (DC) na ciecze jonowe i potwierdza wcześniejsze przypuszczenia, że duże pole BIASu (DC) wpłynęło destrukcyjnie na badane ciecze jonowe i zmieniło ich właściwości. Na rysunkach 20 i 21 pokazano, jak wpłynęło przyłożone pole BIASu (DC) na dalszą historię próbki cieczy jonowej CJ008, tj. tej, która dawała trzykrotnie większy efekt ER w mieszaninie z PAO-6, aniżeli ciecz jonowa CJ001 w mieszaninie z olejem GP-1. Pomiary takie powtarzano wielokrotnie w różnym okresie i w odmiennych warunkach otoczenia, uzyskując wyniki wskazujące tę samą tendencję. Potraktowanie cieczy CJ008 polem BIASu (DC) nie powodowało dużych zmian tylko dla małych napięć 1-2 V, tzn. że charakterystyki przenikalności elektrycznej w funkcji częstotliwości były wówczas z reguły podobne, a czasami takie same. Zdarzało się jednak, że charakterystyki dla małych napięć U ≤ 5 V bywały „podbite" (np. rys. 6 i 8), co może być spowodowane zmienną ruchliwością jonów. Generalnie zwiększania napięcia BIASu (DC) powodowało, że przenikalność elektryczna cieczy malała, przy czym mogło to być zmniejszenie o zróżnicowanej wartości i przebiegu nawet w przypadku tej samej cieczy, z tych samych powodów co powyżej. Natomiast na rysunku 21 widzimy, że wcześniejsze przyłożenie stałego napięcia spowodowało duże zmiany. Zmienione wartości części rzeczywistej przenikalności elektrycznej są wielokrotnie mniejsze – w podanym przykładzie na rysunkach 20 i 21 nawet prawie stukrotnie mniejsze dla U = 0 i f = 1 kHz. Dla tej częstotliwości oraz U ≥ 2 V wartość (ε) osiągnęła zakres typowy dla cieczy dielektrycznych i izolujących. Zatem ponowne przyłożenie napięcia pola BIASu (DC) do tej samej próbki cieczy CJ008 przyspieszyło proces destrukcji i doprowadziło do takiego samego stanu jak w CJ001, która już po jednorazowym działaniu pola BIASu (DC) uległa takiej destrukcji.

Zupełnie inaczej zachowywały się oleje bazowe PAO-6 i GP-1. Ich stałe dielektryczne były stabilne zarówno w funkcji przyrostu napięcia pola BIASu (DC), jak i w funkcji jego częstotliwości, gdy rejestrowano szerokie plateau, nawet powyżej 100 kHz (rys. 10 i 12) i wynosiły odpowiednio 2,02 i 2,30 (rys. 3). Oznacza to, że właści-

wości dielektryczne obu olejów bazowych nie zależą od przyłożonego pola BIASu (DC). Zwiększenie wartości (U) tego pola nie powodowało żadnych zmian wartości stałej dielektrycznej tych olejów. Oleje bazowe PAO-6 i GP-1 są nieprzewodzące, co potwierdza ich przydatność jako cieczy izolujących w mieszaninach ER.

W przypadku badanych mieszanin GP-1 + CJ001 i PAO-6 + CJ008 zauważono niewielki przyrost wartości stałej dielektrycznej (ε) w obszarze stabilnego plateau (rys. 14 i 16). Dla mieszaniny GP-1 + CJ001 wzrost ten wyniósł 0,17 w stosunku do oleju bazowego GP-1, dla którego ε = 2,30 (rys. 3). Nieco większy przyrost wartości stałej dielektrycznej zanotowano dla mieszaniny PAO-6 + CJ008, tj. o 0,26 w stosunku do oleju bazowego PAO-6, dla którego ε = 2,02 (rys. 3). W tym przypadku plateau nie było już takie stabilne. Notowano nieznaczny spadek (ε) w przedziale 0-100 kHz i równocześnie nieustabilizowane wartości (ε) dla różnych wartości (U), niekoniecznie związane z przyrostem napięcia. Z dielektrycznego punktu widzenia ta niewielka domieszka cieczy jonowych praktycznie nie przyniosła znaczącej zmiany. Podwyższanie wartości napięcia BIASu (DC) od 0 V do 20 V nie wpływało znacząco na wyniki pomiarów stałej dielektrycznej badanych mieszanin (rys. 14 i 16) – podobnie jak czystych olejów bazowych (rys. 10 i 12). Jednak w przypadku mieszaniny PAO-6 + CJ008 (rys. 16) zauważyć można, że pod wpływem działania napięcia U > 0 notowano raz spadek, a raz przyrost wartości (ε) znamionujący ciągłą zmianę wartości dielektrycznych spowodowaną prawdopodobnie chaotycznym ruchem jonów.

Na rysunku 18 przedstawiono dla porównania zależność (ε) od częstotliwości (*f*) cieczy ER LID 3354S w zakresie od 0 V do 35 V napięcia pola BIASu (DC). Ciecz ta wykazywała bardzo dużą odporność na działanie napięcia BIASu (DC), jednak nie wykazywała plateau w funkcji przyrostu częstotliwości (*f*); ponadto jej stała dielektryczna (ε) zarejestrowana przy f = 1 kHz była trochę niestabilna (3,15-3,20) przy zmianie napięcia pola BIASu (DC) – jednak bez wyraźnie zaznaczonej tendencji. Objaw ten był prawdopodobnie wynikiem nierównomiernej dyspersji stałych cząstek polimerowych w oleju bazowym cieczy ER LID 3354S. Przy trochę większych częstotliwościach (*f*) objaw ten znikał, a stała dielektryczna (ε) niezależnie od przyłożonego napięcia miała tę samą wartość, stale łagodnie malejącą w funkcji częstotliwości (*f*) aż do wartości ok. 2,5 przy ok. 100 kHz (rys. 18). Równocześnie ze spadkiem (ε) w funkcji częstotliwości (*f*) rosła łagodnie konduktywność σ (rys. 19) i malała odpowiednio rezystancja (R). Wartość rezystancji (R) zobrazowano na rysunku 4, a na rysunku 5 parametr przeciwstawny do (R), tj. konduktywność σ. Najwyższą wartość przewodnictwa elektrycznego, przy f =1 kHz oraz U = 0, wykazała ciecz jonowa CJ008, której $\sigma = 2{,}73 \cdot 10^{-5}$ S·m^{-1}. Jednak, w zakresie częstotliwości f = 1÷10 kHz (rys. 9) zarejestrowano liczne „zawirowania" przebiegu krzywych σ = f(*f*) będące wynikiem chaotycznych ruchów jonów w polu elektrycznym, nasilających się wraz ze wzrostem wartości (U). Początkowo przy U = 0 V wraz ze wzrostem (*f*) rosła konduktywność (σ). Następnie przy U > 0 charakterystyki były „podbite" (rys. 9). Taki stan dotyczył szczególnie cieczy jonowej CJ008 oraz mieszaniny PAO-6 + CJ008, (rys. 17). Drugą co do wartości σ była ciecz jonowa CJ001, dla której, przy f = 1 kHz i U = 0, wartość $\sigma = 1{,}21 \cdot 10^{-5}$ S·m^{-1}. Na rys. 7 możemy zauważyć, że początkowo przy U = 0 V wraz ze wzrostem częstotliwości (*f*), konduktywność σ rosła. Następnie przy U = 5 V nastąpiło „podbicie" tych wyników. Kolejne zwiększenie napięcia pola BIASu (DC) spowo-

dowało znaczny spadek konduktywności (σ) i przy U = 20 V i f = 1 kHz wynosiła ona $\sigma = 2{,}18 \cdot 10^{-7}$ S·m^{-1} (rys. 7).

Charakterystyki σ = f(*f*) czystych olejów bazowych GP-1 i PAO-6, przedstawione na rys. 11 i 13 są typowe dla cieczy dielektrycznych i kompatybilne z przebiegiem charakterystyk ε = f(*f*) i R = f(*f*).

Wyniki mikroskopowych badań in situ obu mieszanin, tj. PAO-6 + CJ008 i GP-1 + CJ001, poddanych działaniu zewnętrznego pola elektrycznego, pozwoliły na szczegółowe rozpoznanie przebiegu mechanizmu ER, potwierdzenie jego zaistnienia i zarejestrowanie objawów zmian struktury wewnętrznej badanych mieszanin, prowadzących do zaniku efektu ER. Dla porównania takie same badania mikroskopowe wykonano z komercyjną cieczą ER LID 3354S. Wybrane sekwencje zdjęć obrazujących zmiany struktury wewnętrznej cieczy elektroreologicznej LID 3354S przedstawiono na rysunku 23 (a-f). Na tych fotografiach widać kolejne fazy tworzenia się tzw. „łańcuchów fibrylowych" z cząstek polimerowych obecnych w oleju silikonowym stanowiącym matrycę (bazę) cieczy LID3354S. W początkowej fazie obserwacji (rys. 23a) natężenie pola elektrycznego wynosiło E = 0 kV·mm^{-1}. Widoczne były polimerowe cząstki stałe dosyć swobodnie „zawieszone" w cieczy bazowej. Niewielkie skupiska tych cząstek były spowodowane ich wzajemnym oddziaływaniem molekularnym wynikającym z ich bardzo dużej zawartości w oleju bazowym (37,5% v/v [31]). Następnie przy zwiększonym natężeniu pola elektrycznego do wartości E = 0,1 kV·mm^{-1} (rys. 23b) obserwowano powstające w coraz większej liczbie „łańcuchy" tworzące strukturę sieci. Podczas zwiększania natężenia pola do wartości E = 0,2 kV·mm^{-1} (rys. 23c) tworząca się struktura sieci uległa zagęszczeniu. Łańcuchy polimerowych cząstek stawały się coraz grubsze, a sieć coraz gęstsza. W trakcie zwiększania natężenia pola elektrycznego do wartości E = 0,3 kV·mm^{-1}, a następnie E = 0,4 kV·mm^{-1} i E = 0,5 kV·mm^{-1} utworzona sieć stawała się coraz gęstsza szczególnie w strefach sąsiadujących z elektrodami (rys. 23 e, f). W trakcie tych badań zwiększono natężenie pola elektrycznego do wartości E = 0,6 kV·mm^{-1}, lecz struktura sieci była stabilna i nie ulegała dalszym zmianom. Oznacza to niewątpliwie, że wszystkie obecne w cieczy polimerowe cząstki zostały całkowicie „wykorzystane" do budowy łańcuchów i struktury sieci odpowiedzialnych za efekt ER. Po odłączeniu zasilania utworzona sieć i łańcuchy rozdzielały się i znów widoczne były „swobodnie zawieszone" pojedyncze nano- i mikrocząstki. W kolejnych próbach z tą samą porcją cieczy zwiększano ponownie natężenie pola elektrycznego w zakresie 0 ÷ 0,4 kV·mm^{-1}. Obserwowano podobne efekty jak w pierwszej próbie. Kilkakrotnie wykonano próby zwiększania i zmniejszania natężenia pola elektrycznego E (również przy zmienianej biegunowości) dla tej samej próbki. W każdej próbie efekty tworzenia oraz zagęszczania się utworzonej sieci polimerowych cząstek w cieczy ER LID 3354S były przewidywalne, a schemat ich tworzenia był powtarzalny.

Wyniki badań in situ mieszaniny PAO-6 + CJ008 (rys. 24 a-j) poddanej działaniu zewnętrznego pola elektrycznego o natężeniu E = 0 ÷ 0,3 kV·mm^{-1} były odmienne. Tym razem większe natężenie pola elektrycznego było zbędne, ponieważ efekt ER zanikał już przy E = 0,3 kV·mm^{-1} . Z uwagi na to, że obydwa składniki mieszaniny PAO-6 + CJ008 są przeźroczyste, obserwacja zmian procesów w niej zachodzących była mocno utrudniona, w porównaniu z obserwacją cieczy referencyjnej LID 3354S.

Dlatego, a także z powodu dużej dynamiki zmian w krótkim czasie, rejestracja charakterystycznych sekwencji zdjęć była bardzo skomplikowana i żmudna. Zdołano jednak uchwycić moment tworzenia się „łańcuchów" fibrylowych z cieczy jonowej CJ008, trochę inaczej niż miało to miejsce w heterogenicznej cieczy ER LID 3343S. Początkowo, gdy natężenie pola elektrycznego było E = 0 kV·mm^{-1} (rys. 24a) obserwowano duże rozproszenie nanocząstek cieczy jonowej CJ008 w oleju bazowym PAO-6, chociaż sporadycznie występowały również większe cząstki cieczy jonowej CJ008 świadczące o pewnej niejednorodności dyspersji (rys. 24b). Następnie przy zwiększonym natężeniu pola elektrycznego do wartości E = 0,1 kV·mm^{-1} zarejestrowano pierwsze objawy powstawania „łańcuchów fibrylowych" tworzonych właśnie przez te nieco większe i dzięki temu najbardziej widoczne na pierwszym planie cząstki. Na rysunku 24c ukazano efekt oddziaływania pola elektrycznego o natężeniu E = 0,1 kV·mm^{-1} na pojedyncze cząstki cieczy jonowej CJ008, które wydłużają się i łączą w łańcuch o kierunku zgodnym z kierunkiem działania tego pola, pomiędzy elektrodami. Na kolejnym zdjęciu (rys. 24d) widać powstawanie kolejnych, nowych „łańcuchów fibrylowych" przy tej samej wartości E = 0,1 kV·mm^{-1}. Po kolejnym wzroście wartości natężenia pola elektrycznego do E = 0,2 kV·mm^{-1} (rys. 24 e, f) rośnie liczba „łańcuchów fibrylowych" – kolejne mikrocząstki cieczy jonowej łączą się w łańcuchy pomiędzy elektrodami. Nie widać jednak jeszcze żadnych symptomów tworzenia się zagęszczonej „sieci fibrylowej" – jak to miało miejsce w cieczy LID 3354S. Zaobserwowano natomiast pierwsze pojedyncze objawy gromadzenia się cieczy jonowej przy elektrodzie (rys. 24 f, g). Na rysunku 24h pokazano strukturę tego samego łańcucha w środkowej jego części. Widoczne na zdjęciach ciemne punkty, szczególnie w miejscach styku poszczególnych cząstek cieczy jonowej w łańcuchu fibrylowym, to prawdopodobnie niezidentyfikowane nanocząstki zanieczyszczeń skupiających się łatwo w obszarach nasilonych oddziaływań molekularnych i elektrycznych. Analizując wszystkie zdjęcia obrazujące tzw. „łańcuchy fibrylowe" cieczy jonowej CJ008 można stwierdzić, że są to raczej pojedyncze łańcuchy (nierozgałęzione, nie łączące się z innymi łańcuchami) z mikrocząstek połączonych szeregowo jedna za drugą i „rozpostartych" pomiędzy elektrodami. Rozmiary mikrocząstek cieczy jonowej są zróżnicowane i przypadkowe – wynikające z uzyskanej dyspersji poszczególnych próbek cieczy jonowej CJ008 w mieszaninie z olejem bazowym PAO-6. Dalsze zwiększanie natężenia pola elektrycznego do wartości E = 0,3 kV·mm^{-1} powodowało stopniową destrukcję powstałych wcześniej „łańcuchów fibrylowych" i tworzenie się skupisk cieczy jonowej w postaci „strumieni" skupiających się przy elektrodzie (rys. 24 i, j). Po odłączeniu zasilania badana mieszanina nie powracała do stanu początkowego przedstawionego na rys. 24a; obecne mikrocząstki z rozpadu „łańcuchów fibrylowych" zalegały trwale przy elektrodach (rys. 24j). W kolejnych próbach z tą samą porcją mieszaniny nie zarejestrowano żadnych symptomów tworzenia jakichkolwiek „łańcuchów fibrylowych". Kilkukrotne zmiany biegunowości zasilania zewnętrznego stałym prądem elektrycznym również nie przynosiły żadnych efektów. Badana mieszanina PAO-6 + CJ008 uległa destrukcji i ta sama jej porcja nie wykazywała już żadnego efektu ER stwierdzonego wcześniej zarówno w badaniach reologicznych za pomocą zmodernizowanego reometru Brookfield DV-III Ultra, jak i w badaniach w tzw. spektroskopii dielektrycznej. Jednak miesza-

nina PAO-6 + CJ008 wykazała wielokrotnie większy wzrost lepkości w porównaniu z drugą badaną mieszaniną, tj. GP-1 + CJ001 (tab. 3).

Na kolejnych zdjęciach (rys. 25 a-h) przedstawiono wybrane sekwencje obrazujące zmiany struktury wewnętrznej mieszaniny skomponowanej z silikonowej hydraulicznej cieczy tłumiącej GP-1 jako matrycy i 2% (v/v) cieczy jonowej CJ001, tj. tetrafluoroboranu 1-metylo-3-oktyloksymetyloimidazolowego. Tę mieszaninę badano również tylko przy natężeniu pola elektrycznego $E = 0 \div 0{,}3$ kV·mm^{-1} z tego samego powodu co mieszaninę PAO-6 + CJ008. Jednak w tym przypadku proces tworzenia i zaniku efektu ER był trochę inny i znacznie bardziej dynamiczny. Uzyskana dyspersja cieczy jonowej CJ001 w oleju silikonowym GP-1 była bardziej równomierna i jednorodna (rys. 25 a, b) od dyspersji cieczy jonowej CJ008 w oleju bazowym PAO-6 (rys. 24 a, b), ale średni rozmiar cząstek był większy. Nie było takiego zróżnicowania średnich rozmiarów cząstek jak poprzednio. W efekcie widoczne zagęszczenie cząstek cieczy jonowej CJ001 było nieco większe niż cieczy jonowej CJ008. W początkowej fazie obserwacji, gdy natężenie pola elektrycznego wynosiło $E = 0$ kV·mm^{-1} cząstki cieczy jonowej CJ001 nie zmieniały swojego położenia, ani rozmiaru, ani struktury. Następnie zasilono obserwowaną próbkę natężeniem pola elektrycznego o wartości $E = 0{,}1$ kV·mm^{-1}. W początkowej fazie pojawiły się pojedyncze krótkie łańcuchy, na bardzo krótkich odcinkach, ustawione zgodnie z kierunkiem działania pola elektrycznego, które następnie łączyły się, tworząc jakby „strugę" cieczy jonowej w oleju bazowym spełniającą funkcję „łańcucha fibrylowego" (rys. 25 c, d). W kolejnej fazie, po zwiększeniu natężenia pola elektrycznego do wartości $E = 0{,}2$ kV·mm^{-1} następowało tworzenie kolejnych strumieni cieczy jonowej (rys. 25 e, f). Po zwiększeniu natężenia pola elektrycznego do wartości $E = 0{,}3$ kV·mm^{-1} następowało rozrywanie łańcuchów i gromadzenie się cieczy jonowej przy elektrodzie (rys. 25 g, h). Po odłączeniu zasilania badana mieszanina nie powracała do stanu początkowego przedstawionego na rys. 25a. Mikrocząstki z rozpadu „strumieni (łańcuchów) fibrylowych" zalegały trwale przy elektrodach, tworząc widoczną na rys. 25g i rys. 25h warstwę. Na rys. 25g widać fazę rozpadu strumieni i gromadzenie się cieczy jonowej przy elektrodzie. Na rys. 25h zarejestrowano większe skupiska cieczy jonowej zalegającej w niewielkiej odległości od elektrody. W kolejnych próbkach z tą samą porcją mieszaniny GP-1 + CJ001 nie zarejestrowano żadnego efektu ER – podobnie jak w mieszaninie PAO-6 + CJ008. Widoczne jest jednak pewne zróżnicowanie przebiegu efektu ER, objawiające się przede wszystkim różniącymi się charakterystykami elektroreologicznymi (rys. 2).

Jak to już wcześniej zauważono, mogły mieć na to wpływ nie tylko zróżnicowane właściwości dielektryczne, ale również właściwości fizykochemiczne składników obu mieszanin, a właściwie ich zróżnicowanie. Zarejestrowana różnica mechanizmu zaniku efektu ER w obu mieszaninach, szczególnie różniący się wyraźnie przebieg rozpadu tzw. „strumieni (łańcuchów) fibrylowych" i gromadzenia się cieczy jonowej przy elektrodzie, nakazuje zauważyć nie tylko omówiony wcześniej, wpływ różnicy lepkości obu składników, ale także prawdopodobny wpływ napięcia powierzchniowego cieczy σ (tab. 1). Wydaje się, że na zarejestrowany efekt, inny w przypadku mieszaniny GP-1 + CJ001 (rys. 25 g, h) niż w przypadku mieszaniny PAO-6 + CJ008 (rys. 25 i, j), ale także na zróżnicowanie charakterystyki elektroreologicznej (rys. 2) obu mieszanin, mogła mieć wpływ również znaczna różnica wartości napięcia powierzchnio-

wego składników tych mieszanin (tab. 1). Stwierdzono mianowicie, że w temperaturze 25°C napięcie powierzchniowe oleju GP-1 wynosiło 19,547 $mN \cdot m^{-1}$, a cieczy jonowej CJ001 aż 26,032 $mN \cdot m^{-1}$, gdy w drugiej mieszaninie napięcie powierzchniowe obu składników było prawie takie samo, tj. dla PAO-6 wynosiło 27,523 $mN \cdot m^{-1}$, a dla CJ008 - 28,099 $mN \cdot m^{-1}$.

W badaniach na aparacie czterokulowym (p.2.6) stwierdzono [1, 35], że właściwości tribologiczne omawianych cieczy jonowych są wyjątkowo dobre. Parametry smarnościowe tych cieczy jonowych były znacznie lepsze nie tylko od olejów bazowych, ale także od markowych olejów silnikowych i przekładniowych. Zresztą informacje dotyczące bardzo dobrych właściwości tribologicznych różnych cieczy jonowych są dość powszechne w światowej literaturze tribologicznej. Zatem zaobserwowany efekt gromadzenia się cieczy jonowej przy elektrodach, po destrukcji „łańcuchów fibrylowych" pod wpływem działania zewnętrznego pola elektrycznego, może mieć pozytywny wpływ na konstytuowanie smarującego filmu granicznego. Wydaje się, że wyniki badań właściwości smarnościowych obu mieszanin, zamieszczone w tabeli 4, uzasadniają taki wniosek. Trzeba jednak zwrócić uwagę na zaobserwowany fakt znaczącego rozrzutu wyników pomiarów parametrów smarnościowych quasi homogenicznych mieszanin, w porównaniu z cieczami jednorodnymi. Niezbędne są bardziej szczegółowe i dokładne badania tribologiczne tych mieszanin.

4. Wnioski końcowe

Reasumując, na podstawie tych obszernych, wieloaspektowych badań można wnioskować, że:

- możliwe jest wytworzenie mieszanin olejów węglowodorowych z niewielką domieszką cieczy jonowej (ok. 2% v/v), generujących efekt ER pod wpływem działania zewnętrznego stałego pola elektrycznego, ale ze względu na znaczną konduktywność cieczy jonowych, większa ich ilość w mieszaninach prowadzi do elektrycznego zwarcia;
- wobec ogromnych trudności z uzyskaniem roztworu cieczy jonowych w olejach węglowodorowych bardzo ważne jest wytworzenie mieszaniny o maksymalnym rozdrobnieniu i rozproszeniu cieczy jonowej w oleju bazowym, w celu uzyskania mieszaniny quasihomogenicznej;
- podstawowym mechanizmem odpowiedzialnym za efekt ER mieszanin olejów węglowodorowych z niewielką domieszką cieczy jonowej, poddanych działaniu zewnętrznego stałego pola elektrycznego, jest powstawanie „łańcuchów lub/i strumieni fibrylowych" z mikro/nanocząstek cieczy jonowej, „rozpostartych" pomiędzy elektrodami wzdłuż linii działania pola elektrycznego;
- działające pole elektryczne po osiągnięciu pewnej wartości progowej doprowadza do trwałej destrukcji „łańcuchów i/lub strumieni fibrylowych" i zaniku efektu ER oraz gromadzenie się cząstek cieczy jonowej przy elektrodach (przy $E = 0{,}3\ kV \cdot mm^{-1}$);
- na przebieg charakterystyki $\tau = f(\gamma')$ mieszaniny oleju węglowodorowego z niewielką domieszką cieczy jonowej, poddanej działaniu zewnętrznego stałego pola elektrycznego, mają wpływ przede wszystkim tzw. właściwości dielektryczne składnika czynnego elektrycznie, a właściwie ich zmiana w funkcji przyłożonego

napięcia BIASu (DC); w tych badaniach ciecz jonowa CJ008, której przenikalność elektryczna zmieniała się powoli (np. przy f = 1 kHz dla U = 0 V było ε = 1127, a dla U = 10 V było ε = 841 i dla U = 20 V było ε = 354 – rys. 8) pozwoliła na wygenerowanie wielokrotnie lepszego efektu ER, aniżeli ciecz jonowa CJ001, której stała dielektryczna malała gwałtownie (dla U = 0 V było ε = 1035, dla U = 10 V było ε = 2,29, a dla U = 20 V było ε = 0,34 – rys. 6);

- wydaje się, że charakterystyki elektroreologiczne $\tau = f(\gamma')$ zbadanych mieszanin zależały także od wielu właściwości fizykochemicznych ich składników oraz od zróżnicowania ich wartości, przede wszystkim od:
  - różnicy lepkości oleju bazowego izolującego i dodanej cieczy jonowej,
  - różnicy wartości napięcia powierzchniowego oleju bazowego i dodanej cieczy jonowej;
- w tych badaniach dla mniejszej różnicy lepkości składników mieszaniny PAO-6 + CJ008 (PAO-6: η = 47,36 mPa·s; CJ008: η = 327,24 mPa·s) uzyskano charakterystykę reologiczną Newtona, a dla dwa razy większej różnicy lepkości składników mieszaniny GP-1 + CJ001 (GP-1: η = 12,61 mPa·s; CJ001: η = 552,43 mPa·s) uzyskano charakterystykę Binghama; natomiast na uzyskanie maksymalnych wartości (τ_{max}) i (η_{max}), gdy $E \leq 2$ kV·mm^{-1} mogła mieć wpływ, obok wcześniej wymienionych aspektów dielektrycznych, również kilkukrotnie większa lepkość oleju bazowego ($\eta_{PAO\text{-}6} >> \eta_{GP\text{-}1}$), co mogło przyczynić się do stwierdzonej wolniejszej degradacji „łańcuchów i/lub strumieni fibrylowych";
- ponadto wydaje się, że na takie zróżnicowanie charakterystyki elektroreologicznej mieszaniny GP-1 + CJ001, w stosunku do charakterystyki mieszaniny PAO-6 + CJ008, mogła mieć również znaczna różnica wartości napięcia powierzchniowego; stwierdzono, że w temperaturze 25°C napięcie powierzchniowe oleju GP-1 wynosiło 19,547 mN·m^{-1}, a cieczy jonowej CJ001 aż 26,032 mN·m^{-1}, gdy w drugiej mieszaninie napięcie powierzchniowe obu składników było niemal takie samo, tj. dla PAO-6 wynosiło 27,523 mN·m^{-1}, a dla CJ008 było 28,099 mN·m^{-1};
- stwierdzono, że efekt gromadzenia się cieczy jonowej przy elektrodach, po destrukcji łańcuchów fibrylowych pod wpływem działania zewnętrznego stałego pola elektrycznego, może mieć pozytywny wpływ na konstytuowanie odpornego smarującego filmu granicznego, co zdaje się potwierdzać ocena parametrów smarnościowych obu mieszanin.

Przeprowadzone badania i analizy wykazały, że problem zastosowania cieczy jonowej jako składnika aktywnego elektrycznie w mieszaninie ER jest bardzo złożony i napotyka na duże trudności nie tylko z powodu ich złej mieszalności z większością węglowodorowych cieczy hydraulicznych i olejów smarowych, ale przede wszystkim ze względu na ich dużą konduktywność. Nie wystarczy jednak podjąć próbę wykorzystania cieczy jonowych o bardzo małej konduktywności. Konieczna jest także szczegółowa analiza przebiegu ich charakterystyki przenikalności elektrycznej (ε) w funkcji częstotliwości (*f*) dla różnych wartości (U) pola BIASu (DC). Zmienność (ε) powinna być jak najmniejsza.

Zatem nadal istnieje potrzeba wytworzenia i zbadania w pełni homogenicznych cieczy ER, tzn. takich, w których składnik aktywny elektrycznie i bazowy olej izolujący stanowią roztwór. Wówczas wymieszanie obu składników dotyczy skali molekularnej,

a wtedy rozróżnienie wzrokowe składników takiej cieczy jest praktycznie niemożliwe, nawet pod mikroskopem. Skutki oddziaływania zewnętrznego pola elektrycznego na taką homogeniczną mieszaninę, tj. na molekuły i jony ich składników są praktycznie nieznane. Z dotychczasowych informacji literaturowych wynika, że tylko Japończycy zdołali osiągnąć pojedynczy sukces, wytwarzając i badając homogeniczną ciecz ER złożoną z polimerowych ciekłych kryształów, np. [36], jednak wzrosty lepkości takiej cieczy w polu elektrycznym nie były imponujące. Wśród cieczy jonowych są też takie, które przy odpowiednio długim łańcuchu alkilowym i w pewnym zakresie temperatur osiągają strukturę ciekłokrystaliczną [37]. Podjęcie prób z takimi cieczami jonowymi, o odpowiednio dobranych właściwościach reologicznych i dielektrycznych oraz umożliwiającymi wytworzenie w pełni homogenicznej mieszaniny z olejem bazowym, to kolejne interesujące wyzwanie. Ze względu na dużą różnorodność cieczy jonowych oraz ich specyficzne i unikatowe właściwości należy prowadzić dalsze, szeroko zakrojone badania możliwości ich wykorzystania zarówno w aspekcie elektroreologicznym, jak i tribologicznym.

Literatura

1. Kałdoński T.J., *Badania i ocena alkoksymetyloimidazolowych cieczy jonowych jako nowych smarów dla stalowych węzłów tribologicznych*, Rozprawa doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2012.
2. Kałdoński T.J., Kałdoński T., *Lubricity and Surface Properties of Selected Imidazolium Based Ionic Liquids*, Int. Conf. BALTRIB 2009, Kaunas – Lithuania, 19-21 November, 2009.
3. Kałdoński T.J., *Badania właściwości tribologicznych wybranych cieczy jonowych, Sprawdzenie końcowe z realizacji pracy badawczej GD/917/2010*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2010.
4. Kałdoński T.J., *Research on Alkiloimidazolium Ionic Liquids as Lubricants for Steel Tribological Nodes*, Military University of Technology, Warsaw 2016.
5. Bermudez M.D., Jimenez A.E., Sanes J., Carrion F.J., *Ionic Liquids as Advaced Lubricant Fluids*, Molecules, 14, 2009, pp. 2888-2908.
6. Truhan J., Qu J.J., Lau H., Dai S., Blau P.J., *Ionic Liquids with Ammonium Cations as Lubricants or Additives*, Tribology Letters, vol. 22, nr 3, 2006, p. 1560.
7. Kałdoński T.J., *Ciecze jonowe – perspektywiczne oleje smarujące*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2014.
8. Pernak J., *Ciecze jonowe. Związki na miarę XXI wieku*, Przemysł Chemiczny, 8-9, 2003, s. 52-56.
9. Wesserchaid P., Welton T. (red*), Ionic Liquids in Synthesis, Second, Completely Revised and Enlarged Edition*, Wiley – WCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 2008.
10. Karty charakterystyk. Materiały Sigma – Aldrich Sp. z o.o. (www.sigma-aldrich.com).
11. Hagiwara R., Ito V., *Room Temperature Ionic Liquids of Alkylimidazolium Cations and Fluoroanions*, Jour. of Flurine Chemistry, 105, 2000, s. 221-227.
12. Pernak J., *Ciecze jonowe*, Politechnika Poznańska, Poznań 2005.
13. Qu J., Blau P.J., Dai S., Luo H., Mayer H.M., *Ionic Liquids as Novel Lubricants and Additives for Diesel Engine Applications*, Tribology Letters, 35, 2009, s. 181-189.
14. Jimenez A.E., Bermudez M.D., Iglesias P., Carrion F.J., Martinez-Nicolas G., *1-N-Alkyl-3-Methylimidazolium Ionic Liquids as Neat Lubricants and Lubricant Additives Steel-Aluminium Contacts*, Wear 260, 2006, s. 766-782.
15. Juda J., Kałdoński T.J., Kałdoński T., *Eksperymentalne badania elektroreologicznych właściwości olejów smarnych zawierających ciecz jonową. Cz. 1. Badania*

zmodyfikowanym wiskozymetrem Brookfielda DV-III Ultra, Biuletyn WAT, vol. 68, nr 3, 2019, s. 35-63.
16. Solvay Solexis Fomblin Lubricants (www.solvaysolexis.com).
17. Kałdoński T.J., Gryglewicz Ł., Stańczyk M., Kałdoński T., *Badanie właściwości powierzchniowych i smarnościowych wybranych olejów perfluoropolieterowych*, Biuletyn WAT, vol. 60, nr 3, 2001, s. 165-183.
18. Norma Obronna NO-91-A291:2009.
19. Karta Informacyjna, Product Data Sheet-SSPLUS Polyalphaolefins (PAO) Exon Mobil Chemical, 150024, 2007.
20. Karta charakterystyki oleje bazowe: SN-100, SN-150, SN-400, SN-650, Orlen Oil Sp. z o.o., 2009.
21. Karta charakterystyki produktu Hipol 15 F (www.orlenoil.pl).
22. Materiały Chemical Reagent J.S.C.POCH Gliwice, Polska.
23. Instrukcja obsługi tensjometru KSV Sigma 701, Helsinki, Finlandia.
24. Instrukcja obsługi łaźni termostatującej Julabo F-12, (www.julabo.de).
25. PN-EN ISO 3104:2004, Przetwory naftowe. Ciecze przeźroczyste i nieprzeźroczyste. Oznaczenie lepkości kinematycznej i obliczanie lepkości dynamicznej.
26. PN-ISO 2909:2009, Przetwory naftowe. Obliczanie wskaźnika lepkości na podstawie lepkości kinematycznej.
27. Instrukcja obsługi łaźni TAMSON TV 2000, Netherlands, 2010.
28. Instruction Manual ViscoLab for AMVn Software. Anton-Paar, Gratz, Austria.
29. Instrukcja obsługi refraktometru RL-1 P20, Warszawa, Polska.
30. Juda J., Madeja J., Olszak A., Kęsy Z., Kałdoński T., Badania właściwości cieczy elektroreologicznych, Hydraulika i Pneumatyka, 2, 2012, s. 5-8.
31. Lord Material Division (www.smarttec.co.uk).
32. Instrukcja obsługi analizatora impedancji firmy Hewlett Packard HP4192A, USA.
33. Nicon Eclipse LV100 brochure (www.niconinstruments.com).
34. PN-76/C-04147, Przetwory naftowe. Badanie właściwości smarnych olejów I smarów.
35. Kałdoński T., *Sprawozdanie końcowe z realizacji projektu B+R nr OR00002404 pt. Opracowanie badania i przygotowanie do wdrożenia w technice wojskowej porowatych łożysk ślizgowych nowej generacji o zwiększonej nośności i trwałości, impregnowanych ekologicznymi smarami zawierającymi dobrane sulfaktanty, w tym ciecze jonowe*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2012.
36. Nakamura T., Saga N., Nakazawa M., *Variable Viscous Control of a Homogenous ER Fluid Device Considening its Dynamic Characteristics*, Mechatronics, 14, 2004, s. 55-68.
37. Holbrey J.D., Rogers R.D., *Physicochemical Properties of Ionic Liquids: Melting Points and Phase, in book: Ionic Liquids in Synthesis. Second edition*, Wessercheid Pand Welton T (Eds), Willey – VGH Verlags GmbH &Co. kGaA, Weinheim 2008, s. 57-72.

Właściwości elektroreologiczne i tribologiczne quasihomegenicznych mieszanin węglowodorowych z domieszką cieczy jonowej

Streszczenie

W rozdziale przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań właściwości elektroreologicznych (ER) olejów smarnych zawierających ciecz jonową. Badania przeprowadzono na stanowisku specjalnie zaprojektowanym do tego celu, w którym zastosowano zmodyfikowany wiskozymetr Brookfield DV-III Ultra. Oceniono właściwości ER dwóch mieszanin, tj. silikonowej cieczy tłumiącej GP-1 zawierającej 2% (v/v) cieczy jonowej CJ001, tj. tetrafluoroboranu 1-metylo-3-oktyloksymetyloimidazolowego oraz oleju bazowego polialfaolefinowego PAO-6 zawierającego 2% (v/v) cieczy jonowej CJ008, tj. triheksylotetradecylofosfoniowego bis(trifluorometylosulfonylo)imidu. Przeprowadzone badania wykazały, że wytworzone mieszaniny generowały efekt ER, lecz był on krótkotrwały, co sugerowało zmiany struktury wewnętrznej tych mieszanin. Dlatego zaplanowano kolejne badania m.in. spektroskopię dielektryczną i obserwacje mikroskopowe *in situ*

tych mieszanin w zewnętrznym polu elektrycznym. Celem tych badań było zarejestrowanie zanikającego efektu ER i rozpoznanie jego mechanizmu. Przedstawione w rozdziale fotografie dokumentują zachodzące pod wpływem działania zewnętrznego pola elektrycznego zmiany struktury mieszanin zawierających ciecze jonowe, polegające na tworzeniu „łańcuchów i/lub strumieni fibrylowych" i następnie na ich destrukcji oraz gromadzeniu się cząstek cieczy jonowej przy elektrodach. Stwierdzono w badaniach tribologicznych, że może to mieć pozytywny wpływ na konstytuowanie odpornego smarującego filmu granicznego.
Słowa kluczowe: oleje smarowe, ciecze jonowo, efekt elektroreologiczny

Electrorheological and tribological properties of homogenic hydrocarbon mixtures with an ionic liquid admixture

Abstract
The results of experimental investigations on electrorheological (ER) properties of lubricating oils which containing ionic liquids, are presented in this chapter. The investigations were realized on the special stand wich was projected for this aim. In this stand was used the modified Brookfield viscosimeter. Electrorheological properties two mixtures were tested, i.e. silicone damping liquid GP-1 wich is polimethyl silicone mixture containing 2% (v/v) of ionic liquid CJ001, i.e. tetrafluoroboran 1-methyl-3-oktyloxymethylimidazolium as well as base polialfaolefine oil PAO-6 which containing 2% (v/v) of ionic liquid CJ008, i.e. trihexyltetradecylfosfonium bis(trifluoromethylsulfonyl)imide. The investigations showed that the made mixtures generated effect ER, but it was short-lived, sugesting changes of inner structure of these mixtures. Therefore we made plans on next investigations, among others dielectric spectroscopy and microscope in situ these mixtures in external electric fields. The aim of those investigations will be recording of fading effect ER and reconnaissance of this mechanism. Photographs presented in the chapter document changes in the structure of mixtures containing ionic liquids that occur under the influence of an external electric fields, consisting in the formation of "fibril chains and/or fibril streams" and then their destruction and accumulation of ionic liquid particles at the electrodes. In tribological studies it was found that this may have a positive effect on constituting of resistant lubricating boundary film.
Keywords: lubricating oils, ionic liquids, electrorheological effect

Tadeusz Kałdoński[1], Tomasz Jan Kałdoński[2]

Procesy zużywania ściernego par precyzyjnych nurnik-tuleja: badania, modelowanie, predykcja

1. Wprowadzenie – krytyczny przegląd znanych modeli i parametry oceny procesów zużywania ściernego metali

W procesach zużywania ściernego twarde cząstki lub wierzchołki nierówności twardszej powierzchni usuwają lub przemieszczają materiał miększej powierzchni. Według Mate [1] do wystąpienia zużycia ściernego cząstki ścierne lub wierzchołki nierówności powinny mieć twardość 1,3 razy większą od twardości materiału zużywanego. Jednak z obszernego przeglądu literatury oraz rezultatów badań własnych wynika, że wśród tribologów nie ma zgodności co do krytycznej wartości stosunku twardości materiału ścierającego do twardości materiału zużywanego, najczęściej metalu (Ha/Hm). Znaczenie tego stosunku dla przebiegu procesu zużywania ściernego jest uznane przez wielu badaczy; wcześniej przez Hruszczowa i Babiczewa [2-5], a później przez Kragielskiego [6-8], Zum-Gahra [9-12], Berna [13], Iwasakiego [14], Penga [15] i wielu innych. Tenebaum [16, 17] zaproponował stosowanie tego ilorazu jako kryterium występowania określonej odmiany zużycia ściernego. Stwierdził on, że krytyczna wartość stosunku Ha/Hm wynosi 1,43-2,0 (lub Hm/Ha = 0,7-0,5 [17]). Jego zdaniem wystąpienie prostej formy zużywania ściernego polegającego na skrawającym działaniu ostrza ziarna ściernego lub wierzchołka chropowatości twardszej powierzchni jest możliwe tylko dla Ha/Hm > 2 (lub Hm/Ha < 0,5 i przy odpowiednim obciążeniu normalnym [17]. Ponadto, uważał on, że dla Ha/Hm < 1,43 (lub Hm/Ha > 0,7) *proste niszczenie powierzchni jest mało prawdopodobne, a zaczynają dominować procesy wielocykliczne zmęczeniowe*. Natomiast Hruszczow [2, 5] stwierdził, że dla stosunku Ha/Hm ≤ 0,7÷1,1 zużycie ścierne w ogóle nie wystąpi, więc odporność metalu na ten rodzaj zużywania będzie nieskończona, a przy wzroście tego stosunku do wartości z zakresu 1,3-1,7 jego zdaniem *odporność zużyciowa będzie niezmienna, choć zużycie bewzględne może być duże*. Mate [1] oraz wielu autorów wcześniej wymienionych stosowali kryterium stosunku twardości materiału ścierającego Ha (twardszego) do materiału ściernego Hm (miększego), niezależnie od odmiany zużywania ściernego, tzn. niezależnie czy jest to zużywanie ścierne dwóch ciał (two – body abrasion), czy jest to zużywanie ścierne trzech ciał (three – body abrasion), które przecież może mieć jeszcze różnorodne formy związane m.in. z różnym stopniem umocowania ziaren ściernych w podłożu. Mate jak wielu innych autorów, nie uwzględnia tej różnorodności i zakłada, że wszystkie „osadzone" w jednej z powierzchni ziarna są trwałe i na stałe umocowane – co nawet w przypadku obróbki płótnem ściernym nie jest pewne, a w rzeczywistej eksploatacji różnych węzłów tribologicznych raczej rzadko spotykane

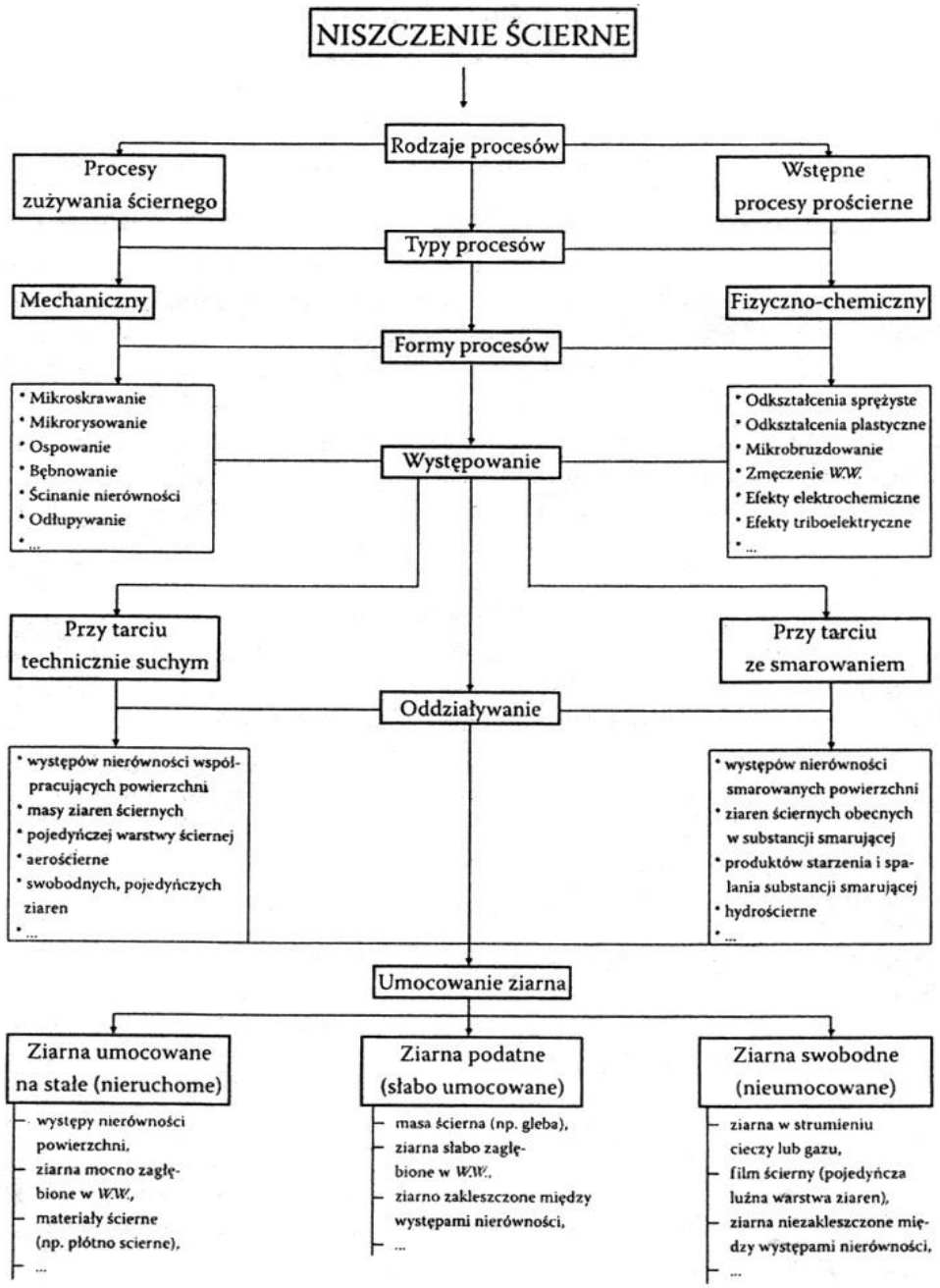
[1] tadeusz.kaldonski@wat.edu.pl, Zakład Materiałów Pędnych i Smarów, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Wojskowa Akademia Techniczna, www.wat.edu.pl.
[2] tomasz.kaldonski@wat.edu.pl, Zakład Materiałów Pędnych i Smarów, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Wojskowa Akademia Techniczna, www.wat.edu.pl.

(np. zagłębione przypadkowo w miękkim stopie łożyskowym ziarna ścierne). Zatem zastosowana przez Mate [1 – rys. 12.5, s. 326] w stosunku do takiego modelu nazwa „zużywanie ścierne dwóch ciał" jest myląca i niewłaściwa.

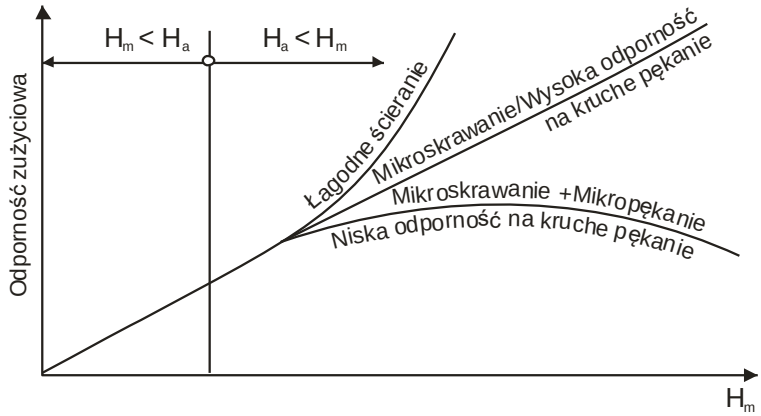
Ponadto w większości opracowań naukowych i technicznych przyjmuje się, że zużycie ścierne jest wynikiem działania tzw. ziaren ściernych pochodzących z zewnątrz, nierówności (chropowatości) współpracujących powierzchni węzła tarcia oraz produktów zużycia tych powierzchni, odrzucając niesłusznie z tego podziału zużycie erozyjne jako zupełnie odmienny rodzaj. W efekcie spotkać można było dawniej klasyfikacje wyróżniające dwie odmiany zużycia, tj. tribologiczne i erozyjne, tak jakby to drugie nie było wynikiem tarcia (*tribos* – tarcie). Zresztą podobne podejście do tematu zużywania ściernego można zaobserwować we wszystkich wcześniej wymienionych opracowaniach. Reasumując, w zakresie klasyfikowania i definiowania zużycia ściernego panował spory chaos wymagający uporządkowania. Jedną z przyczyn takiego stanu był fakt niesystemowego i niekompleksowego ujmowania i rozwiązywania zagadnień tribologicznych przez poszczególnych autorów, w tym także dowolne i zamienne stosowanie słów: zużywanie i zużycie oraz niszczenie i zniszczenie!? Wydaje się, że w nowej klasyfikacji należy wyraźnie rozróżnić procesy zużywania ściernego, które mają charakter mechaniczny, od innych procesów fizyczno-chemicznych, które poprzedzają lub przebiegają równolegle ze zużyciem rozumianym jako bezpośredni ubytek materiału.

Taką adekwatną klasyfikację procesów niszczenia materiałów w efekcie działania procesów ściernych, na podstawie wieloletnich badań i analiz zużywania ściernego [18], opracował autor obecnego artykułu, w której oprócz podziału na rodzaje, typy i formy procesów scharakteryzowano występowanie smarowania lub jego brak, oddziaływania z tym związane oraz stopień umocowania ziaren ścierających (wierzchołków nierówności ścierających przeciwległą powierzchnię. Taką kompleksową klasyfikację i charakterystykę procesów niszczenia ściernego przedstawiono na rysunku 1.

Jak widać z rysunku 1, uznano, że o realnym zużyciu, tj. o stanie warstwy wierzchniej materiału po procesie zużywania, można powiedzieć wtedy, gdy zaistnieje ubytek mate-riału będący wynikiem wykrawującego działania ciała o większej odporności ściernej. Wydaje się, że odniesienie do większej odporności ściernej zamiast do większej twardości, biorąc pod uwagę wszystkie odmiany i typy zużywania ściernego, jest bardziej właściwe. Na przykład przyjęcie za Hruszczowem założenia, że dla Ha/Hm = 1,1 wystąpienie jakiejkolwiek odmiany lub formy zużywania ściernego jest niemożliwe, może doprowadzić do opłakanych skutków. Praktyka eksploatacyjna wykazuje, że zużycie ścierne elementów maszyn ma wtedy również miejsce i może być intensywne m.in. z powodu dużej energii kinetycznej ziarna powodującego ścieranie. Bardziej wyważony pogląd zaprezentował Zum-Gahr [11]. Wykorzystał on do analizy wyniki badań własnych i rezultaty badań innych autorów. Zum-Gahr nie podaje konkretnej liczby kryterialnej stosunku Ha/Hm, prezentując jedynie ogólny wpływ twardości zużywanego metalu i twardości ścierniwa na możliwy przebieg zużywania (rys. 2) – pewne wątpliwości budzi jednak jego sugestia, że dla Hm < Ha odporność materiałów na zużywanie ścierne ma zawsze przebieg liniowy [11].



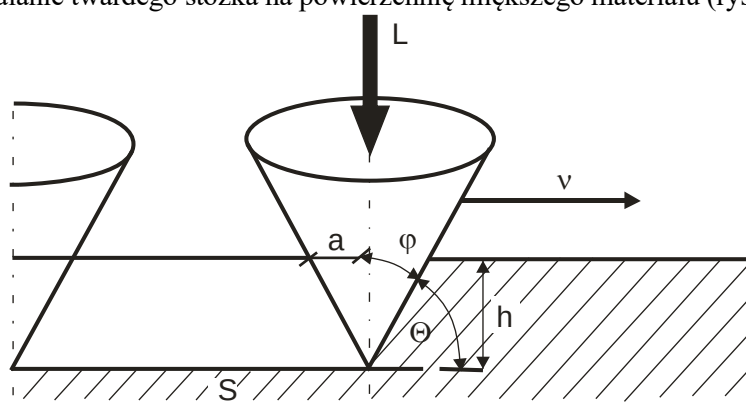
Rysunek 1. Kompleksowa klasyfikacja i charakterystyka procesów niszczenia ściernego [18]



Rysunek 2. Odporność zużyciowa materiałów konstrukcyjnych w zależności od ich twardości wg Zum-Gahra [11]

Najczęściej w analizie procesów zużywania ściernego, zarówno w obecności dwóch ciał, jak i w obecności trzech ciał, sięga się do modelu Archarda [19], nie zważając na istotne różnice w oddziaływaniu ziaren umocowanych i ziaren swobodnych – co jest daleko idącym uproszczeniem [20].

Archard swój wzór na zużycie tarciowe wyprowadził z zależności określającej ubytek materiału (V) na jednostkę drogi tarcia (s). Zwykle model taki przedstawiany jest jako działanie twardego stożka na powierzchnię miększego materiału (rys. 3).



Rysunek 3. Model zużywania ściernego materiału miękkiego przez występ nierówności powierzchni materiału twardszego [20]

Powyższy model ściśle koresponduje z modelem tarcia bruzdującego Bowdena i Tabora [21]. Jeśli głębokość rowka wykrawanego ostrzem stożka na drodze (s) wynosi (h), a kąt nachylenia tworzącej stożka w stosunku do krawędzi dna rowka wynosi (θ), to objętość usuniętego z rowka materiału wynosi:

$$V = s \cdot h^2 \cdot tg\varphi = s \cdot h^2 \cdot ctg\,\theta \,. \tag{1}$$

Na drodze (s) obciążenie (L) na obszarze $\pi \times a^2/2$ jest przenoszone tylko przez przednią połowę stożka, więc mamy:

$$L = \frac{1}{2} \cdot H \cdot \pi \cdot a^2 = \frac{1}{2} \cdot H \cdot \pi \cdot h^2 \cdot ctg^2\theta \quad , \tag{2}$$

gdzie (H) jest twardością bardziej miękkiego materiału.

Wykorzystując równania (1) i (2) w celu wyeliminowania (*h*), otrzymujemy wzór na intensywność zużywania na drodze (*s*):

$$W = \frac{V}{s} = \frac{2 \cdot tg\theta}{\pi} \cdot \frac{L}{H} \quad . \tag{3}$$

Wzór ten jest określony na podstawie innych wstępnych założeń niż w modelu teoretycznym Archarda [19] bazującym częściowo także na teorii atomowej adhezji Holma [22]. W efekcie uogólniona postać wzoru na objętościowe zużycie na jednostkę drogi tarcia podana przez Archarda była następująca:

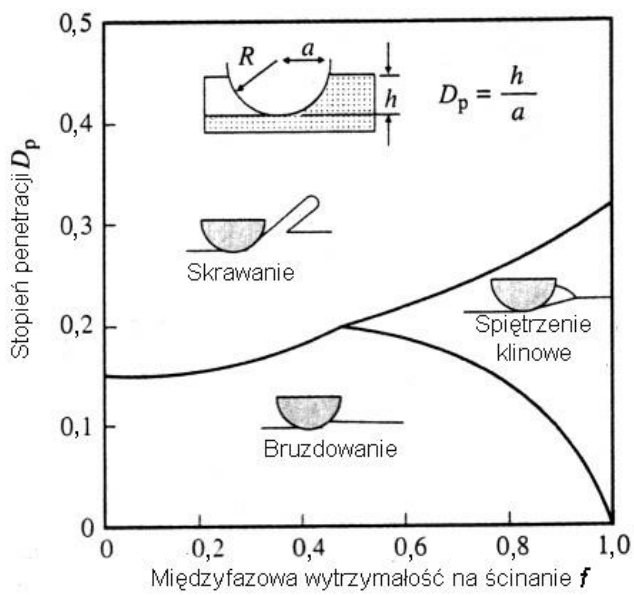
$$W = \frac{V}{s} = K \cdot \frac{L}{H} \quad . \tag{4}$$

Mate [1] podaje, że w równaniu Archarda (4) współczynnik proporcjonalności (*K*), określany jako współczynnik zużycia, jest zawsze mniejszy od jedności i wynosi zazwyczaj w przypadku tarcia suchego (bez smarowania) materiałów od 10^{-12} do 10^{-7}. Natomiast w przypadku smarowania granicznego od 10^{-6} do 10^{-4}, a dla smarowania hydrodynamicznego jest mniejszy od 10^{-13}.

Chociaż wzory (3) i (4) określono na podstawie różnych założeń wstępnych [19, 21], to jak widać obydwa wzory mają taką samą formę, przy czym we wzorze (3) można wyróżnić współczynnik zużycia Ka = 2×tgθ/π, co oznaczałoby, że (Ka) jest proporcjonalne do wartości tgθ [1]. Jednak model opisany wzorem (3) nie oddaje rzeczywistego przebiegu procesu zużywania ściernego jednej powierzchni przez występy drugiej powierzchni. Wartość zużycia (ubytki materiału) obliczane według tego modelu (przewidywane) są znacznie większe od realnie rejestrowanych. Rabinowicz [24] badał procesy zużyciowe w warunkach smarowania granicznego. Do opisu zużywania ściernego przyjął on taki sam model, zakładając jednakże przenoszenie obciążenia (*L*) na obszarze πa^2 (tzn. przez cały stożek), uzyskując łagodniejszą postać wzoru, tj. $W=V/s=$ tg$\theta\times L/\pi\times H$. Tę postać wzoru powołano także w monografii [18], do której nawiązuje obecne opracowanie. Jednak ta postać wzoru również prowadzi do przeszacowanych (zawyżonych) wartości zużycia ściernego.

Ogólne założenia teorii Archarda i Rabinowicza zostały częściowo potwierdzone przez wielu badaczy, jednak w uwzględnieniem licznych wyjątków. Między innymi nie może być powszechnie zastosowane wyłaniające się z tych wzorów „ogólne" prawo, że *„intensywność zużywania ściernego × twardość = constans"*. Może ono być słuszne tylko wówczas, gdy twardość powierzchni zużywanego materiału jest znacząco mniejsza aniżeli twardość występów nierówności drugiej powierzchni. Ponadto, intensywność zużywania ściernego zmniejsza się na drodze tarcia (*s*) z powodu stępienia ostrzy wierzchołków nierówności powierzchni lub ziaren ściernych. Zużycie ścierne jest także zależne od wielu czynników zewnętrznych, np.: wilgotność, obecność smaru, rozmiar ziaren oraz ich umocowanie i sposób oddziaływania (rys. 1). Usunięcie pewnej

objętości materiału przez pojedynczą nierówność (ziarno ścierne) jest możliwe tylko w przypadku zagłębienia się jej w materiał zużywany i równoczesnego przemieszczania. Warunki przejścia od deformacji sprężystej do plastycznej i do mikroskrawania badał i opisał przede wszystkim Kragielski [6-8], a następnie m.in. Kato i Hokkirigawa [25-27]. Japończycy [25] zaproponowali w 1988 r. uproszczoną, poglądową mapę mechanizmów zużywania ściernego (rys. 4) w zależności od stopnia zagłębienia (D_p) sferycznego ostrza w metalu zużywanym (bez smarowania), określonego jako stosunek głębokości penetracji (h') do promienia styku a ($D_p = h'/a$), oraz tzw. międzyfazowej wytrzymałości na ścinanie (f), rozumianej jako stosunek wytrzymałości na ścinanie (τ) do wyraźnej granicznej plastyczności (R_{pl}) zużywanego metalu. Zatem (f) jest parametrem bezwymiarowym, podobnie jak (D_p).



Rysunek 4. Mapa mechanizmów zużywania ściernego niesmarowanego metalu przez sferyczny, twardy wgłębnik wg Kato i Hokkirigawy [25]

Na tym schemacie autorzy wyróżnili podstawowe mechanizmy zużywania metalu wynikające ze ściernego oddziaływania twardego sferycznego wgłębnika, które występują według nich powyżej określonych wartości parametrów (D_p) i (f) Przy małych wartościach stopnia penetracji (D_p) i parametru wytrzymałości na ścinanie (f) wg mapy (rys. 4) występuje głównie bruzdowanie z przemieszczaniem materiału, który piętrzy się wzdłuż krawędzi rowka (tzn. materiał jest przede wszystkim plastycznie wyciśnięty na boki rowka). Te grzbiety wzdłuż krawędzi rowka ulegają zmęczeniu w kolejnych cyklach procesu tarcia współpracujących powierzchni i następnie są oddzielone jako zużyciowe cząstki. Dla tego typu połączonego procesu bruzdowania i zmęczenia współczynnik zużycia jest stosunkowo niski ($< 10^{-3}$), w porównaniu do innych mechanizmów zużywania ściernego. Jeśli parametr wytrzymałości na ścinanie (f) jest relatywnie duży ($f > 0{,}5$) to siły tarcia w strefie styku wypychają (spiętrzają) większy

fragment materiału w postaci klinowatej do przodu przed ostrze wgłębnika, a następnie jest on oddzielany w wyniku propagacji pęknięć. Przy wartości stopnia penetracji (D_p) powyżej 20% dominuje mechanizm skrawania, gdy przemieszczany przed ostrzem wgłębnika materiał jest odrywany w formie mikrowiórków, jako zużyciowe cząstki. W takim reżimie mikroskrawania może być osiągnięty współczynnik zużycia powyżej 0,1 [1].

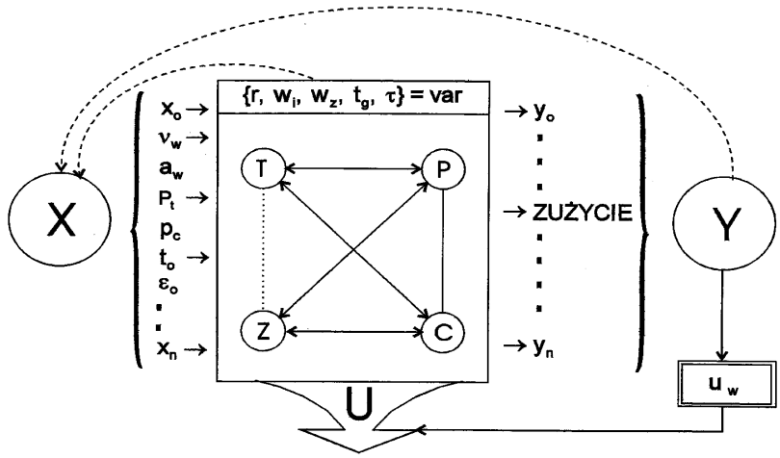
Prognozowanie zużycia w obecności dwóch i w obecności trzech ciał na podstawie tego samego modelu jest nieuprawnione, choćby ze względu na znaczne zróżnicowanie w sposobie oddziaływania ziaren ściernych oraz stopnia umocowania tych ziaren (rys. 1). Część wniosków i uogólnień wynikająca z analizy zużywania ziarnami umocowanymi lub zużywania w masie ściernej (np. gleba) może być wykorzystana do rozwiązywania i objaśniania niektórych zagadnień zużywania ściernego luźnymi ziarnami. Jednak wiele kwestii wymaga zupełnie odmiennego sposobu objaśniania. Wśród wielu prac dotyczących zużycia ściernego warstw wierzchnich, pomiędzy którymi znajdują się ziarna ścierne, należy wymienić przede wszystkim prace takich autorów jak np.: Rabinowicz [28, 29, 24, 30], Jampolski [31], Uetz [32], Kragielski [6, 7, 8], Kaszczejew [33], Tenenbaum [17], Peng [15], Yang i Garrison [34], Wang [35], Wang i Spikes [36], Williams i Hyncic [37], Roach [38]. Rzuca się w oczy fakt dużego zainteresowania procesami zużywania ściernego w poprzednim wieku i niemal całkowity brak zainteresowania tymi procesami obecnie. Do najważniejszych czynników decydujących o przebiegu tego rodzaju zużywania autorzy na ogół zaliczają: twardość powierzchni materiału zużywanego, twardość i wytrzymałość ziarna ściernego na ściskanie, rozmiar ziarna ściernego, liczba ziaren aktywnie działających, obecność środka smarnego. Kragielski [8] sugerował, że za pomocą stopnia penetracji ostrza ziarna w materiał zużywany (na rysunku 4 u Hokkirigawy jest to $D_p = h'/a$) można ocenić stan „umocowania" ziarna, mianowicie, gdy $h'/a < 1$ – ziarno powinno być swobodne, gdy $h'/a \geq 1$ – ziarno zagłębia się („umocowuje się") w miększy materiał. Taki wniosek jest wątpliwy, jeśli wziąć pod uwagę, że formuła h'/a (u Kragielskiego h/r) była ustalona dla przypadku zużywania ziarnami umocowanymi na stałe i zupełnie w innym celu (charakterystyka oddziaływań tarciowych). Ponadto, zależność ta nie uwzględnia rzeczywistego rozmiaru ziarna i wynika z przekonania, że promień ostrza ziarna jest styczny do tworzącej tego ostrza – co nie musi być prawdą. Jak wynika z wieloletnich badań autora, sprawa przedstawia się zupełnie inaczej – o czym będzie mowa w dalszej części tego rozdziału. Tenenbaum, jak wielu autorów wymienionych wcześniej, twierdził, że kształt ziarna ściernego nie ma wpływu na przebieg tej odmiany zużywania ściernego. Tenenbaum analizując obciążenie krytyczne, jakie może przenieść ziarno, posłużył się modelem ziarna kulistego. Uważał on, że przyjęcie modelu ziarna kulistego jest uzasadnione *ponieważ ziarna kwarcowe są też kuliste*. Tymczasem już w 1948 r. Pattyjohn [za 39] stwierdził, że są to co prawda bryły izometryczne, lecz ich współczynniki sferyczności są bardzo różne ($\varphi = 0{,}6 \div 0{,}9$). Przyjmowanie modelu ziarna kulistego umożliwia przeprowadzenie bardzo prostych obliczeń, lecz niestety wprowadza dużo zakłóceń informacyjnych i prowadzi często do błędnych wniosków, np.: w ocenie tzw. „umocowania" ziarna, ocenie wpływu kształtu ziarna na proces zużywania, ocenie możliwości oddziaływania na powierzchnię chropowatą itd. Prawdopodobnie dlatego istniały trudności z wyjaśnieniem wpływu rozmiarów ziaren na prze-

bieg erozji ścinającej, (tzn. takiej, gdy kąt zderzenia ziarna z powierzchnią jest bliski zero), ocenianej m.in. przez Finniego [40, 41], Bittera [42, 43] i Tenenbauma [17].

Kolejny problem wymagający rozwiązania to znajomość obciążenia kruszącego ziarno znajdujące się między dwoma powierzchniami ściskającymi je. Niewątpliwie ważną cechą ziaren jest wytrzymałość na ściskanie, jednak rzeczywiste oddziaływanie ich na powierzchnie może być różne, w zależności od konkretnej odmiany zużywania ściernego (rys. 1), od kształtu ziaren ściernych oraz ich rozmiaru, od typu i charakteru pracy konkretnego systemu tribologicznego, oddziaływań między jego elementami i otoczenia systemu. Jest to szczególnie istotne, gdy dotyczy mikrosystemów i mikroziaren w nich funkcjonujących. Bardzo ważną sprawą jest wówczas zidentyfikowanie wartości naprężeń ścinających powstających w cieczy smarującej (w mikroszczelinie pomiędzy współpracującymi powierzchniami) oraz ich wpływ na swobodne ziarna ścierne. Szczegółowo zagadnienia te zostały opisane we wcześniejszych pracach [44, 45], łącznie z podaniem konkretnych wzorów służących do obliczenia lepkości dynamicznej cieczy zmieniającej się w wyniku działania wysokiego ciśnienia w mikroszczelinie pomiędzy współpracującymi powierzchniami węzła tribologicznego i obliczenia wytrzymałości mikroziaren ściernych na ściskanie i na ścinanie w takiej mikroszczelinie. Wiązało się to z koniecznością opracowania adekwatnych modeli zużywania ściernego przez zakleszczone w mikroszczelinie ziarna ścierne i przez mikroziarna swobodne powodujące erozję ścinającą współpracujących powierzchni pary precyzyjnej typu nurnik-tuleja.

2. Oceniane systemy tribologiczne: zakres i metody badań

Każdy proces analizy zużywania tribologicznego należy rozpocząć od szczegółowego opisu systemu tribologicznego i następnie przeprowadzić badania identyfikacyjne niezbędne w procesie analizy zużywania elementów pary trącej. W omawianym przypadku obiektami badań były typowe elementy tłoczące FPE-10-3u rzędowych pomp wtryskowych typu F-M (Friedman-Mayer) stosowanych do zasilania paliwem (olejem napędowym) silników o zapłonie samoczynnym. Nurnik i tuleja (tłok i cylinder) takiego elementu tłoczącego są wykonane ze stali łożyskowej 100 Cr6 (AISI 52100). Jest to stal martenzytyczna o znacznej odporności na zużywanie ścierne (o twardości 62÷64 HRC), które może być powodowane ziarnami ściernymi dostającymi się wraz z paliwem do pompy wtryskowej. Zatem badania i analizy dotyczyły systemów tribologicznych typu nurnik-tuleja (tłok-cylinder) przetłaczających paliwo zawierające niewielką liczbę ziaren mineralnych (ziaren ściernych). System ten w skrócie nazwano TPZC (tłok-paliwo-ziarno-cylinder). W hydraulicznych parach tego typu luz promieniowy nie przekracza 10 μm, a w omawianym szczegółowo przypadku luz promieniowy pomiędzy tłokiem, a cylindrem (o średnicy nominalnej 10 mm) wynosił 2 μm. Korzystając z ogólnych zasad systemowej analizy złożonych zjawisk i obiektów, rozpoznano dogłębnie strukturę badanego systemu tribologicznego TPZC, którego model logiczny został zobrazowany na rysunku 5.



Rysunek. 5. Model logiczny systemu TPZC w stanie dynamicznym v_w – prędkość względna liniowa tłoczka pary precyzyjnej, a_w – przyśpieszenie tłoka pary precyzyjnej, P_t – siła osiowa działająca na tłok, p_c – ciśnienie cieczy doprowadzanej do systemu, t_o – temperatura otoczenia systemu, ε_o – stężenie ziaren ściernych w cieczy hydraulicznej, r – relacje (oddziaływania) wewnętrzne pomiędzy elementami systemu, W_i – właściwości indywidualne elementów systemu, W_z – właściwości zespołowe elementów systemu, τ – czas, U_w – szczelność wewnętrzna pary precyzyjnej [18]

Szczegółowy opis badań i modelowania takich systemów tribologicznych został podany wcześniej w wielu publikacjach autora, m.in. [46-51], natomiast kompleksowe omówienie problemu zużywania ściernego hydraulicznych par precyzyjnych przedstawiono w monografiach [18, 55, 57]. Chcąc ustalić optymalne wyjście użytkowe (U) systemu, którego model logiczny przedstawiono na rysunku 5, należało uprzednio dogłębnie rozpoznać procesy tribologiczne (Y) wpływające np. na pogorszenie szczelności wewnętrznej (U_w) pary precyzyjnej T-C. W procesie identyfikacyjnym relacji wewnętrznych tego systemu najważniejsze znaczenie ma:

- ocena charakteru i przebiegu zużywania par precyzyjnych;
- ocena wpływu zanieczyszczeń paliwa na proces zużywania ściernego.

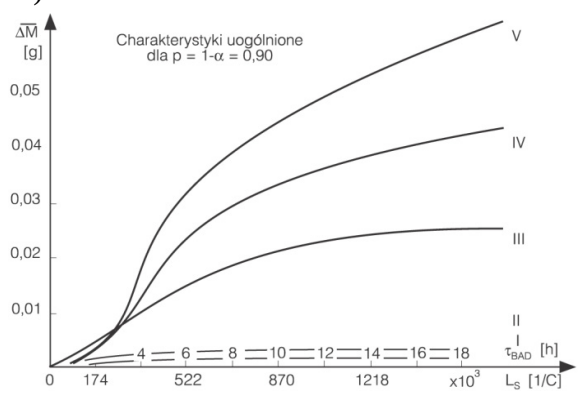
Identyfikację charakteru i przebiegu procesu zużywania par T-C oraz szczegółowego wpływu zanieczyszczeń paliwa na proces zużywania ściernego tych par przeprowadzono w oparciu o badania eksploatacyjne, stanowiskowe i modelowe. Zmiany powodowane oddziaływaniem ziaren ściernych identyfikowano m.in. dzięki badaniom profilometrycznym (profilografy Taylor-Hobson), badaniom mikroskopowym w tym Skaningowym mikroskopem elektronowym (SEM – *Scaning Electron Microscpy*), badaniom metalograficznym struktury warstwy wierzchniej elementów pary T-C. Wybrane wyniki tych badań prezentowano m.in. w pracach [44, 45, 50, 56, 60].

W badaniach eksploatacyjnych, oceniając charakter i przebieg zużywania ściernego par T-C, na ogół stwierdzano dużą złożoność przebiegu tych charakterystyk, trudnych do jednoznacznej oceny. Ubytki masy w początkowym okresie eksploatacji były bardzo małe. Układ nie może być stale demontowany i ponownie montowany, ponieważ zmienione byłyby warunki badań. W efekcie liczba uzyskiwanych wyników była znacznie zmniejszona. Ten niedostatek należało uzupełnić badaniami stanowiskowymi i laboratoryjnymi. W odniesieniu do modelowo rozpatrywanych par T-C przeprowadzono m.in.:

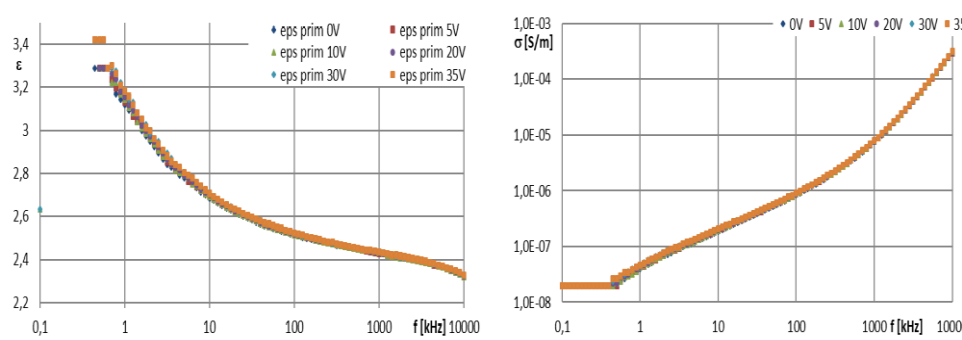
- badania stanowiskowe zużywania ściernego par T-C w rzeczywistym systemie TPZC pompy wtryskowej F-M, w obiegu zamkniętym i otwartym przetłaczania paliwa, stosując pył testowy Skaleń 3 600 (glinokrzemian potasowy) o dobranym składzie granulometrycznym określonym licznikiem Coultera i składzie chemicznym określonym metodą promieniowania rentgenowskiego (ang. *X-ray)* [50];
- badania modelowe zużywania ściernego stosując ziarna ścierne w postaci Skalenia oraz w postaci specjalnie wykonanych ryclów z Al_2O_3, ze stali szybkotnącej SW-18 oraz ze spieków S-30 i H-10 o określonym promieniu zaokrąglenia ostrza [51].

W badaniach stanowiskowych uzyskano charakterystyki zużyciowe, m.in. określono:

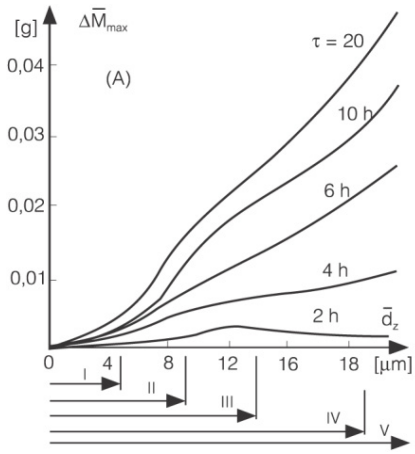
- wpływ składu granulometrycznego pyłu testowego na zużycie par T-C (rys. 6);
- wpływ ilości zanieczyszczeń i rodzaju obiegu paliwa (otwarty – zamknięty) na zużycie par T-C (rys. 7);
- zależność maksymalnej wartości zużycia par T-C od średniego rozmiaru ziaren ściernych (rys. 8);
- zależność maksymalnej wartości zużycia par T-C od stężenia zanieczyszczeń w paliwie (rys. 9).



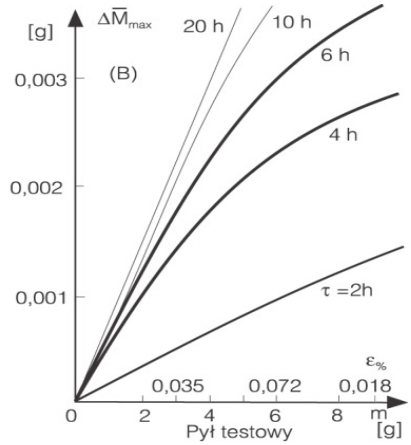
Rysunek 6. Wpływ składu granulometrycznego pyłu testowego (T-C) na zużycie par T-C w funkcji ich czasu pracy (liczby cykli) [18]



Rysunek 7. Wpływ ilości zanieczyszczeń i rodzaju obiegu paliwa na zużycie par T-C w funkcji ich czasu pracy (liczby cykli) [18]



Rysunek 8. Zależność maksymalnej wartości zużycia par T-C od średniego rozmiaru ziaren ściernych [18]



Rysunek 9. Zależność maksymalnej wartości zużycia par T-C od stężenia zanieczyszczeń w paliwie [18]

Wybrany do badań stanowiskowych Skaleń 3 600 (glinokrzemian potasowy) miał skład chemiczny niemal identyczny jak zanieczyszczenia rzeczywiste oleju napędowego [50, 56]. Podobny był również kształt ziaren obserwowanych w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM), a odsiew sitowy 0...40 μm umożliwił odwirowanie w wirówce BAHCO kilku różnych frakcji (I-V), w tym takiej, która prawie całkowicie odpowiadała rozkładowi granulometrycznemu zanieczyszczeń rzeczywistych przefiltrowanego paliwa dostarczanego do pompy wtryskowej. W tabeli 1 przedstawiono wyniki analizy na liczniku Coultera pięciu frakcji pyłu testowego stosowanego w badaniach rzeczywistych par T-C (pomp wtryskowych).

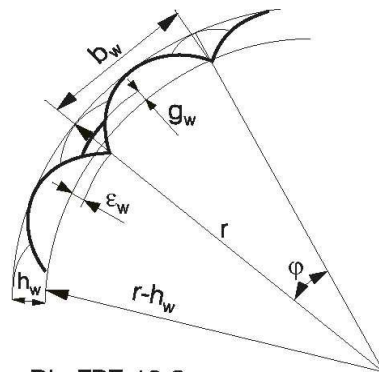
Tabela 1. Wyniki analizy na liczniku Coultera [18]

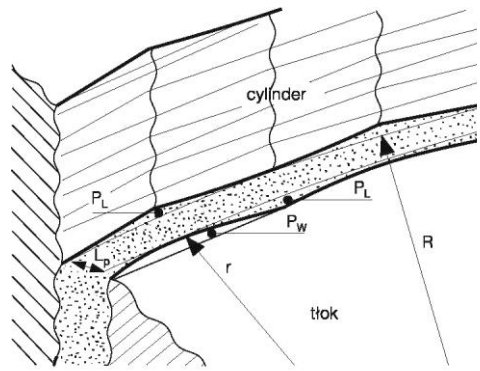
Rozmiar cząsteczkowy [μm]	Udział cząstek w poszczególnych frakcjach pyłu [% ilościowy]				
	I	II	III	IV	V
1…4,5	99,18	79,80	49,00	45,31	45,13
4,5…9,0	0,80	20,52	24,35	9,76	17,64
9,0…14,0	0,02	0,25	25,75	14,13	9,24
14,0…23,0	—	0,13	0,90	30,52	5,86
23,0…30,0	—	—	—	0,28	21,83
w BAHCO [μm]	2,21	7,25	10,08	14,18	26,46
wkładka	18	16	14	12	4

W omawianych precyzyjnych systemach TPZC możliwe było wystąpienie tylko procesów zużywania ściernego pojedynczymi, swobodnymi ziarnami mineralnymi. Produkty zużywania par precyzyjnych były tu mało istotne ze względu na znikomą ich ilość, ciągłe ich wymywanie z obszarów tarcia i pomijalny efekt zużyciowy. W związku z tym, że elementy pary precyzyjnej były stale rozdzielone cieczą i pojedynczymi ziarnami ściernymi, mogły być zużywane tylko zakleszczonymi między powierzchniami ziarnami lub ewentualnie w wyniku erozji hydrościernej (ścinającej). Stąd wynikała konieczność rozpatrywania dwóch odrębnych modeli zużywania ściernego adekwatnym modelowym ziarnem ściernym.

3. Adekwatny model mikroziarna ściernego

Mikroziarna ścierne mogą dostać się wraz z paliwem do mikroszczeliny, której modelowy obraz pokazano na rysunku 10 (na tym rysunku m.in. (L_p) to luz promieniowy (κ) to współczynnik wzrostu luzu w wyniku działania wysokiego ciśnienia w fazie tłoczenia paliwa, h_W – wysokość chropowatości powierzchni, b_W – szerokość występów chropowatości).





Dla FPE-10-3u:

$h_w \cong 0{,}2$ µm
$b_w \cong 20$ µm
$r \cong 5$ µm

$\varphi = 360°/1570 \cong 0{,}23°$

$L_p = R - r$

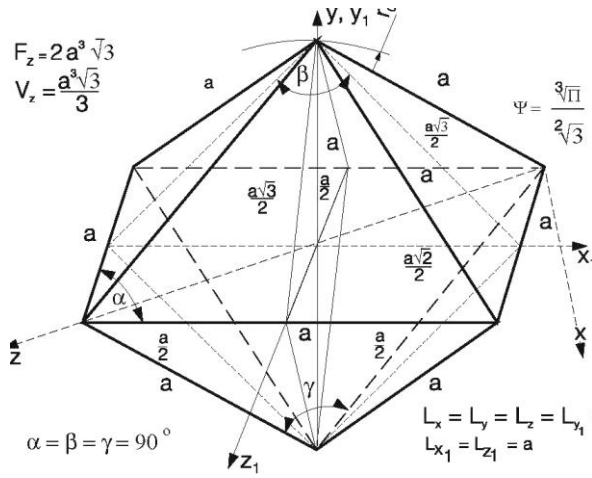
$L_p \cong 2$ µm

$\kappa = 1 - 5$

$z \cdot L_p = 2 - 10$ µm

Rysunek 10. Modelowy obraz powierzchni i szczeliny

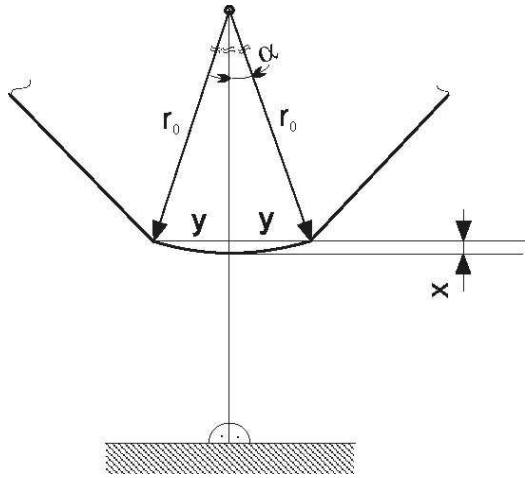
Dzięki szczegółowym badaniom, m.in. składu chemicznego rzeczywistych zanieczyszczeń oleju napędowego w systemie TPZC [56] i analizie krystalograficznej podstawowych składników tych zanieczyszczeń (SiO_2, Al_2O_3) ustalono, że najbardziej odpowiednim zanieczyszczeniem modelowym w badaniach stanowiskowych jest Skaleń, a adekwatnym uogólnionym modelem ziarna, ściernego jest *oktader* czyli regularny ośmiościan zbudowany z dwóch piramid tetragonalnych. Stwierdzono, że ośmiościan taki odzwierciedla z dobrym przybliżeniem kształt rzeczywistych zanieczyszczeń cieczy i umożliwia równocześnie przeprowadzenie teoretycznych obliczeń i analiz, które mogą być odnoszone do każdego systemu TPZC lub innego systemu tego rodzaju [18, 56]. Na rysunku 11 przedstawiono model oktaedrycznego ziarna ściernego.



Rysunek 11. Model oktaedrycznego mikroziarna ściernego [18]

Przyjęcie takiego modelu ziarna ściernego powoduje, że jest także spełniony warunek podobieństwa sferyczności ziarna modelowego i rzeczywistej sferyczności zanieczyszczeń cieczy niezależnie od rozmiaru ziaren. Jak już wcześniej zaznaczono, współczynnik sferyczności (φ) najlepiej oceniać za pomocą uogólnienia Pattyjohna dla brył izometrycznych. Współczynnik sferyczności (φ) rozumiany jako stosunek powierzchni zastępczej kuli (F_o) o średnicy d_z ($F_o = \pi \cdot d_z^2$) do powierzchni $F_z = 2 \cdot a^2 \cdot \sqrt{3}$ ziarna modelowego oktadru, przy czym zastępcza średnica $d_z = (6 \cdot V_z / \pi)^{1/3} = a\sqrt[3]{2 \cdot \sqrt{2} / \pi}$ wynosi zatem $\varphi = 0{,}846$.

Rzeczywiste ziarna ścierne nigdy nie maja ostrzy takich jak modelowy kryształ ($r_o = 0$). Na podstawie szczegółowych badań mikroskopowo-projekcyjnych ziaren Skalenia i rzeczywistych zanieczyszczeń paliw (cieczy hydraulicznej) przyjęto ($r_o = 10$ μm). Należy w tym miejscu przypomnieć, że wielu tribologów w swoich badaniach traktuje promień (r_o) jako promień czaszy kulistej, której sfera jest styczna do krawędzi ziarna; natomiast inni pomijają występowanie tego promienia, przyjmując $r_o = 0$. Tymczasem odcinek $2 \cdot y$ występowania promienia (r_o) stanowi około $0{,}01 \cdot r_o$ do $0{,}03 \cdot r_o$ (rys. 12). Wydawałoby się, że są to wartości znikome, więc nieistotne. Jednak istnienie takiego promienia (r_o) na odcinku $2 \cdot y$ pozwala objaśnić mechanizm oddziaływania mikroziarna ściernego na chropowatą powierzchnię.



Rysunek 12. Ostrze mikroziarna ściernego [18]

Z geometrii ostrza modelowego ziarna wynika, że $x = r_o(1-\cos\alpha)$. Wartość (x) zależy od promienia (r_o) i kąta $2\cdot\alpha$ ograniczającego odcinek $2\cdot y$ występowania tego promienia na ostrzu ziarna modelowego: $2\cdot y = 2\times\mathrm{tg}\alpha\,(r_o-x)$. Ponieważ dla mikroziaren średnio $y \approx 0{,}01\cdot r_o \approx$ const, w zakresie rozpatrywanych rozmiarów można przyjąć, że wartość $\alpha \approx$ const i wynosi $\sin\alpha \approx y/r_o = 0{,}1 \rightarrow \alpha = 36'$. Średnie charakterystyczne rozmiary ostrzy ziaren ściernych wynosiły zatem: $y \approx 0{,}01\cdot r_o$ oraz $x = 0{,}0001\cdot r_o$ (tzn. $x = 0{,}01\cdot y$). W ogólnym przypadku:

$$y = r_o \cdot \sin\alpha, \tag{5}$$

$$x = r_o \cdot (1-\sqrt{1-\sin^2\alpha}). \tag{6}$$

Takie małe ziarna ścierne, mniejsze od 10 µm, charakteryzują się bardzo dużą wytrzymałością. Z analizy hiperbolicznych charakterystyk $\sigma_n = f(d_z)$ podanych przez Tenenbauma [17] wynika, że wytrzymałość takich mikroziaren na ściskanie może sięgać wartości kilkunastu, a nawet kilkudziesięciu tysięcy MPa. Na podstawie danych literaturowych [17, 33, 52, 53, 58] oraz własnych badań i analiz [18, 44, 45] opracowano zależność pozwalającą obliczać przybliżone wartości σ_n dla typowych ziaren ściernych znajdujących się w cieczy systemu TPZC:

$$\sigma_n = 9810\cdot\left(\frac{1{,}1}{d_z^{0,3}} + \frac{1{,}1}{d_z}\right)\cdot\varphi\cdot D\cdot K, \tag{7}$$

gdzie: φ – sferyczność korygująca wpływu kształtu ziaren (tutaj $\varphi = 0{,}846$ dla modelowego ziarna); $D \le 1$ – parametr korygujący wpływu defektów konfiguracji i struktury ($D = 1$); K – parametr określający zróżnicowanie kruchości materiałów w stosunku do SiO_2 (tutaj $K = 1$).

Korzystając z tego wzoru dla $D = 1$ i $\varphi = 0{,}846$ otrzymamy: dla $d_z =$ 2 µm $\rightarrow\sigma_n$ = 11 980 MPa; dla d_z =10 µm$\rightarrow\sigma_n$ = 5 488 MPa; d_z =20 µm $\rightarrow\sigma_n$ = 4 173 MPa; a dla d_z =100 µm$\rightarrow\sigma_n$ = 2 384 MPa.

Wytrzymałość na ściskanie materiałów kruchych jest mniejsza od wytrzymałości na ścinanie ($K \approx E/3$, $G \approx E/2 \rightarrow G \approx 1{,}5 \cdot K$, gdzie E – moduł Yonga, G – moduł Kirchhoffa); natomiast w przypadku materiałów plasycznych jest odwrotnie. Uogólniając dla materiałów kruchych bez granicy plastyczności jest $\tau_z = £ \times \sigma_n$, gdzie $£ \geq 1{,}5$. Z obliczeń wynika zatem, że dla ziaren kwarcowych naprężenia ścinające będą mniejsze niż: $\tau_z = 8\,232$ MPa dla $d_z = 10$ μm i $\tau_z = 17\,970$ MPa dla $d_z = 2$ μm. Parametr (K) wprowadzony do wzoru (7) wynika z postulatu Lawna i Marschalla [52] i pozwala stosować ten wzór do ziaren ściernych z innych minerałów niż modelowy SiO_2. Postulat ten mówi o konieczności stosowania do oceny kruchości minerałów prostego wskaźnika będącego stosunkiem twardości minerałów HV [MPa] mierzonej metodą wgłębnikową Vickersa i odporności na pękanie K_C [MPa·m$^{1/2}$] czyli $K_X = HV/K_C$ [μm$^{1/2}$]. Podczas gdy ocena twardości wynika z pomiarów charakterystycznych rozmiarów (przekątnych) utworzonego przez piramidę wgłębienia, to parametr (K_C) jest wynikiem pomiarów pęknięć propagowanych poza wgłębienia (na przedłużeniu przekątnych). Z badań tych autorów wynika, że propagacja pęknięć (przy określonym, wywołującym je obciążeniu) ma w przybliżeniu liniowy charakter w stosunku do mierzonych wartości rozmiarów odcisku charakteryzującego twardość minerału. Wprowadzono zatem do wzoru (7) mnożnik (K) będący stosunkiem wskaźnika (K_X) dla kwarcu do wartości wskaźnika (K_χ), dla dowolnego minerału kruchego.

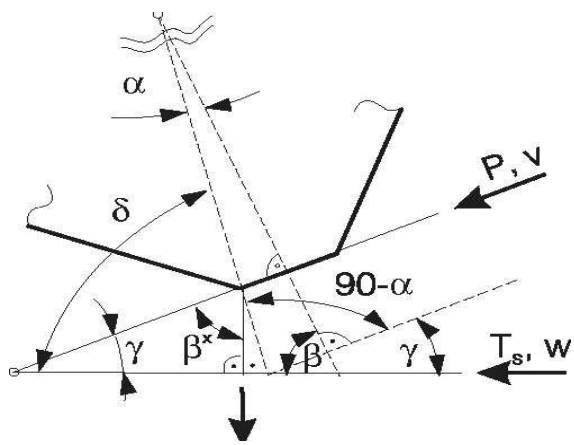
Z przeprowadzonych dla konkretnego systemu TPZC obliczeń wynika, że mikroziarna ścierne dostające się do mikroszczeliny T-C nie będą ulegać pękaniu z powodu wytwarzanych w cieczy naprężeń ścinających. Wytrzymałość na ścinanie takich mikroziaren jest 2÷3 rzędy wartości większa od generowanych w cieczy hydraulicznej naprężeń ścinających [18, 44]. Ziarna takie, uderzając o powierzchnie pod bardzo małym kątem ($\gamma \sim 0$), mogą teoretycznie powodować erozję ścinającą.

4. Erozja ścinająca hydraulicznych par precyzyjnych

W celu objaśnienia przebiegu takiego procesu rozpatrywano ewentualny kontakt swobodnego modelowego mikroziarna, o rozmiarach (L_z) mniejszych od luzu promieniowego (L_p) pary T-C, z powierzchnią jako zderzenie z pojedynczą nierównością modelowej powierzchni, której chropowatość $R_z \approx 0{,}2$ μm jest o rząd wielkości mniejsza od rozmiaru modelowego ziarna (rys. 11, rys. 12). Takie przedstawienie problemu pozwala objaśnić niektóre rozbieżności i *anomalie* wymieniane w literaturze, np. wpływ wzrostu rozmiaru ziaren na początkową intensyfikację erozji ścinającej i późniejszą stabilizację zużycia, mimo dalszego wzrostu rozmiaru ziaren ściernych, a więc także ich masy. Traktowanie ziarna jako kuli utrudnia objaśnienie wielu szczegółów dotyczących mechanizmu oddziaływania ziarna szczególnie mikroziarna, na powierzchnię zużywanego metalu. Ziarno kuliste nie ma możliwości skutecznego wniknięcia w luki pomiędzy nierównościami powierzchni i będzie obślizgiwało się po krzywiźnie tej nierówności. Wówczas nie ma ono możliwości efektywnego ścinania materiału. Objaśniałoby to, dlaczego mimo większej masy i wynikającej z tego większej energii kinetycznej, duże ziarna powodują stale jednakowe, ustabilizowane zużycie podczas erozji ścinającej [2, 3, 5, 29].

To samo można jednak objaśnić, stosując model *oktaedrycznego* ziarna ściernego (rys. 11, rys. 12). Ziarna małe (do pewnego rozmiaru L_z, który należy odnosić do chropowatości (R_z) powierzchni zużywanego metalu) swoimi ostrzami mogą efektywnie

zahaczać o występy nierówności, trafiając promieniem ostrza (r_o) na wierzchołek nierówności (przy $\gamma \sim 0$) – niekoniecznie muszą być odwzorowane modelem ziarna kulistego. Przyjęcie modelu ziarna oktaedrycznego pozwala również bardziej przejrzyście objaśnić wpływ wartości kąta podania ziarna (γ) i jego prędkości (v). Przy bardzo małym kącie $\gamma \sim 0$, ziarno mimo niekulistości i tak obślizguje się po krzywiźnie nierówności. Wynikająca z tego zderzenia składowa pionowa prędkości i siły zderzenia jest znikoma (lub równa zero przy całkowitym poślizgu) i ziarno nie może efektywnie wniknąć w materiał zużywany. Efektywny wpływ składowej poziomej jest pomniejszony dzięki promieniowi zaokrąglenia ostrza ziarna (rys. 12). Z drugiej strony możliwość efektywniejszego oddziaływania ziaren małych można lepiej udowodnić, jeśli proces objaśnia się jako zderzenie ziarna niekulistego z pojedynczą nierównością powierzchni. Jak to wcześniej udowodniono, tak drobne ziarna charakteryzują się wyjątkową wytrzymałością, a to również poprawia ich możliwości tnące. Odwołując się do modelu mikroziarna oktaedrycznego (rys. 11, rys. 12) można wnioskować, że ziarno zmierzające ku powierzchni pod kątem $\gamma = \alpha_{gr} = 36'$, tzn. gdy oś pionowa ziarna tworzy z powierzchnią kąt $\beta > 90\text{-}\alpha$ (rys. 13), nie może efektywnie oddziaływać na powierzchnię, trafiając swoim promieniem (r_o) niemal w wierzchołek i obślizgując się (chyba, że trafi poniżej wierzchołka nierówności), co przy tak znikomym kącie (γ) jest mało prawdopodobne ze względu na bliskie sąsiedztwo kolejnych wierzchołków nierówności.



$\delta = 180 - [\gamma + (90 - \alpha)] = 90 - \gamma + \alpha$
dla $\gamma = \alpha$, $d = 90°$ i $\beta^x = 90 - \alpha = \beta$

Rysunek 13. Kąt podania mikroziarna – rozkład sił i prędkości [18]

Jeśli przyjąć, że oś pionowa ziarna (którakolwiek po obrocie oktaedrycznego ziarna) jest zawsze prostopadła do osi strumienia cieczy, to teoretycznie dla przyjętego modelu ziarna, począwszy od kąta $\gamma = \alpha_{gr}$, może ona zderzyć się z powierzchnią swoją ostrą krawędzią kończącą promień (r_o). Nie znaczy to, że nastąpi natychmiast erozyjne ścinanie. Do zrealizowania procesu ścinania wartość składowej pionowej prędkości (u) musi być większa od pewnej wartości krytycznej (W_{KR}), przy której odkształcenie jest jeszcze sprężyste. Po jej przekroczeniu wystąpi taka pionowa siła (N), że możliwe będzie zgłębienie się ostrza ziarna w zużywany materiał na pewną głębokość i efek-

tywne ścinanie na skutek działania składowej poziomej prędkości (W_{KR}) wywołującej taką siłę tnącą (τ_s), która zdoła pokonać opór materii w jednorazowym, natychmiastowym akcie ścinania. Może to nastąpić tylko wtedy, gdy energia kinetyczna ziarna ściernego przy prędkości (W_{KR}) jest większa od energii potencjalnej ciała ścinającego. Można zatem zapisać:

$$\frac{m_z \cdot W_{KR}^2}{2} > \frac{\tau_s^2 \cdot V_s}{2 \cdot G_s}, \tag{8}$$

gdzie: m_z – masa ziarna ściernego; W_{KR} – składowa pozioma prędkości ziarna; τ_s – naprężenie ścinające dla materiału zużywanego; V_s – objętość ściętego materiału; G_s – moduł sprężystości postaciowej Kirchhoffa.

Ponieważ $W_{KR} = v \cdot \cos\gamma$ (rys. 13), po przekształceniu otrzymamy:

$$\upsilon \cdot \cos\gamma > \tau_s \cdot \frac{V_s^{1/2}}{G_s^{1/2} \cdot m_z^{1/2}}. \tag{9}$$

Ponieważ $T_s = \tau_s \cdot A$, więc $\tau_s = T_s/A$, gdzie (A) jest powierzchnią ścinania, natomiast $N = \sigma_n \cdot F$, gdzie (F) jest powierzchnią odcisku. Jeśli $T_s = \mu \cdot N$, to:

$$\tau_s = \frac{\mu \cdot \sigma_n \cdot F}{A}. \tag{10}$$

W omawianym przypadku może być wprowadzone, w pełni zasadne uproszczenie. Mianowicie, przy znikomej drodze tarcia ziarna o powierzchnię zużywanego elementu można przyjąć, że $A = F$, zatem $\tau_s = \mu \cdot \sigma_n$.

W procesach zużywania erozyjnego duże znaczenie ma twardość powierzchni zużywanego materiału. Im twardszy materiał tym bardziej jest odporny na zużywanie w wyniku erozji ścinającej. Oczywiście w pewnych specyficznych przypadkach wpływ twardości materiału na jego zużywanie erozyjne, zarówno aerościerne, jak i hydrościerne, może mieć złożony charakter. Chodzi głównie o materiały bardzo kruche, które mimo dużej twardości są często mniej odporne na zużywanie erozyjne niż materiały plastyczne o zbliżonej lub nawet mniejszej twardości [13, 40-43, 52, 54]. W rozważanych obecnie przypadkach materiałów twardych, lecz plastycznych, dla przyjętego modelu ziarna ściernego (*oktaedru*), naprężenia (σ_n) mogą być odwzorowane mikrotwardością materiału zużywanego (HV_S), a (μ) współczynnikiem tarcia statycznego (μ_{st}) (ocenionego laboratoryjnie dla konkretnego przypadku), zatem $\tau_s = \mu_{st} \cdot HV_S$. Wówczas wzór (9) przyjmuje postać:

$$\upsilon \cdot \cos\gamma > \mu_{st} \cdot HV_s \cdot \frac{V_s^{1/2}}{G_s^{1/2} \cdot m_z^{1/2}}. \tag{11}$$

Dalsze udoskonalanie tego wzoru może dotyczyć uwzględnienia parametru sferyczności ziarna (φ), który powinien być korygowany współczynnikiem rozmiarowej nieregularności (ε) ziarna, w stosunku do chropowatości powierzchni (R_z) o wpływie odwrotnie proporcjonalnym do (φ), oraz współczynnikiem (E_f) uwzględniającym różne efekty towarzyszące. Szczegółowy opis tych modyfikacji przedstawiono m.in. w pracach [18, 55, 57].

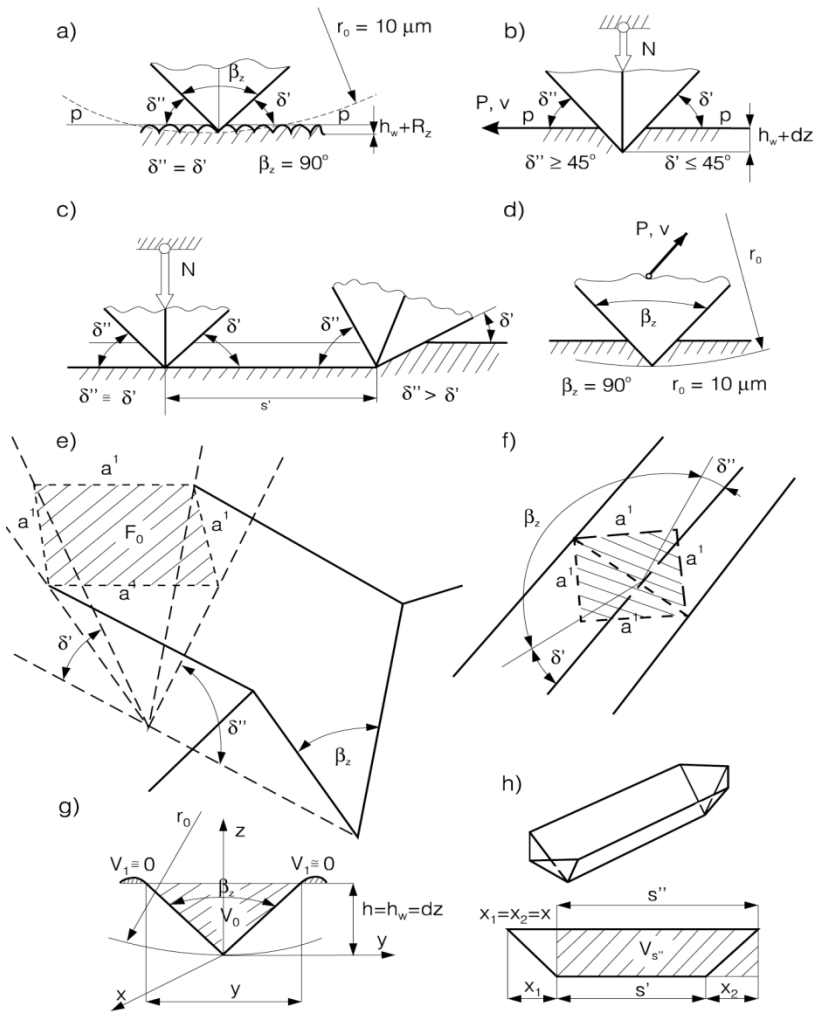
Ustalono, zarówno na podstawie przeprowadzonych obliczeń, jak i rezultatów badań stanowiskowych i eksploatacyjnych, że wpływ erozji ścinającej na zużycie par precyzyjnych T-C jest znikomy w porównaniu z typowym zużyciem ściernym spowodowanym ziarnami zakleszczonymi w luzie promieniowym pary T-C.

5. Elementarny model zużywania ściernego hydraulicznych par precyzyjnych

Z obserwacji mikroskopowych oraz pomiarów profilografometry-cznych, m.in. [50, 56] wiadomo, że szerokość pojedynczej rysy (y_r), wykonanej przez zakleszczone w luzie T-C ziarno jest na ogół większa od jej głębokości (h_r). Wynika to m.in. z kształtu ostrzy ziaren oraz ich znikomej możliwości wnikania w głąb warstwy wierzchniej o dużej twardości (62-64 HRC). Wszystkie ostrza oktaedrycznego modelowego ziarna (rys. 11) mają kąt rozwarcia $\beta_z = 90°$, więc teoretyczny stosunek $y_r/h_r = 2$. W badaniach modelowych (scratch testy) stwierdzono [51, 55], że dla małych obciążeń ($\leq 0{,}2 \cdot N$) stosunek ten wynosił ok. 1,8, natomiast dla obciążeń większych przekraczał często 2. Ostrza ziaren uszkadzały się i dlatego miały znikomą możliwość wnikania w głąb warstwy wierzchniej. Wydaje się zatem, że obrany model ziarna dobrze odzwierciedla średnią możliwość oddziaływania cząstek mineralnych na utwardzone powierzchnie stalowe. Elementarny model oddziaływania takiego ziarna na fragment powierzchni o chropowatości (R_z) przedstawiono na rysunku 14.

W modelu tym przyjęto, że ziarno ścierne ma największą możliwość zakleszczenia się w nierównościach sąsiadujących ze sobą powierzchni ostrzami wyznaczonymi osią **Z** i **X** (rys. 11), co jest konsekwencją m.in. wcześniejszych ustaleń stosowanych w modelu erozji ścinającej. W modelu na rysunku 14 założono również, że ziarno tnie materiał par T-C, jedną z krawędzi oktaedru, zgodnie z kierunkiem realizowanego przez tłok (T) skoku (h_t). Krawędź ta jest krawędzią natarcia ostrza ziarna nachyloną w stosunku do powierzchni zużywanego elementu pod kątem (δ'). Elementarnym sposobem zużywania jest mikroskrawanie. Niewielkie objawy mikrorysowania (mikroskrawanie i mikrobruzdowanie) występują, lecz są tak znikome, że nie mają praktycznego znaczenia (rys. 14g). Nieznaczna objętość (V_1) materiału plastycznie wyciśnięta na krawędzie mikrorowka jest łatwo usuwana w kolejnych cyklach zużywania – przede wszystkim ziarnami pochodzącymi ze skruszenia ziarna podstawowego. Natomiast w badaniach ziarnami umocowanymi na stałe (scratch testy), szczególnie Al_2O_3 [51, 55] rzeczywiście występowało wypychanie metalu na boki, przede wszystkim przy większych obciążeniach. Dochodziło nawet do takiego zwiększenia rozmiaru tłoka, że nie mógł on być ponownie umieszczony w cylindrze, tzn. wysokość „wybrzuszeń" przekroczyła wartość luzu promieniowego pary T-C. Sytuacja taka nigdy nie zaistniała w rzeczywistym systemie TPZC, gdzie swobodne, nieliczne ziarna Skalenia „szarżujące" po powierzchniach pary T-C są łatwo kruszone, a droga ich efektywnego działania jest bardzo mała. Ostrze swobodnego ziarna skrawa materiał warstwy wierzchniej jednego lub drugiego elementu pary T-C, powodując powstanie w pojedynczym akcie niewielkich rys, których całkowita długość stanowi znikomą część skoku (h_t) i nie osiąga 0,1 drogi względnego przemieszczania elementów pary trącej jak to sugerowali: Kragielski [8], Rabinowicz [28, 29] oraz Yi-Li-Wang [59]. W rzeczywistości ani długość rys pochodzących od jednego aktu mikroskrawania nie są jednorodne, ani ich

szerokość i głębokość nie są takie same. Wydaje się, że trzy charakterystyczne rozmiary rys zależą od wielu czynników, nie tylko od skoku (h_t) a nawet nie tylko od stosunku twardości ziarna i materiału zużywanego. Niewątpliwie znaczenie musi mieć rozmiar ziaren oraz ich wytrzymałość, a także chropowatość powierzchni zużywanej warstwy i chwilowy luz promieniowy T-C.



Rysunek 14. Kolejne fazy (a-h) budowy i uogólnienia elementarnego modelu zużywania ściernego par T-C [18]

W przyjętym modelu zakłada się, że każde aktywne ostrze ziarna jest ustawione w stosunku do powierzchni zużywanej warstwy wierzchniej tak jak to pokazano na rysunku 14. Ustawienie takie, oprócz wcześniej przyjętych założeń dla modelu erozji ścinającej, jest uzasadnione kształtem ostrza ziarna (β_o, r_o – rys. 11 i rys. 12), topografią powierzchni (b_w, $2 \cdot h_w$ – rys. 10) i naturalną, tendencją do działania przy najmniejszej wkładanej energii (przy najmniejszych oporach ruchu). Ostre ziarna dzięki występowaniu niewielkiego odcinka promienia r_o (rys. 12) obsuwają się łatwo

między nierównościami $2 \cdot h_w$ (zakleszczenie) i ewentualnie znikomo penetruje w głąb warstwy wierzchniej na dodatkową głębokość *dz*. Całkowite zagłębienie ziarna h_r w stosunku do powierzchni p-p (rys. 14) może teoretycznie wynosić $h_r = h_w + dz$. W badaniach modelowych z luźnymi ziarnami Skalenia działającymi na utwardzoną powierzchnię stali łożyskowej 100 Cr6 (SAE 52 100) obserwowano [51, 55] głębokość pojedynczych rys rzędu 0,2-0,3 μm, tzn. odpowiadającą w przybliżeniu parametrowi chropowatości tej powierzchni $R_z = h_w = 0{,}2$ μm. Uśredniając można powiedzieć, że ostrze ziarna „zanurza się" pomiędzy występy nierówności i w wyniku ruchu tłoka pary precyzyjnej T-C wykrawa niewielką rysę (rys. 14h), krusząc się równocześnie. Tak zwany „efekt ostrza" jest niewielki i wynosi średnio $dz = 1/4 \cdot R_z$. W pierwszej połowie długości rysa bywa nieco głębsza niż w drugiej połowie. W obliczeniach modelowych pominięto zróżnicowanie głębokości rysy, przyjmując wartość średnią zagłębienia $h_r = R_z$ i stosując odwzorowanie odcinków krańcowych rysy (x_1) oraz (x_2) (rys. 14h). W tym momencie pominięto również minimalny odcinek występowania promienia ostrza (r_o), który ulega zmianie w czasie procesu mikroskrawania i kruszenia. Dotychczasowe wyróżnianie tego promienia było konieczne dla optymalnego objaśnienia mechanizmu oddziaływania ziarna ściernego z powierzchnią zużywanej warstwy wierzchniej. Szczegółowy opis modelu przedstawiono w monografiach [18, 55, 57]. Dla uproszczenia w modelu wprowadzono drogę obliczeniową ziarna ściernego $s_{1}'' = s - x = s_{1}' + x$ (rys. 14). Wtedy objętość rysy (objętość materiału usuniętego) wynosi $V_s = V_{s1}''$ tj.

$$V_{s_1''} = F_r \cdot s_1'' = \frac{1}{2} \cdot y_r \cdot h_r \cdot s_1'' , \tag{12}$$

co dla warunków modelowych gdy $y_r/2 = R_z$; $h_r/2 = R_z$; $x = y_r/2 = R_z$; $s_{1}'' = A_1 \cdot h_t + x$ oznacza:

$$V_{s_1''} = R_z^2 \cdot (A_1 \cdot h_t + R_z) , \tag{13}$$

gdzie (A_1) jest liczbą ułamkową, określającą rzeczywistą drogę cięcia w stosunku do skoku tłoka (h_t).

Zakleszczone ziarno musi wykonać pewną pracę na drodze *s''*, taką aby energia zużyta na ścinanie materiału nie przekraczała energii potencjalnej ziarna:

$$\frac{\tau_z^2 \cdot V_z}{2 \cdot G_z} \geq T_{s''} \cdot s'' \tag{14}$$

gdzie: τ_z – naprężenia ścinające ziarno ścierne; V_z – objętość ziarna ściernego; G_z – moduł Kirchhoffa do ziarna ściernego; $T_{s''}$ – siła z jaką ziarno ścierne ścina materiał zużywany na drodze *s''*.

W każdym przypadku wartość siły ($T_{s''}$) musi być taka, aby pokonała opór materii o maksymalnym przekroju, który dla przypadku badanych par precyzyjnych wynosił $F_r = (n_Z \cdot R_z)^2$, gdzie n_Z określa stopień zakleszczenia (zagłębienia) ziarna. Wówczas rozwijana wartość siły ścinającej wynika z kanonicznego wzoru $T_{s''} = \tau_s \cdot F_r$. Z wcześniej przeprowadzonego dowodu wynika, że dla materiałów plastycznych $\tau_s = \mu_{st} \cdot HV_s$, więc wzór na siłę ścinającą, w modelowym przypadku pary precyzyjnej, ma postać:

$$T_{S^{''}} \geq \mu_{st} \cdot HV_S \cdot (n_Z \cdot R_Z)^2 . \tag{15}$$

Reasumując uszczegółowiona postać wzoru (14) jest następująca:

$$\frac{\tau_Z^2 \cdot V_Z}{2 \cdot G_Z} \geq \mu_{st} \cdot HV_S \cdot (n_Z \cdot R_Z)^2 \cdot s^{''} . \tag{16}$$

Podobne jak w przypadku erozji ścinającej możliwe jest dalsze doskonalenie wzoru (16), np. modyfikatorem określającym wpływ różnorodnych efektów towarzyszących (E_f). Szczegółowy opis tych modyfikacji przedstawiono m.in. w pracach [18, 55, 57].

6. Podsumowanie

Zostały opracowane elementy nowej teorii zużywania ściernego metali (w odniesieniu do systemów TPZC). W szczególności opracowano:

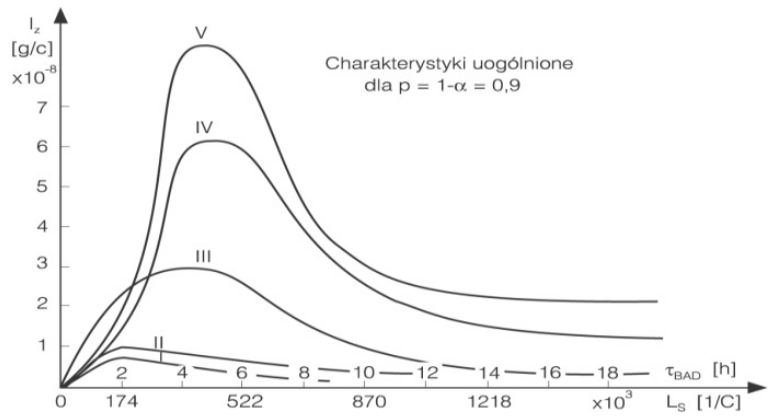
- nowy model erozji ścinającej powodowanej przez oktaedryczne mikroziarna ścierne, odzwierciedlający ich oddziaływanie z powierzchnią i umożliwiający obliczenie zużycia elementu, poddanego erozji ścinającej;
- nowy elementarny model zużywania ściernego hydraulicznych par precyzyjnych T-C powodowanego zakleszczonym w mikroszczelinie pomiędzy nurnikiem i tuleją (tłokiem i cylindrem) modelowym oktaedrycznym ziarnem ściernym, z obszernym zestawem wzorów umożliwiających praktyczne obliczenia i analizy dotyczące prognozowania trwałości takich par precyzyjnych.

W przypadku rozpatrywanych modelowych systemów TPZC zasilonych na ogół bardzo czystymi cieczami (filtrowanymi), w których znajduje się niewielka liczba bardzo drobnych ziaren ściernych, udział erozji w ogólnym procesie zużywania ściernego par T-C jest znikomy. Z powodu wielu szczegółowych uwarunkowań ogólna charakterystyka zużywania par precyzyjnych T-C jest w rzeczywistości złożoną zależnością funkcyjną $\overline{\Delta M} = f(L_s)$, gdzie $\overline{\Delta M}$ jest średnim ubytkiem masy pary T-C a (L_S) jest liczbą cykli pracy hydraulicznej pary precyzyjnej. Zależności te są bardzo charakterystyczne i w badanym przypadku bardzo podobne – niezależnie od pewnych modyfikacji konstrukcji par T-C i sposobu tłoczenia cieczy, w obiegu zamkniętym lub otwartym (rys. 6 i rys. 7). Jeśli charakterystyki zużyciowe $\overline{\Delta M} = f(L_s)$, wykonane w oparciu o wartość pomierzone bezpośrednio w trakcie badań rzeczywistych systemów TPZC (rys. 6), przekształcimy w krzywe obrazujące intensywność zużywania I_z [g/cykl], to otrzymamy charakterystyki $I_z = f(L_S)$ przedstawione na rysunku 15.

Charakterystyki takie pozwalają w sposób najbardziej obrazowy i ogólny uwidocznić zmiany procesu zużywania ściernego hydraulicznych par precyzyjnych T-C. Widoczny obraz charakterystyk $I_z = f(L_S)$ świadczy o tym, że w ogólnym przypadku mogą być one analizowane jako złożone funkcje wykładnicze typu $y = a \cdot x^b \cdot e^{cx}$, gdy $a > 0$, $b > 0$ i $c < 0$ oraz $y = I_z$ i $x = L_S$. Funkcja $y = a \cdot x^b \cdot e^{cx}$ ma wiele interesujących cech, które w przypadku przystosowania jej do potrzeb analizy procesów zużywania ściernego hydraulicznych par precyzyjnych T-C umożliwiają jednoznaczny ich opis i porównywanie przebiegów zużywania w różnych systemach TPZC, obserwowanych zarówno w badaniach stanowiskowych, jak i eksploatowanych. Stwierdzono, że dla utylitarnego wykorzystania funkcji $I_z = a \cdot L_S^b \cdot e^{cLs}$:

- współczynnik *„a”* powinien określać wpływ stężenia ziaren ściernych w cieczy systemów TPZC;
- wykładnik potęgowy *„b”* powinien charakteryzować wpływ rozmiarów (L_z) ziaren ściernych w systemach TPZC;
- natomiast wykładnik potęgowy *„c”* może być wtedy wyróżnikiem rozdrobniania (skuteczności rozdrabniania) ziaren ściernych w systemie w miarę wzrostu liczby cykli (L_S).

Szczegółowy opis modeli, ich praktycznego wykorzystania oraz całego procesu analizy systemowej zużywania ściernego hydraulicznych par precyzyjnych T-C przedstawiono w monografiach [18, 55, 57], których strony tytułowe przedstawiono na rysunku 16.



Rysunek 15. Charakterystyki intensywności zużywania par T-C w funkcji liczby cykli (czasu pracy), dla pyłów testowych o różnej granulacji [18]

Rysunek 16. Strony tytułowe monografii [18, 55, 57]

Celem obecnego opracowania jest szersze zainteresowanie badaczy, szczególnie tribologów, omówioną problematyką zużywania ściernego hydraulicznych par precyzyjnych T-C.

Literatura

1. Mate C.M., *Tribology on the small scale. A bottom up approach to friction, lubrication and wear*, Oxford University Press, Oxford, New York 2008.
2. Hruszczow M.M., Babiczew M.A., *Abraziwnoje iznosziwanije*, Nauka, Moskawa 1970.
3. Hruszczow M.M., Babiczew M.A., *Islidowanija iznosziwanija metałow*, Izd. ANZSSR, Moskwa 1960.
4. Hruszczow M.M., *Pronciples of abrasive wear*, Wear, 28(1), 1974, pp. 69-88.
5. Hruszczow M.M., *Zakonomiernosti abraziwnogo iznasziwanija*, Nauka, Moskwa 1975.
6. Kragielski J.W., Alisin W.W., *Trienije, iznasziwanije i smazka*, Maszinostrojenije, Moskwa 1978.
7. Kragielski J.W., *Trienije i iznos*, Maszinostrojenije, Moskwa, 1968.
8. Kragielski J.W., *Trienije i iznos*, Maszinostrojenije, Moskwa 1977.
9. Zum-Gahr K.H., *Abrasive wear of cast iron*, Wear 64(1), 1980, s. 175-194.
10. Zum-Gahr K.H., *Formation of wear debris by the abrasion of ductile metals*, Wear, 74(2), 1981-82, s. 353-373.
11. Zum-Gahr K.H., *Microstructure and wear of materials*, Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York, Tokyo 1987.
12. Zum-Gahr K.H., *Modelling of two-body abrasive wear*, Wear, 124(1) 1988, s. 87-103.
13. Bern H., Fischer A., *Abrasive wear resistance and microstructure of Fe-Cr-C-B hard surfacing weld deposites*, Wear, 112(2), 1986, pp. 163-180.
14. Iwasaki J., Riemier S.C., Orlich J.N, *Corrosive and abrasive wear in ore grinding*, Wear, 103(3), 1985, s. 253-287.
15. Peng Q.F., *Improving abrasion wear by surface treatment*, Wear, 129(2), 1989, s. 195-203.
16. Tenenbaum M.M., *Iznosostojkost konstrukcionnych matieriałow i dietaliej maszin*, Maszinostrojenije, Moskwa 1966.
17. Tenenbaum M.M., *Soprotiwlienije abraziwnomu iznosziwaniju*, Maszinostrojenije, Moskwa 1976.
18. Kałdoński T., *Badanie i modelowanie procesów zużywania ściernego hydraulicznych par precyzyjnych*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2008.
19. Archard J.F., *Contact and rubbing of flat surfaces*, Journal of Applied Physics, 24(8), 1953, s. 981-988.
20. Kałdoński T., *Zarys mikro/nanotribologii*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2016.
21. Bowden F.P., Tabor D., *The froction and lubrication of solids*, Clarendon Press, Oxford 1950.
22. Holm R., *Electrical contacts*, Almquist and Wiksells, Stockholm 1946 [za 23].
23. Hahn G.J., Lee R.E., McFarland W. J., *Determination of wear distribuations*, RADC-TR-69225 – General Electric, New York 1969 (reprint).
24. Rabinowicz E., *Friction and wear materials*, John Wiley and Sons, New York [za 23].
25. Hokkirigawa K., Kato K., *An experimental and theoretical investigations of ploughing, cutting and wedge formation during abrasive wear*, Tribology Internationak, 21(1).
26. Kokkirigawa K., Kato K., *The effect of hardness on the transistion of the abrasive wear mechanism of steels*, Wear, 123(2), 1988, s. 241-251.
27. Hokkirigawa K., Kato K., Kayaba T., Endo Y., *Three dimensional shape effect on abrasive wear*, ASME Jour. Trib., 108(3), 1986, s. 346-351.
28. Rabinowicz E., Dunn L.A., Russel P.C., *A study of abrasive wear under three body conditions*, Wear, 14(5), 1961, s. 345-355.
29. Rabinowicz E., Mutis A., *Effect of abrasive particle size on wear*, Wear, 8(5), 1965, s. 381-390.
30. Rabinowicz E., *The formation of spherical wear particles*, Wear, 42(1), 1977, s. 149-156.

31. Jampolski G.J., *Abraziwnyj iznos truszczisja soprażnienij maszin*, Trienje i iznos, 5, 1981, s. 832-842.
32. Uetz J., *Zużycie materiałów przy udziale ziarnistych materiałów mineralnych*, Zag. Ekspl. Masz. PAN, 1(25), 1976, s. 7-29.
33. Kaszczejew W.N., *Abraziwnoje rozruszenije twierdych treł*, Nauka, Moskwa 1970.
34. Yang G.H., Garrison Jr.A., *A comparision of micrastructural effect on two-body and three-body abrasive wear*, Wear, 129(1), 1989, s. 93-103.
35. Wang A.G., Hutchings J.M., *The numer of particle contacts in two-body abrasive wear of metals by coated abrasive papers*, Wear, 129(1), 1989, s. 23-25.
36. Wang G.T.Y., Spikes H.A., *Solid particles in rolling and sliding elasto-hydrodynamic contacts*, Tribol. Trans., 31(1), 1988, s. 12-21.
37. Williams J.A., Hyncic A.M., *Mechanism of abrasive wear in lubricated contact*, Wear, 152(1), 1992, s. 57-74.
38. Roach A.E., *Performance of oil film bearings with containing lubricant*, Trans. of the ASME, 73, 1951, s. 677-686.
39. Ciborowski J., *Inżynieria chemiczna*, PWN, Warszawa 1955.
40. Finnie J., Wolak J., Kabil T., *Erosion of metals by solid particles*, Jour Mat., 2, 1967, s. 682-700.
41. Finnie J., *Some observations on the erosion of ductile metals*, Wear 9(1), 1972, s. 81-90.
42. Bitter J.G., *A study of erosion phenomena. Part I*, Wear, 6(1), 1963, s. 5-21.
43. Bitter J.G., A *study of erosion phenomena. Part II*, Wear, 6(3), 1963, s. 169-190.
44. Kałdoński T., *Metoda oceny wytrzymałości ziaren ściernych na ścinanie*, Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, XLVI(7), 1997, s. 73-89.
45. Kałdoński T., *The new model and estimation method for cutting erosion*, Arch. Bud. Maszyn PAN, XLIII(4), 1996, s. 1-23.
46. Kałdoński T., *Elementarny model zużywania ściernego par precyzyjnych typu tłok-cylinder*, Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, LIII(10), 2004, s. 5-22.
47. Kałdoński T*., Metodologia oceny zużycia ściernego hydraulicznych par precyzyjnych*, Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, LII(1), 2003, s. 5-27.
48. Kałdoński T., *Model erozji ścinającej pojedynczymi ziarnami*, Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, LIII(1), 2004, s. 23-36.
49. Kałdoński T., *Modele i parametry oceny zużywania ściernego*, Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, LII(3), 2003, s. 21-42.
50. Kałdoński T., *Zużywanie ścierne w systemach tribologicznych typu tłok-cylinder. Rozprawa habilitacyjna*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 1996.
51. Kałdoński T., *Identyfication tests of stiction characteristic determining abrasive wear course of LH-15 steel*, Jour. of Mater. Proces Techn., 175, 2006, pp. 241-245.
52. Lawn B.R., Marshall D.B., *Hardness toughness and brittleness an indentation analysis*, Jour. of the Amer. Soc. 67(7-8), 1979, pp. 347-350.
53. Person B.N.J., *Sliding friction: physical principles and applications*, Springer, Berlin-New York, 1998.
54. Gawne D.T., Ma U., *Friction and wear of chromium and nickel coatings*, Wear, 129(1), 1989, s. 123-142.
55. Kałdoński T., *Abrasive wearing processes of hydraulic precise pairs*, Military University of Technology, Warsaw 2020.
56. Kałdoński T., *Wpływ czystości paliwa na trwałość aparatury wtryskowej silników o zapłonie samoczynnym. Rozprawa doktorska*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 1986.
57. Kałdoński T., *Isliedowanije i modelirowanije procesow abraziwnogo iznasziwanija gidrawliczeskich precizionnych par*, WołgGTU/Otrok, Wołgograd 2015.

58. Zwierzycki W., *Zagadnienia apriorycznej oceny trwałości węzłów tarcia ślizgowego*, Rozprawy Politechniki Poznańskiej nr 226, Poznań 1990.
59. Yi-Li-Wang, Zi-Shan-Wang, *An analysis of the influence of plastic indentation on three-body abrasive wear of metals*, Wear, 122(2), 1988, pp. 123-133.
60. Kałdoński T., Ziencik H., Bojar Z., *Ocena zmian mikrostruktury warstwy wierzchniej par precyzyjnych pomp wtryskowych*, Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, 10(446), 1989, s. 97-105.

Procesy zużywania ściernego par precyzyjnych nurnik-tuleja: badania, modelowanie, predykcja

Streszczenie
W rozdziale przedstawiono krytyczny osąd stanu wiedzy dotyczącej modeli i parametrów oceny procesów zużywania ściernego metali, w tym hydraulicznych par precyzyjnych typu nurnik-tuleja. Bazując na wieloletnich studiach literaturowych i badaniach własnych zużywania ściernego hydraulicznych par precyzyjnych opracowano nowe modele służące ocenie zużywania ściernego, w tym: model oktaedrycznego ziarna ściernego, model zużywania ściernego ziarnami zakleszczonymi w luzach promieniowych par precyzyjnych. Przedstawione modele są efektem przyjętej metodologii kompleksowych badań i oceniania procesów zużywania ściernego zachodzących w takich systemach tribologicznych. W efekcie, rzeczywisty proces zużywania ściernego hydraulicznych par precyzyjnych opisano złożoną funkcją wykładniczą typu $y = ax^b \cdot e^{cx}$.
Słowa kluczowe: zużycie ścierne, hydrauliczne pary precyzyjne, modele

Abrasive wear processes of punger-sleeve presice pairs: research, modeling, prediction

Abstract
This chapter presents a critical judgment of the state of knowledge regarding models and parameters for the assessment of metal abrasive wear processes, including plunge-sleeve hydraulic precision pairs. Based on many years of literature studies and own research on the wear of precise hydraulic pairs, new models have been developed for assessment of abrasive wear, including the octahedral model of abrasive grain the model of shear erosion of hydraulic precision pairs, and the elementary model of abrasive wear with grains jammed in the radial clearance of precision pairs. The presented models are the results of the adopted methodology of comprehensive research on the assessment of abrasive wear processes occuring in such tribological systems. As a result, the actual abrasive wear process of hydraulic precision pairs is described by a complex expotential function of type $y = ax^b \cdot e^{cx}$.
Keywords: abrasive wear, hydraulic precision pairs, models

Krzysztof Dutkowski[1]

Współczesne trendy w wykorzystaniu materiałów zmiennofazowych jako dodatku do cieczy roboczych w układach wymiany ciepła

1. Wprowadzenie

Celem polityki Unii Europejskiej jest prowadzenie gospodarki umożliwiającej co najmniej 40% redukcję emisji gazów cieplarnianych do 2030 r. Działanie wymuszone jest tym, że w krajach położnych w obszarze klimatycznym UE na ogrzewanie i chłodzenie budynków zużywa się prawie połowę energii, zaś znaczna ilość energii cieplnej jest ciepłem odpadowym innych procesów energetycznych i nie jest gromadzona ani efektywnie wykorzystywana [1]. Osiągnięcie europejskich celów klimatycznych, które są zawarte w celach Unii Europejskiej oraz w planie działania Komisji Europejskiej w zakresie energii do 2050 r. możliwe będzie dzięki włączeniu energii odnawialnej w krajowe systemy energetyczne oraz zastosowaniu technologii magazynowania różnych form energii.

Magazynowanie energii odbywać się może na kilka sposobów [2].

1.1. Magazynowanie energii cieplnej

TES (ang. *Thermal Energy Storage*) to magazyny, w których ciepło doprowadzane jest do medium magazynującego umieszczonego w przestrzeni, która zapobiega wymianie ciepła z otoczeniem. Tradycyjne magazynowanie odbywa się w postaci ciepła jawnego, czyli doporowadzenie ciepła podnosi temperaturę medium, np.: magazyn ciepłej wody, magazyn wypełniony kamieniami. Przechowywanie energii cieplnej z wykorzystaniem ciepła utajonego jest kolejną z metod TES. Polega na wykorzystaniu energii potrzebnej do zmiany fazy materiału magazynującego z ciała stałego w ciecz lub z cieczy w ciało stałe. Magazyny ciepła utajonego cieszą się ostatnio dużym zainteresowaniem, przede wszystkim ze względu na izotermiczny charakter procesu przemiany fazowej oraz możliwość magazynowania dużych ilości ciepła.

1.2. Chemiczne magazynowanie energii

Chemiczne magazyny energii wykorzystują odwracalną reakcję chemiczną, która pochłania dużą ilość energii. Chemiczne systemy magazynowania energii są czasami klasyfikowane jako termochemiczne magazynowanie energii, gdy wykorzystują energię cieplną i jako elektrochemiczne magazynowanie energii, gdy wykorzystują energię elektryczną.

1.2.1. Termochemiczne magazyny energii

Wykorzystują reakcje chemiczne, które pochłaniają lub uwalniają energię cieplną. Charakteryzują się trzema etapami działania: dysocjację endotermiczną, magazynowaniem produktów reakcji a następnie reakcję egzotermiczną produktów dysocjowanych. Końcowy etap odtwarza początkowe materiały, umożliwiając powtórzenie

[1] krzysztof.dutkowski@tu.koszalin.pl, Katedra Energetyki, Wydział Mechaniczny, Politechnika Koszalińska.

procesu. Systemy termochemicznego magazynowania energii wykazują większą gęstość magazynowania niż systemy TES, co czyni je bardziej zwartymi. Ponieważ straty energii podczas magazynowania są mniejsze niż w TES, magazynowanie energii termochemicznej ma duży potencjał do zastosowań związanych z przechowywaniem długoterminowym. Potrzebne są jednak odpowiednie materiały lub kombinacje materiałów, które magazynują energię przy niewielkich stratach ciepła i uwalniają ją łatwo, gdy jest to potrzebne.

1.2.2. Elektrochemiczne systemy magazynowania energii

Energia elektryczna może być magazynowana elektrochemicznie w bateriach i kondensatorach. Akumulatory są urządzeniami umożliwiającymi magazynowanie energii o dużej gęstości energii oraz wysokim napięciu. W zależności od użytych materiałów wyróżnia się akumulatory litowo-jonowe, sodowo-siarkowe, niklowo-kadmowe, kwasowo-ołowiowe, akumulatory ołowiowo-węglowe, a także akumulatory zebra (tzw. „gorącej soli") czy baterie przepływowe. Kondensatory przechowują energię elektrochemiczną i w zależności od budowy dzieli się je na kondensatory elektrostatyczne, kondensatory elektrolityczne i kondensatory elektro-chemiczne. Spośród tych trzech typów kondensatory elektrochemiczne, zwane również superkondensatorami lub ultrakondensatorami, ze względu na porowatą strukturę elektrody, mają największą pojemność na jednostkę objętości.

1.3. Magazynowanie energii kinetycznej

Forma mechanicznego magazynowania energii, która jest odpowiednia do osiągnięcia płynnej pracy maszyn i zapewnienia dużej mocy i gęstości energii. W tego typu magazynach energia kinetyczna jest przenoszona do koła zamachowego za pomocą maszyny elektrycznej działającej jako silnik lub generator w zależności od trybu pracy (ładowania, rozładowania). Maszyny z magnesami trwałymi są powszechnie stosowane do kół zamachowych ze względu na ich wysoką sprawność, dużą gęstość mocy i niskie straty na wirniku. Zmagazynowana energia może zostać uwolniona jako energia elektryczna. Obracająca się masa jest podtrzymywana przez łożyska magnetyczne, które działają w próżni, aby wyeliminować straty tarcia podczas długotrwałego przechowywania i kwestii bezpieczeństwa. Łożysko magnetyczne nie wymaga smarowania, ponieważ nie ma strat spowodowanych tarciem, ale ma skomplikowane systemy sterowania, a niektóre typy wymagają energii do działania. Łożyska magnetyczne nadprzewodnikowe (SMB) są odpowiednie do zastosowań o dużej prędkości, ale wymagają energii do działania kriogenicznego układu chłodzenia. Osiągnięcie dużej prędkości obrotowej jest pożądane, ponieważ zmagazynowana energia jest proporcjonalna do kwadratu prędkości.

1.4. Magazynowanie energii sprężonego powietrza

Powietrze jest sprężane (podczas nadwyżki energii) i przechowywane w podziemnej kawernie lub opuszczonej kopalni. W przypadku zapotrzebowania na energię sprężone powietrze może zostać uwolnione do turbiny w celu wytworzenia energii elektrycznej. Systemy magazynowania energii sprężonego powietrza mogą być ekonomicznie atrakcyjne ze względu na ich zdolność do przesunięcia czasu zużycia energii i równoważenia skutków cyklicznego działania źródeł energii odnawialnej.

1.5. Magazynowanie energii skroplonego powietrza

Odbywa się w temperaturach kriogenicznych, w izolowanych zbiornikach niskociśnieniowych. W porównaniu ze sprężonym powietrzem, skroplone powietrze generuje mniejsze straty, ponieważ może być utrzymywane przy umiarkowanym ciśnieniu co sprzyja długotrwałemu przechowywaniu. Powietrze w stanie ciekłym jest również gęstsze i można je przechowywać w mniejszych zbiornikach. Podczas cyklu odzysku energii ciśnienie ciekłego powietrze jest zwiększane, ciecz odparowywana i podgrzewane, aby zapewnić gaz pod wysokim ciśnieniem. Ciepło może być dostarczane z dowolnego medium o temperaturze otoczenia, takiego jak otoczenie, ale może być dodatkowo dostarczane z ośrodka o wyższej temperaturze (np. ciepło odpadowe). Podwyższenie temperatury powietrza poprawia moc i wydajność odzysku energii.

1.6. Magazynowanie wodoru

Wodór jest wytwarzany bezpośrednio (np. poprzez fotokonwersję) lub metodą elektrolityczną, przechowywany przez pewien czas, a następnie np. utleniany w celu odzyskania energii. Energia wodoru wykazuje cechy uzupełniające w stosunku do energii elektrycznej. Niektórzy zaproponowali „gospodarkę wodorową" obejmującą wszystkie aspekty systemów energii wodorowej, w tym produkcję, przechowywanie, dystrybucję i wykorzystanie. Jedną z powszechnych metod produkcji wodoru jest rozbicie cząstki wody. Energia potrzebna do tego procesu może pochodzić z paliw kopalnych, odnawialnych lub innych źródeł energii. Przechowywanie wodoru jest poważnym wyzwaniem, zwłaszcza w zastosowaniach motoryzacyjnych. Wodór ma niską gęstość energii w porównaniu z innymi paliwami, co wymaga znacznie większego zbiornika paliwa dla pojazdu zasilanego wodorem zamiast benzyny/oleju napędowego. Ponadto wodór jest najlżejszym ze wszystkich pierwiastków i trudniejszy do skraplania niż metan i propan. Ze względu na małą gęstość, a także niewielkie rozmiary cząsteczek może wyciekać z pojemników przechowawczych. Wodór można przechowywać w czystej postaci jako sprężony gaz lub jako ciecz kriogeniczna lub w fazie mieszanej.

1.7. Systemy hydroenergetyczne

Magazyny energii wody, w który „przechowuje się" energię elektryczną w postaci energii potencjalnej wody (obiekty typu: elektrownie szczytowo-pompowe). Za pomocą pompy przemieszcza się wodę z akwenu na niskiej wysokości do wyższej położonego zbiornika wodnego. Energię można odzyskać, pozwalając wodzie przepływać przez turbinę wodną z dużej wysokości na niższą. Turbina jest podłączona do generatora, który może wytworzyć energię elektryczną. Systemy hydroenergetyczne wymagają szczególnych warunków lokalizacyjnych. Jeśli warunki są spełnione, jest to odpowiedni sposób magazynowania energii odnawialnej, jak również dostarczania energii bezpośrednio do sieci. Cechą charakterystyczną systemów PHES jest ich długa żywotność, niskie koszty eksploatacji i konserwacji.

1.8. Magazynowanie energii magnetycznej

Osiągane za pomocą dużej cewki nadprzewodzącej, która prawie nie ma oporu elektrycznego w pobliżu temperatury zera absolutnego i jest zdolna do magazynowania energii elektrycznej w polu magnetycznym generowanym przez przepływający przez

nią prąd stały. Cewka nadprzewodząca jest utrzymywana w temperaturze kriogenicznej za pomocą ciekłego hel lub azotu. Straty energii są głównie związane z systemem chłodzenia, który utrzymuje temperaturę kriogeniczną zwojów cewki. Straty energii w cewce są prawie zerowe, ponieważ nadprzewodniki nie stawiają oporu dla przepływu elektronów. Cewki mogą pracować nieograniczoną liczbę cykli ładowania i rozładowywania przy zachowaniu wysokiej wydajności.

2. Magazynowanie energii cieplnej z wykorzystaniem materiału zmiennofazowego

Magazynowanie energii cieplnej (TES), jako element systemu energetycznego pozwala na oszczędzanie energii, zwiększenie ogólnej sprawności systemów poprzez eliminację niedoborów w okresie między niską podażą a wysokim popytem na energię, zmniejszenie kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych oraz redukcję emisji dwutlenku węgla oraz innych zanieczyszczeń do środowiska [3].

Materiały wymagające doprowadzenia znacznej ilości energii cieplnej, na jednostkę objętości, dodatkowo ulegające przemianie fazowej typu ciało stałego-ciecz przy „stałej" temperaturze, to tzw. materiały zmiennofazowe – PCM (ang. *Phase Change Material*) [4, 5]. Badanie PCM zostało zainicjowane przez Telkesa i Raymonda w latach 40 ubiegłego wieku w okresie kryzysu energetycznego, gdy poszukiwano nowych sposobów magazynowania ciepła, zwłaszcza energii słonecznej [6].

Obecnie stosowane PCM-y charakteryzują się, zależnie od rodzaju materiału, temperaturą przemiany fazowej od -100^{o}C do + 400^{o}C. Ciepło przemiany fazowej może wynosić od 100 kJ do 1 MJ na każdy kilogram masy [7]. Temperatura przemiany fazowej oraz jednostkowe ciepło przemiany fazowej to główne zmienne, które należy wziąć pod uwagę przy wyborze PCM. W rzeczywistości, od materiału PCM oczekuje się dodatkowych właściwości, które można podzielić na kategorie: termiczno-fizyczne, kinetyczne, chemiczne, ekonomiczne oraz środowiskowe. Od materiału PCM oczekuje się, aby posiadał [3, 8]:

a) pod względem własności termicznych i fizycznych:

- temperaturą przejścia fazowego odpowiednią do aktualnej potrzeby;
- wysoką zdolnością magazynowania ciepła podczas przemiany fazowej, czyli wysoką wartość entalpii przemiany fazowej;
- wysoką zdolnością magazynowania ciepła w zakresie temperatury innej niż temperatura przemiany fazowej, czyli dużą wartość ciepła właściwego;
- duży współczynnik przewodzenia ciepła, co gwarantuje szybki proces „ładowania" i „rozładowania" magazynu ciepła;
- dużą gęstość co gwarantuje możliwość budowania magazynów ciepła o małej objętości;
- brak lub minimalnie małe zmiany objętości podczas przejścia fazowego;
- stabilne długoterminowo i w pełni odwracalne cykle krystalizacji/topienia;
- brak lub maksymalnie mało intensywne zjawiska dodatkowe (np. przechłodzenie);

b) pod względem kinetycznym:

- wysokie tempo zarodkowania;
- wysokie tempo wzrostu kryształów;

c) pod względem chemicznym:
- trwały chemiczne i termiczne w czasie;
- odwracalny chemicznie cykl krystalizacji i topnienia;
- nietoksyczny;
- niepalny;
- niekorozyjny;
- niewybuchowy;

d) pod względem ekonomicznym:
- komercyjnie dostępny;
- tani;

e) pod względem środowiskowym:
- brak lub niskie oddziaływanie na środowisko;
- nie wytwarzający zanieczyszczeń;
- możliwy do recyklingu.

W praktyce nie ma materiałów PCM, które spełniają wszystkie ww. wymagania. Wynika to z ich budowy chemicznej. PCM to związki: organiczne, nieorganiczne i eutektyczne. Organiczne PCM obejmują materiały parafinowe i nieparafinowe, w których te ostatnie to kwasy tłuszczowe, alkohole i glikole. Nieorganiczne PCM są klasyfikowane jako hydraty soli, stopione sole lub metale. Eutektyczne PCM uzyskuje się przez zmieszanie dwóch lub więcej związków organicznych, nieorganicznych lub organicznych z nieorganicznymi PCM. Najbardziej rozpowszechnione są organiczne PCM. Są to materiały występujące w naturze, które w większości składają się z łańcuchów węglowo-wodorowych. Organiczne PCM są stabilne chemicznie, nie wykazują przechłodzenia, nie powodują korozji i nadają się do recyklingu. Mają jednak niską przewodność cieplną i są łatwopalne [8]. Współczynnik przewodzenia ciepła PCM to jedynie 0,1-0,6 W/m·K. Ogranicza to szybkość „ładowania/rozładowywania" magazynu ciepła, a tym samym utrudnia przemysłowe wdrożenie materiałów PCM. Prowadzone są badania w celu zwiększenia ich przewodności cieplnej, między innymi, poprzez [9]:

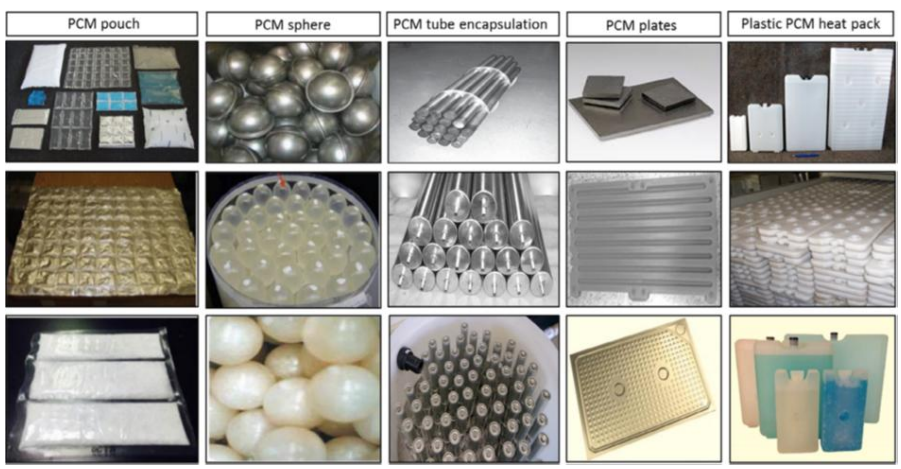
- bezpośrednie dodawanie do PCM materiałów o wysokiej przewodności cieplnej, takich jak nanocząstki węglowe, drobinki metalu. Dodatek niewielkich ilości (~ 1% wagowo) może zwiększyć przewodność cieplną PCM ponad 200%. Pomimo swojego dużego potencjału, dodatek nanocząstek może również prowadzić do niepożądanych skutków ubocznych, takich jak sedymentacja, aglomeracja, wzrost lepkości i wyższy koszt materiału;
- zastosowanie dodatkowego ożebrowania powierzchni kontaktu wymiennik ciepła – materiał PCM w celu zwiększenia powierzchni wymiany ciepła. Strategia ta może prowadzić do niezgodności materiałowych i w efekcie korozji;
- umieszczenie materiału PCM w porowatej strukturze przewodzącej (np.: grafit ekspandowany, grafit laminowany itp.) lub metalicznych piankach. Technika ta zwiększa transport ciepła, ale zmniejszając ilość materiału PCM obniża się gęstość magazynowanej energii cieplnej. Ponadto w większości przypadków zwiększa się koszt magazynu ciepła;

- kapsułkowanie – technika ta pozwala na gromadzenie materiału PCM w dużej liczbie małych pojemników stanowiących wsad akumulatora ciepła, co pozwala na zwiększenie transferu ciepła oraz inicjowanie przemiany fazowej jednocześnie w wszystkich omywanych pojemnikach. Niestety proces kapsułkowania dodatkowo komplikuje budowę magazynu ciepła oraz podnosi jego koszt;
- inne nowatorskie techniki, jak np. dodanie do PCM innego związku chemicznego (np. heksagonalnego azotku boru, który może zwiększyć przewodnictwo cieplne PCM o kilkanaście procent).

3. Kapsułkowanie PCM

Kapsułkowanie materiału PCM pozwala oprócz zwiększenia współczynnika przewodzenia ciepła (dzięki materiałowi obudowy) na inicjowania przemiany fazowej jednocześnie w każdej zamkniętej objętości. Powoduje to zwiększenie powierzchni wymiany ciepła i dodatkowo: zapobiega bezpośredniemu kontaktowi substancji czynnej PCM ze środowiskiem, zmniejsza ryzyko wycieków, przedłuża żywotność PCM, jak i samego magazynu ciepła oraz zmniejsza problemy wynikające z rozdzielania się faz ciekłej oraz stałej. Techniki kapsułkowania można podzielić na makro, mikro i nanokapsułkowanie [10, 11].

Makrokapsułkowanie PCM jest procesem, w którym materiał PCM jest zamykany w pojemniku, którego ścianka ma grubość około 1 mm i więcej. Geometria powłoki kapsułki może mieć kształt woreczków, kul, prętów, płytek lub dowolną inną formę (rys. 1). Powłoka kapsuły/pojemnika powinna być odporna chemicznie i fizycznie na wzajemne oddziaływanie z jednej strony materiału PCM z drugiej strony, płynu przenoszącego ciepło.

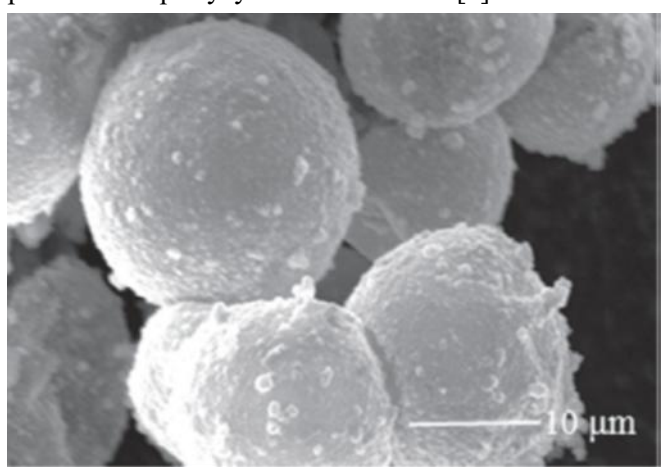


Rysunek 1. Rodzaje konstrukcji obudowy PCM jako przykład makrokapsułkowania [12]

Mikrokapsułkowanie (rys. 2) to proces, w którym cząsteczki PCM (o średnicy około 0,1-1000 μm) są pokrywane cienką warstwą powłoki [13]. Materiał rdzenia może być w postaci ciała stałego lub cieczy, podczas gdy materiał powłoki to na ogół naturalny lub syntetyczny polimer o grubości kilku mikrometrów. Po raz pierwszy problem mikrokapsułkowania został rozwiązany w latach czterdziestych XX wieku,

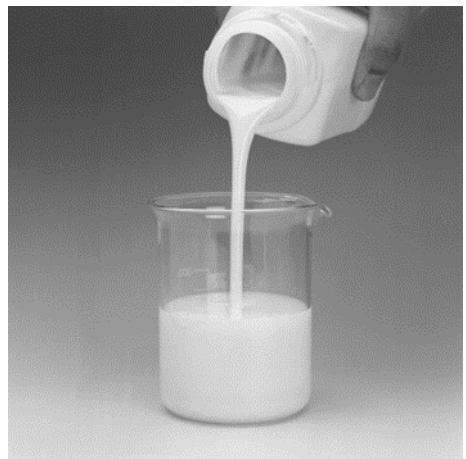
gdy nad technologią umieszczania materiałów PCM wewnątrz kapsuł pracowano w National Cash Register Company [14]. Technologia pozwoliła na wykonywanie kopii paragonów na kilku warstwach papieru poprzez rozgniatanie mikrokapsułek, przez co wypływającej z nich cieczy mieszała się z substancją chemiczną znajdującą się drugiej warstwie papieru barwiąc go.

Mikrokapsułkowanie materiału zmiennofazowego ma na celu optyma-lizację wymiany ciepła poprzez zmianę stosunku powierzchni PCM do jego objętości. Dodatkowo chroni go, zapobiegając procesom degradacji i parowania oraz zapewnia lepsze rozprowadzenie w cieczy bazowej. Dzięki temu nadaje się do pasywnego magazynowania energii cieplnej w materiałach budowlanych (jako dodatek do płyt kartonowo-gipsowych, farb, cementu). Doskonale nadają się jako wypełnienie przestrzeni budowlanych w celu chłodzenia i ogrzewania pomieszczeń oraz jako dodatek w tekstyliach, płynach termoizolacyjnych i piankach termoizolacyjnych. Technika mikrokapsułkowania jest stosowana również do powlekania leków czy bakterii probiotycznych w przemyśle farmaceutycznym. Znalazła zastosowanie również w przemyśle spożywczym czy do kapsułkowania pestycydów w rolnictwie [3].



Rysunek 2. Widok w powiększeniu mikrokapsułek z PCM [15]

Postęp technologiczny sprawił, że możliwa jest masowa produkcja kapsułek o średnicy rzędu mikrometrów, a nawet nanometrów (nanokapsułkowanie). Przy tak małych rozmiarach kapsułek przepływ jest możliwy nie tylko nośnika energii cieplnej omywającego je, ale całości zawiesiny płynu bazowego i mikro-/nanokapsułek wypełnionych materiałem zmieniającym fazę (rys. 3). Podjęto intensywne badania w celu określenia właściwości termicznych i charakterystyk płynięcia zawiesin. Ten typ płynów nazywany jest „utajonym roboczym płynem termicznym" (LTFT – *Latent Functional Thermal Fluid*). LTFT jest dwufazowym płynem stosowanym w układach wymiany ciepła i charakteryzuje się większą zdolnością, w porównaniu do płynów jednofazowych, wymiany ciepła dzięki wykorzystaniu ciepła utajonego dodatków. Oprócz zawiesiny kapsułkowanego PCM, LFTF obejmuje płyny składające się z cząstek PCM dodanych bezpośrednio do płynu bazowego (emulsje PCM) oraz zawiesiny lodowe [16].



Rysunek 3. Widok wodnej zawiesiny zawierającej mikrokapsułki z PCM [17]

4. Zastosowanie zawiesiny kapsułkowanego PCM w układach wymiany ciepła

Dodanie PCM do płynu zwiększa jego zdolność magazynowania energii cieplnej. PCM może być dodany bezpośrednio do płynu (emulsja PCM) lub zamknięty w mikro-/nanokapsułkach (zawiesina mPCM/nPCM). Emulsje PCM przygotowuje się przez formowanie kropelek PCM w płynie nośnym przy użyciu emulgatora. Z badań wynika, że emulsje PCM mają pewne ograniczenia, takie jak: duże przechłodzenie wymagane do rozpoczęcia procesu krystalizacji, duża niestabilność, wysoka lepkość. Dlatego wielu badaczy skupiło się na płynach zawierających kapsułkowany PCM. Wyniki pokazały, że zawiesina tego rodzaju może zapewnić znaczną poprawę pojemności cieplnej przy niewielkim udziale masowych (około 1%). Może ona być ponad 40% większa niż dla wody, a zawiesina mPCM znacznie zmniejsza moc potrzebną do napędu pompy przy większym tempie wymiany ciepła. Z drugiej strony, niektórzy badacze podali, że dodatek mPCM powoduje wzrost lepkości płyn i zawiesina może wykazywać niską powtarzalność w kolejnych cyklach pracy z powodu pękania kapsułek podczas pompowania. W przeciwieństwie do mPCM, nPCM charakteryzują się: lepszą stabilnością zawiesiny, większą powierzchnią wymiany ciepła w stosunku do objętości PCM i mniejszą zdolnością pękania podczas pompowania. Przygotowanie jednorodnej i stabilnej zawiesiny nPCM jest jednym z technicznych wyzwań w zastosowaniach praktycznych, ponieważ nanokapsułki mogą gromadzić się w płynie ze względu na silne interakcje Van der Waalsa. Powstawanie agregatów negatywnie wpływa na właściwości termofizyczne płynu (przewodność cieplna, lepkość i ciepło właściwe). Aby poprawić stabilność zawiesin nPCM, można zastosować różne metody, takie jak mieszanie mechaniczne, mieszanie ultradźwięki, dodawanie środków powierzchniowo czynnych i funkcjonalizacja powie-rzchni kapsułki [5].

4.1. Zastosowanie zawiesin mPCM w budownictwie

Zastosowanie zawiesin mikrokapsułkowanego PCM w budynkach sprowadza się głównie do zmniejsza wahania temperatury w pomieszczeniach. Aby przeanalizować wydajność chłodzenia paneli sufitowych zainstalowanych w biurze, zaprojektowano

specjalny obiekt. Zastosowano w nim cyrkulację zawiesiny mPCM jako płynu roboczego w sufitowej instalacji chłodzącej pomieszczenia. Jak wykazały badania, sufitowa instalacja chłodząca, przez którą przepływała zawiesina mPCM, odciąża pracę klimatyzatora i jest bardziej energooszczędna, niż sufitowa instalacja chłodząca zasilana wodą lodową [18].

W 2008 roku zaproponowano projekt systemu hybrydowego, który łączy system chłodzonego sufitowego z zawiesiną mPCM zintegrowany z systemem chłodzenia wyparnego. Zastosowanie instalacji w klimacie północno-zachodnich Chin umożliwiło na uzyskanie oszczędności energii na poziomie 80% [19].

Nowatorski projekt systemu chłodzenia budynków z wykorzystaniem zawiesiny mPCM bazuje na różnicy temperatury powietrza między dniem a nocą. W nocy przy niższej temperaturze otoczenia zawiesina mPCM oddaje ciepło i przepływa do zbiornika, w którym jest przechowywana. Natomiast w godzinach wysokiego nasłonecznienia zawiesina przepływa ze zbiornika do sufitowej instalacji chłodzącej, gdzie pobiera ciepło z otoczenia, powodując efekt chłodzenia pomieszczenia [19].

Na lotnisku Narita w Tokio opracowano instalację do chłodzenia budynku. Przyjazne dla środowiska czynniki chłodnicze (R134a i R123) zastąpiły oryginalne (R11 i R22). Ponieważ nie wymiano agregatów chłodniczych, nowy układ chłodniczy nie był w stanie odebrać wymaganej ilości ciepła. Aby rozwiązać ten problem, zainstalowano dodatkowy zbiornik wypełniony zawiesiną mPCM. Zasobnik jest w stanie magazynować 67 MJ energii cieplnej w m^3 zawiesiny. Jest to znacznie więcej niż potencjał jaki posiada zimna wody (21 MJ/m^3). Efektywność energetyczna oraz koszty eksploatacji zasobnika z zawiesiną mPCM okazały się dużo niższe od tych jakie wymagane byłyby przy wykorzystaniu wody, czy nawet lodu [19].

4.2. Systemy magazynowania energii słonecznej

Cieczowe kolektory słoneczne są najbardziej powszechnym sposobem wykorzystania energii słonecznej. Aby efektywniej wykorzystywać energię słoneczną, najważniejszym wyzwaniem jest poprawa sprawności kolektorów. Niektórzy badacze zaproponowali cieczowe kolektory słoneczne z bezpośrednią absorpcją. Kolektory takie mają wysoką wydajność i niski koszt przechowywania energii słonecznej. Kolektor słoneczny z absorpcją bezpośrednią wykorzystuje nośnik ciepła w przezroczystych szklanych rurkach do bezpośredniego pochłaniania energii promieniowania słonecznego; w tym przypadku medium odbierające ciepło jest zarówno materiałem pochłaniającym ciepło, jak i materiałem przenoszącym ciepło. W kolektorach słonecznych z bezpośrednią absorpcją zawiesina mPCM/nPCM może być jednocześnie nośnikiem ciepła i akumulatorem ciepła [18].

Prowadzono również próby wykorzystania zawiesin mPCM jako nośnik oraz magazyn energii słonecznej co może wpłynąć na zmniejszanie rozmiarów rur i kolektora słonecznego, a także zmniejszania zużycia energii potrzebne na pompowanie płynu [19].

4.3. Hybrydowy system fotowoltaiczno-termiczny (PV/T)

Hybrydowy system fotowoltaiczno-termiczny (PV/T) może jednocześnie wytwarzać energię elektryczną (z ogniw PV) i energię cieplną (w przepływającym płynie) z promieniowania słonecznego. W systemach PV/T długi okres promieniowania słonecznego powoduje wzrost temperatury paneli PV i doprowadza do spadku wydajności

konwersji energii foto-elektrycznej. Zawiesina mPCM, która przepływa poniżej ogniw PV powoduje obniżenie ich temperatury. W ten sposób zapewniona jest wysoka sprawność konwersji energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną przy jednoczesnym podgrzewaniu zawiesiny mPCM w części cieczowej kolektora. Zawiesina pełnił rolę tradycyjnej cieczy roboczej wykazując jednak większą zdolność transportu energii cieplnej oraz posiada możliwość jej kumulowania. Hybrydowy moduł PV/T o wymiarach 800 x 1600 x 50 mm z zwodną zawiesiną mPCM jako nośnikiem ciepła wykazał najwyższą sprawność (80,8-83,9%), gdy stężenie mPCM wynosiło około 10% [18].

4.4. Przemysł spożywczy

Zastosowanie mPCM w przemyśle spożywczym może zmniejszyć lub uniknąć utraty składników odżywczych podczas obróbki cieplnej owoców i warzyw. Badania wykazały, że mikrokapsułki zawierające żelazo jako materiał rdzenia i maltodekstrynę jako materiał powłoki mogą być dodawane do dyni, co wykazało, że zawartość żelaza w dyniach po ich obróbce cieplnej wzrosła o ponad 1000%. Podobnie jabłka z dodatkiem mikrokapsułek karotenoidów miały zwiększoną zawartość karotenoidów o około 430%. Potrzebne są jednak dalsze badania eksperymentalne, aby określić bezpieczeństwo i niezawodność mPCM w zastosowaniach spożywczych [16].

Aby przedłużyć okres przydatności do spożycia produktów spożywczych, konieczne jest zachowanie łańcucha chłodniczego w okresie ich dystrybucji i sprzedaży. W przemyśle spożywczym PCM są generalnie stosowane podczas magazynowania i transportu w komorach chłodniczych i opakowaniach termicznych. Częstym problemem związanym z zastosowaniem PCM w procesie chłodzenia jest przechłodzenie. Objawia się ono tym, że materiał PCM jest chłodzony, ale krystalizacja nie rozpoczyna się mimo osiągnięcia temperatury przemiany fazowej. Stwierdzono, że emulsje PCM i zawiesiny mPCM/nPCM są lepsze pod względem rozpoczęcia, a następnie tempa wymiany ciepła w porównaniu z większymi modułami PCM. Prowadzone są intensywne badania w tym zakresie [10].

4.5. Przemysł włókienniczy

Nowy rodzaj włókna można przygotować przez zmieszanie mPCM ze zwykłym włóknem. Ten nowy rodzaj włókien może dostosowywać temperaturę odzieży do otoczenia, a także może redukować zmiany temperatury skóry i zwiększać komfort noszenia. Wstępne badania realizowano poprzez pokrycie powierzchni włókien mgiełką zawiesiny mPCM. Wyniki analizy SEM wykazały, że powierzchnia dzianiny może zostać równomiernie pokryta mPCM, a ciepło utajone dzianin wzrosło z 21-23 kJ/kg do 56-60 kJ/kg [18].

4.6. Innowacyjny wymiennik ciepła

W 2019 roku podjęto próbę stworzenia nowatorskiego gruntowego wymiennika ciepła łączącego zawiesinę mPCM i konstrukcje gruntowego wymiennika ciepła w kształcie „gałęzi drzewa". Udowodniono, że połączenie zawiesiny mPCM i kanałów wymiennika ciepła ułożonych w kształcie „gałęzi drzewa" w znaczący sposób poprawiło parametry cieplne instalacji. Badania numeryczne wykazały, że optymalny udział objętościowy mPCM wynosi 12% [19].

5. Podsumowanie

W artykule dokonano przeglądu na temat materiałów PCM, rodzajów kapsułkowania oraz wykorzystania mikrokapsułkowanego PCM jako dodatku do cieczy bazowej. Z dokonanego przeglądu wynika, że:

- istnieje wiele rodzajów materiałów zmiennofazowych, przy czym parafina jest najczęściej stosowana jako wypełnienie mikrokapsułek ze względu na jej wysoki ciepło przemiany fazowej (utajone), stabilność fizyczną i chemiczną oraz nietoksyczność;
- lepkość zawiesiny mPCM jest wyższa niż lepkość wody, ale moc potrzebna do pompowania w odniesieniu do transportowanego ciepła jest niższa;
- niska przewodność cieplna PCM prowadzi do konieczności mieszania materiałów o wysokiej przewodności cieplnej w powłoce i poprawy mikro-konwekcji przepływu,
- cykliczny przepływ mPCM przez pompę może prowadzić do pęknięcia powłoki, co skutkuje skróceniem żywotności zawiesiny;
- istniejące badania wykazały, że zawiesina mPCM jest doskonałym nośnikiem ciepła i może służyć do magazynowania energii cieplnej;
- prognozuje się szersze stosowanie zawiesin mPCM w instalacjach wymiany ciepła w budynkach, do magazynowania energii słonecznej, w instalacjach hybrydowych PV/T, przemyśle spożywczym, tekstylnym i innych.

Wymagane są działania zmierzające do:

- obniżenia kosztów mikro- i nanokapsułkowania;
- prawidłowego doboru PCM, materiału powłoki, rozmiaru kapsułki w zależności od zastosowania;
- pozyskania wiedzy na temat mechanizmu zwiększania wymiany ciepła i prognozowania tempa zmiany fazy PCM będącego w zawiesinie.

Literatura

1. European Commission, Commission staff working document, *Energy storage – the role of electricity*, 2017.
2. Koohi-Fayegh S., Rosen M.A., *A review of energy storage types, applications and recent developments*, Journal of Energy Storage, 27, 2020, 101047.
3. Jouhara H., Żabnieńska-Góra A., Khordehgah N., Ahmad D., Lipinski T., *Latent thermal energy storage technologies and applications: A review*, International Journal of Thermofluids, 5-6, 2020, 100039.
4. Delgado M., Lázaro A., Peñalosa C., Zalba B., *Experimental analysis of the influence of microcapsule mass fraction on the thermal and rheological behavior of a PCM slurry*, Applied Thermal Engineering, 63, 2014, s. 11-22.
5. Karaipekli A., Erdoğan T., Barlak S., *The stability and thermophysical properties of a thermal fluid containing surface-functionalized nanoencapsulated PCM*, Thermochimca Acta, 682, 2019, 178406.
6. Pandey A.K., Hossain M.S., Tyagi V.V., Abd Rahim N., Selvaraj J.A.L., Sari A., *Novel approaches and recent developments on potential applications of phase change materials in solar energy*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 2018, s. 281-323.
7. Zhang P., Xiao X., Ma Z.W., *A review of the composite phase change materials: Fabrication, characterization, mathematical modeling and application to performance enhancement*, Applied Energy, 165, 2016, s. 472-510.

8. Faraj K., Khaled M., Faraj J., Hachem F., Castelain C., *Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 119, 2020, 109579.
9. Palacios A., Cong L., Navarro M.E., Ding Y., Barreneche C., *Thermal conductivity measurement techniques for characterizing thermal energy storage materials – A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 108, 2019, s. 32-52.
10. Alehosseini E., Jafari S.M., *Micro/nano-encapsulated phase change materials (PCMs) as emerging materials for the food industry*, Trends in Food Science and Technology, 91, 2019, s. 116-128.
11. Magendran S.S., Khan F.S.A., Mubarak N.M., Vaka M., Walvekar R., Khalid M., Abdullah E.C., Nizamuddin S., Karri R.R., *Synthesis of organic phase change materials (PCM) for energy storage applications: A review*, Nano-Structures and Nano-Objects, 20, 2019, 100399.
12. Elarem R., Alqahtani T., Mellouli S., Askri F., Edacherian A., Vineet T., Badruddin I.A., Abdelmajid J., *A comprehensive review of heat transfer intensification methods for latent heat storage units*, Energy Storage, 2020, s. 1-30.
13. Zhang P., Ma Z.W., Wang R.Z., *An overview of phase change material slurries: MPCS and CHS*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, 2010, s. 598-614.
14. Hawlader M.N.A., Uddin M.S., Khin M.M., *Microencapsulated PCM thermal-energy storage system*, Applied Energy. 74, 2003, s. 195-202.
15. Yu Q., Tchuenbou-Magaia F., Al-Duri B., Zhang Z., Ding Y., Li Y., *Thermo-mechanical analysis of microcapsules containing phase change materials for cold storage*, Appl. Energy, 211, 2018, s. 1190-1202.
16. Yang R., Xu H., Zhang Y., *Preparation, physical property and thermal physical property of phase change microcapsule slurry and phase change emulsion*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 80, 2003, s. 405-416.
17. Pons O., Aguado A., Fernández A.I., Cabeza L.F., Chimenos J.M., *Review of the use of phase change materials (PCMs) in buildings with reinforced concrete structures*, Materiales de Construccion, 64, 2014, s. 1-11.
18. Ran F., Chen Y., Cong R., Fang G., *Flow and heat transfer characteristics of microencapsulated phase change slurry in thermal energy systems: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 134, 2020, 110101.
19. Yang L., Liu S., Zheng H., *A comprehensive review of hydrodynamic mechanisms and heat transfer characteristics for microencapsulated phase change slurry (MPCS) in circular tube*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 114, 2019, 109312.

Współczesne trendy w wykorzystaniu materiałów zmiennofazowych jako dodatku do cieczy roboczych w układach wymiany ciepła

Streszczenie
W artykule przedstawiono przegląd stanu wiedzy na temat możliwości wykorzystania materiału zmiennofazowego (PCM) w formie mikrokapsułkowanej jako dodatku do cieczy roboczej do zastosowań w układach wymiany ciepła. Przedstawiono podstawowe informacje na temat magazynowania różnych postaci energii ze szczególnym uwzględnieniem energii cieplnej. Omówiono zalety wynikające z zastosowania materiału PCM w magazynowaniu energii cieplnej. Przedstawiono sposoby poprawy funkcjonalności PCM poprzez jego kapsułkowanie w powłokach rozmiarów konwencjonalnych, mini- oraz mikro. Przedstawiono obszary stosowania mikrokapsułkowanego PCM, w tym jako dodatek do cieczy roboczych (wody, glikolu) stosowanych w układach wymiany ciepła. Wskazano kierunki dalszych badań nad zastosowaniem zawiesin mPCM.
Słowa kluczowe: przegląd, zawiesina, PCM, mikrokapsułkowanie

Contemporary trends in the use of phase change materials as an additive to working fluids in heat exchange systems

Abstract

The article presents an overview of the state of knowledge on the possibility of using the phase change material (PCM) in the microencapsulated form (mPCM) as an additive to the working fluid for applications in heat exchange systems. Basic information on the storage of various forms of energy was presented, with particular emphasis on thermal energy. The advantages of using PCM in thermal energy storage are discussed. Ways of improving the functionality of PCM by encapsulating it in conventional, mini-, and micro-size coatings have been presented. The areas of application of microencapsulated PCM are presented, including as an additive to working fluids (water, glycol) used in heat exchange systems. Directions for further research on the use of mPCM slurries were indicated.

Keywords: review, slurry, PCM, microencapsulation

Piotr Eliasz[1], Maciej Bara[2], Zbigniew Buliński[3], Zofia Szweda[4]

Opracowanie modelu numerycznego wnikania jonów chlorkowych do wnętrza betonu

1. Wprowadzenie

Prognozowanie trwałości konstrukcji żelbetowych i sprężonych jest tematem podejmowanym w ostatnim czasie przez coraz szersze grono naukowców, jako że jest to problem ściśle związany z bezpieczeństwem eksploatacji konstrukcji budowlanych [1, 2]. Zagadnienie to jest niezwykle trudne, ponieważ opracowanie wiarygodnego modelu matematycznego procesów fizykochemicznych zachodzących w betonie wymaga uwzględnienia silnego sprzężenia pomiędzy procesami elektrochemicznymi i właściwościami mechanicznymi materiału betonowego, przepływowymi oraz reakcjami chemicznymi zachodzącymi w betonie wskutek oddziaływania warunków zewnętrznych.

W pracy skupiono się na jednym z elementów, który wpływa na trwałość betonu, jakim jest migracja jonów chlorkowych w betonie. Jony chlorkowe są głównymi depasywatorami i ich obecność w konstrukcjach żelbetowych i sprężonych powoduje w dłuższym okresie eksploatacji konstrukcji inicjację procesu korozji zbrojenia, następnie odspojenie otuliny betonowej na skutek zwiększania objętości produktów korozji oraz w dalszym etapie zmniejszenie przekroju zbrojenia i zniszczenie konstrukcji wskutek utraty nośności. Głównym źródłem jonów chlorkowych w betonie w Polskich warunkach jest stosowanie zimą środków do odladzania jezdni zawierających jony chlorkowe stosowanych na obiektach komunikacyjnych: wiaduktach i mostach. Ponadto, konstrukcje żelbetowe i sprężone usytuowane w środowisku nadmorskim są narażone na duże ryzyko powstania korozji zbrojenia spowodowanego obecnością jonów chlorkowych zawartych w wodzie morskiej. Migracja jonów chlorkowych pochodzących z zewnętrznego środowiska przez otulinę betonową po pewnym okresie prowadzi do depasywacji warstewki ochronnej na powierzchni zbrojenia. Przyjmuje się, że korozja stali zbrojeniowej rozpoczyna się w momencie, gdy stężenie jonów Cl^- w betonie przy jej powierzchni osiągnie wartość krytyczną. W literaturze nie ma zgodności, co do wartości krytycznej, najczęściej przyjmuje się jednak wartość 0,4% masy chlorków odniesionych do masy cementu zawartego w betonie [3]. Przy założeniu, że jedyną przyczyną inicjacji korozji zbrojenia konstrukcji żelbetowych i ich zniszczenia jest stężenie jonów chlorkowych w otulinie betonowej, zasadniczy wpływ na wiarygodność analizy trwałości konstrukcji ma dokładność estymacji współczynnika dyfuzji. W literaturze przedstawiono wiele metod wyznaczania wartości współczynnika dyfuzji jonów chlorkowych w betonie, najpopularniejsze z nich zebrano w publikacjach [4-6]. Co więcej, działanie obciążenia zewnętrznego i dynamicznego w czasie eksploatacji konstrukcji budowlanych jest przyczyną zarysownia konstrukcji żelbetowych nato-

[1] Katedra Techniki Cieplnej, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska, www.polsl.pl.
[2] Katedra Techniki Cieplnej, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska, www.polsl.pl.
[3] Katedra Techniki Cieplnej, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska, www.polsl.pl.
[4] Katedra Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, www.polsl.pl.

miast na skutek pojawiających się rys i spękań na powierzchni betonu następuje przyspieszenie procesu wnikania jonów chlorkowych do betonu oraz wzrost wartości efektywnego współczynnika dyfuzji [7].

Dojrzały beton jest materiałem porowatym. Rozkład i wielkość porów jest efektem procesu hydratacji zaczynu cementowego oraz samego procesu produkcyjnego (rozmieszania składników betonu) połączonego z obróbkowym (pielęgnacji betonu), a także porowatości zastosowanego kruszywa oraz pustek powietrznych powstających na styku powierzchni kruszywa i zaczynu. Dotychczas w modelowaniu transportu jonów chlorkowych do betonu przeważało wykorzystywanie jednorodnego – zhomogenizowanego modelu betonu lub rozdzielano go na: część opisującą kruszywo, strefę kontaktową kruszywo-cement i sam materiał cementowy lub kruszywo wraz ze stwardniałym zaczynem cementowym. Odwzorowywano też uproszczoną mikrostrukturę betonu i pustek powietrznych w trzech wariantach ich kształtów: kulistym, elipsoidalnym oraz w postaci wielościanów [8]. W modelu zaproponowanym w niniejszej pracy opisującym transport jonów chlorkowych w betonie, rozważano ich transport w stwardniałej części betonu składającej się z kruszywa utwierdzonego w zhydratyzowanym zaczynie cementowym, jak i wewnątrz pustek powietrznych, czyli porów połączonych ze sobą i wypełnionych powietrzem lub roztworem.

Jony chlorkowe dyfundują do wnętrza betonu za pośrednictwem porów wypełnionych cieczą porową. Całkowitą dyfuzję jonów chlorkowych, obejmującą dyfuzję w betonie i porach, można wyrazić równaniem:

$$J \cdot (A_c+A_P)=J_c \cdot A_c+J_P \cdot A_P \quad (1)$$

gdzie: J – całkowity strumień dyfuzji, J_C i J_P – strumień dyfuzji w betonie i porach, A_C i A_P – powierzchnia betonu i porów.

Zgodnie z Prawem Ficka dyfuzyjny strumień masy jest iloczynem współczynnika dyfuzji jonów w ośrodku i gradientu potencjału jonów chlorkowych, co przedstawia równanie (2) i (3):

$$J_c=-D_C \cdot \mu \quad (2)$$

$$J_P=-D_P \cdot \mu \quad (3)$$

gdzie: μ – gradient stężenia jonów chlorkowych, D_C i D_P – współczynnik dyfuzji chlorków w stwardniałej matrycy cementowej wiążącej kruszywo i porach powietrznych (znak minus opisuje dyfuzję w kierunku regionu o niższym stężeniu) [8].

Rozważania zaprezentowane w publikacji [8] odnosiły się do badania właściwości transportowych jonów chlorkowych w betonie. Autorzy odwzorowali złożoną mikrostrukturę betonu poprzez zamodelowanie pustek powietrznych w trzech wariantach ich kształtów: kulistym, elipsoidalnym oraz w postaci wielościanów. Badania prowadzone przez Guan i innych [9] obejmowały zagadnienie transportu jonów chlorkowych w materiale betonowym, wywoływane naprzemiennym działaniem cykli moczenia i suszenia w roztworze jonów chlorkowych imitującym działanie agresywnego środowiska zawierającego jony chlorkowe przy jednoczesnym poddawaniu go obciążeniom dynamicznym. W modelu uwzględniono powstające w betonie rysy i spękania pod wpływem działania obciążenia dynamicznego. Nie uwzględniono jednak dokładnej

geometrii tych spękań oraz rzeczywistego rozkładu pustek powietrznych w porowatej strukturze betonu. Natomiast w swoich badaniach Lu i inni [10] zajmowali się modelowaniem transportu jonów chlorkowych w materiale betonowym, posługując się modelem 2D i 3D. Mikrostruktura obejmowała prawie 7000 pustek, a próbka o boku 25 x 25 mm posiadała pęknięcie wzdłuż całej struktury. Model 3D był rekonstrukcją zeskanowanego modelu 2D.

W niniejszej pracy przedstawiono model numeryczny pozwalający na modelowanie procesów dyfuzji jonów chlorkowych w materiale odwzorowującym rzeczywistą mikrostrukturę materiału betonowego – analizie poddane zostało około 100 pustek powietrznych, nadających charakter porowaty badanemu materiałowi. W symulacjach wykorzystano trójwymiarowe odwzorowanie porowatej mikrostruktury betonu oparte na obrazie uzyskanym dzięki wykorzystaniu rentgenowskiej tomografii komputerowej. Przeprowadzenie obliczeń symulacyjnych z wykorzystaniem rzeczywistej geometrii betonu, traktowanego jako ośrodek porowaty, pozwala na prowadzenie analiz prędkości wnikania jonów chlorkowych do betonu oraz inicjację i prędkość rozwoju procesów korozyjnych zbrojenia w betonie. Sam transport jonów chlorkowych w głąb próbki jest uwarunkowany między innymi funkcją zmiany gęstości roztworu wypełniającego pory w betonie w zależności od wartości stężenia roztworu jonów chlorkowych.

2. Wykorzystanie tomografii komputerowej do badania struktury betonu

Tomografia komputerowa jest rodzajem spektroskopii rentgenowskiej, wykorzystującej pochłanianie promieniowania przechodzącego przez obiekt, co pozwala uzyskać informacje o strukturze obiektu. W taki sposób utworzony zostaje obraz przekrojowy 2D i przestrzenny 3D. Poddawany badaniu tomograficznemu obiekt, a konkretniej jego objętość, podzielona jest na mniejsze komórki zwane voxelami [11]. Zrekonstruowany obraz przedstawia rozkład współczynnika absorpcji promieniowania, w voxelach, danej warstwy analizowanego obiektu. Głównym zastosowaniem tomografii komputerowej od jej powstania jest obrazowanie medyczne wnętrza ludzkiego ciała. Podstawową metodą wykorzystywaną w tomografii komputerowej jest skierowanie na obiekt wiązki promieniowania X, za pomocą której wykonuje się dwuwymiarowe zdjęcia struktury wewnętrznej. Takie obrazy następnie podlegają komputerowej segmentacji i dalej rekonstrukcji geometrii trójwymiarowej (z tego wynika nazwa tomografia komputerowa). Dokładność reprezentacji geometrii zależy od rozdzielczości obiektywu urządzenia oraz gęstości rozmieszczenia warstw, dla których robione są pojedyncze zdjęcia.

W przemysłowym zastosowaniu stosowane są dwie główne metody z wykorzystaniem tomografii komputerowej:

- układ z równoległą wiązką promieniowania;
- układ z wiązką stożkową.

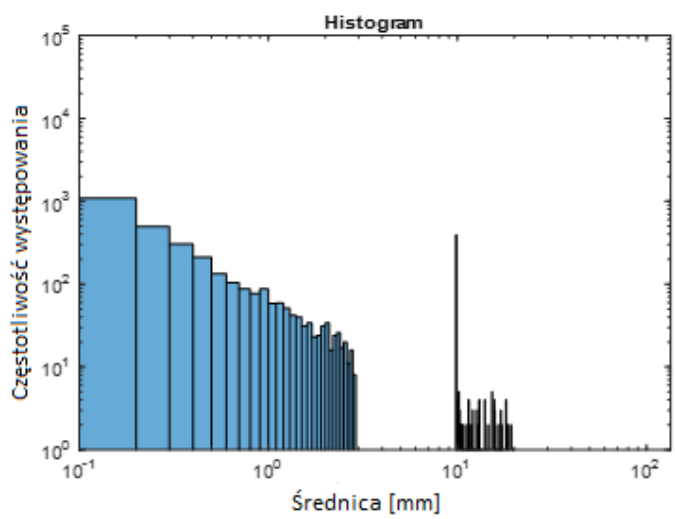
Pierwsza z metod polega na emitowaniu spójnej wiązki promieniowania X w kierunku badanego obiektu, a znajdujący się na przeciwległej stronie detektor rejestruje sygnał pomiarowy. W drugiej z metod wiązka promieniowania jest emitowana przez lampę rentgenowską, tworząc strumień promieniowania w kształcie stożka. Podobnie jak w przypadku pierwszej metody, na przeciwległej stronie znajduje się panel detek-

torów. Różnicą w obu metodach jest położenie i ruchomość układu. W metodzie z równoległą wiązką promieniowania obrotowi może ulegać badany obiekt oraz układ lamp i detektorów. W układzie z wiązką stożkową, lampa i detektor zawsze pozostają nieruchome [12].

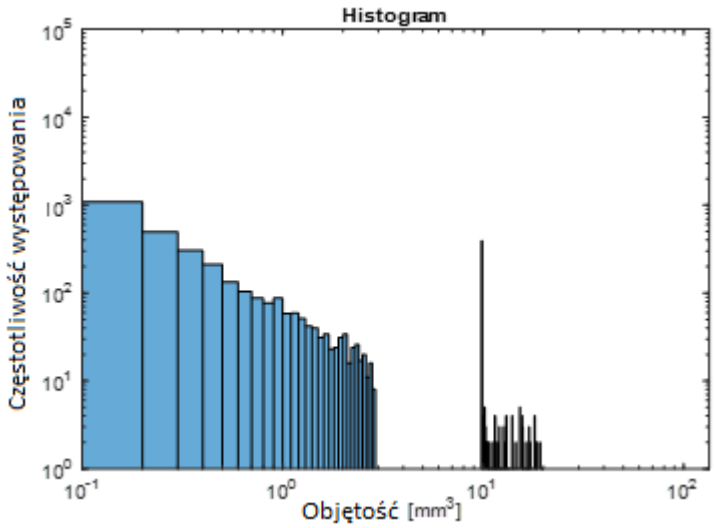
2.1. Geometria

Wykorzystanie tomografii komputerowej do celów przemysłowych, pozwala nie tylko wykrywać niedokładności na poziomie wytwarzania lub modernizacji, ale także, jak w analizowanym przypadku, zostać wykorzystana do odwzorowania mikrostruktury materiałów. W analizowanym przypadku, badaniom metodą tomografii komputerowej, w pierwszej kolejności poddana została próbka betonu w kształcie walca o promieniu 5 cm i wysokości bryły 10 cm. Badanie wykonano z rozdzielczością 50 μm. Następnie z próbki tej wycięto mniejszy walec o średnicy 8 mm i wysokości 12 mm i poddano go badaniom tomograficznym z rozdzielczością 10 μm. W analizowanym betonie zastosowano cement CEM IV/B (V) 32,5 R – LH/NA pucolanowy klasy 32,5 z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego. Charakteryzuje się on stabilnym przyrostem wytrzymałości, zwiększoną wytrzymałością w długich okresach dojrzewania, niskim ciepłem hydratacji, które znacznie ogranicza ryzyko powstania rys skurczowych, dobrą plastycznością, urabialnością, pompowalnością mieszanki betonowej, ograniczoną tendencją do powstania wykwitów węglanowych i stabilnymi parametrami jakościowymi. Cement CEM IV/B (V) 32,5 R – LH/NA przeznaczony jest do wytwarzania betonu zwykłego klas od C8/10 do C30/37, produkcji zapraw murarskich i tynkarskich, produkcji betonów samozagęszczalnych, wytwarzania chudego betonu stosowanego w podbudowie konstrukcji nośnych, utwardzania podsypek pod kostkę brukową, stabilizacji gruntów oraz wytwarzania betonów przeznaczonych do wykonywania obiektów masywnych [13].

Na rysunku 1 i 2 przedstawiono histogramy rozkładu objętości i średnicy porów tworzących próbkę analizowanego betonu. Zostały one wykonane na podstawie badań tomograficznych mniejszej próbki walcowej.

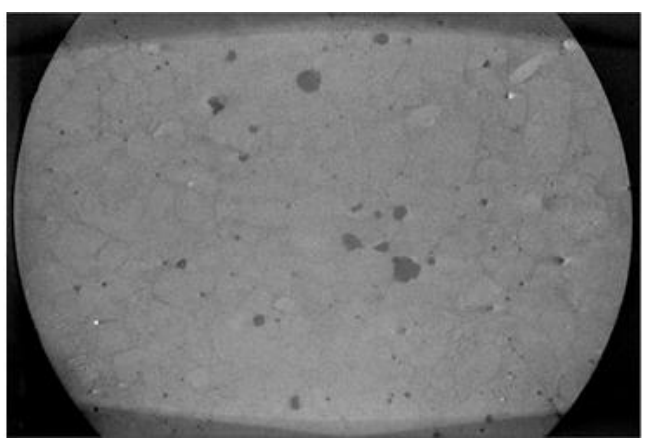


Rysunek 1. Histogram średnic mikrostruktur w rozważanej próbce betonu [opracowanie własne]



Rysunek 2. Histogram objętości mikrostruktur w próbce betonu C4-23 [opracowanie własne]

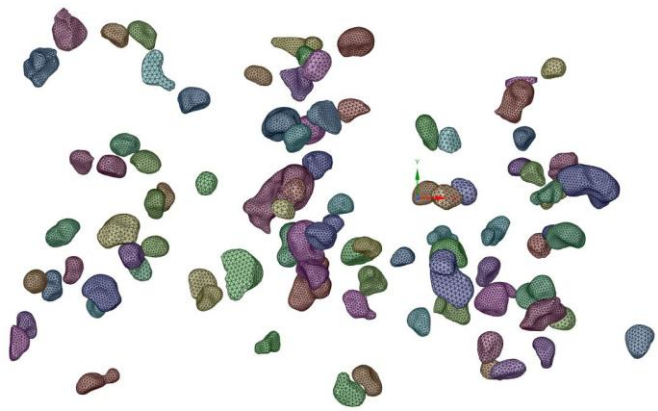
Jedną z istotnych zalet badań tomograficznych materiałów inżynierskich jest możliwość weryfikacji potencjalnych niedoskonałości materiału: pustek powietrznych, pęknięć, niepożądanych wtrąceń itd. Wstępną kontrolę wyników tomografii można przeprowadzić za pomocą oprogramowania FIJI, które pozwala na sprawdzenie poprawności wyników uzyskanych z jej wykorzystaniem. Ewentualne błędy mogłoby znacząco utrudnić opracowywanie modelu trójwymiarowego na podstawie otrzymanych skanów. Rysunek 3 przedstawia widok wybranego przekroju próbki betonowej.



Rysunek 3. Jeden z przekrojów betonu otrzymany z tomografu [opracowanie własne]

Stworzenie mikrostruktury betonu wymagało przeprowadzenie filtracji objętości pustek powietrznych oraz kruszywa, których wymiary były na tyle małe, że ich obecność zwiększałaby jedynie koszt obliczeniowy, natomiast ich uwzględnienie nie wpływałoby na końcowe wyniki.

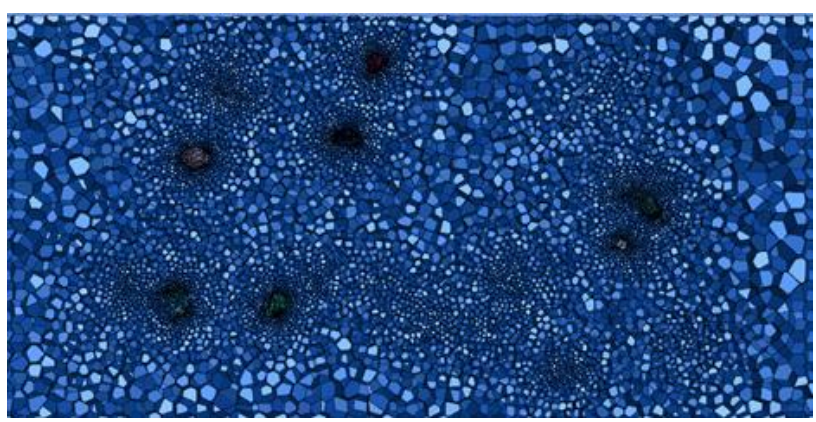
Na postawie wyników tomografii komputerowej odtworzone zostały kształty geometryczne powierzchni porów w betonie. Na rysunku 4 przedstawiono geometrię największych porów, odtworzoną na podstawie skanu próbki betonowej. Po zaimportowaniu geometrii porów do oprogramowania ANSYS SpaceClaim, model powierzchniowy porów został zamieniony na model objętościowy, który następnie został obudowany objętością betonu traktowanego jako obszar ciągły. Tak przygotowany model geometryczny został zaimportowany do oprogramowania ANSYS Fluent Meshing, gdzie została stworzona siatka numeryczna na potrzeby obliczeń przepływowych.



Rysunek 4. Obraz trójwymiarowy opisujący rozkład porów analizowanego betonu [opracowanie własne]

2.2. Siatka numeryczna

Siatka numeryczna stworzona została z wykorzystaniem narzędzia Ansys Fluent Meshing. Zbudowano ją z elementów wielościennych i odpowiednio zagęszczono wokół porów w celu lepszego odwzorowania zjawisk zachodzących na granicy struktury ciała stałego i cieczy porowej w betonie oraz konwekcji wewnątrz porów. Na rysunku 5 przedstawiono siatkę numeryczną badanej próbki betonowej, a konkretniej jej przekrój wzdłuż płaszczyzny ZY.



Rysunek 5. Przekrój siatki numerycznej modelu betonu B-C4-23 wzdłuż płaszczyzny YZ [opracowanie własne]

Dla weryfikacji dokładności wyników obliczeń numerycznych stworzono siatki o różnej ilości elementów. Pozwoliło to na dobranie siatki numerycznej, dla której wyniki obliczeń CFD (*Computational Fluid Dynamics*), a konkretniej stężenie chlorków w danej warstwie, byłyby zbliżone najbardziej do wartości wynikających z eksperymentu przeprowadzonego na rzeczywistej próbce betonu C4-23. W tabeli 1 przedstawiono dokładną ilość elementów dla czterech przygotowanych siatek numerycznych.

Tabela 1. Ilość elementów dla poszczególnych siatek numerycznych

Numer siatki	Ilość elementów
I	762 687
II	1 450 814
III	4 521 092
IV	7 669 499

Źródło: Opracowanie własne

2.3. Model numeryczny

Obliczenia numeryczne zostały przeprowadzone przy użyciu oprogramowania ANSYS Fluent, zapewniającego dyskretyzację w przestrzeni i czasie równań różniczkowych opisujących przepływ płynu, a następnie ich rozwiązanie. Oprogramowanie to wykorzystuje metodę elementów skończonych (FVM – *Finite Volume Method*), w celu dyskretyzacji przestrzennej równań transportu.

W analizie numerycznej zastosowano sekwencyjny schemat typu SIMPLE (*Semi Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) dla rozwiązania sprzężonego układu równań ruchu. Do dyskretyzacji ciśnienia oraz równań zachowania pędu zastosowano schematy drugiego rzędu. Schemat pierwszego rzędu zastosowano do dyskretyzacji równania transportu koncentracji chlorków.

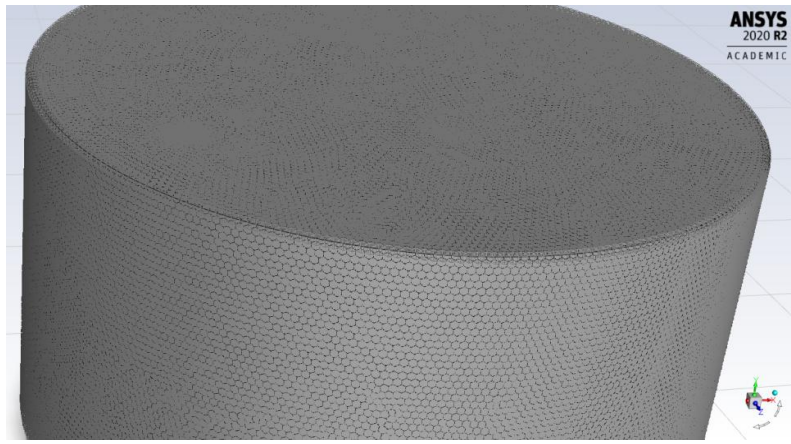
Założono, że transport jonów chlorkowych w shomogenizowanym obszarze jest zdominowany przez dyfuzję, natomiast w porach transport chlorków jest wynikiem zjawisk konwekcyjnych i dyfuzyjnych.

Transport chlorków w betonie można opisać za pomocą następującego równania różniczkowego:

$$\frac{\partial \rho \cdot \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varphi \mathbf{w}) = \Gamma \cdot \nabla^2 \varphi \qquad (4)$$

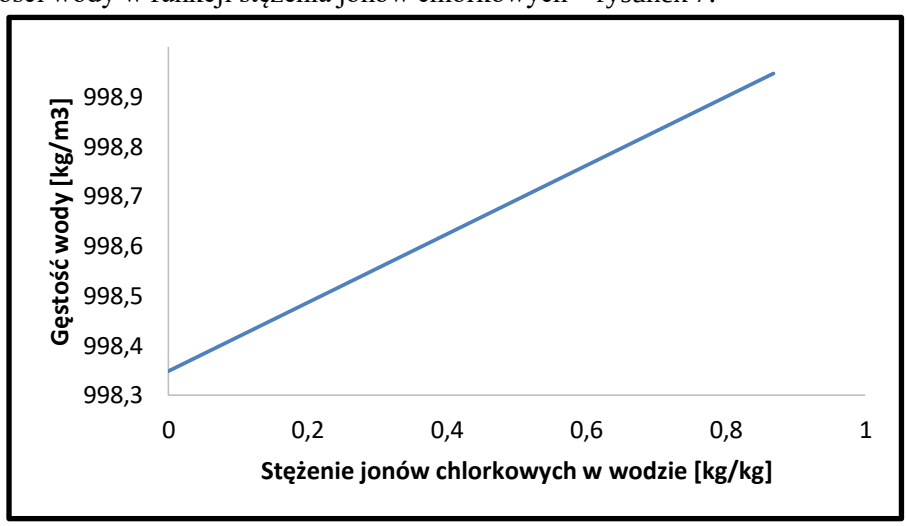
gdzie: ρ – gęstość materiału ciągłego, φ – stężenie chlorków, $\boldsymbol{w}$ – wektor prędkości roztworu cieczy porowej, Γ – współczynnik dyfuzji jonów chlorkowych.

Na rysunku 6 przedstawiona została górna ścianka próbki betonowej. Na jej powierzchni zadany został warunek brzegowy pierwszego rodzaju – stała wartość koncentracji wodnego roztworu chlorków równa 3%. Na przeciwległej ściance przyjęto wartość koncentracji chlorków równą zero. Stąd główny kierunek transportu jonów chlorkowych jest zgodny z osią Y.



Rysunek 6. Siatka numeryczna dla badanej próbki betonu [opracowanie własne]

Wraz ze wzrostem stężenia jonów chlorkowych w cieczy porowej rośnie również jej gęstość. Jako, że gęstość roztworu porowego zależy od stężenia jonów chlorkowych w większych porach, będzie to prowadziło do konwekcji naturalnej, która może powodować intensyfikację transportu jonów chlorkowych. Aby uwzględnić ten efekt w modelu matematycznym, zaimplementowana została funkcja opisująca zmienność gęstości wody w funkcji stężenia jonów chlorkowych – rysunek 7.



Rysunek 7. Wykres zależności gęstości wody od stężenia jonów chlorkowych [opracowanie własne]

3. Badanie eksperymentalne dyfuzji chlorków w betonie

Efektywne działanie modelu matematycznego do symulacji badanego procesu, należy przeprowadzić jego uwiarygodnienie. Uwiarygodnienie modelu matematycznego jest realizowane poprzez porównanie wyników otrzymanych z wykorzystaniem modelu matematycznego z wynikami badań eksperymentalnych przeprowadzonych dla specjalnie zaprojektowanego eksperymentu walidacyjnego, w którym dobrze zdefinio-

wane są warunki brzegowe i początkowe analizowanego zjawiska. Taki eksperyment walidacyjny został przeprowadzony dla analizowanej próbki betonu.

Ponadto, przeprowadzony eksperyment został również wykorzystany do wyznaczenia współczynnika dyfuzji chlorków, które były przyjęte dla homogenicznej części modelu. W tabeli 2 przedstawiono parametry badanej próbki betonu. Założono, że gęstość wody wynosi 998,23 kg/m^3, natomiast gęstość powietrza 1,2 kg/m^3.

Tabela 2. Parametry próbki betonowej C4

Parametr	Wartość	Jednostka
Masa w stanie suchym	117,66	g
Masa w stanie nasyconym	122,4	g
Objętość próbki	50,9	cm^3
Gęstość	2,312	g/cm^3
Nasiąkliwość masowa	4,029	%
Objętość gazu	4,754	cm^3
Porowatość	0,093	-

Źródło: Opracowanie własne

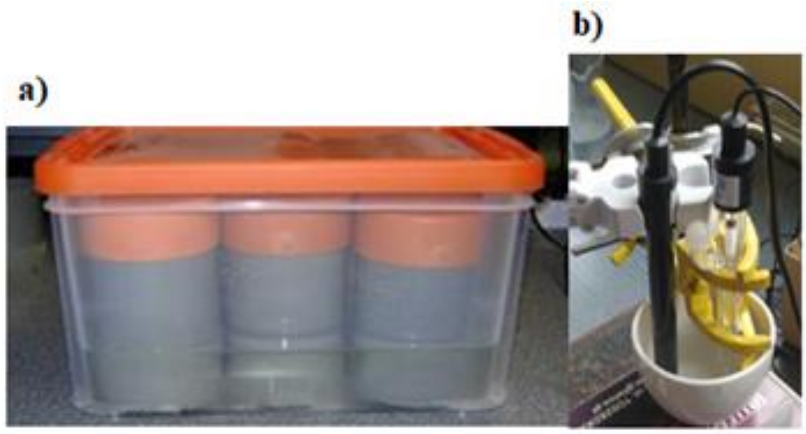
W badaniach dyfuzyjnych wykorzystano próbki betonowe w kształcie walca o średnicy 110 mm i wysokości 50 mm, po ich dojrzewaniu w warunkach laboratoryjnych przez okres trzech miesięcy. Pobocznicę próbek pokryto żywicą, w celu uszczelnienia, a do górnej powierzchni szczelnie zamocowano plastikowe zbiorniki rurowe o wysokości 170 mm, które wypełniono roztworem 3% NaCl do wysokości 150 mm. Zbiorniki te zabezpieczono przed parowaniem za pomocą szczelnych zaślepek. Następnie tak przygotowane próbki umieszczono w zamkniętym, plastikowym zbiorniku wypełnionym wodą destylowaną do wysokości 50 mm. Po upływie 6 miesięcy próbki wyjęto z wody. Z racji, iż ubytki roztworów powstałych w wyniku parowania były nieznaczne, postanowiono o ich nieuzupełnianiu. Wymiana wszystkich roztworów następowała co 1 miesiąc – rysunek 8a.

Wykorzystując kolejne 6 próbek, wykonanych z tego samego betonu, przeprowadzono badania migracyjne wnikania jonów chlorkowych do betonu pod wpływem działania pola elektrycznego na skutek przyłożonego do przeciwległych elektrod, między którymi znajdowała się próbka źródła prądu o napięciu 18 V. Do górnej powierzchni próbek walcowych przymocowano zbiorniki z tworzywa sztucznego, wypełnione 3% roztworem NaCl, w których umieszczono katody wykonane ze stali nierdzewnej. Tak przygotowane próbki ustawiono na anodzie wykonanej z tytanu pokrytego platyną. Każdorazowo roztwór NaCl wymieniano po 24 godzinach. Przez cały okres badań, temperatura roztworów była stała i wynosiła około 20˚C. Migracja chlorków przez 3 próbki jednego zestawu trwała t_1 = 24 godziny, natomiast przez 3 próbki drugiego zestawu – t_2 = 48 godzin.

Po zakończeniu badań zdemontowano zbiorniki wraz z elementami, które następnie suszono przez okres 72 godzin w warunkach laboratoryjnych. Kolejno, z każdej próbki pobierano rozdrobniony beton warstwami grubości 2 mm przy użyciu urządzenia „Profile Grinding Kit" firmy Germann Instruments AS.

Z pojedynczej warstwy uzyskano przeciętnie niewielką masę ok. 20 g rozdrobnionego betonu. W celu otrzymania potrzebnej do badań chemicznych masy materiału, połączono rozdrobniony beton z odpowiednich warstw zestawu 3 próbek. Z rozdrob-

nionego betonu, reprezentującego uśrednione właściwości poszczególnych warstw badanych elementów, wykonano roztwory wodne. Do każdej porcji rozdrobnionego betonu dodano wodę destylowaną w proporcjach wagowych 1 : 1. Gęsty roztwór mieszano przez dobę, po czym przesączono przez średni sączek, wspomagając się kolbą ssawkową połączoną z pompką elektryczną. Proces wypłukiwania powtórzono dwukrotnie. Badania przygotowanych roztworów przeprowadzono wielofunkcyjnym multimetrem CX-701 firmy Elmetron za pomocą elektrody jonoselektywnej służącej do określania stężenia jonów chlorkowych – rysunek 8b.



Rysunek 8. Widok stanowisk: a) w badaniu dyfuzyjnym, b) do określania stężenia jonów chlorkowych w roztworach [opracowanie własne]

W tabeli 3 zawarto gęstości masy jonów chlorkowych ρ^1 wyznaczone po badaniach dyfuzyjnych na podstawie określonego stężenia c^1 jonów chlorkowych w roztworach modelowych [13]. Badania migracyjne wykorzystano w celu wyznaczenia wartości współczynnika dyfuzji na podstawie modelu termodynamicznego migracji [14], którego wartość wyniosła $(0{,}72 \div 1{,}45) \cdot 10^{-12}$ m^2/s [13].

Tabela 3. Wartości gęstości jonów chlorkowych w betonie w danej warstwie próbki

Głębokość warstwy [mm]	Gęstość jonów chlorkowych w betonie [kg/m^3]
180 dni = 4320 h 180 dni = 4320 h	
0-2	3,64
2-4	2,28
4-6	1,82
6-8	1,60
8-10	1,32
10-12	1,12
12-14	0,87
14-16	0,65
16-18	0,55
18-20	0,46

Źródło: Opracowanie własne

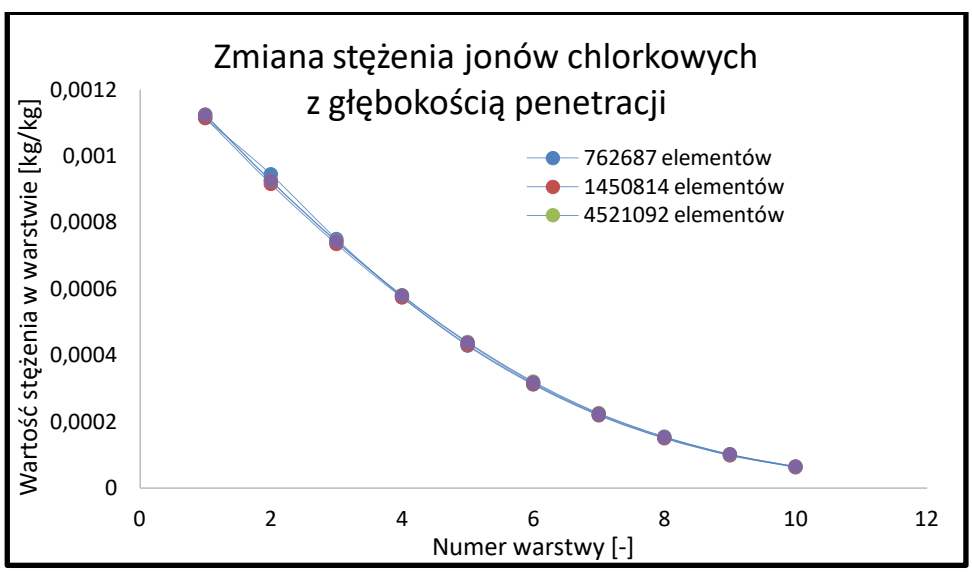
4. Wizualizacja wyników

Podstawą uzyskania wiarygodnych wyników dla konkretnej analizy przepływowej jest stworzenie reprezentatywnej siatki numerycznej. Dla badanego modelu próbki betonowej utworzone zostały cztery siatki o różnej ilości elementów (tab. 1). W celu sprawdzenia wpływu ilości elementów na uzyskiwane wyniki, przeprowadzona została analiza wrażliwości. Dla każdej z siatek ustawiono identyczne parametry wejściowe oraz parametry charakteryzujące zjawisko wnikania jonów chlorkowych do wnętrza próbki, tj. współczynnik dyfuzji wody oraz samego betonu. W tabeli 4 porównane zostały wartości stężenia jonów chlorkowych w danej warstwie, a na rysunku 9 zwizualizowany został charakter tych zmian.

Tabela 4. Wartości stężenia jonów chlorkowych w warstwie w zależności od ilości elementów siatki numerycznej

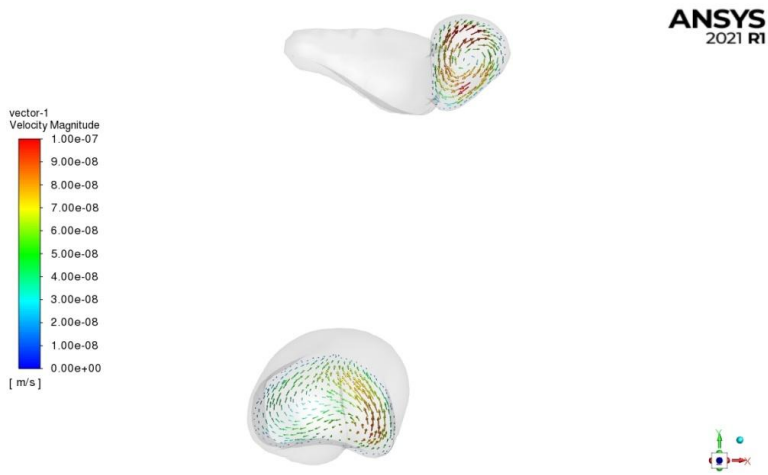
Numer warstwy	Ilość elementów siatki			
	762687	1450814	4521092	7669499
	Stężenie jonów chlorkowych w danej warstwie			
1	0,001113	0,001114	0,001124	0,001123
2	0,000944	0,000915	0,000925	0,000925
3	0,000749	0,000734	0,000743	0,000742
4	0,000575	0,000573	0,00058	0,000579
5	0,000428	0,00043	0,000439	0,000437
6	0,000311	0,000313	0,00032	0,000317
7	0,000218	0,00022	0,000225	0,000223
8	0,000149	0,00015	0,000154	0,000153
9	0,000098	0,000098	0,000101	0,000101
10	0,000062	0,000062	0,000064	0,000064

Źródło: Opracowanie własne



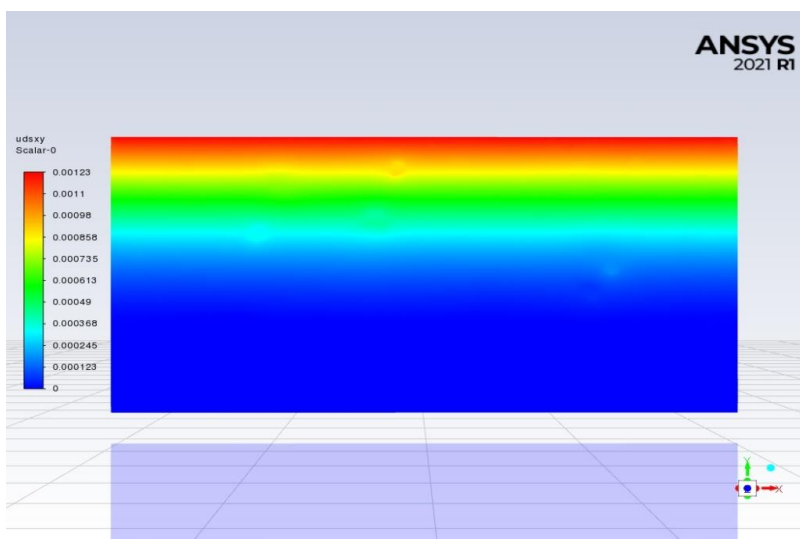
Rysunek 9. Wykres zmian stężenia jonów chlorkowych w zależności od głębokości penetracji [opracowanie własne]

Rysunek 10 przedstawia rozkład pola prędkości w porach betonu. Potwierdza to dominację ruchu konwekcyjnego jonów chlorkowych wewnątrz porów (ciecz porowa o mniejszej gęstości unosi się ku górze, natomiast cięższa o większej zawartości chlorków w dół) co intensyfikuje transport jonów w głąb betonu.

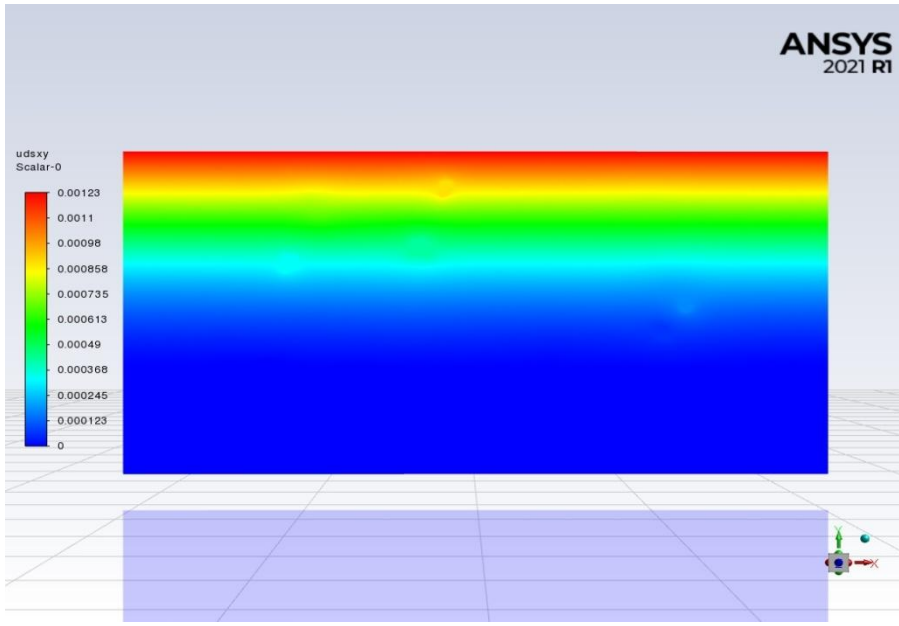


Rysunek 10. Model kierunku oraz wartości wektorów prędkości w jednym z porów podczas analizy [opracowanie własne]

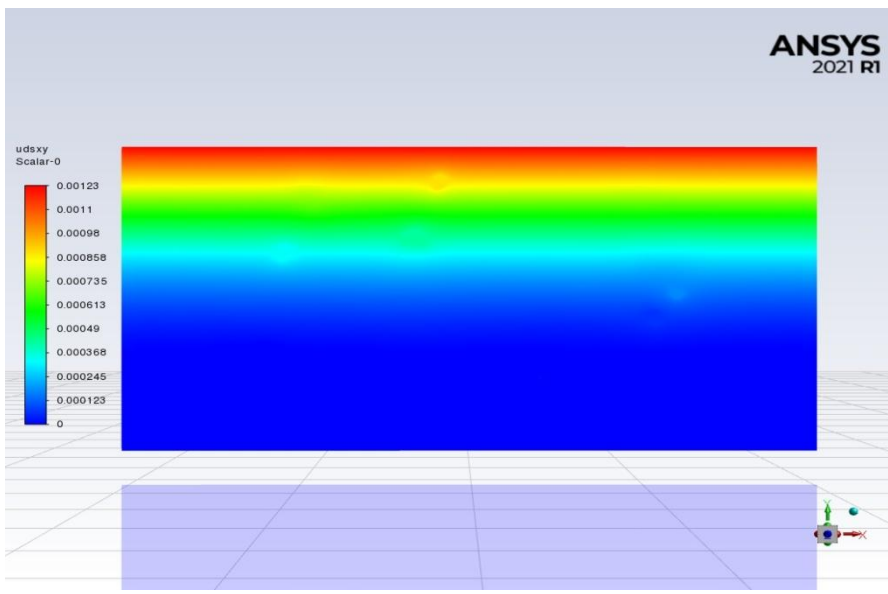
Rysunki 11-14 przedstawiają rozkład jonów chlorkowych (przekrój badanej próbki) i przebieg penetracji skalara, czyli wodnego roztworu jonów chlorkowych w jej głąb w zależności od gęstości siatki numerycznej w czasie 180 dni.



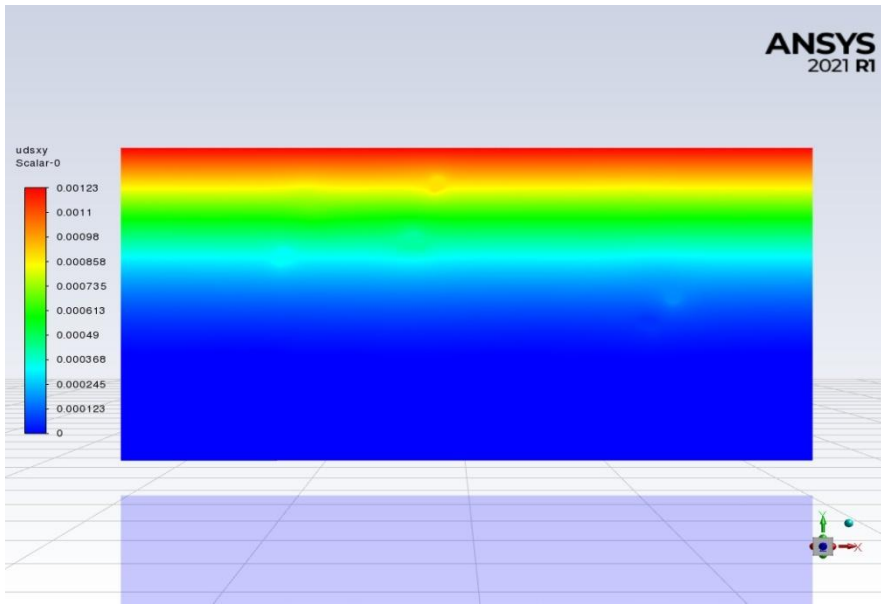
Rysunek 11. Przekrój przedstawiający stężenie w próbce betonowej oraz głębokość penetracji jonów chlorkowych dla siatki 762 687 elementów [opracowanie własne]



Rysunek 12. Przekrój przedstawiający stężenie w próbce betonowej oraz głębokość penetracji jonów chlorkowych dla siatki 1 450 814 elementów [opracowanie własne]



Rysunek 13. Przekrój przedstawiający stężenie w próbce betonowej oraz głębokość penetracji jonów chlorkowych dla siatki 4 521 092 elementów [opracowanie własne]



Rysunek 14. Przekrój przedstawiający stężenie w próbce betonowej oraz głębokość penetracji jonów chlorkowych dla siatki 7 669 499 elementów [opracowanie własne]

5. Wnioski

Za pomocą użytych narzędzi możliwe było zamodelowanie transportu jonów chlorkowych do wnętrza materiału porowatego – w tym przypadku betonu. Zeskanowana z wykorzystaniem tomografii komputerowej geometria próbki betonu została odwzorowana w dokładny sposób. Naprawy i drobne zmiany geometrii powierzchni skanowanych miały na celu optymalizację dalszych prac przy tworzeniu siatki oraz przeprowadzeniu analizy numerycznej w oprogramowaniu ANSYS Fluent. Stworzony model odwzorowuje transport chlorków w strukturze betonu, uwzględniając wpływ adwekcji w dużych porach, co do tej pory było pomijane w opracowywanych modelach matematycznych. W pracy pokazano, że obecność dużych porów i pustych przestrzeni wewnątrz betonu, może istotnie przyspieszyć wnikanie chlorków do betonu.

Dalsze prace będą skupiały się na walidacji opracowanego podejścia w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych dla analizowanych próbek wykonanych z różnych rodzajów betonu. Potwierdzenie zgodności wyników na obecnym etapie pozwoli na rozbudowę modelu matematycznego o inne elementy istotne dla wyznaczania trwałości konstrukcji żelbetonowych i sprężonych, tj. pęknięcia struktury betonu czy wpływu temperatury i wilgotności otoczenia oraz obecności innych czynników agresywnych np. CO_2.

Badania współfinansowane przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego w ramach projektu „Politechnika Śląska jako Centrum Nowoczesnego Kształcenia opartego o badania i innowacje” nr POWR-03.05.00-00-Z098/17/00

Literatura

1. Angst U.M., *Predicting the time to corrosion initiation in reinforced concrete structures exposed to chlorides*, Cem. Concr. Res., vol. 115, no. June 2018, s. 559-567, 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.08.007.
2. Li K., Zhang D., Li Q., Fan Z., *Durability for concrete structures in marine environments of HZM project: Design, assessment and beyond*, Cem. Concr. Res., vol. 115, no. August 2018, s. 545-558, 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.08.006.
3. Angst U., Elsener B., Larsen C.K., Vennesland Ø., *Critical chloride content in reinforced concrete – A review*, Cement and Concrete Research, vol. 39, no. 12, s. 1122-1138, Dec-2009, doi: 10.1016/j.cemconres.2009.08.006.
4. Konečný P., Lehner P., Ponikiewski T., Miera P., *Comparison of Chloride Diffusion Coefficient Evaluation Based on Electrochemical Methods*, [w:] *Procedia Engineering*, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.05.326.
5. Szweda Z., *Comparison of Diffusion and Migration Coefficients Determined from Tests on Concrete in Prestressed Floor Slabs HC-500*, [in:] *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/471/5/052034.
6. Szweda Z., Buliński Z., *Application of inverse methodology to estimation of chloride diffusion coefficient in concrete of prestressed precast slab*, MATEC Web Conf., vol. 174, s. 1-10, 2018, doi: 10.1051/matecconf/201817401008.
7. Ye H., Jin N., Jin X., Fu C., *Model of chloride penetration into cracked concrete subject to drying-wetting cycles*, Constr. Build. Mater., vol. 36, s. 259-269, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.05.027.
8. Guan B.W., Wu J.Y., Yang T., Xu A.H., Sheng Y.P., Chen H.X., *Developing a Model for Chloride Ions Transport in Cement Concrete under Dynamic Flexural Loading and Dry-Wet Cycles*, Math. Probl. Eng., vol. 2017, 2017, doi: 10.1155/2017/5760512.
9. Xiong Q., Wang X., Jivkov A.P., *A 3D multi-phase meso-scale model for modelling coupling of damage and transport properties in concrete*, Cem. Concr. Compos., vol. 109, s. 103545, 2020, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103545.
10. Lu Y., Garboczi E., Bentz D.P., Davis J., *Modeling chloride transport in cracked concrete: a 3-D image–based microstructure simulation*, COMSOL Conf. 2012, Boston, MA, USA, s. 1-15, 2012.
11. Chiffre D.L., Carmignato S., Kruth J.-P., Schmitt R., Weckemann A., *Industrial applications of computed tomography*, CRIP Annals: Manufacturing Technology, Tom 63, 2014, s. 655-677.
12. De Chiffre L., Carmignato S., Kruth J.P., Schmitt R., Weckenmann A., *Industrial applications of computed tomography*, CIRP Ann. – Manuf. Technol., vol. 63, no. 2, s. 655-677, 2014, doi: 10.1016/j.cirp.2014.05.011.
13. Szweda Z., *Comparison of Protective Properties of Concretes with Low Alkali Cement*, [in:] *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 603, no. 4, doi: 10.1088/1757-899X/603/4/042059.
14. Szweda Z., Zybura A., *Theoretical model and experimental tests on chloride diffusion and migration processes in concrete*, [in:] *Procedia Engineering*, 2013, vol. 57, doi: 10.1016/j.proeng.2013.04.141.

Opracowanie modelu numerycznego wnikania jonów chlorkowych do wnętrza betonu

Streszczenie

Celem pracy było zamodelowanie dyfuzji jonów chlorkowych w elementach konstrukcji żelbetowych eksploatowanych w agresywnym środowisku zawierającym jony chlorkowe. W celu odwzorowania faktycznej struktury wnętrza betonu wykorzystano metodę tomografii komputerowej próbki, którą następnie za pomocą narzędzi obliczeniowych programu ANSYS przekształcono w geometrię, z której następnie utworzono siatkę numeryczną i wykorzystano ją do symulacja metodą CFD. Model pomocniczy został zaimplementowany do utworzonego modelu w pakiecie ANSYS Fluent za pośrednictwem UDF. Za pomocą zastosowanych narzędzi można zamodelować rzeczywisty transport jonów chlorkowych do wnętrza materiału porowatego – w tym przypadku betonu. Zakładając właściwości fizyczne materiałów biorących udział w eksperymencie, wyniki są zgodne z założeniami i badaniami eksperymentalnymi. Przedstawione rozwiązanie i model można z powodzeniem wykorzystać w przyszłości do modelowania dyfuzji jonów w materiałach porowatych.

Słowa kluczowe: dyfuzja, ośrodek porowaty, korozja zbrojenia w betonie, beton, analiza numeryczna

Research and modelling of reinforced corrosion under simulated variable climate condition

Abstract

The aim of a paper was to model the diffusion of chlorides in reinforced concrete elements placed in an aggressive environment with chloride ions. In order to reproduce the actual structure of the concrete interior, the method of computed tomography of the sample was used – which was then transformed into a geometry with the use of ANSYS software calculation tools, from which a numerical grid was subsequently created and used for simulation using the CFD method. An auxiliary model has been implemented into the created model in the ANSYS Fluent package via UDF. With the help of the tools used, it is possible to model the actual transport of chloride ions into the interior of the porous material – in this case concrete. Assuming the physical properties of the materials involved in the experiment, the results are consistent with the assumptions and experimental tests. The presented solution and model can be successfully used in the future to model the diffusion of ions in porous materials.

Keywords: diffusion, porous solid, reinforcement corrosion, concrete, computational fluid dynamics (CFD)

Karolina Czerwińska[1], Andrzej Pacana[2]

Analiza oraz doskonalenie poziomu jakości tłoków ze stopu aluminium

1. Wprowadzenie

Zmiany gospodarcze, które miały miejsce w ostatnich latach przyczyniły się do tego, iż wysoka jakość oferowanych produktów oraz usług stała się priorytetowym kryterium determinującym sukces przedsiębiorstw. Równie ważną kwestię stanowi stosowna wiedza kadry zarządzającej z zakresu możliwości zwiększenia efektywności pracy, będącej rezultatem zarówno teoretycznych, jak i praktycznych znajomości podstaw doskonalenia działalności przedsiębiorstwa oraz realizowanych w nim procesów [1-3]. Trwałe i skuteczne doskonalenie poziomu jakości może być osiągnięte poprzez kierowanie wysiłków organizacji w działania dotyczące planowania oraz zapobiegania powstawania problemów tuż u ich źródła [4, 5]. Wskazany koncept zarządzania jakością określany jest jako zapewnienie jakości, w którym znaczne wysiłki skierowane są na dojrzałe zarządzanie – przejawiające się zaawansowanym planowaniem jakości, poprawą projektu wyrobu, procesów i usług, udoskonaleniem kontroli procesów, wyrobów, a także znacznym zaangażowaniem i motywowaniem pracowników [6, 7].

Przedsiębiorstwa produkcyjne celem umocnienia swojej pozycji na rynku w drodze doskonalenia powinny ustalić metody oraz kryteria niezbędne do oceny ich przebiegu [8]. Ponadto, aby można było posługiwać się definicją poprawnego zarządzania, przedsiębiorstwa powinny monitorować, mierzyć i poddawać analizie poszczególne procesy, w celu wdrożenia ewentualnych usprawnień. Trafne usprawnienia można wskazać dzięki zastosowaniu różnego rodzaju instrumentów zarządzania jakością [9]. W znacznej ilości artykułów [10-14] oraz publikacji książkowych [15, 16] związanych z problematyką zarządzania jakością można dostrzec podejście wskazujące, iż metody i narzędzia stosowane w ramach zarządzania jakością są niezwykle istotne w kontekście wspierania rozwoju oraz poprawy jakości wyrobów finalnych, które trafiają do nabywców. Pogląd ten związany jest z faktem, iż instrumenty zarządzania jakością cechują się uniwersalizmem w zakresie stosowania – mogą być wykorzystywane do monitorowania całego cyklu produkcyjnego już od etapu projektowania, poprzez wytwarzanie aż do kontroli wyrobu gotowego oraz do kontrolowania wyrobu na każdym etapie produkcyjnym [17].

Wciąż brakuje jednak skonfigurowanej integralnie metody kontroli jakości, która przyczyniłaby się do realizacji pogłębionej analizy przyczynowej niezgodności produkcyjnych – zidentyfikowania źródłowej przyczyny niezgodności. Z tego względu celowym wydaje się opracowanie sekwencji wykorzystania metod i narzędzi zarządzania jakością (burza mózgów, diagram Pareto-Lorenza oraz metody FMEA (ang. *Failure Mode and Effect Analysis*), w których element wyjścia z jednego narzędzia stanowi wejście do kolejnego.

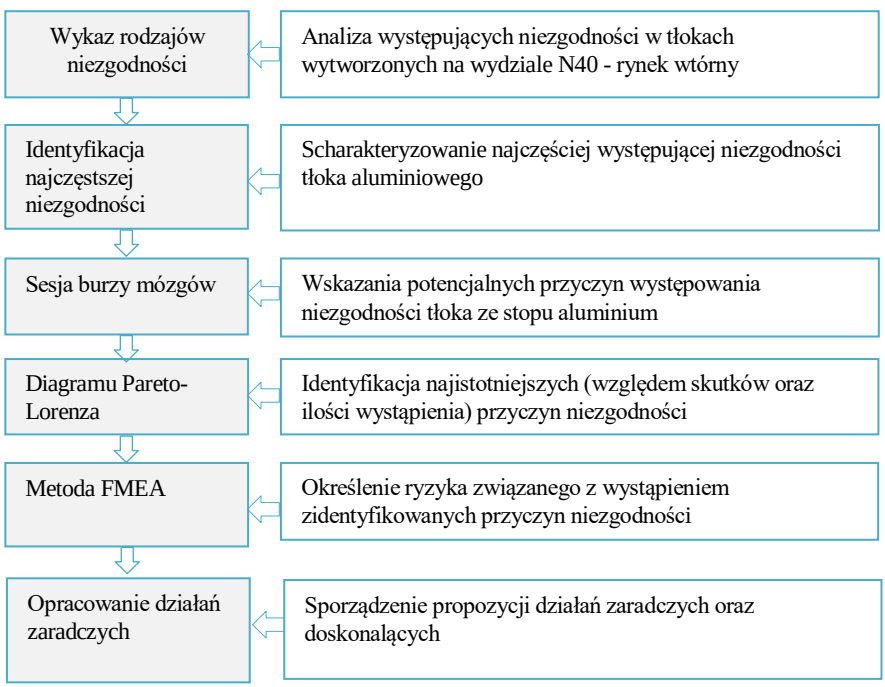
[1] k.czerwinska@prz.edu.pl, Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza.
[2] app@prz.edu.pl, Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza.

2. Cel, przedmiot i zakres badań

Celem opracowania było przeprowadzenie analizy oraz doskonalenie procesu wytwórczego tłoka ze stopu aluminium do silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym samochodu ciężarowego marki MAN. Z uwagi na wzrost poziomu reklamacji tłoków o 2% – w odniesieniu do poprzedniego kwartału – zrealizowane badanie objęło partię wyrobów wykonaną w 4 kwartale 2019 r. Zakres badań odnosił się do kontroli pooperacyjnej wyrobu i objął swym zasięgiem poszczególne etapy procesu produkcyjnego. Kontrola jakości prowadzona była zgodnie z wewnętrznymi procedurami przedsiębiorstwa oraz wymaganiami klienta stosowanie do konkretnych zleceń produkcyjnych.

3. Metodyka badań

W celu efektywnego przeprowadzenia jakościowej analizy stanu odlewów tłoka silnika spalinowego zrealizowano badania, w obrębie których konfigurowano integralnie narzędzia zarządzania jakością. Kolejne etapy postępowania przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1. Sekwencja metod wykorzystanych do analizy niezgodności oraz identyfikacji źródła ich powstania [opracowanie własne]

Pierwszy krok metodologii obejmował zgromadzenie niezbędnych informacji, dotyczących niezgodności występujących w badanym wyrobie oraz wytypowanie najczęściej pojawiającej się wady. W etapie tym wykonano gemba walk (analiza problemu w miejscu jego występowania, zbieranie danych [18]), przeprowadzono wywiady z pracownikami oraz przeanalizowano wewnętrzną dokumentację wyników kontroli jakości.

Kolejny etap polegał na scharakteryzowaniu oraz zwizualizowaniu najczęściej występującej niezgodności wraz z wskazaniem jej istotności.

Następnie zastosowano niekonwencjonalny sposób zespołowego poszukiwania nowych pomysłów dotyczących metod rozwiązywania problemów [19, 20] – przeprowadzono sesję burzy mózgów. Sesja burzy mózgów została zastosowana przez ekspertów w celu wyodrębnienia potencjalnych przyczyn powstania niezgodności.

Wykorzystanie w ramach analizy diagramu Pareto-Lorenza – graficznego przedstawienia danych na wykresie, w sposób malejący z uwzględnieniem linii Lorenza wskazującej sumę udziału procentowego przyczyn [21, 22], przyczyniło się do wyszczególnienia najistotniejszych niezgodności pod kątem liczby ich występowania oraz dotkliwości skutków.

Zastosowanie metody FMEA (analizy skutków potencjalnych błędów [23, 24]) w ramach analizy problemu miało na celu zapobiegnięcie skutkom wad, które mogą wystąpić w fazie wytwarzania, dzięki określeniu ryzyka związanego z wystąpienie zidentyfikowanych przyczyn niezgodności.

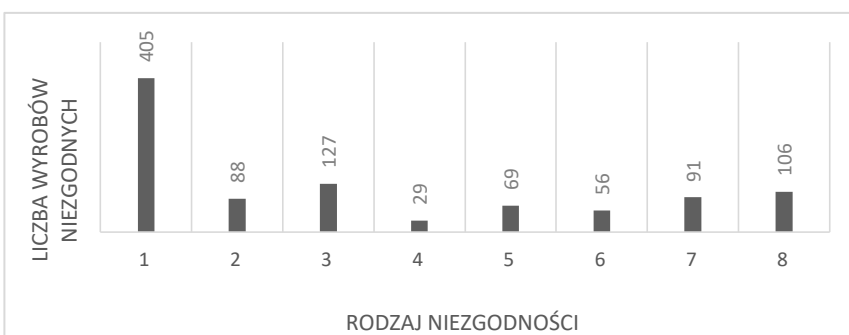
Ostatni etap analizy dotyczył przedstawienia propozycji działań korygujących oraz doskonalących w ramach zwiększenia poziomu jakości tłoków ze stopu aluminium. Dzięki przedstawionym rozwiązaniom możliwym będzie całkowite wyeliminowanie rozpatrywanej niezgodności lub zminimalizowanie częstości jej powstania.

4. Wyniki badań oraz analiza

Najczęstszymi, zidentyfikowanymi przyczynami niezgodności wyrobu – tłoka wykonanego ze stopu aluminium, były niezgodności w formie wykonania niewłaściwego wybrania pod zawory (rys. 2, 3). W rozpatrywanym okresie niezgodności te osiągnęły wartość 405 sztuk.

Na rysunku 2 niezgodności zostały oznaczone jako: 1 – niewłaściwe wybranie pod zawory; 2 – niewłaściwa średnica zewnętrzna tłoka; 3 – nieodpowiedni wymiar kompresyjny; 4 – bicie rowków pod pierścień osadczy sprężynujący; 5 – niewłaściwa średnica zewnętrzna tłoka; 6 – błędy w wykonaniu otworu pod sworzeń; 7 – uszkodzenia (ubytki), deformacje i rysy oraz strefy zużycia wyrobu; 8 – błędy związane z niewłaściwą głębokością komory spalania.

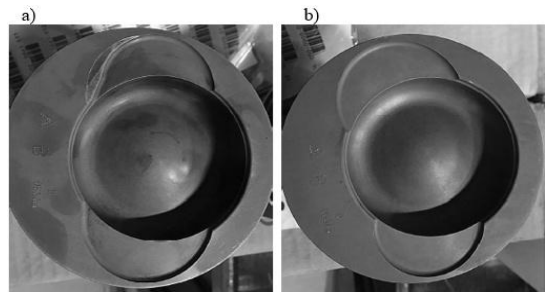
Zidentyfikowane rodzaje niezgodności nie podlegają naprawie – generują dodatkowe koszty dla przedsiębiorstwa.



Rysunek 2. Wykaz rodzajów niezgodności tłoków ze stopu aluminium do silnika spalinowego samochodu ciężarowego marki MAN w analizowanym okresie [opracowanie własne]

Ze względu na fakt, iż wśród niezgodności najpoważniejszą oraz najczęściej występującą jest brak utrzymania nominalnej wartości średnicy, położenia i głębokości wybrania po zawory, postanowiono poddać analizie zaistniały problem jakościowy.

Przykład niezgodności – wykonania niewłaściwego (a), oraz poprawnie wykonanego wybrania (b) pod zawory przedstawia rysunek 3.



Rysunek 3. Zestawienie nieprawidłowo (a) oraz prawidłowo (b) wykonanego wybrania pod zawory w tłoku ze stopy aluminium stosowanym do silników w pojazdach MAN

Wskazana niezgodność może być przyczyną nieprawidłowego działania silnika, gdyż przyczynia się do obniżenia mocy jednostki napędowej. Zawory umiejscowione w głowicy silnika sterują dopływem sprężonego powietrza niezbędnego do powstania zapłonu, który w efekcie wprawia w ruch tłoki i wał korbowy. W celu wprowadzenia w ruch układu korbowo-tłokowego zawory ssące doprowadzają powietrze, a wtryskiwacze wprowadzają paliwo, po czym w określonych warunkach następuje samozapłon mieszanki paliwowo-powietrznej, który rozpoczyna pracę tłoków. Po podaniu powietrza następuje zamknięcie zaworów ssących i otworzenie zaworów wydechowych w celu usunięcia powstałych spalin z komory spalania. Z tego względu istotne jest poprawne wykonanie wybrania pod zawory, aby podczas otwierania nie uderzyły one w powierzchnię tłoka.

W trakcie sesji „burzy mózgów" zespół ekspertów w składzie: kierownik ds. jakości, główny technolog, kierownik odlewni oraz specjalista ds. kontroli jakości, w pierwszej kolejności określono zagadnienie do rozwiązania: „Potencjalne przyczyny niezgodności w postaci nieprawidłowego wybrania pod zawory aluminiowego tłoka". Omówiono zaistniały problem i przypomniano fundamentalne zasady sesji „burzy mózgów" jak:

1. Brak krytyki.
2. Słuchanie się nawzajem.
3. Przedstawianie pomysłów i ich zapisywanie.
4. Możliwość modyfikacji i doskonalenia pomysłów przez członków zespołu.

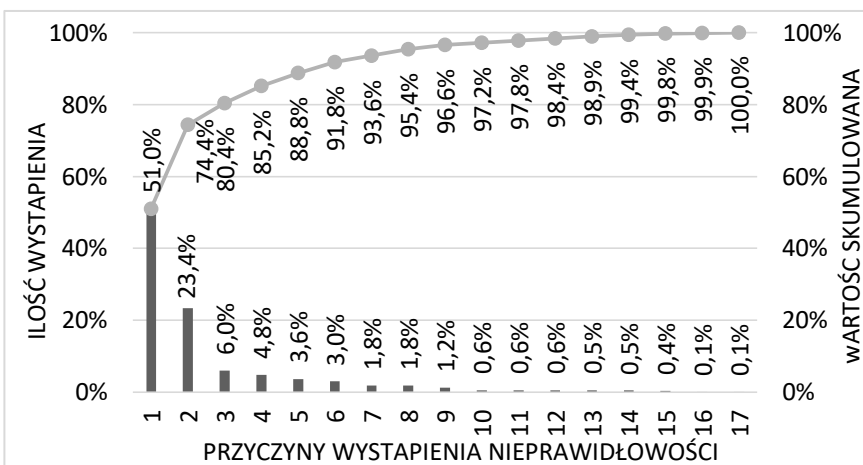
Analizie poddano zaistniały problem i przedstawiono pomysły w celu rozwiązania występującego problemu. Skupiono się na wygenerowaniu dużej ilości potencjalnych przyczyn zidentyfikowanych wad. Ostatni etap „burzy mózgów" polegał na zestawieniu i wyborze najlepszych pomysłów, wskazujących na przyczyny, które powodują analizowaną niezgodność. Zgłoszone pomysły były dyskutowane i sklasyfikowane. W wyniku dokonanej oceny otrzymano rozwiązania, które w dalszej kolejności należy poddać dalszej analizie. Schemat przeprowadzonej „burzy mózgów" przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Schemat zrealizowanej sesji „burzy mózgów”

Potencjalne przyczyny niezgodności w postaci nieprawidłowego wybrania pod zawory aluminiowego tłoka	
Redefinicja problemu	Zgłoszone propozycje
1. Jakie najczęściej występują niezgodności? 2. Dlaczego niezgodności powstają? 3. Z czyjej winy powstają niezgodności? 4. Na jakim etapie procesu produkcyjnego powstają niezgodności? 5. Jakie czynności wykonywane są podczas tego etapu? 6. W jaki sposób wyeliminować powstające niezgodności? 7. Jak poważny jest problem?	1. Nieodpowiednie pozycjonowanie detalu w uchwycie maszyny, 2. Niepoprawne zamocowanie tłoka silnika w uchwycie maszyny, 3. Zużyty uchwyt stabilizujący detal, 4. Zużyte ramie stabilizujące detal, 5. Nieodpowiednie ustawienie parametrów obróbczych, 6. Zużyte noże obróbcze, 7. Nieodpowiednia średnica denka tłoka, 8. Nieodpowiednia powierzchnia denka tłoka, 9. Nieodpowiedni owal denka tłoka, 10. Niski poziom wiedzy pracownika, 11. Zbyt rzadkie kontrole, 12. Brak instrukcji stanowiskowych, 13. Natłok obowiązków, 14. Pośpiech, 15. Roztargnienie, 16. Brak nadzoru, 17. Brak motywacji.

Źródło: Opracowanie własne

Kolejnym etapem analizy było sprecyzowanie i uściślenie ilości najważniejszych, potencjalnych przyczyn wystąpienia problemu jakościowego, które wyszczególniono w czasie sesji „burzy mózgów”. Dokonano tego przy pomocy diagramu Pareto-Lorenza (rys. 4).



Rysunek 4. Potencjalne przyczyny determinujące powstanie defektu tłoka – diagram Pareto-Lorenza

Z przedstawionej analizy z wykorzystaniem diagramu Pareto-Lorenza wynika, iż największy procentowy udział w powstawaniu defektu tłoka był związany z nieodpowiednim pozycjonowaniem detalu w maszynie do obróbki materiału oraz niepoprawnego jego zamocowaniu w uchwycie obróbczym. Wskazane niezgodności osiągnęły

kolejno 52% i 23,9% wszystkich niezgodności. W ramach działań zaradczych w pierwszej kolejności postanowiono wyeliminować nieodpowiednie pozycjonowanie detalu w uchwycie maszyny do obróbki materiału.

Zespół zadaniowy dokonał oceny ryzyka w odniesieniu do każdej z potencjalnych przyczyn, zgodnie z metodą FMEA z uwzględnieniem trzech kryteriów: LPW (liczba występowania błędu), ryzyko dotyczące częstości występowania przyczyny), LPZ (liczba priorytetowa znaczenia) znaczenie przyczyny w kontekście procesu eksploatacji wyrobu lub czasu realizacji danego procesu) i LPO (liczba priorytetowa odkrycia) możliwość wykrycia).

Wskazane wielkości służą do określenia poziomu wskaźnika występowania ryzyka – LPR (wskaźnik priorytetowy ryzyka), stanowiącego ich iloczyn. Przy pomocy niniejszego wskaźnika określono poziom prawdopodobieństwa ryzyka, które związane było z zaistnieniem przyczyny niezgodności wyrobu. Przyjęto wartość 200 jako limit, natomiast dla wartości większych od 170 należało podjąć działania zapobiegające i obniżające prawdopodobieństwo wystąpienia przyczyny. Tabela 2 została sporządzona na podstawie opracowanego formularza analizy FMEA względem analizowanej niezgodności.

Tabela 2. Analiza FMEA zrealizowana względem problemu niezgodności wybrań w tłoku

Nazwa wady	Potencjalny rodzaj przyczyny	Potencjalny skutek przyczyny	LPW	LPZ	LPO	LPR	Działania zapobiegawcze
Nieprawidłowe wybranie pod zwory w tłoku silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym marki MAN	Nieodpowiednie pozycjonowanie detalu w uchwycie maszyny do obróbki materiału	Wykonanie wybrania pod zawory w tłoku o nieodpowiednim położeniu	8	8	5	320	Wykonanie kołka pozycjonującego na okręgu mocująco-bazującym tłok w maszynie.
		Uszkodzenie oprzyrządowania maszyny	7	8	5	280	
	Niepoprawne zamocowanie tłoka w uchwycie maszyny	Wykonanie wybrania pod zawory w aluminiowym tłoku o nieodpowiednim położeniu	7	8	5	280	Wykonanie kołka pozycjonującego na okręgu na okręgu mocująco-bazującym tłok w maszynie.
		Uszkodzenie oprzyrządowania maszyny	7	7	5	245	
		Uszkodzenie obrabianej powierzchni (denka tłoka)	7	7	5	245	
		Uszkodzenie tłoka	7	7	5	245	

	Zużyty uchwyt stabilizujący detal	Brak stabilności detalu – niepoprawna geometria wybrania pod zawory	5	7	5	175	Zwiększenie częstotliwości przeglądów technicznych, obsługi konserwacyjnej maszyny realizowanej wewnątrz przedsiębiorstwa przez operatorów (autonomiczna konserwacja) oraz personel utrzymania ruchu (planowa konserwacja). Wdrożenie TPM na stanowisku roboczym.
	Zużyte ramie stabilizujące detal	Brak stabilności detalu – niepoprawna geometria wybrania pod zawory	5	6	6	180	Zwiększenie częstotliwości przeglądów technicznych, obsługi konserwacyjnej maszyny realizowanej wewnątrz przedsiębiorstwa przez operatorów (autonomiczna konserwacja) oraz personel utrzymania ruchu (planowa konserwacja). Wdrożenie TPM na stanowisku roboczym.
		Uszkodzenie oprzyrządowania maszyny	4	6	6	144	
	Nieodpowiednie ustawienie parametrów obróbczych	Niepoprawna geometria wybrania pod zawory	5	6	4	120	Dodatkowe szkolenia operatorów maszyn. Umieszczenie kart procesu i instrukcji stanowiskowych na stanowisku roboczym. Nadzór pracowników oraz prowadzenie kontroli procesu technologicznego.
		Uszkodzenie urządzenia – oprzyrządowanie	3	7	4	84	
		Uszkodzenie obrabianego detalu	3	4	4	48	
	Zużyte narzędzia/noże obróbcze	Uszkodzenie powierzchni denka tłoka	3	6	8	144	Zwiększenie częstotliwości przeglądów technicznych, obsługi konserwacyjnej maszyny realizowanej wewnątrz przedsiębiorstwa przez operatorów
		Pęknięcia, wyszczerbienia, chropowata powierzchnia wybrania	2	6	6	72	

		Uszkodzenie urządzenia	2	6	8	96	(autonomiczna konserwacja) oraz personel utrzymania ruchu (planowa konserwacja). Wdrożenie TPM na stanowisku roboczym.
	Nieodpowiednia średnica denka tłoka	Niepoprawna geometria wybrania pod zawory	4	5	4	80	Stała kontrola jakości detalu po realizacji poszczególnych procesów technologicznych.
	Nieodpowiednia powierzchnia denka tłoka	Niepoprawna geometria wybrania pod zawory	5	5	5	125	Stała kontrola jakości detalu po realizacji poszczególnych procesów technologicznych.
		Pęknięcia, wyszczerbienia, chropowata powierzchnia, wybrania	5	5	5	125	
	Nieodpowiednia owal denka tłoka	Niepoprawna geometria wybrania pod zawory	3	5	6	90	Stała kontrola jakości detalu po realizacji poszczególnych procesów technologicznych.
	Niski poziom wiedzy pracownika	Niepoprawne wykonanie operacji technologicznej - niepoprawne wykonanie wybrania pod zawory	2	5	5	50	Dodatkowe szkolenia operatorów maszyn. Umieszczenie kart procesu i instrukcji stanowiskowych na stanowisku roboczym. Nadzór pracowników oraz prowadzenie kontroli procesu technologicznego.
		Uszkodzenie urządzenia	2	5	4	80	
		Uszkodzenie obrabianego detalu	2	6	8	96	
	Zbyt rzadkie kontrole	Błędy podczas realizacji operacji technologicznej	2	5	6	60	Nadzór pracowników oraz prowadzenie kontroli procesu technologicznego.

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonej analizy przyczyn wadliwości oraz krytyczności niezgodności – FMEA wyróżniono dwie najistotniejsze przyczyny niezgodności, wpływające na niepoprawne wykonanie wybrania pod zawory w tłoku do silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym samochodu ciężarowego marki MAN. Niezgodności dotyczą niepoprawnego pozycjonowania oraz zamocowania detalu w uchwycie maszyny do obróbki materiału. W ramach analizy FMEA wskazano także działania zaradcze. Celem eliminacji wskazanych niezgodności należy zapobiec niepoprawnemu zamocowaniu obrabianego elementu, poprzez zamocowanie kołka pozycjonującego na okręgu mocująco-bazującym tłok w maszynie do obróbki materiału. Wysoki wskaźnik ryzyka uzyskały również przyczyny spowodowane złym stanem technicznym urządzenia.

W ramach działań zapobiegawczych należy zapewnić instrukcje stanowiskowe na stanowisku roboczym, na którym wykonywane będą wybrania pod zawory. Zaleca się również przeszkolenie pracowników z zakresu mocowania tłoków w uchwycie obróbkowym. Należy także stale monitorować poziom jakości analizowanego procesu technologicznego.

5. Wnioski

Zarządzanie jakością stanowi jeden z istotnych obszarów funkcjonowania przedsiębiorstwach produkcyjnych, które chcą utrzymać stabilna pozycję na rynku, a wytwarzane w nich wyroby muszą być dostosowane jakościowo do wymagań odbiorcy końcowego. Zaprezentowana w opracowaniu szczegółowa analiza niezgodności, dotycząca identyfikacji obszarów, w których występuje najwięcej niezgodności i identyfikacji przyczyn obecności tych defektów w połączeniu z zastosowaniem skonfigurowanej integracji narzędzi zarządzania jakością, przyczynia się do ich eliminacji oraz wdrożenia skutecznych działań zapobiegających występowaniu niezgodności w przyszłości.

Najważniejszą, w kontekście obniżenia poziomu jakości, niezgodnością było nieodpowiednie wykonanie wybrania pod zawory. Głównymi przyczynami występowania tej niezgodności było nieodpowiednie pozycjonowanie detalu w uchwycie maszyny do obróbki materiału oraz niepoprawne zamocowanie tłoka w uchwycie obróbkowym. W ramach działań zaradczych zaproponowano wykonanie kołka pozycjonującego na górnej powierzchni okręgu mocująco-bazującym tłok w maszynie służącej wykonaniu wybrania zaworu w tłoku.

Przedstawiona metoda analizy niezgodności w sekwencyjnie połączonych narzędziach może z powodzeniem stanowić składowe metod wspierających procesy zarządzania jakością.

Literatura

1. Karaszewski R., *Zarządzanie jakością – koncepcje, metody, narzędzia stosowane przez liderów światowego biznesu*, TNOiK, Toruń 2005.
2. Wolniak R., Skotnicka B., *Metody i narzędzi zarządzania jakością. Teoria i praktyka*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005.
3. Babica M., Pająk E., *Koncepcja metody eliminacji niezgodności w procesach produkcyjnych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Budowa Maszyn i Zarządzanie Produkcją, 2006, nr 3, s. 5-15.

4. Bamford D.R., Greatbanks R.W., *The use of quality management tools and techniques: a study of application in everyday situations*, International Journal of Quality & Reliability Management, 2005, vol. 22, no. 4, s. 376-392.
5. Grudowski P., *Pomiary, analiza i doskonalenie jako kryteria auditu systemu zarządzania jakością*, Problemy Jakości, 2006, nr 3, s. 35-38.
6. Iwasiewicz A., *Zarządzanie jakością w przykładach i zadaniach*, Śląskie Wydawnictwa Naukowe Wyższej Szkoły Zarządzania i Nauk Społecznych, Tychy 2005.
7. Jednoróg A., Koch T., Zadrożny R., *Metody i techniki zapewnienia jakości o szczególnym znaczeniu dla przemysłu motoryzacyjnego*, Problemy Jakości, 2000, nr 1, s. 17-26.
8. Wolniak R., *Parametryzacja kryteriów oceny poziomu dojrzałości systemu zarządzania jakością, Rozprawa habilitacyjna (monografia)*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
9. Siwek M., Onyszczuk J., Bagiński J., *Skuteczność, efektywność, a produktywność*, Problemy Jakości, 2006, nr 9, s. 35-41.
10. Borkowski S., Ingaldi M., Jagusiak-Kocik M., *Quality Analysis and Technological Portfolio in Production of the Metal Screws. METAL 2014: 23rd International Conference On Metallurgy And Materials*, 2014, pp. 1716-1722.
11. Kowalczyk A., Maleszka A., *Metody i techniki zarządzania jakością w branży motoryzacyjnej*, [w:] Sikora, T. (red.), *Zarządzanie jakością – doskonalenie organizacji, tom I*, Wydawnictwo Naukowe PTTŻ, Kraków 2010, s. 524-535.
12. Łuczak J., Maćkiewicz E., *8D oraz inne metody zarządzania jakością w branży motoryzacyjnej (OE/OES) – analiza przypadku*, Problemy Jakości, 2006, nr 11, s. 36-37, s. 35- 43.
13. Pacana A., Czerwińska K., Bednarova L., *Discrepancies analysis of casts of diesel engine piston*, Metalurgija 57 (4), 2018, s. 324-326.
14. Pacana A., Czerwińska K., Bednarova L., *Comprehensive improvement of the surface quality of the diesel engine piston*, Metalurgija 58 (3-4), 2019, s. 329-332.
15. Sage A.P., Rouse W.B., *Handbook of Systems Engineering and Management*, Wiley-Interscience, New Jersey 2009.
16. Żuchowski J., Łagowski E., *Narzędzia i metody doskonalenia jakości*, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2004.
17. Wadsworth H.M., Stephens K.S., Godfrey A.B., *Modern methods for quality control and improvement, 2nd ed*., JohnWiley&Sons, New York 2002.
18. Imai M., *Gemba Kaizen. Zdroworozsądkowe, niskokosztowe podejście do zarządzania*, Wydawnictwo MT Biznes, Warszawa 2006.
19. Pacana A., Czerwińska K., *Analysis of the causes of control panel inconsistencies in the gravitational casting process by means of quality management instruments*, Production Engineering Archives 25 (25), 2019, s. 12-16.
20. Pacana A., *Praca zespołowa i liderzy*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2017.
21. Blike A.J., *Doktryna Jakości. Rzecz o turkusowej samoorganizacji*, Wydawnictwo Helion, Gliwice 2017.
22. Szczepańska K., *Metody i techniki TQM*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
23. Słowiński B., *Zarządzanie i inżynieria jakości*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2011.
24. Puente J., Pino R., Priore P., Fuente D., *A decision support system for applying failure mode and effects analysis*, The International Journal of Quality & Reliability Management, 2002, Vol. 19 No. 1, s. 137-150.
25. Folejwska A., *Analiza FMEA – zasady, komentarze, arkusze*, Wydawnictwo Verlag Dashofer Sp.z o.o. Świat profesjonalnej wiedzy. Warszawa 2010.

Analiza oraz doskonalenie poziomu jakości tłoków

Streszczenie
Celem opracowania była analiza oraz usprawnienie i udoskonalenie procesu produkcyjnego w kontekście zwiększenia poziomu jakości tłoków ze stopu aluminium przeznaczonych do samochodów MAN, poprzez rozwiązanie problemu związanego ze znaczną ilością niezgodnych wyrobów. W opracowaniu stworzono przy zastosowaniu instrumentów zarządzania jakością (burza mózgów, diagram Pareto-Lorenza) kompleksowy zbiór informacji dotyczący potencjalnych przyczyn powstania niezgodności detalu, który był przydatny w dalszej części analizy przy użyciu metody FMEA. Zakres badań objął partię tłoków wyprodukowaną w czwartym kwartale 2019 roku. Na podstawie zrealizowanej analizy przyczyn wadliwości oraz krytyczności niezgodności wyróżniono dwie najistotniejsze przyczyny niezgodności przyczyniających się do niepoprawnego wykonania wybrania pod zawory w aluminiowym tłoku MAN. Przyczynami o wysokim wskaźniku ryzyka były: nieodpowiednie pozycjonowanie detalu w uchwycie maszyny oraz niepoprawne zamocowanie tłoka w uchwycie maszyny. W ramach analizy FMEA wskazano potencjalne skutki wystąpienia przyczyn oraz zaproponowano działania zaradcze. Wskazana sekwencja metoda analizy niezgodności dzięki uniwersalnemu charakterowi może stanowić składowe metod wspierających i doskonalących procesy zarządzania jakością. Dalsze badania będą dotyczyły zastosowania przedstawionej sekwencji metod do pozostałych (oferowanych przez przedsiębiorstwo) wyrobów w ramach realizacji działań doskonalących. Przedstawione w opracowaniu treści stanowią przydatne źródło wiedzy dla przedsiębiorstw produkcyjnych poszukujących efektywnych rozwiązań z zakresu identyfikacji potencjalnych przyczyn obniżenia poziomu jakości oferowanych wyrobów.
Słowa kluczowe: inżynieria jakości, zarządzanie jakością, burza mózgów, diagram Pareto-Lorenza, metoda FMEA

Analysis and improvement of piston quality

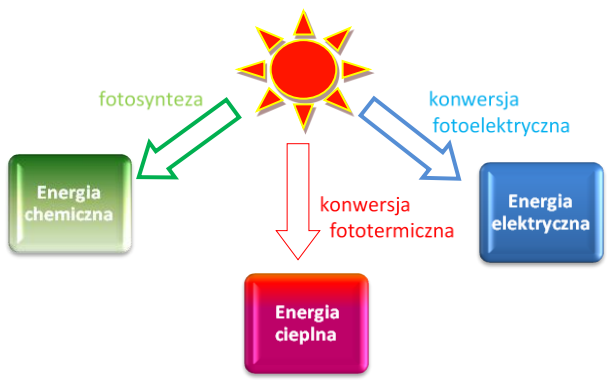
Abstract
The aim of the study was to analyse and improve and streamline the production process in the context of increasing the quality level of aluminium alloy pistons for MAN vehicles by solving the problem of the significant number of non-compliant products. In the study, using quality management instruments (brainstorming, Pareto-Lorenz diagram), a comprehensive set of information on the potential causes of the non-compliance of the detail was created, which was useful for further analysis using the FMEA method. The scope of research covered the batch of pistons produced in the fourth quarter of 2019. On the basis of the analysis of the causes of defectiveness and criticality of non-conformity, the two most important causes of non-conformity contributing to incorrect selection for valves in the aluminium Man piston were distinguished. The reasons for the high risk rate were: incorrect positioning of the workpiece in the machine mount and incorrect piston mounting in the machine mount. The FMEA analysis identified the potential effects of the causes and proposed remedial action. The indicated sequence of methods of non-conformity analysis due to its universal character can be a component of methods supporting and improving quality management processes. Further research will concern the application of the presented sequence of methods to other (offered by the company) products as part of the implementation of improvement measures. The content presented in the study is a useful source of knowledge for manufacturing companies looking for effective solutions for identifying potential reasons for lowering the quality level of offered products.
Keywords: quality engineering, quality management, brainstorming, Pareto-Lorenz diagram, FMEA method

Krzysztof Dutkowski[1]

Powietrzny kolektor słoneczny – niedoceniany element regulacji komfortu cieplnego w pomieszczeniach

1. Wprowadzenie

Słońce jest najjaśniejszym obiektem na niebie, ale przede wszystkim głównym źródłem energii docierającej na Ziemię. Energia słoneczna docierająca do Ziemi ulega konwersji na inne postaci energii. Rodzaje konwersji energii oraz jej nowe postaci przedstawiono poglądowo na rysunku 1.



Rysunek 1. Rodzaje konwersji energii słonecznej oraz jej postacie [opracowanie własne na podstawie [3]]

Konwersja fototermiczna polega na konwersji energii słonecznej w energię cieplną i jest realizowana w sposób kontrolowany i celowy w kolektorach słonecznych. Kolektory słoneczne to urządzenia zaprojektowane do pochłaniania promieniowania słonecznego i przekazywania pozyskanej energii cieplnej do przepływającego płynu [1]. W zależności od rodzaju czynnika roboczego wyróżnia się kolektory słoneczne cieczowe oraz powietrzne.

Kolektory cieczowe dzieli się, w zależności od kształtu konstrukcji, na kolektory płaskie (w tym: płaskie, rurowe) lub wypukłe. Kolektory te mogą pracować jako konstrukcje pokryte transparentną osłoną lub bez osłony. Przestrzeń pomiędzy pokryciem kolektora, a absorberem, wypełniona może być powietrzem lub posiadać próżnię. Inny podział cieczowych kolektorów słonecznych wynika ze sposobu koncentracji promieni słonecznych. Wyróżnia się cieczowe kolektory słoneczne bez elementów skupiających promienie słoneczne lub skupiające: o ognisku punktowym, o ognisku liniowym, bezogniskowo, z wykorzystaniem soczewki Fresnela lub wielościanowe. Wszystkie wspomniane konstrukcje mogą pracować jako układy stacjonarne lub nadążne.

W przypadku kolektorów słonecznych, w których czynnikiem roboczym jest powietrze, dokonuje się innej klasyfikacji. Podział wynika z różnicy w budowie kolektora, a ta jest konsekwencją sposobu jego wykorzystania. Wyróżnia się kolektory powietrzne

[1] krzysztof.dutkowski@tu.koszalin.pl, Katedra Energetyki, Wydział Mechaniczny, Politechnika Koszalińska

służące do: suszenia (płodów rolnych, drewna, biomasy uprawowej, biomasy odpadowej, materiałów budowlanych itp.), regulacji mikroklimatu w przechowalniach płodów rolnych, ogrzewania pomieszczeń, klimatyzacji pomieszczeń bytowych, ogrzewania hal i magazynów, podgrzewania szklarni i tuneli foliowych, wspomagania energią cieplną procesów technologicznych wymagających podgrzanego powietrza, odsalania wody, chłodzenia paneli fotowoltaicznych (PV) itp. [2].

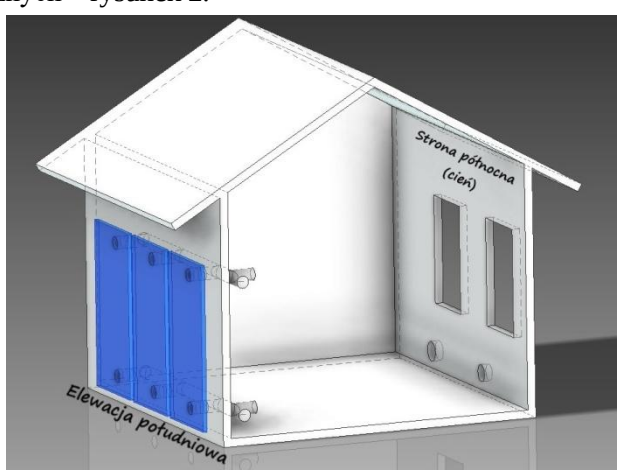
Kolektory słoneczne cieczowe i powietrzne mogą pracować jako układy:

- pasywne, czyli niewymagające dodatkowego źródła energii napędowej do przemieszczania czynnika roboczego (np.: pomp, wentylatorów);
- aktywne, czyli specjalne skonstruowane instalacje wymagające dodatkowych nakładów energetycznych podczas ich pracy [3].

W systemach pasywnych zakup i montaż kolektora powietrznego jest jedynym wydatkiem inwestora. Brak poboru mocy elektrycznej podczas działania pasywnego kolektora słonecznego czyni tę technologię jeszcze bardziej atrakcyjną. Ponadto kolektory powietrzne zapewniają dodatkowe korzyści finansowe, gdyż pozwalają uniknąć kosztów związanych z: wykonaniem projektu instalacji, pozwoleniem na budowę, skomplikowanych układów sterowania, instalacji płynu roboczego, pośrednich wymienników ciepła, profesjonalnego serwisu, konserwacji itp.

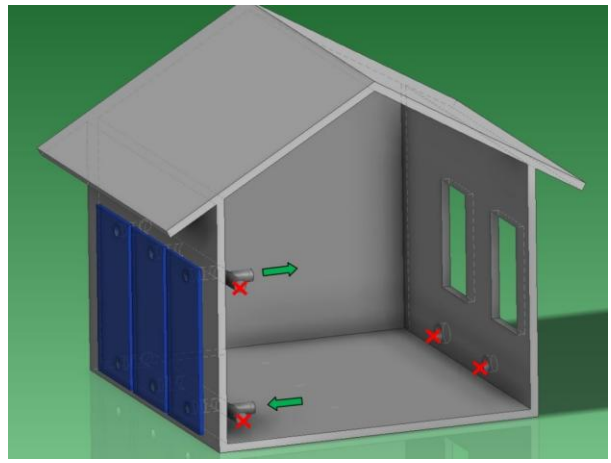
2. Sposoby wykorzystania płaskiego pasywnego powietrznego kolektora słonecznego

Zasadniczo, powietrzne kolektory słoneczne stosuje się do podgrzewania powietrza w pomieszczeniach, które ze względów technicznych lub bezpieczeństwa nie posiadają okien (podwyższone piwnice, hale, magazyny, warsztaty) lub gdy umiejscowienie pomieszczenia jest niekorzystne pod kątem możliwości bezpośredniego wykorzystania promieni słonecznych – rysunek 2.



Rysunek 2. Umiejscowienie płaskiego powietrznego kolektora słonecznego [opr. własne]

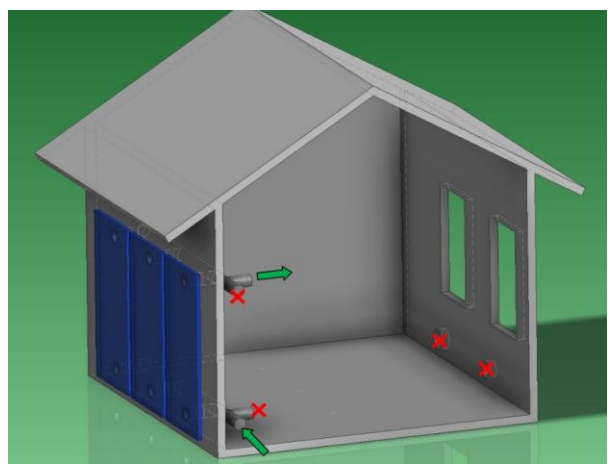
W zależności od miejsca, do którego kierowane jest rozgrzane powietrze opuszczające kolektor oraz z którego pobierane jest powietrze do kolektora, wyróżnić można kilka wariantów pracy (zastosowań) powietrznych kolektorów słonecznych.



Rysunek 3. Wykorzystanie kolektora do ogrzewania pomieszczenia powietrzem pobieranym z tego samego pomieszczenia [opracowanie własne]

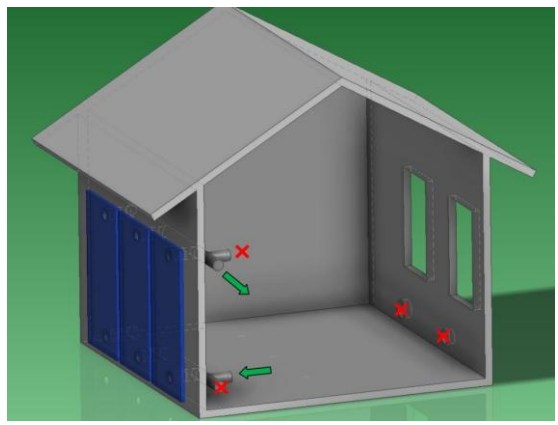
Na rysunku 3 przedstawiono wykorzystanie kolektora słonecznego jako urządzenie do grzania pomieszczenia powietrzem pobranym bezpośrednio z tego pomieszczenia. Układ taki zapewnia wysokie tempo wzrostu temperatury w pomieszczeniu. Wadą takiego rozwiązania jest powtórne wykorzystywanie powietrza wewnętrznego, którego parametry komfortu bytowego (np. zapach) mogą być niewłaściwe.

Wyżej opisanej wady pozbawione jest rozwiązanie przedstawione na rysunku 4 Kolektor służy do ogrzania pomieszczenia powietrzem zewnętrznym (lub z innego pomieszczenia). Układ taki zapewnia wentylację pomieszczenia, dostarczając świeże, zewnętrzne powietrze podgrzane w kolektorze. Wadą takiego rozwiązania jest fakt, iż w okresie zimowym wzrost temperatury powietrza w kolektorze może być zbyt mały. Wówczas może okazać się konieczne dogrzanie powietrza przed, lub za kolektorem słonecznym.



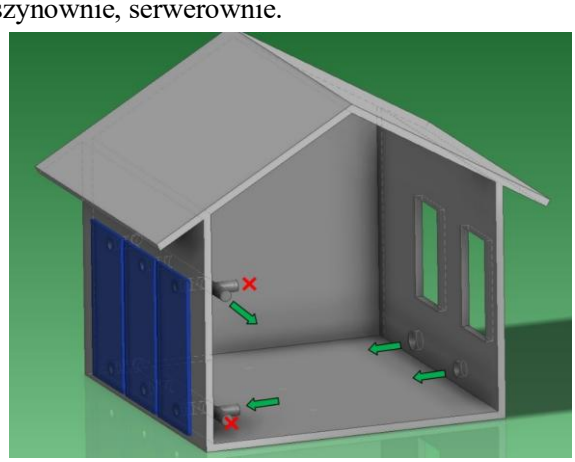
Rysunek 4. Wykorzystanie kolektora do ogrzewania pomieszczenia powietrzem pobieranym z zewnątrz [opracowanie własne]

Kolejnym przykładem wykorzystania powietrznego kolektora słonecznego jest wariant przedstawiony na rysunku 5. Tym razem kolektor słoneczny służy do ogrzania innego pomieszczenia powietrzem z wnętrza budynku. Szczególnym przypadkiem może być wyprowadzenie ciepłego powietrza na zewnątrz budynku z pomieszczenia, w którym wydzielane są nieprzyjemne zapachy. Wówczas kolektor powietrzny pełni rolę wywiewnej kratki wentylacyjnej, wymuszając cyrkulację powietrza w pomieszczeniu.



Rysunek 5. Wykorzystanie kolektora do wymuszenia wentylacji pomieszczenia [opracowanie własne]

Ciekawą alternatywną wykorzystania powietrznego kolektora słonecznego do grzania pomieszczeń jest możliwość jego stosowania w celu obniżania temperatury powietrza w pomieszczeniu (rys. 6). Pomieszczeniami wymagającymi chłodzenia mogą być np.: maszynownie, serwerownie.



Rysunek 6. Wykorzystanie kolektora do wymuszenia przepływu chłodnego powietrza [opracowanie własne]

W tym przypadku kolektor słoneczny może stanowić urządzenie wymuszające przepływ powietrza. Obniżenie temperatury w pomieszczeniu możliwe jest dzięki zassanemu powietrzu o obniżonej temperaturze. Może ono pochodzić, np.: z zacienionej strony budynku, pomieszczeń piwnicznych, gruntowej chłodnicy powietrza itp.

3. Badania własne powietrznego kolektora słonecznego

3.1. Cel i zakres prac badawczych

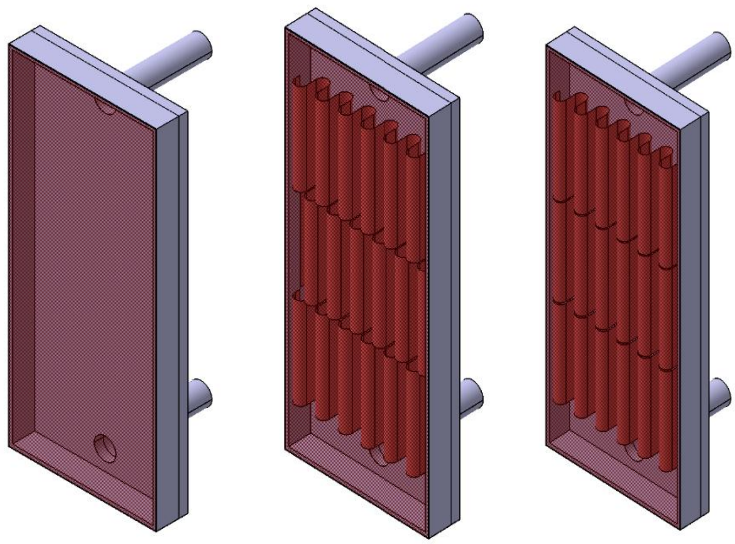
Celem pracy było wyznaczenie sprawności energetycznej powietrznego kolektora słonecznego o różnej konstrukcji absorbera. Do badań wykorzystano prototypowe, wykonane według własnego pomysłu, konstrukcje kolektora z płaskim absorberem oraz absorberem ożebrowanym (dwa warianty). Kolektory pracowały w warunkach konwekcji swobodnej. Badania zrealizowano w warunkach laboratoryjnych w zakresie natężenia promieniowania $I = 0 \div 1000$ W/m^2. Dodatkowo badano wpływ ustawienia kolektora (odchylenia od pionu) na jego sprawność energetyczną.

3.2. Obiekt badań

Na rysunku 7 przedstawiono widok prototypowych, powietrznych kolektorów słonecznych wykorzystywanych w trakcie badań. Każdy kolektor składał się z aluminiowej obudowy o wymiarach: 0,85 m (szerokość) x 2,0 m (wysokość) x 0,18 m (grubość). Tylna, wewnętrzna ściana kolektora wyłożona była izolacją z wełny mineralnej o grubości 50 mm. Na jej powierzchni znajdował się płaski absorber wykonany z blachy aluminiowej o grubości 0,5 mm pokryty cienką warstwą czarnej farby. Ścianki boczne, górna oraz dolna kolektora były wyłożone warstwą izolacyjną z wełny mineralnej grubości 20 mm. Transparentne przykrycie kolektora wykonano ze szkła solarnego o grubości 3,2 mm. Wlot powietrza do wnętrza kolektora, oraz jego wylot, odbywał się w sposób naturalny kanałami rurowymi o średnicy d_{in} = 125 mm i długości 0,5 m każdy. Osie kanałów dolotowego i wylotowego umieszczono w połowie szerokości kolektora 110 mm od dolnej i górnej jego krawędzi.

Konstrukcja przedstawiona na rysunku 7a służyła do przeprowadzenia większości badań poznawczych, w tym, do wyznaczenia: wpływu natężenia promieniowania cieplnego na wzrost temperatury powietrza przepływającego przez kolektor, wpływu natężenia promieniowania cieplnego na natężenie przepływu powietrza przez kolektor, wpływ natężenia promieniowania cieplnego na wydajność cieplną kolektora, wpływu natężenia promieniowania cieplnego na sprawność energetyczną kolektora, wpływu odchylenia kolektora od pionu na parametry cieplno-przepływowe powietrza oraz sprawność energetyczną kolektora.

Prototypowe konstrukcje przedstawione na rysunkach 7b i 7c posiadały trzy dodatkowe sekcje ożebrowania (wysokości 0,5 m każda), z czego, w jednym przypadku fale ustawione były naprzemiennie, zaś w kolejnym fale tworzyły ciąg kanałów. Konstrukcje z rysunków 7b i 7c służyły do oceny możliwości poprawy sprawności energetycznej powietrznego kolektora słonecznego.

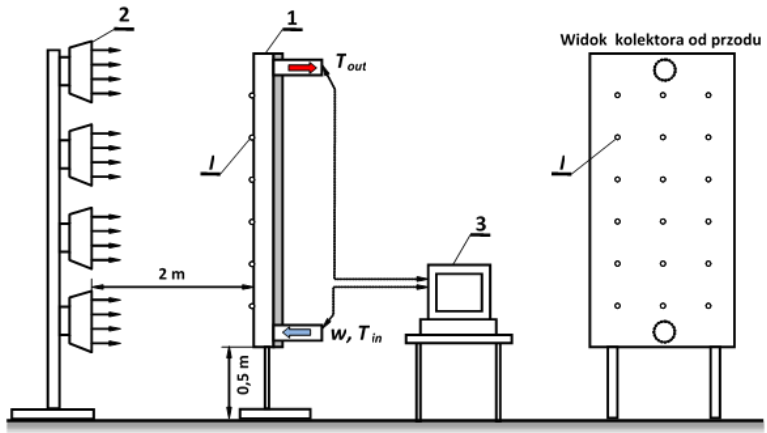


Rysunek 7. Widok badanych kolektorów: a) z płaskim absorberem, b) z ożebrowaniem naprzemiennym, c) z ożebrowaniem w kształcie podłużnych kanałów [opracowanie własne]

3.3. Stanowisko badawcze

Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 8. Podstawowym jego elementem był prototypowy powietrzny kolektor słoneczny bez ożebrowania ustawiony na konstrukcji nośnej. Kolektor pracował w pozycji pionowej. Odległość dolnej krawędzi kolektora od powierzchni podłogi wynosiła 0,5 m. W odległości 2 m od powierzchni czołowej umieszczono zespół promienników z możliwością regulacji ich natężenia promieniowania. Całkowite natężenie promieniowania docierające do powierzchni kolektora mierzone było za pomocą pyranometru CMP11 firmy Kipp & Zonen. Wartość natężenia promieniowania określono jako średnią arytmetyczną z 30 wartości lokalnych (I) promieniowania całkowitego mierzonych w punktach równomiernie rozmieszczonych na powierzchni czołowej kolektora (3 kolumny x 10 poziomów). Dokładność wyznaczenia średniego natężenia promieniowania wynosiła ± 4.33 W/m^2.

Temperaturę powietrza na wejściu do kanału wlotowego (T_{in}), temperaturę powietrza na wypływie z kanału wylotowego (T_{out}) oraz temperaturę otoczenia (T_{amb}) mierzono za pomocą indywidualnie wykonanych termopar typu K. Każda z termopar była indywidualnie cechowania (w zakresie 20-80^{0}C) względem wzorcowego termometru szklanego o działce elementarnej 0,02^{0}C. Błąd wskazań termopar nie przekraczał ±0,2 K. Wszystkie sygnały temperatury były archiwizowane za pomocą uniwersalnego 16 kanałowego rejestratora sygnałów elektrycznych Memograph RSG40 firmy Endress&Hauser. Uniwersalny charakter rejestratora umożliwiał przypisanie, indywidualnie dla każdego kanału, mierzonego sygnału elektrycznego (Ω, A, mA, V, mV) lub zainstalowanej aparatury pomiarowej (np.: termopara, termometr oporowy itp.). Wartość odczytu wielkości mierzonej w stanie ustalonym przyjmowano jako średnią z 300 odczytów dokonanych w czasie 5 minut.



Rysunek 8. Schemat stanowiska badawczego: 1 – powietrzny kolektor słoneczny, 2 – zespół promienników, 3 – system akwizycji danych, I – punkt pomiaru natężenia promieniowania [opracowanie własne]

Prędkość przepływu powietrza (w) mierzono na wejściu do kanału wlotowego za pomocą termoanemometru Testo 524. Jako prędkość powietrza na wlocie przyjmowano średnią ważoną z 5 punktów pomiarowych (w osi pionowej i poziomej). Dokładność pojedynczego pomiaru prędkości wynosiła ±0,03 m/s + 5% mierzonej wartości. Stąd maksymalny błąd pomiaru prędkości wynosił ±0,08 m/s.

3.4. Metodyka badań

Badania eksperymentalne realizowano według następującej procedury. Po uruchomieniu przyrządów pomiarowych oraz rejestratora ustawiano, za pomocą autotransformatora, wartość natężenia prądu doprowadzanego do zespołu promienników. Maksymalna, możliwa do uzyskania w warunkach laboratoryjnych, wartość natężenia promieniowania, w pierwszej fazie badań wynosiła I = 550 W/m^2. Podczas kolejnych badań (badania kolektorów ożebrowanych) dołożenie dodatkowych promienników pozwoliło na uzyskanie maksymalnej wartości natężenia promieniowania I = 1000 W/m^2. Za każdym razem, układ badawczy pozostawiano do uzyskania stanu ustalonego. Sygnałem uzyskania stanu ustalonego był brak zmian we wskazaniach temperatury powietrza na wylocie z kolektora. Proces stabilizacji wynosił około 20 min, co odpowiadało czasom zawartym w pracach [4, 5]. Po uzyskaniu stanu ustalonego rejestrowano rozkład natężenia promieniowania na powierzchni czołowej kolektora słonecznego, temperaturę powietrza w otoczeniu, na wlocie i wylocie kanałów powietrznych oraz prędkość powietrza na wejściu do kanału wlotowego kolektora. Wyniki (wartości chwilowe) zapisane w pamięci rejestratora posłużyły do wyznaczenia wartości średnich, przeprowadzenia na ich podstawie obliczeń oraz wykonania charakterystyk.

Wzrost temperatury powietrza ΔT przepływającego przez kolektor wyznaczono jako różnicę pomiędzy temperaturą powietrza opuszczającego kanał wylotowy T_{out}, a temperaturą powietrza na wejściu do kanału wlotowego kolektora T_{in}. Należy zauważyć, że temperatura powietrza na wejściu do kolektora była stała i odpowiadała temperaturze otoczenia T_{amb}, stąd $T_{in} = T_{amb}$ = 20°C ±2°C.

$$\Delta T = T_{out} - T_{in} = T_{out} - T_{amb}. \quad (1)$$

Objętościowe natężenie przepływu powietrza przez kolektor obliczono na podstawie wielkości zmierzonych w kanale dolotowym z równania:

$$\dot{V} = w \cdot (0{,}25 \cdot \pi \cdot d_{in}^2), \quad (2)$$

gdzie: w – średnia prędkość powietrza w kanale dolotowym, d_{in} – średnica wewnętrzna kanału dolotowego.

Wydajność cieplną kolektora słonecznego wyznaczono na podstawie zależności:

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = \rho \cdot \dot{V} \cdot c_p \cdot \Delta T, \quad (3)$$

gdzie: ρ – gęstość powietrza w temperaturze wlotowej, c_p – ciepło właściwe powietrza w temperaturze otoczenia.

Sprawność energetyczną pasywnego kolektora powietrznego określono wykorzystując równanie:

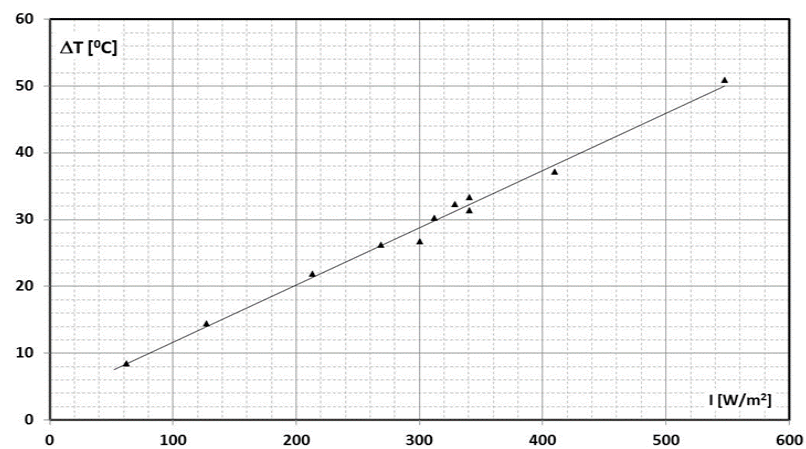
$$\eta = \frac{Q}{I \cdot A} = \frac{\rho \cdot \dot{V} \cdot c_p \cdot \Delta T}{I \cdot A}, \quad (4)$$

gdzie: I – średnia wartość całkowitego natężenia promieniowania docierającego do powierzchni czołowej kolektora, A – powierzchnia absorbera.

Sposób obróbki statystycznej wyników pomiaru oraz wyznaczenia błędu wielkości złożonych szczegółowo opisano w pracy autora [6]. Na tej podstawie stwierdzono, że błąd wyznaczenia sprawności badanego powietrznego kolektora słonecznego wynosi ±3,4%

4. Wyniki badań

Na rysunku 9 przedstawiono wzrost temperatury powietrza ΔT (wzór 1) przepływającego przez kolektor bez ożebrowania w funkcji natężenia promieniowania I. Ze wzrostem wartości natężenia promieniowania proporcjonalnie wzrasta wartość przyrostu temperatury powietrza przepływającego przez kolektor.

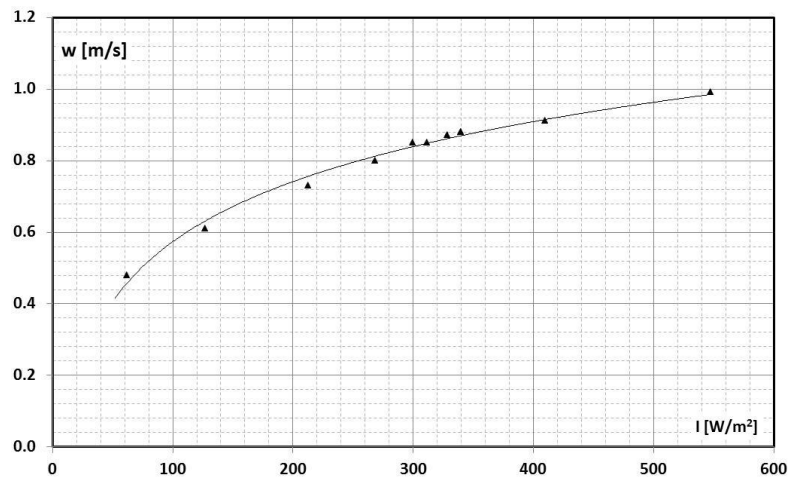


Rysunek 9. Przyrost temperatury powietrza ΔT przepływającego przez kolektor od średniego natężenia promieniowania I [opracowanie własne]

Prostoliniowy charakter zmian ΔT obserwuje się zarówno podczas pracy kolektora powietrznego w warunkach wymuszonego przepływu [7, 8], jak i podczas konwekcji swobodnej [9].

Podczas badań eksperymentalnych prototypowego, pasywnego kolektora powietrznego mierzono średnią prędkość przepływu powietrza. Ruch powietrza wywołany był konwekcją swobodną w szczelinie powietrznej utworzonej przez pokrycie kolektora i absorber. Ze względy na stałą temperaturę zasysanego powietrza, równą temperaturze otoczenia, prędkość powietrza mierzono wyłącznie na wlocie do kolektora. Umożliwiło to przyjęcie do obliczeń (wzór 3) jednej wartości ciepła właściwego i gęstości powietrza. Dodatkowo nie była wymagana kompensacja temperaturowa wskazań termoanemometru mierzącego prędkość przepływu powietrza.

Na rysunku 10 przedstawiono wyniki pomiarów prędkości powietrza przepływającego przez kolektor w zależności od natężenia promieniowania. Zauważa się, że ze wzrostem wartości natężenia promieniowani wzrasta średnia prędkość przepływu powietrza. Krzywa $w = f(I)$ ma przebieg logarytmiczny. Zwiększanie wartości natężenia promieniowania powoduje coraz mniejszy przyrost średniej prędkości przepływu powietrza. Maksymalna, średnia prędkość przepływu powietrza przez kolektor, w warunkach eksperymentu, wynosiła około w = 1,0 m/s.

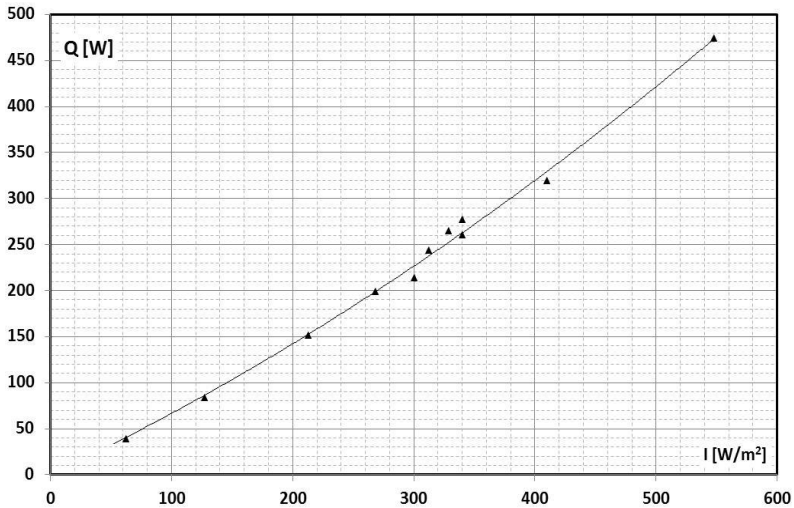


Rysunek 10. Prędkość powietrza *w* na wejściu do kanału wlotowego kolektora w zależności od natężenia promieniowania *I* [opracowanie własne]

Na podstawie zmierzonej wartości średniej prędkości w obliczono z zależności (2) objętościowe natężenie przepływu powietrza. Maksymalne natężenie przepływu powietrza przez pasywny kolektor wynosiło $\dot{V} = 28\ m^3/h$. Jest to wartość prawie dziesięciokrotnie niższa od uzyskanej, przy analogicznym strumieniu ciepła, przez autorów [10]. Różnica wynika z faktu, że w pracy [10] przestrzeń między powierzchnią absorbera, a przeszkleniem była otwarta (brak obudowy zewnętrznej i kanałów dolotowych wlotowego i wylotowego).

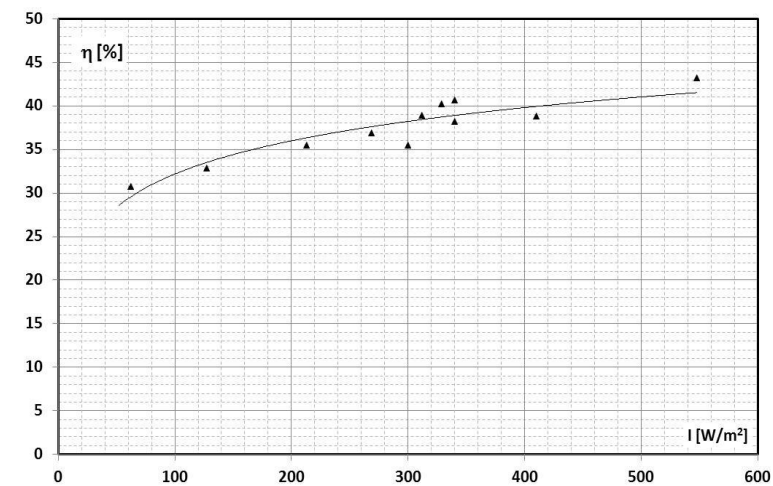
Na rysunku 11 przedstawiono wpływ natężenia promieniowania *I* na wydajność cieplną kolektora określoną zależnością (3). W przypadku pasywnego kolektora sło-

necznego wzrost natężenia promieniowania pociąga za sobą proporcjonalny przyrost temperatury czynnika oraz dodatkowy wzrost prędkości jego przepływu. Tłumaczy to paraboliczny kształt krzywej obserwowanej na rysunku 11.



Rysunek 11. Wydajność cieplna Q kolektora od średniego natężenia promieniowania I [opracowanie własne]

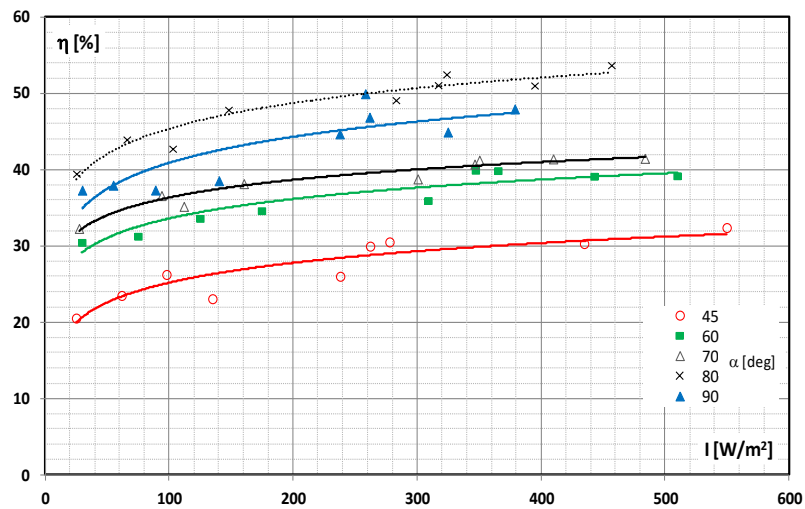
Na rysunku 12 przedstawiono wyniki obliczeń sprawności energetycznej kolektora (wzór 4) dla różnych wartości natężenia promieniowania I. Z równania wynika, że ze wzrostem natężenia promieniowania wzrasta sprawność energetyczna kolektora. Maksymalna, uzyskana w warunkach eksperymentu, sprawność wynosiła około 43% dla $I = 550$ W/m^2. W badaniach [11], z wykorzystaniem kolektora słonecznego z płaskim absorberem pracującym w warunkach konwekcji wymuszonej ($G = 0{,}040$ kg/(m^{2}s)), uzyskano porównywalną sprawność konwersji energii. Wynosiła ona $\eta = 35\%$ przy $I = 300$ W/m^2.



Rysunek 12. Wpływ natężenia promieniowania I na efektywność cieplną η kolektora [opracowanie własne]

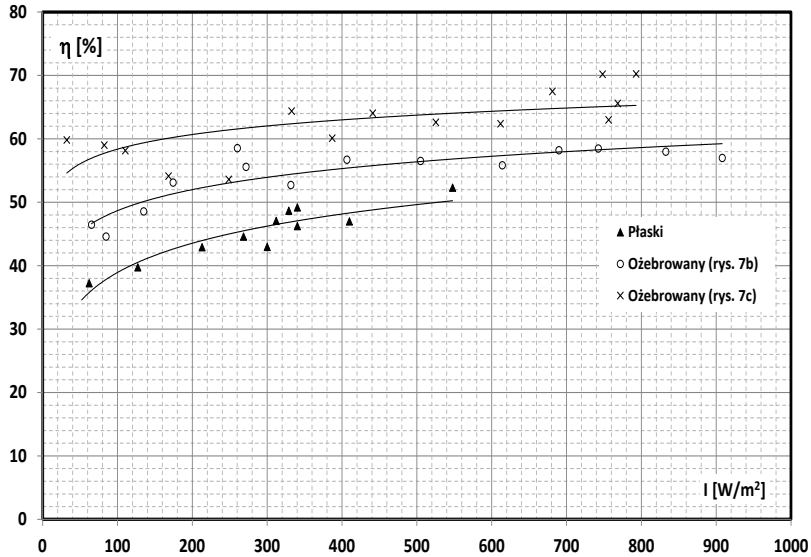
Kolejne badania zrealizowano przy innym stałym położeniu promienników. Nie znajdowały się one w pozycji pionowej, jak na rysunku 8, lecz były odchylone od pionu o kąt $\alpha = 45^0$. Konstrukcja stanowiska umożliwiała obrót kolektora w połowie jego wysokości. Gdy kolektor był odchylony od pionu o wartość 45^0 jego powierzchnia czołowa znajdowała się równolegle do promienników. Odległość między zespołem promienników, a kolektorem wynosiła wówczas 3 m.

Wpływ odchylenia kolektora od pionu na wartość jego sprawności energetycznej przedstawiono na rysunku 13. Zauważa się, że najwyższą sprawność energetyczną kolektora uzyskano, gdy wartość kąta między obudową a podłożem wynosiła 80^0. Przyczyny upatruje się w przepływie powietrza wewnątrz przestrzeni kolektora. Obecna szerokość szczeliny powietrznej wewnątrz kolektora umożliwia powstawanie zawirowań i wynikające stąd opory przepływu. Intensywność ruchów turbulentnych maleje przy odchyleniu kolektora od pionu o 10^0. Potwierdzają to wyniki własnych symulacji CFD (dotychczas nie prezentowane).



Rysunek 13. Wpływ natężenia promieniowania I na sprawność energetyczną η kolektora [opracowanie własne]

Wpływ rodzaju powierzchni absorbera na sprawność energetyczną prototypowych, powietrznych kolektorów słonecznych przedstawiono na rysunek 14. Zauważa się, że wraz ze wzrostem natężenia promieniowania cieplnego wzrasta sprawność energetyczna każdego z typów kolektora. Uzyskane charakterystyki wydają się być równoległe do siebie, przy czym wyraźny jest wpływ ożebrowania na sprawność kolektora. Zastosowanie ożebrowania powoduje wzrost sprawności kolektora. Najwyższą uzyskuje się dla konstrukcji, w której ożebrowanie tworzy podłużne kanały wzdłuż całej wysokości ożebrowania (rys. 7c). Powstałe kanały tworzą przestrzenie, wewnątrz których powietrze przepływa bez możliwości turbulizacji, która mogłaby zakłócić przepływ w pozostałej przestrzeni kolektora.



Rysunek 14. Wpływ konstrukcji kolektora na jego sprawność energetyczną [opracowanie własne]

5. Podsumowanie i wnioski

Wyniki badań cieczowych, płaskich kolektorów słonecznych są w literaturze często publikowane. Podane są także zależności pozwalające określić charakterystyki cieplne tego typu kolektorów. Liczba publikacji dotyczących płaskich powietrznych kolektorów słonecznych jest znacznie mniejsza, co w znacznym stopniu utrudnia właściwe ich projektowanie i zastosowanie.

Przedstawione w opracowaniu wyniki własnych badań eksperymentalnych charakterystyk płaskiego, powietrznego kolektora słonecznego pozwalają zwrócić uwagę na problematykę związaną z wykorzystaniem solarnych elementów pasywnych. Badania wykonano na laboratoryjnym stanowisku pomiarowym z wykorzystaniem trzech prototypowych konstrukcji. Opracowano podstawowe charakterystyki eksploatacyjne badanych kolektorów.

Na podstawie pomiarów określono przyrost temperatury powietrza w przepływie przez każdy kolektor, moc cieplną kolektora i w efekcie sprawność energetyczną. Badania przeprowadzono w zakresie natężenia promieniowania $I = 0 \div 1000$ W/m^2. Kolektory pracowały wyłącznie w warunkach konwekcji swobodnej. Dla natężenia promieniowania $I = 550$ W/m^2 prędkość przepływu powietrza wynosiła $w = 1{,}0$ m/s dla kolektora płaskiego, co pozwoliło uzyskać jego moc cieplną $Q = 474$ W przy sprawności $\eta = 43\%$. Wprowadzenie ożebrowania poprawia sprawność powietrznego kolektora słonecznego. Sprawność kolektora wzrosła, dla każdego natężenia promieniowania, o 10% gdy posiadał on absorber wyposażony w naprzemiennie ustawione ożebrowanie, oraz o kolejne 10%, gdy ożebrowanie tworzyło podłużne kanały przez całą wysokość kolektora. Sprawność badanej konstrukcji kolektora z płaskim absorberem może wzrosnąć o kilka procent, gdy zostanie on górą, odchylony od piony o kąt około 10^0.

Literatura

1. PN EN ISO 9488, Solar Energy – Vocabulary.
2. Kumar Singh A., Samsher A., *Analytical study of evacuated annulus tube collector assisted solar desaltification system: A review*, Solar Energy, 207, 2020, s. 1404-1426.
3. Lewandowski W.M., *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, WNT, Warszawa, 2007.
4. Tanaka H., Nakatake Y., Tanaka M., *Indoor experiments of the vertical multiple-effect diffusion-type solar still coupled with a heat-pipe solar collector*, Desalination, 177, 2005, s. 291-302.
5. Maneewan S., Khedari J., Zeghmati B. Hirunlabh, J. Eakburanawat J., *Experimental investigation on generated power of thermoelectric roof solar collector*, [w:] *International Conference Thermoelectric*, 2003, s. 574-577.
6. Fiuk J.J., Dutkowski K., Piątkowski P., *An experimental study on the thermal efficiency of a passive solar air collector*, Engineering Transactions, 65, 2017, s. 251-268.
7. Karim M.A., Hawlader M.N.A., *Performance evaluation of a v-groove solar air collector for drying applications*, Applied Thermal Engineering, 26, 2006, s. 121-130.
8. Karim M.A., Hawlader M.N.A., *Development of solar air collectors for drying applications*, Energy Conversion Management, 45, 2004, s. 329-344.
9. Toure S., *Characteristic temperatures in a natural convection solar air heater*, Energy Conversion Management, 42, 2001, s. 1157-1168.
10. Ryan D., Burek S.A.M., *Experimental study of the influence of collector height on the steady state performance of a passive solar air heater*, Solar Energy, 84, 2010, s. 1676-1684.
11. El-Sawi A.M., Wifi A.S., Younan M.Y., Elsayed E.A., Basily B.B., *Application of folded sheet metal in flat bed solar air collectors*, Applied Thermal Engineering, 30, 2010, s. 864-871.

Powietrzny kolektor słoneczny – niedoceniany element regulacji komfortu cieplnego w pomieszczeniach

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych własnych, prototypowych konstrukcji powietrznych kolektorów słonecznych. Badano wpływ ożebrowania oraz natężenia promieniowania na sprawność kolektora. Badano proces konwersji energii w kolektorze z płaskim absorberem oraz o rozwiniętej, falowanej powierzchni absorbera (dwa typy). Badania realizowano w warunkach laboratoryjnych w zakresie natężenia promieniowania $I = 0 \div 1000$ W/m^2. Kolektory pracowały w warunkach konwekcji swobodnej. Dla natężenia promieniowania $I = 550$ W/m^2 prędkość przepływu powietrza wynosiła $w = 1{,}0$ m/s dla kolektora płaskiego, co pozwoliło uzyskać moc cieplną $Q = 474$ W przy sprawności $\eta = 43\%$. Wprowadzenie ożebrowania poprawia sprawność powietrznego kolektora słonecznego. Sprawność kolektora wzrosła, dla każdego natężenia promieniowania, o 10% gdy posiadał on absorber wyposażony w naprzemiennie ustawione ożebrowanie, oraz o kolejne 10%, gdy ożebrowanie tworzyło podłużne kanały przez całą wysokość kolektora.

Słowa kluczowe: powietrzny kolektor słoneczny, badania eksperymentalne, sprawność energetyczna

Air solar collector – an underestimated element of regulating thermal comfort in rooms

Abstract

The paper presents the results of own experimental research, prototype structures of air solar collectors. The influence of the ribbing and radiation intensity on the collector efficiency was investigated. The process of energy conversion in a collector with a flat absorber and with a developed, undulating absorber surface (two types) was investigated. The tests were carried out in laboratory conditions within the radiation intensity $I = 0 \div 1000$ W/m^2. The collectors were operated under free convection conditions. For the radiation intensity, $I = 550$ W/m^2, the airflow velocity was $w = 1.0$ m/s for a flat collector, which allowed to obtain a thermal power $Q = 474$ W with an efficiency of $\eta = 43\%$. The introduction of the fins improves the efficiency of the solar air collector. The efficiency of the collector increased, for each irradiance, by 10% when it had an absorber equipped with alternating fins, and by another 10% when the fins formed longitudinal channels through the entire height of the collector.

Keywords: air solar collector, experimental research, energy efficiency

Łukasz Skroński[1], Jerzy Winczek[2], Marek Gucwa[3]

Objętościowe ujęcie energii spawania

1. Wprowadzenie

Spawaniem nazywamy proces, w wyniku którego następuje trwałe zespolenie, charakteryzujące się ciągłością fizyczną łączonych elementów. Napawanie ma na celu naniesienie na metal podłoża danego elementu warstwy wierzchniej o odpowiednich właściwościach. Pod pojęciem spoiny rozumie się, zgodnie z terminologią spawalniczą i odpowiednimi normami, połączenie dwóch elementów powstałe na skutek procesu spawania. Napoinę natomiast należy rozumieć jako warstwę wierzchnią powierzchni elementu naniesioną metodami spawalniczymi. Zarówno podczas napawania, jak i spawania, wprowadzana jest do elementów pewna ilość ciepła. Ze względu na to, iż wykonywanie spoin oraz napoin odbywa się tą samą techniką spawalniczą, ilość ciepła, która jest wprowadzana do materiału, jest obliczana w ten sam sposób zarówno dla napoin, jak i spoin.

Od dziesięcioleci w spawalnictwie powszechnie stosowane jest pojęcie energii liniowej spawania, która ma być miarą ilości ciepła dostarczanego do złącza spawanego. W instrukcjach technologicznych spawania wymagane jest określenie energii liniowej spawania dla danego procesu, w których stosuje się wzór do obliczania energii liniowej E_l spawania łukowego [1]:

$$E_l = \eta \frac{UI}{v} \quad \left[\frac{J}{mm}\right] \tag{1}$$

gdzie: I – średnia wartość natężenia prądu spawania dla prądu jednokierunkowego lub wartość skuteczna natężenia prądu spawania dla prądu przemiennego, U – średnia wartość napięcia łuku dla prądu jednokierunkowego lub efektywna wartość napięcia łuku dla prądu przemiennego, v – prędkość spawania, η – sprawność spawania.

W miarę poznawania natury zjawisk zachodzących w procesach spawalniczych oraz wyników badań analizujących wpływ różnych czynników na przebieg tych procesów, w tym również na transport ciepła do połączenia spawanego, zaczęły pojawiać się coraz większe wątpliwości co do adekwatności powszechnie stosowanego wzoru (1) w odniesieniu do rzeczywistej ilości ciepła wprowadzanego do połączenia spawanego. Pod koniec ubiegłego wieku Loos [2] stwierdził, że wartości energii liniowej spawania (rzeczywistej ilości ciepła wprowadzanego do spoiny) nie uwzględnia rzeczywistego wpływu natężenia prądu. Z kolei Kensik [3] odniósł się do szacowania energii rzeczywistej łuku spawalniczego. Zwrócił uwagę, że szczególnie w przypadku

[1] lukasz.skronski@itm.pcz.pl, Katedra Technologii i Automatyzacji, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Politechnika Częstochowska.
[2] winczek@imipkm.pcz.czest.pl, Katedra Technologii i Automatyzacji, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Politechnika Częstochowska.
[3] mgucwa@spaw.pcz.pl, Katedra Technologii i Automatyzacji, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Politechnika Częstochowska.

łuku impulsowego określenie rzeczywistej jego mocy jest trudne. Wykazał, że nie uwzględnianie współczynnika mocy λ_s określanego stosunkiem mocy rzeczywistej do mocy pozornej [4-7] we wzorze na energię linową spawania może prowadzić do błędów 20-25%. Goldak i in. [8] również podkreślili, że energia liniowa spawania nie charakteryzuje faktycznej ilości ciepła wprowadzanej do spoiny. Kudła i Wojsyk w [9] wyspecyfikowali czynniki wpływające na ilość ciepła wprowadzanego do złącza spawanego, dzieląc je na trzy grupy:

a) sposób wprowadzenia ciepła:
- geometria źródła ciepła;
- biegunowość prądu;
- przebieg prądu (stały, impulsowy);
- rodzaj transportu materiału;
- rodzaj ściegu (prosty, zakosowy);

b) warunki technika spawania:
- temperatura otoczenia;
- temperatura wstępnego podgrzewania materiału i stopiwa;
- rodzaj ukosowania;
- pozycja i kierunek spawania;
- długość wysuniętego odcinka elektrody;

c) materiały:
- skład chemiczny materiału stopiwa;
- rodzaj gazu ochronnego lub topnika;
- skład chemiczny materiału podstawowego;
- grubość (kształt) złącza;
- skład chemiczny aktywatora;
- średnica i kształt elektrody.

Brak adekwatności wzoru (1) do rzeczywistego wkładu ciepła do połączenia spawanego jest dostrzegany przez coraz szersze grono badaczy [10-15].

W pracy [1] zaproponowano wzór energię liniową spawania uwzględniającą powyższe czynniki:

$$E_l = k_1 \cdot k_2 \cdot .... k_n \frac{P_r}{v} \tag{2}$$

gdzie: k_1 …. k_n – czynniki materiałowe i technologiczne oraz związane ze stosowanym źródłem ciepła, P_r – rzeczywista moc źródła ciepła, v – liniowa prędkość spawana.

Eksperymentalne określenie tak wielu współczynników k_1 …. k_n (jak słusznie zauważają autorzy koncepcji) w praktyce jest bardzo trudne, a być może nawet niemożliwe wskutek opracowywania nowych materiałów i metod spawania. Dlatego też w tej samej pracy [1] przedstawiono propozycję szacowania energii linowej spawania na podstawie poprzecznego pola powierzchni spoin, nie proponując jednak żadnego wzoru. W pracy [16] przedstawiono liczne przykłady, dla których dokonano analizy porównawczej pól poprzecznych spoin i napoin wykonanych różnymi metodami spawalniczymi i odpowiadającym im liniowym energiom spawania. W konkluzji

wykazano brak korelacji pomiędzy energią liniową spawania liczoną według wzoru (1) a polami przetopionego obszaru spoiny (napoiny).

Wielkość pola przekroju porzecznego spoiny nie zależy tylko od ilości ciepła wprowadzonego do złącza (czynników wymienionych powyżej). Zależy również od własności cieplnych (m.in. współczynnika przewodzenia ciepła, ciepła właściwego) oraz wymiarów spawanego przedmiotu (materiału), co ma wpływ na przepływ ciepła. Niemniej poprzeczne pole powierzchni może być wskaźnikiem użytecznym w szacowaniu rzeczywistego wkładu ciepła do spoiny.

Celem pracy jest:

- wykazanie różnicy w wartościach energii objętościowej dla napoin wykonanych z tymi samymi parametrami technologicznymi i identycznymi wartościami energii liniowej;
- uzasadnienie stosowania metody objętościowej dla spoin i zgrzein punktowych, w odniesieniu do których wzór na energię liniową nie znajduje zastosowania;
- ocena różnicy w wartościach pól powierzchni przekrojów napoin obliczanych z wykorzystaniem wzorów analitycznych i zmierzonych doświadczalnie.

Zaprezentowano metodę pomiaru bezpośredniego pola powierzchni przekroju poprzecznego spoin na zgładzie makro z wykorzystaniem mikroskopu i specjalistycznego oprogramowania. Zaproponowano metodykę obliczania tych pól w oparciu o uproszczone wzory do obliczania pól przekrojów spoin na podstawie szerokości i wysokości nadlewu oraz głębokości wtopienia. Analizę porównawczą wartości energii objętościowej przeprowadzono na podstawie wyników badań doświadczalnych (zgładów metalograficznych) wykonanych przez zespół prof. Łabanowskiego z Politechniki Gdańskiej.

2. Objętościowe ujęcie ilości ciepła wprowadzonego do spoiny

Zgodnie z sugestiami Wojsyka i in. zawartymi w pracach [1, 16] dotyczącymi uznania powierzchni przekroju poprzecznego spoiny (zgrzeiny) za wielkość adekwatną do ilości ciepła wprowadzanego do połączenia spawanego, po podzieleniu energii liniowej spawania przez pole powierzchni przekroju spoiny otrzymujemy:

$$E_{vw} = \frac{E_l}{A_w} \quad \left[\frac{J}{mm^3}\right] \tag{3}$$

gdzie: E_{vw} – objętościowa energia spawania, A_w – pole przekroju poprzecznego spoiny (napoiny).

Objętościowa energia spawania jest więc ilością ciepła wprowadzanego do złącza spawanego na jednostkę objętości (wkładem ciepła na jednostkę objętości). Po wstawieniu do wzoru (3) wyrażenia określającego energię liniową spawania zgodnie ze wzorem (1) otrzymujemy [17]:

$$E_{vw} = \frac{\eta UI}{A_w v} \quad \left[\frac{J}{mm^3}\right] \tag{4}$$

Z kolei uwzględniając postulaty sformułowane w [3-6, 9] oraz normę [18] po wprowadzeniu rzeczywistej energii łuku elektrycznego, wzór (4) przyjmie postać:

$$E_{vw} = \eta \frac{E_a}{vA_w} \quad \left[\frac{J}{mm^3}\right] \tag{5}$$

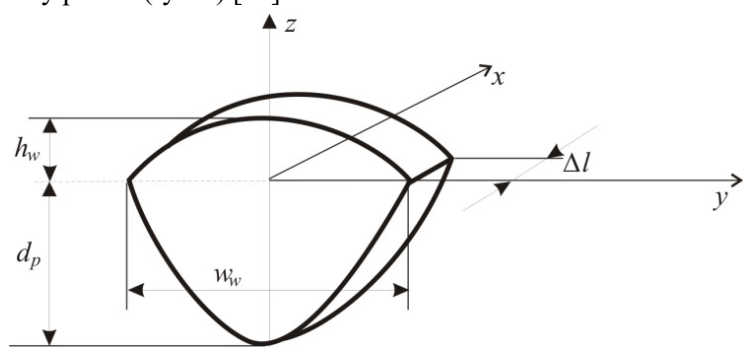
gdzie: E_a – rzeczywista energia łuku elektrycznego.

O ile energię liniową spawania można określić przed rozpoczęciem procesu, to wyznaczenie objętościowej energii spawania wymaga wykonaniu spoiny i zgładu metalograficznego i analizy makro w celu zwymiarowania przekroju strefy przetopienia (wtopienia i nadlewu).

Pomiaru pola obszaru przetopienia można dokonać za pomocą mikroskopu i specjalistycznego oprogramowania (np. mikroskopu metalograficznego Olympus GX51 z programem Stream). W przypadku typowych kształtów strefy przetopienia można skorzystać z metody analitycznej opartej na charakterystycznych wymiarach spoiny (napoiny) takich, jak wysokość i szerokość nadlewu oraz głębokość wtopienia.

2.1. Spoina (napoina) o regularnym kształcie parabolicznym lica i linii wtopienia

Dla spoiny o regularnym kształcie lico spoiny (napoiny) i linię wtopienia można opisać parabolą [19]. Wówczas funkcje opisujące powierzchnię spoiny i linię wtopienia będą miały postać (rys. 1) [20]:



Rysunek 1. Charakterystyczne wymiary spoiny: h_w – wysokość nadlewu, w_w – szerokość, d_p – głębokość wtopienia, Δl – długość spoiny wykonanej w ciągu 1 s [20]

- lico spoiny:

$$z = -\frac{4h_w}{(w_w)^2} y^2 + h_w \tag{6}$$

- linia wtopienia:

$$z = \frac{4d_p}{(w_w)^2} y^2 - d_p \tag{7}$$

gdzie: h_w – wysokość spoiny, w_w – szerokość spoiny, d_p – głębokość wtopienia, Δl – długość spoiny wykonana w ciągu 1 s.

Pola przekroju spoiny ograniczone tymi krzywymi (nadlewu i wtopienia) określają następujące wzory:

- nadlew:

$$A_r = \frac{2}{3} h_w w_w \tag{8}$$

- obszar wtopienia:

$$A_f = \frac{2}{3} d_p w_w \tag{9}$$

Wówczas pole powierzchni całego obszary przetopienia wynosi:

$$A_w = A_r + A_f = \frac{2}{3}\left(h_w + d_p\right) w_w \tag{10}$$

a równanie (5) przyjmuje postać:

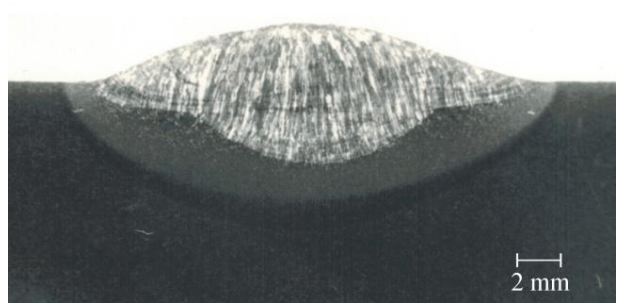
$$E_{vw} = \frac{3\eta E_a}{2v\left(h_w + d_p\right) w_w} \tag{11}$$

W przypadku napawania o minimalnej głębokości penetracji ($d_p = 0$) wzór przyjmuje uproszczoną postać:

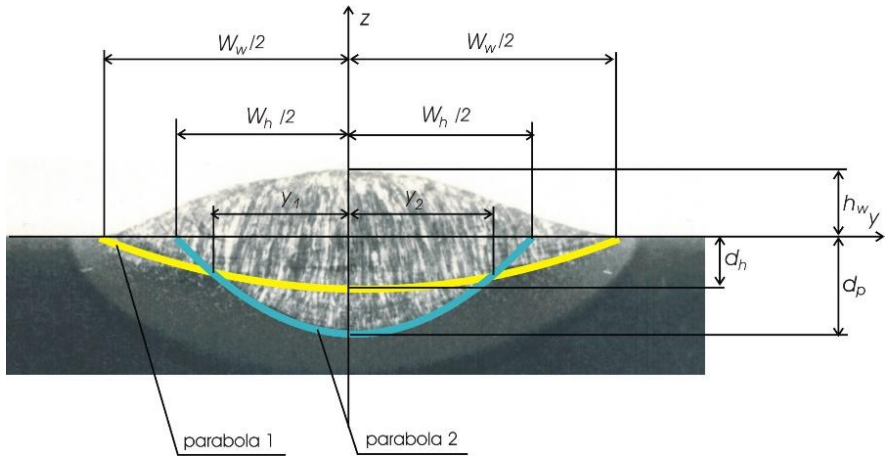
$$E_{vw} = \frac{3\eta E_a}{2v h_w w_w} \tag{12}$$

2.2. Spoina (napoina) o regularnym kształcie parabolicznym lica i nieregularnej linii wtopienia

W przypadku nieregularnego kształtu linii wtopienia przedstawionej na rysunku 2 [21] należy wyznaczyć hipotetyczne parabole (rys. 3):



Rysunek 2. Zgład metalograficzny napoiny [21]



Rysunek 3. Schemat obliczania pola przekroju spoiny o nieregularnym kształcie strefy przetopienia [opracowanie własne]

- parabola 1:

$$z_1 = \frac{4d_h}{(w_w)^2} y^2 - d_h \tag{13}$$

- parabola 2:

$$z_2 = \frac{4d_p}{(w_h)^2} y^2 - d_p \tag{14}$$

Współrzędne przecięcia parabol z_1 i z_2 są następujące:

$$y_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{d_p - d_h}{\frac{4d_p}{(w_h)^2} - \frac{4d_h}{(w_w)^2}}} \tag{15}$$

Pole powierzchni strefy wtopienia będzie równe:

$$A_f = 2\left[\int_{\frac{w_w}{2}}^{y_1}\left(\frac{4d_h}{(w_w)^2} y^2 - d_h\right)dy + \int_{y_1}^{0}\left(\frac{4d_p}{(w_h)^2} y^2 - d_p\right)dy\right] =$$

$$= \frac{2}{3} d_h w_w + \frac{2}{3}(d_p - d_h)\sqrt{\frac{(d_p - d_h)(w_h)^2 (w_w)^2}{d_p (w_w)^2 - d_h (w_h)^2}} \tag{16}$$

a całkowite pole powierzchni przekroju spoiny jest równe:

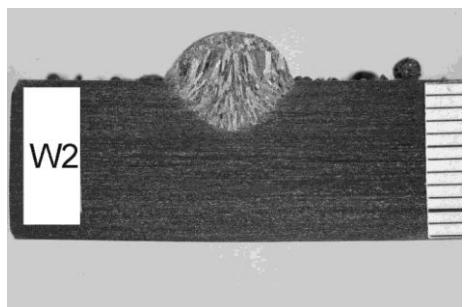
$$A_w = A_r + A_f = \frac{2}{3} h_w w_w + \frac{2}{3} d_h w_w + \frac{2}{3}\left(d_p - d_h\right)\sqrt{\frac{\left(d_p - d_h\right)\left(w_h\right)^2\left(w_w\right)^2}{d_p\left(w_w\right)^2 - d_h\left(w_h\right)^2}} \tag{17}$$

Wzór (5) przyjmie wtedy postać:

$$E_{vw} = \frac{3\eta E_a}{2v\left(h_w w_w + d_h w_w + \left(d_p - d_h\right)\sqrt{\frac{\left(d_p - d_h\right)\left(w_h\right)^2\left(w_w\right)^2}{d_p\left(w_w\right)^2 - d_h\left(w_h\right)^2}} \right)} \tag{18}$$

2.3. Spoiny (napoiny) o w przybliżeniu kołowym kształcie przekrojów nadlewu i wtopienia

Spotykane są również kształty napoiny uzyskane przez Łabanowskiego i in. [21] (rys. 4).



Rysunek 4. Zgład metalograficzny napoiny wykonanej pod wodą [21]

Zmierzone wymiary napoiny wynoszą: h_w 3,8 mm, d_p = 3,9 mm, a w_w = 9,5 mm. Ponieważ połowa szerokości napoiny wynosi 4,25 mm, stąd należy założyć, że przyjęcie kołowego kształtu przekroju może dać stosunkowo lepsze przybliżenie obliczonej wartości pola powierzchni przekroju napoiny. Przy czym, ze względu na różnice pomiędzy wartościami h_w, d_p i $w_w/2$ postuluje się wprowadzenie uśrednionych promieni półkola nadlewu r_{ra} i wtopienia r_{fa} wyrażonych wzorami:

$$r_{ra} = \frac{h_w + w_w/2}{2} \tag{19}$$

$$r_{fa} = \frac{d_p + w_2/2}{2} \tag{20}$$

Pole powierzchni nadlewu i wtopienia wyniosą odpowiednio:

$$A_r = \frac{\pi\left(r_{ra}\right)^2}{2} = \frac{\pi\left(2h_w + ww\right)^2}{32} \tag{21}$$

$$A_f = \frac{\pi\left(r_{fa}\right)^2}{2} = \frac{\pi\left(2d_p + ww\right)^2}{32} \tag{22}$$

a całkowite pole powierzchni przekroju napoiny zgodnie z (3) wyniesie:

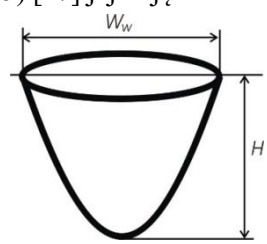
$$A_w = \frac{\pi}{32}\left[\left(2h_w + ww\right)^2 + \left(2d_p + ww\right)^2\right] \tag{23}$$

Wzór na objętościową energię spawania (5) przyjmuje wówczas postać:

$$E_{vw} = \frac{32\eta E_a}{\pi v\left[\left(2h_w + ww\right)^2 + \left(2d_p + ww\right)^2\right]} \tag{24}$$

2.4. Objętościowa energia spawania spoin i zgrzein punktowych

W spawaniu punktowym najczęściej spotykanymi są dwa kształty przetopienia: paraboloidalne i cylindryczne. Do obliczenia objętości roztopionego metalu (jądra) zgrzeiny korzystamy ze wzorów do obliczania objętości brył. W przypadku paraboloidalnego kształtu zgrzeiny (rys. 5) [17] jej objętość równa się:



Rysunek 5. Schemat paraboidalnej spoiny [17]

$$V_w = \frac{\pi\left(w_w\right)^2 H}{4} \tag{25}$$

gdzie: H – oznacza wysokość złącza (np. sumę grubości zgrzewanych blach) i średnicę w_w spoiny mierzoną na powierzchni spawanych elementów.

Wzór na objętościową energię spoiny paraboidalnej przyjmuje postać [17]:

$$E_{vw} = \eta\frac{4E_a H}{\pi\left(w_w\right)^2} \tag{26}$$

Dla walcowatego kształtu spoiny punktowej jej objętość jest równa:

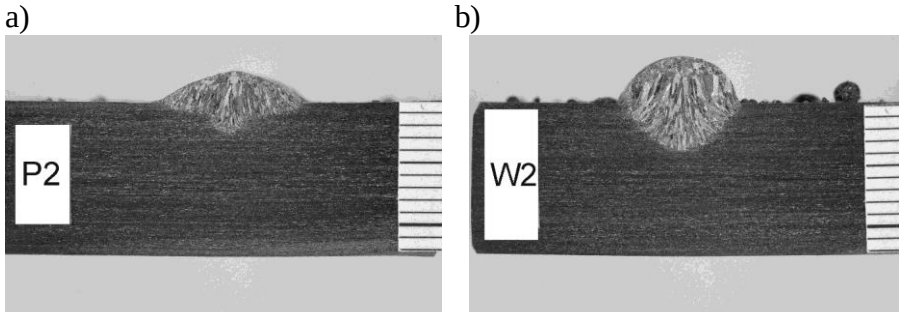
$$V_w = \pi\left(w_w\right)^2 H \tag{27}$$

a objętościowa energia spoiny walcowej wynosi [17]:

$$E_{vw} = \eta\frac{E_a H}{\pi\left(w_w\right)^2} \tag{28}$$

3. Przykład obliczeń

Analizie poddano przekroje poprzeczne dwóch napoin (rys. 6) [22] wykonane z taką samą energią liniową spawania wynoszącą 1,2 kJ/mm, ale wykonanych w różnych warunkach: w powietrzu (rys. 6a) i w wodzie za pomocą suchej komory (rys. 6b).



Rysunek 6. Przekroje napoin wykonanych: a) w powietrzu, b) pod wodą [22]

Metodą GMA napawano blachy stalowe duplex UR45N o grubości 12 mm drutem elektrodowym Avesta AWS A5.9-06 (ER2209) o średnicy 1,2 mm [23]. W napawaniu przyjęto następujące parametry technologiczne (tab. 1):

Tabela 1. Parametry napawania blachy stalowej duplex UR45N

Próbka	Środowisko	Napięcie (V)	Natężenie (A)	Prędkość spawania (mm/s)
P2	Powietrze	30,5	240	6,1
W2	Woda	32,5	224	6,1

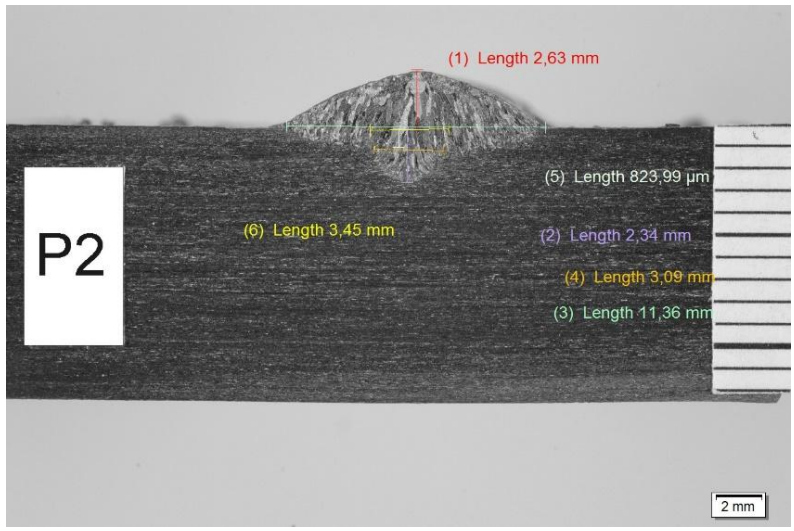
Źródło: [23]

Jak wynika z wartości energii liniowej, autorzy prac [22, 23] obliczyli ją, korzystając z wzoru rekomendowanego przez normę ASME IX QW-409.1 [24, 25]:

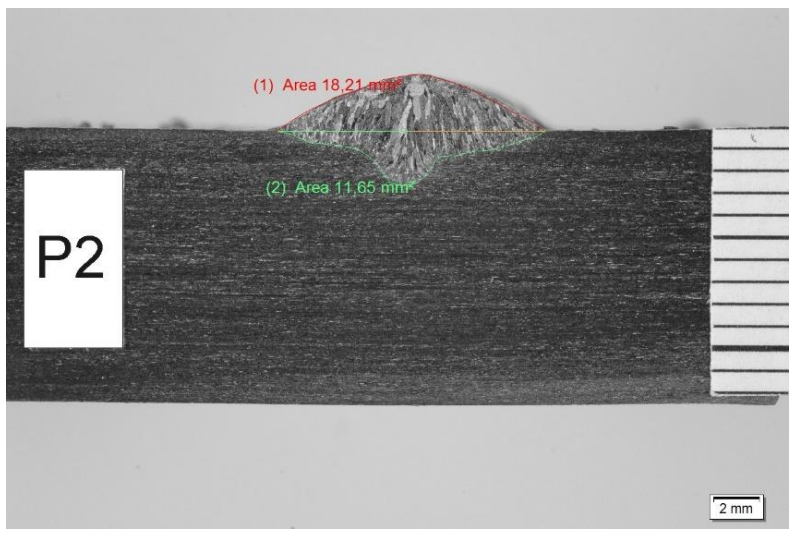
$$Heat\ Input = \frac{UI}{v} \tag{29}$$

gdzie: *Heat Input* (ang.) należy rozumieć jako energię liniową spawania. Obliczone wartości tej energii wykonanych napoin wynoszą odpowiednio 1200 J/mm (w powietrzu) i 1193 J/mm (w wodzie). Wybór wzoru (29) podyktowany był zapewne brakiem wartości współczynnika sprawności procesu spawania pod wodą. Takie podejście zastosowano również w tym przykładzie obliczeniowym.

Pomiarów geometrycznych napoin dokonano przy użyciu mikroskopu metalograficznego Olympus GX51 z programem Stream. Zdjęcia z pomiarów napoiny wykonanej w powietrzu przedstawiono na rysunkach 7 i 8.



Rysunek 7. Charakterystycznych wielkości geometryczne napoiny [opracowanie własne]



Rysunek 8. Pomiar pola powierzchni przekroju napoiny [opracowanie własne]

Tabela 2. Wymiary napoin

Próbka	Wysokość nadlewu hw (mm)	Głębokość wtopienia dp (mm)	Szerokość spoiny ww (mm)	y1,2	dh	wh
P2	2,63	2,34	11,36	3,09	0,82	3,45
W2	3,8	3,9	9,5	-	-	-

Źródło: Opracowanie własne

Wymiary charakterystyczne napoin zestawiono w tabeli 2. Wyniki pomiarów i obliczeń pól powierzchni i energii objętościowej zestawiono w tabeli 3. Obliczenia

pola powierzchni przekrojów próbek dokonano korzystając ze wzorów: (17) dla próbki napawanej w powietrzu *P2* i (10) dla próbki napawanej w wodzie *W2*. Wartości energii objętościowej określono odpowiednio za pomocą wzorów (18) dla *P2* i (11) dla *W2*. Wartość energii użytecznej obliczono zgodnie ze wzorem:

$$E_a = UI \tag{30}$$

Tabela 3. Wyniki obliczeń

Mierzona (obliczona wielkość	Próbka P2	Próbka W2
Rzeczywista moc łuku elektrycznego (W)	7320	7280
Rzeczywiste pole powierzchni przekroju napoiny – pomiar mikroskopowy (mm^2)	29,86	50,3
Pole powierzchni przekroju napoiny obliczone wg wzorów: (17) – dla próbki P2 i (23) – dla próbki W2 (mm^2)	28,99	52,29
Energia objętościowa obliczona na podstawie pola powierzchni zmierzonego mikroskopowo (J/mm^3)	40,19	23,27
Energia objętościowa obliczona na podstawie pola powierzchni określonego za pomocą wzorów: (18) – dla próbki P2 i (24) – dla próbki W2) (J/mm^3)	41,39	22,82

Źródło: Opracowanie własne

Różnica w obliczonych polach powierzchni przekroju napoiny dla próbki napawanej w powietrzu (P2) za pomocą mikroskopu i programu komputerowego a wzorem (17) wynosi 3%, podobna różnica występuje w wartościach energii objętościowej. W przypadku próbki napawanej pod wodą (W2) różnica pomiędzy wielkościami otrzymanymi metodą obliczeniową przy użyciu wzorów (17) oraz (18) a danymi uzyskanymi z programu komputerowego wynosi odpowiednio: 4% oraz 2%.

4. Podsumowanie i wnioski

Zaletą obecnej metody wyznaczania energii liniowej spawania jest prostota wzoru. Wadą metody, podkreślaną w wielu publikacjach, jest rosnąca rozbieżność między obliczonym wkładem ciepła na jednostkę długości a faktyczną energią wprowadzoną do złącza spawanego. Potwierdzają to różnice wartości energii objętościowej napawania dla analizowanego w artykule przykładu obliczeniowego. Uzyskane rezultaty wskazują, że wartości pola powierzchni przekrojów poprzecznych zgładów rozważanych w pracy napoin obliczone według zaproponowanych wzorów analitycznych oraz zmierzone doświadczalne są zbliżone. Konsekwentnie, podobną zgodność wykazują wartości energii objętościowej obliczonej z wykorzystaniem wyżej wspomnianych pól powierzchni przekrojów napoin.

Rozważane w pracy przykłady obliczeniowe napawania przy tej samej wartości energii linowej wykazały, że obliczone wartości energii objętościowej spawania różnią się znacznie (w przypadku napawania na powietrzu jest prawie dwukrotnie większa niż w przypadku napawania pod wodą). Spowodowane jest to zapewne zintensyfikowanym odprowadzaniem ciepła w środowisku wodnym. Wskazuje to na większą przydatność metody objętościowej do oceny rzeczywistej ilości ciepła wprowadzanego do napoiny.

Przedstawiona w artykule propozycja określania (w oparciu o objętość spoiny czy napoiny) ilości ciepła wprowadzanego do złącza spawanego wymaga co najmniej

jednej próby wykonania połączenia spawanego lub napoiny. Należy jednak zauważyć, że kwalifikacja technologii spawania wymaga takiego testu.

Zaproponowane wzory do uproszczonego obliczania pola powierzchni przekroju poprzecznego obszaru przetopienia spoiny (napoiny) nie wyczerpują oczekiwań i możliwości ich zastosowania. W pracy [16] przedstawiono liczne przykłady kształtów spoin i napoin przy zastosowaniu różnych metod spawania, które stanowią bogaty materiał badawczy do dalszych rozważań i formułowania wzorów do obliczania pola powierzchni przekroju obszaru przetopienia.

Docelowo określenie objętościowej energii spawania będzie wymagało użycia aplikacji komputerowej pozwalającej na szybki wybór kształtu przekroju spoiny (napoiny), w tym wybór kształtu linii lica i wtopienia lub obliczenia pola powierzchni przekroju za pomocą mikroskopu i specjalistycznego oprogramowania.

Proponowana objętościowa metoda obliczania ilości ciepła wprowadzanego do złącza spawanego może być bardziej realnym wskaźnikiem niż energia liniowa. Zaletą koncepcji obliczania energii objętościowej spawania jest możliwość jej zastosowania do spoin oraz zgrzein punktowych.

Literatura

1. Wojsyk K., Macherzyński M., *Określanie energii liniowej spawania metodą pomiaru pól poprzecznych spoin*, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 60(5), 2016, s. 75-79.
2. Loos P., *Europäischer Normentwurf über die Verarbeitung ferritischer Stähle*, Schweissen & Schneiden 45(1), 1993, s. 59-70.
3. Kensik R., *Ocena energii liniowej w procesach MIG/MAG*, Przegląd Spawalnictwa 78(9-10), 2006, s. 5-8.
4. Kensik R., Kudła K., *Analiza współczynnika mocy impulsowego łuku spawalniczego*, [w:] *Sympozjum Katedr i Zakładów Spawalnictwa Politechniki Śląskiej 1997*, s. 71-78.
5. Kudła K., *Określenie relacji między wielkościami opisowymi spawania impulsowego elektrodą topliwą w osłonie gazów ochronnych*, (Rozprawa doktorska) Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2003.
6. Kensik R., Kudła K., *Moc impulsowego łuku spawalniczego*, Przegląd Spawalnictwa 2000, 7-8, s. 5-8.
7. Kensik R., Nocuń A., *Analiza energii liniowej spawania łukowego*, [w:] *VII Konferencja Spawalnicza Energetyków*, Ślesin k. Konina, 5-7 wrzesień 1995, s. 43-52.
8. Goldak J., Asadi M., Alena R.G., *Why power per unit length of weld does not characterize a weld?*, Computational Materials Science 48, 2010, s. 390-401.
9. Kudła K., Wojsyk K., *Normowana energia liniowa a ilość ciepła wprowadzanego podczas spawania*. Przegląd Spawalnictwa 82(12), 2010, s. 21-25.
10. Liskevych O., Scotti A., *Determination of the gross heat input in arc welding*, Journal of Materials Processing Technology 225, 2015, s. 139-150.
11. Matkowski P., Nowacki J., Sajek A., *The influence of welding heat input on the microstructure of joints of S1100QL steel in one-pass welding*, Archives of Civil and Mechanical Engineering 16, 2016, s. 777-783.
12. Nasir N.S.M., Razab M.K.A.A., Ahmad M.I., Mamat S., *Influence of heat input on carbon steel microstructure*, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences 12, 2017, s. 2689-2697.
13. Ostromęcka M.,*Wpływ energii liniowej na wybrane aspekty jakości połączeń spawanych elektrodą nietopliwą z zastosowaniem prądu pulsującego,* Przegląd Spawalnictwa 89(6) 2017, s. 20-23.

14. Górka J., Janicki D., Fidali M., Jamrozik W., Thermographic *assessment of the HAZ properties and structure of thermomechanically treated steel*, International Journal Thermophysics 38, 2017, s. 183. DOI 10.1007/s10765-017-2320-9.
15. Sajek A., Nowacki J., *Comparative evaluation of various experimental and numerical simula-tion methods for determination of t8/5 cooling times in HPAW process weldments*, Archives of Civil and Mechanical Engineering 18, 2018, s. 583-591.
16. Wojsyk K., Macherzyński M., Lis R., *Ocena ilości ciepła wprowadzonego do spoin i napoin metodą pomiaru ich pól poprzecznych w konwencjonalnych i hybrydowych procesach spawalniczych*, Przegląd Spawalnictwa 89(10), 2017, s. 67-82.
17. Winczek J., Wojsyk K., *Nowa metoda obliczania ilości ciepła wprowadzanego do spoiny*, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 64(3), 2020, s. 19-22.
18. PN-NE 1011-1: 2001 *Wytyczne dotyczące spawania stali. Część 1. Ogólne wytyczne dotyczące spawania łukowego*.
19. Hrabe P., Choteborsky R., Navratilova M., *Influence of welding parameters on geometry of weld deposit bead*, Int. Conf. Economic Eng. Manufacturing Systems, Brasov, 26-27 November 2009, Regent, 10 3(27), 2019, s. 291-294.
20. Winczek J., *New approach to modeling of temperature field in surfaced steel elements.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 54, 2011, s. 4702-4709.
21. Winczek J., Ziobrowski P., *The modelling of the temperature field during surfacing by submerged arc welding using a bimodal heat source model*, Journal of Manufacturing and Industrial Engineering, 2015, 1-2, 462, s. 1-4, http://dx.doi.org/10.12776/mie.v14i1-2.462.
22. Łabanowski J., *Stale odporne na korozję*, Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2019.
23. Labanowski J., Fydrych D., Rogalski G., Samson K., *Underwater welding of Duplex stainless steel*, Solid State Phenomena 183, 2011, s. 101-106.
24. ASME IX QW-409. *Electrical characteristic* : 2010.
25. Melfi T. *New code requirements for calculating heat input*, Welding Journal 2010, 89(6), 2010, s. 61-63.

Objętościowe ujęcie energii spawania

Streszczenie
W pracy przedstawiono objętościowe podejście do szacowania energii spawania. Energia liniowa spawania jest powszechnie stosowaną miarą ilości ciepła dostarczanego do złącza spawanego. Klasyczna jej definicja opisuje wkład ciepła na jednostkę długości spawania jako ilość energii potrzebną do wytworzenia spoiny o jednostkowej długości. Autorzy wielu publikacji zauważają brak adekwatności stosowanego wzoru na energię liniową spawania w stosunku do rzeczywistej ilości ciepła wprowadzanego do złącza spawanego. Dlatego zaproponowano miarę ilości ciepła wprowadzanego do spoiny w odniesieniu do jej jednostkowej objętości, dzieląc energię liniową spawania przez pole powierzchni przekroju poprzecznego spoiny (napoiny). W odniesieniu do spawania punktowego jako miarę zaproponowano ilość energii potrzebnej do jej wykonania w odniesieniu do objętości spoiny traktowanej jako bryłę obrotową. Zaprezentowano metodę pomiaru bezpośredniego pola powierzchni przekroju poprzecznego spoin w zgładzie makro z wykorzystaniem mikroskopu i specjalistycznego oprogramowania. Zaproponowano metodykę obliczania tych pól w oparciu o uproszczone wzory do obliczania pól przekrojów spoin na podstawie szerokości i wysokości nadlewu oraz głębokości wtopienia. W odniesieniu do spoin punktowych przedstawiono wzory określające ich objętość. Rozważania zilustrowano przykładami obliczeń i analiz dla rzeczywistych połączeń spawanych. Przeprowadzono analizy porównawcze napoin wykonanych z takimi samymi parametrami technologicznymi, ale w różnych warunkach (np. na powietrzu i po wodą), wykazując przy tej samej wartości energii liniowej spawania różnice w wartościach pola powierzchni przekroju poprzecznego i objętościowej energii spawania. Zaproponowana metoda może być bardziej miarodajna w obliczaniu ilości ciepła wprowadzanego do złącza spawanego, a w niektórych przypadkach wskutek badań porównawczych może pomóc wyznaczaniu współczynnika sprawności spawania metody, np. pod wodą.
Słowa kluczowe: energia liniowa spawania, energia objętościowa spawania, strefa przetopienia

Volumetric description of welding energy

Abstract
The paper presents a volumetric approach to estimating welding energy. The linear energy of welding is a commonly used measure of the amount of heat supplied to a welded joint. Its classic definition describes the heat input per unit of welding length as the amount of energy needed to produce a weld of a unit length. The authors of many publications note the lack of adequacy of the applied formula for the linear energy of welding in relation to the actual amount of heat introduced into the welded joint. Therefore, a measure of the amount of heat introduced into the weld was proposed in relation to its unit volume by dividing the linear welding energy by the cross-sectional area of the weld (padding weld). With regard to spot welding, as a measure, the amount of energy needed to perform it was proposed in relation to the volume of the weld treated as a rotational solid. The method of measuring the direct cross-sectional area of welds in a macro sample with the use of a microscope and specialized software is presented. A methodology for calculating these fields was proposed based on simplified formulas for calculating the cross-sectional areas of welds based on the width and height of the riser and the depth of penetration. With regard to spot welds, the formulas determining their volume are presented. The considerations are illustrated with examples of calculations and analyzes for the actual welded joints. Comparative analyzes of welds made with the same technological parameters, but under different conditions (e.g. in air and in water) were carried out, showing differences in the values of the cross-sectional area and volumetric welding energy for the same value of linear welding energy. The proposed method may be more reliable in calculating the amount of heat introduced into the welded joint, and in some cases, as a result of comparative tests, it may help in determining the welding efficiency coefficient of the method, e.g. under water.
Keywords: heat input per length unit, heat input per volume unit, fusion zone

Patrycja Pokora[1], Malwina Sikora[2], Damian Wojcieszak[3]

Wpływ srebra na właściwości optyczne cienkowarstwowych powłok TiO_2

1. Wstęp

Świat w ostatnich latach dąży w bardzo wielu dziedzinach do jak największej minimalizacji wyspecjalizowanych urządzeń. Dlatego nanotechnologia cieszy się tak dużym zainteresowaniem, a zarazem jest jedną z najszybciej rozwijających się dziedzin nauki. Dotyczy ona wytwarzania i badania materiałów o rozmiarach elementów strukturalnych rzędu od 0,1 do 100 nm [1]. Do nanotechnologii zaliczyć można również metody ich wytwarzania oraz charakteryzacji [2].

Cienkie warstwy a przede wszystkim te o dużym poziomie przeźroczystości oraz nanokrystalicznej strukturze posiadają liczne zastosowania w optyce, fotonice oraz elektronice. Do wytworzenia tego typu powłok najczęściej stosuje się następujące matryce: SnO_2, ZnO_2, a także TiO_2. Dwutlenek tytanu występuje w trzech krystalicznych odmianach polimorficznych – w postaci rutylu, anatazu i brukitu [3]. Anataz i brukit mają strukturę metastabilną, natomiast rutyl jest stabilny termodynamicznie [4]. Domieszkowanie różnymi pierwiastkami (np. dodatek Ag) tlenków metali, powoduje modyfikację ich właściwości [5, 6]. Jednak na parametry cienkich warstw nie wpływa tylko dodany pierwiastek, ale także wykorzystywana metoda wytwarzania, jak i obróbka poprocesowa np. wygrzewanie [7-9]. Wymienione powyżej modyfikacje w procesie wytwarzania pozwalają na otrzymanie różnych form TiO_2:Ag oraz parametrów optycznych [8, 9].

Cienkie warstwy na bazie tlenku tytanu (IV) występują w bateriach słonecznych jako powłoki antyrefleksyjne [10]. Stosuje się je w architekturze w postaci powłoki naniesionej na szkło architektoniczne [11]. Posiadają silne właściwości bakteriobójcze i grzybobójcze, wykorzystywane w medycynie [12, 13]. Ponadto cienkie warstwy na bazie TiO_2 są stosowane jako katalizatory [14], czujniki gazu [15] i materiały dielektryczne [16].

W niniejszej pracy przedstawiono właściwości i parametry cienkich warstw TiO_2 domieszkowanych różną ilością srebra. Powłoki optyczne zostały naniesione w wysokoenergetycznym procesie rozpylania magnetronowego. Do badań użyto warstwę na bazie TiO_2 oraz powłoki TiO_2 domieszkowane Ag w ilości 2% at. i 8% at.

[1] patrycja.pokora@pwr.edu.pl, Laboratorium Technologii Próżniowych i Diagnostyki Nanomateriałów, Katedra Mikroelektroniki i Nanotechnologii, Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki, Politechnika Wrocławska, www.wemif.pwr.edu.pl.

[2] malwina.sikora@pwr.edu.pl, Laboratorium Technologii Próżniowych i Diagnostyki Nanomateriałów, Katedra Mikroelektroniki i Nanotechnologii, Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki, Politechnika Wrocławska, www.wemif.pwr.edu.pl; Laboratorium naukowo-badawcze Nanores, www.nanores.pl.

[3] damian.wojcieszak@pwr.edu.pl, Laboratorium Technologii Próżniowych i Diagnostyki Nanomateriałów, Katedra Mikroelektroniki i Nanotechnologii, Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki, Politechnika Wrocławska, www.wemif.pwr.edu.pl.

2. Wpływ Ag na wybrane właściwości materiałów na bazie TiO_2

Zarówno w życiu codziennym, jak i w różnych gałęziach przemysłu wykorzystywany jest dwutlenek tytanu [17], ponieważ charakteryzuje się silną absorpcją promieniowania słonecznego [18], stabilnością, dużą odpornością fizyczną, termiczną oraz mechaniczną. Ponadto materiał ten wykazuje dużą wartość współczynnika załamania światła, jak i wysoki poziom przeźroczystości dla światła w szerokim zakresie spektralnym, która sięga powyżej 90% [14, 19]. Jest neutralny, nietoksyczny dla środowiska, a przy tym ma silną aktywność fotokatalityczną oraz dużą przenikalność elektryczną [20]. Domieszkowanie warstwy na bazie TiO_2 powoduje zmianę ich właściwości elektrycznych [21, 22].

Dodatek srebra wpływa na właściwości strukturalne i optyczne cienkiej warstwy TiO_2. Powłoki tego typu mają duży poziom przeźroczystości oraz dobrze odbijają podczerwień. Dwutlenek tytanu sam w sobie wykazuje silne właściwości bakteriobójcze, a dodatek srebra jeszcze bardziej wzmaga te właściwości. Z badań Basavaraju i innych [12] wynika, że wraz ze wzrostem ilości domieszki srebra aktywność bakteriobójcza wzrasta, ponieważ testy adhezji drobnoustrojów wykazały drastyczny spadek liczebności mikroorganizmów. Należy podkreślić jednak, że najlepszą skuteczność bakteriobójczą otrzymano po upływie 4 godzin. Zarówno liczba kolonii grzybów, jak i bakterii wykazuje silną tendencje malejącą przy zetknięciu z cienką warstwą TiO_2:Ag.

Na właściwości TiO_2:Ag wpływa także forma w jakiej występuje. Dwutlenek tytanu z domieszką srebra może występować w postaci: nanocząstek [16], cienkiej warstwy TiO_2 z jednorodnie rozłożoną domieszką [16], cienkiej warstwy TiO_2 z aglomeratami Ag [12] oraz wysp Ag na powierzchni TiO_2 [23]. Nanocząstki w pracy Fischera i innych [16] posiadają tendencje do szybkiej aglomeracji. Fischer i inni [16] również przedstawili warstwy z jednorodnie rozłożoną domieszką Ag. Wynika z nich, że TiO_2 zawiera cząstki srebra o rozmiarach ok. 2 nm, a struktura ta jest jednorodna, o gęstym upakowaniu srebra, bez widocznych defektów [16]. Natomiast badania prowadzone przez Basavaraju [12] pokazały, że cienka warstwa TiO_2:Ag posiada w niektórych miejscach na powierzchni skupiska aglomeratów, o stosunkowo małej wielkości od 8 do 20 nm. Jednak wraz ze wzrostem ilości domieszki srebra cienka warstwa zaczęła wykazywać porowate struktury. Natomiast w publikacji Zuo [23] na powierzchni TiO_2 powstały wyspy Ag, najprawdopodobniej poprzez wzrost skupisk aglomeratów. Struktura ta jest bardzo niejednorodna, o gęstym upakowaniu i z dużą ilością wysp Ag o nieregularnych kształtach.

Metoda wytwarzania jest jednym z czynników wpływających na właściwości warstw. Użycie odpowiedniej metody wprowadza zmiany w strukturze wytworzonych cienkich warstw. Możliwe jest zatem dostosowanie właściwości powłok do odpowiedniego zastosowania w przemyśle [24]. Istnieje wiele metod nanoszenia powłok optycznych. Najbardziej rozpowszechnione są metody fizycznego nanoszenia z fazy gazowej PVD [25] oraz chemicznego nanoszenia z fazy gazowej CVD [26]. Natomiast w przemyśle często wykorzystana jest metoda rozpylania magnetronowego MS, która jest jedną z metod PVD [27].

Wpływ na właściwości strukturalne cienkich warstw TiO_2 ma także ilość domieszki srebra. Praca Sena i innych [28] przedstawia wyniki badań warstwy na bazie TiO_2, która posiada gęsto upakowaną strukturę, jednakże morfologia uformowanych ziaren

wydaje się inna niż w warstwach z domieszką srebra. Warstwy domieszkowane Ag mają zupełnie inną mikrostrukturę. Posiadają wydłużone ziarna, które są gęsto upakowane. Oprócz tego, wzrost ilości domieszki srebra wskazuje na przejście modyfikację struktury TiO_2 z anatazu w rutyl.

Zmiana struktury cienkich warstw ma wpływ również na właściwości optyczne w tym na poziom transmisji i na wartość współczynnika załamania światła. W pracy Sena i innych [28] przedstawiono charakterystykę transmisji i odbicia światła cienkich warstw na bazie dwutlenku tytanu oraz TiO_2 domieszkowanego srebrem. Z badań wynika, że współczynnik załamania światła wzrastał przy zwiększaniu ilości domieszki Ag. Dla cienkiej warstwy TiO_2 współczynnik załamania światła wynosił n = 1,80. Natomiast dla TiO_2:(9% at. Ag) oraz TiO_2:(23% at. Ag) wynosił odpowiednio 1,84 i 1,90. Kolejnym parametrem optycznym, na który wpływa struktura cienkiej warstwy to szerokość optycznej przerwy energetycznej. W pracach Chrysicopoulou [29] oraz Wang [30] dla warstw na bazie TiO_2 parametr ten wynosił 3,2 – 3,3 eV. Natomiast z badań przeprowadzonych przez Sena [28] $E_g^{opt.}$ dla TiO_2:(9% at. Ag) wynosi 3,34eV, a dla TiO_2:(23% at. Ag) $E_g^{opt.}$ = 3,33eV. Zatem wraz ze wzrostem ilości domieszki srebra zmniejsza się szerokość optycznej przerwy energetycznej.

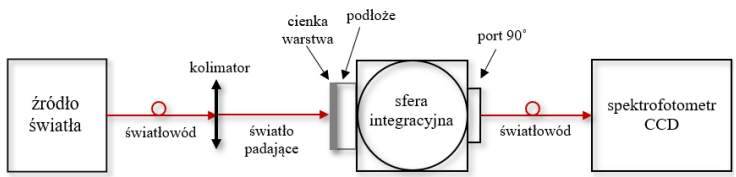
Obróbka poprocesowa w postaci wygrzewania również powoduję zmianę właściwości cienkich warstw TiO_2 z domieszką srebra. Dodatek domieszki Ag do TiO_2 powoduje znaczne zmniejszenie przezroczystości powłoki w stosunku do cienkich warstw TiO_2, co przedstawia praca [9]. Cienkie warstwy TiO_2:Ag, które poddano wygrzaniu w tlenie wykazują bardzo wyraźną tendencję spadkową poziomu przeźroczystości przy zwiększaniu temperatur wygrzewania z 300 do 600°C. Natomiast obróbka w atmosferze azotu domieszkowanych srebrem warstw na bazie TiO_2, wykazuje najniższą przezroczystość po wygrzewaniu w temperaturze 300°C.W temperaturach 500 i 600˚C cienkie warstwy TiO_2:Ag posiadają podobne do siebie właściwości optyczne. Z kolei szerokość optycznej przerwy energetycznej cienkiej warstwy TiO_2:Ag wygrzewanej w otoczeniu O_2 drastycznie wzrasta przy zwiększeniu temperatury z 300˚C do 400˚C, co zostało przedstawione w pracy Ivanova [9]. Większe wartości temperatury (powyżej 400°C) nieznacznie wpływają na wartość E_g^{opt}. Natomiast szerokość optycznej przerwy energetycznej cienkiej warstwy TiO_2:Ag wygrzewanej w otoczeniu N_2, maleje przy zwiększaniu temperatury z 300˚C do 500˚C. Większe wartości szerokości optycznej przerwy energetycznej związane są z nanokrystaliczną naturą cienkich warstw, wielkością ziaren i zmiennością struktury krystalicznej [31, 32]. Optyczna przerwa energetyczna TiO_2:Ag jest mniejsza niż cienkiej warstwy na bazie dwutlenku tytanu ze względu na działanie nanocząstek Ag, co przedstawiono w publikacji [9]. Taki spadek $E_g^{opt.}$ cienkiej warstwy TiO_2 z dodatkiem srebra zaobserwowało wielu autorów [33, 34].

3. Metodyka

Przedmiot badań stanowiły cienkie warstwy na bazie TiO_2 oraz TiO_2:(2% at. Ag), TiO_2:(8% at. Ag), które otrzymano za pomocą metody rozpylania magnetronowego przy użyciu impulsowych zasilaczy typu MSS2 (DORA Power System). Proces nanoszenia przeprowadzono w atmosferze 70% Ar + 30% O_2. Rozpylano jednocześnie dwa targety Ti oraz jeden Ag (o czystości 99,95%) z użyciem trzech magnetronów.

Ciśnienie podczas nanoszenia wynosiło 1,2 x 10^{-2} mbar. Moc z jaką rozpylano tytan wyniosła 500W dla każdego z magnetronów, a srebro rozpylano z mocą 10W oraz 50W. Czas procesu nanoszenia warstw wynosił 120 min. Zostały one naniesione na podłoża typu Corning 7059. Odległość między targetem a podłożami wynosiła 12 cm.

Do badania właściwości cienkich warstw TiO_2:Ag użyto metody transmisji i odbicia światła. Istnieje wiele różnych metod optycznych stosowanych do diagnostyki materiałów, jednak ta posiada wiele zalet. Jedną z najważniejszych jest pomiar próbek, który odbywa się w sposób bezkontaktowy. Układ pomiarowy wyposażono między innymi w sferę całkującą, źródło światła typu DH-2000-BAL (Micropac) oraz spektrometr QR65000 (Ocean Optics). W układzie pomiarowym do wyznaczenia charakterystyk transmisji światła (rys. 1) zastosowano światło kierunkowe padające prostopadle na badaną powłokę. Jako źródło światła użyto lampę deuterową (zakres UV) oraz halogenową (zakres VIS-NIR). W trakcie pomiaru strumień światła trafiał na kolimator, którego zadaniem było zebranie światła przechodzącego i skierowanie go na badaną powłokę. Strumień wchodzący do sfery integracyjnej ulega rozproszeniu na wewnętrznej powierzchni sfery, co pozwala na uzyskanie jednorodnego promieniowania. Następnie intensywność światła zmierzono spektrofotometrem światłowodowym z detektorem CCD [24].



Rysunek 1. Układ pomiarowy ze sferą integracyjną zastosowany do wyznaczenia charakterystyk transmisji światła cienkich warstw

W przypadku pomiaru charakterystyki odbicia światła zastosowano oświetlenie pod kątem 8° względem normalnej do powierzchni powłoki. Na podstawie otrzymanych charakterystyk określono wartość współczynnika transmisji światła (T_{550}), położenie optycznej krawędzi absorpcji (λ_{cutoff}) oraz szerokość optycznej przerwy energetycznej ($E_g^{opt.}$) [24].

Do wyznaczenia grubości oraz chropowatości powierzchni zastosowano profilometr optyczny typu Talysurf CCI Lite (Taylor Hobson). Pomiary wykonano na tzw. stopniu na próbce, który został wytworzony przez zamaskowanie części podłoża podczas procesu nanoszenia. Na podstawie otrzymanych profili trójwymiarowych, oprócz grubości warstw, określono również parametry ich chropowatości powierzchni. W ramach niniejszej pracy topografie powierzchni cienkich warstw analizowano również na za pomocą mikroskopu optycznego, który pracuje w dwóch modach, tj. w modzie światła przechodzącego lub odbitego. Pozwala to na otrzymywanie powiększonych obrazów małych przedmiotów. Zdjęcia wykonano obiektywem o powiększeniu 20x.

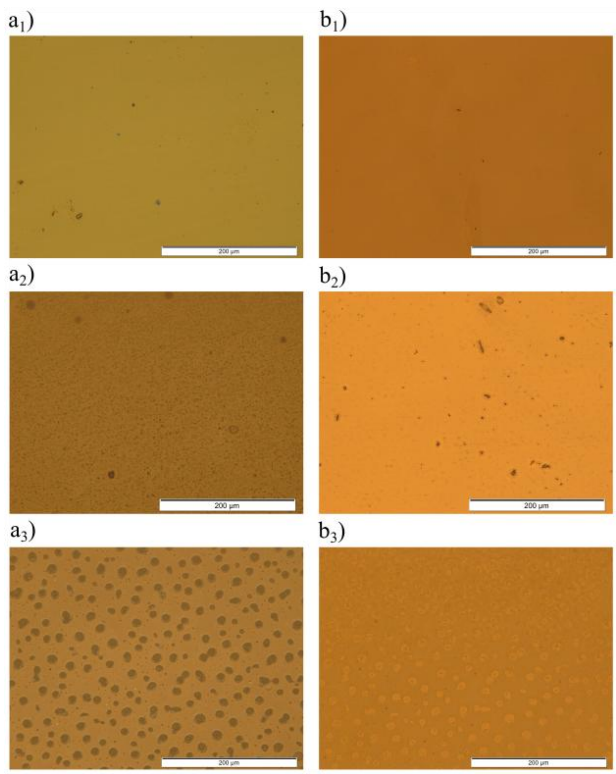
4. Wyniki i dyskusja

Na rysunku 2 przedstawiono obrazy mikroskopowe powierzchni cienkich warstw TiO_2, TiO_2:(2% at. Ag), TiO_2:(8% at. Ag). Zostały one zarejestrowane w modzie światła odbitego i przechodzącego. Na ich podstawie można stwierdzić, że srebro

tworzyło odrębne formy w strukturze TiO_2. W przypadku powłoki na bazie TiO_2 obrazy z mikroskopu świadczą o jej dużej jednorodności. Z kolei dodatek Ag w ilości 2% at. spowodował powstanie aglomeratów o średnicy około 1,1 µm. Ich ilość stanowi 21% powierzchni. Natomiast zwiększenie ilości Ag do 8% at., spowodowało wzrost średnicy aglomeratów do 14,7 µm i zajęcia 69% powierzchni warstwy. W tabeli 1 zestawiono wyniki uzyskane na podstawie obserwacji mikroskopowych dla badanych cienkich warstw.

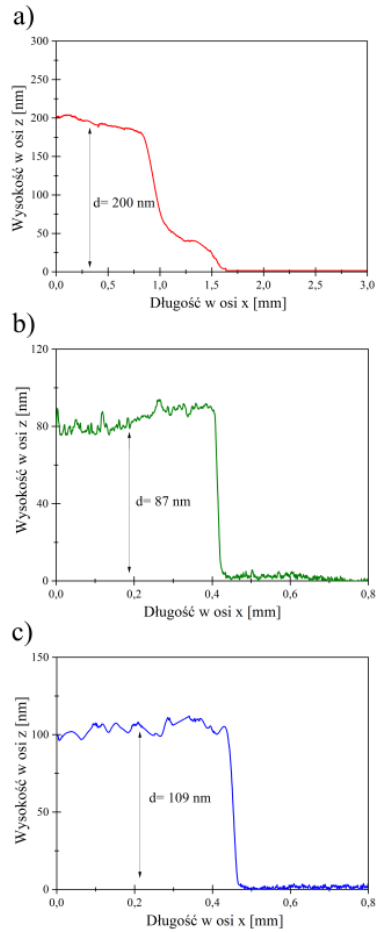
Tabela 1. Wykaz wartości wybranych parametrów wyznaczonych na podstawie obrazów mikroskopowych powierzchni cienkich warstw TiO_2, TiO_2:(2% at. Ag), TiO_2:(8% at. Ag), naniesionych wysokoenergetyczną metodą napylania magnetronowego na podłoże typu Corning 7059

Cienka warstwa	$l_{śr}$	A
–	[µm]	[%]
TiO_2	-	-
TiO_2:(2% at. Ag)	1,1	21
TiO_2:(8% at. Ag)	14,7	69
Oznaczenia: $l_{śr}$ – wartość średnicy aglomeratów, A – udział procentowy powierzchni próbki zajętej przez aglomeraty srebra		



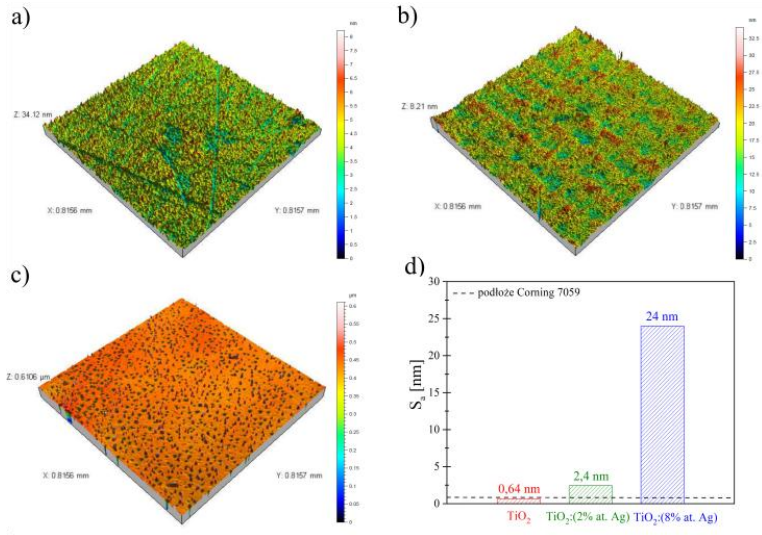
Rysunek 2. Zdjęcia z mikroskopu optycznego powierzchni cienkiej warstwy 1) TiO_2, 2) TiO_2:(2% at. Ag), 3) TiO_2:(8% at. Ag), wytworzonej wysoko energetyczną metodą rozpylania magnetronowego, które zarejestrowano w modzie światła odbitego (a) oraz przechodzącego (b)

Na rysunku 3 zamieszczono dwuwymiarowy profil topografii powierzchni cienkich warstw TiO_2, TiO_2:(2% at. Ag), TiO_2:(8% at. Ag), które zarejestrowano w obszarze występowania tzw. stopnia na próbce. Pozwoliło to określić grubość powłok. Jak widać grubość cienkiej warstwy na bazie TiO_2 wynosiła 200 nm. Z kolei warstwa TiO_2:(2% at. Ag) miała 87 nm, natomiast dla TiO_2:(8% at. Ag) wartość ta wynosiła 109 nm.



Rysunek 3. Sposób wyznaczania grubości cienkiej warstwy a) TiO_2, b) TiO_2:(2% at. Ag), c) TiO_2 :(8% at. Ag), na podstawie dwuwymiarowego profilu powierzchni zarejestrowanego w obszarze tzw. stopnia na próbce

Na rysunku 4 zamieszczono trójwymiarowe profile powierzchni cienkich warstw TiO_2, TiO_2:(2% at. Ag), TiO_2:(8% at. Ag) oraz zestawienie ich chropowatości na podstawie wartości parametru S_a czyli średnie arytmetyczne odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia. Z profili trójwymiarowych widać, że cienka warstwa na bazie TiO_2 miała najbardziej jednorodną powierzchnię (rys. 4a). W warstwach z dodatkiem Ag pojawia się coraz większa niejednorodność.

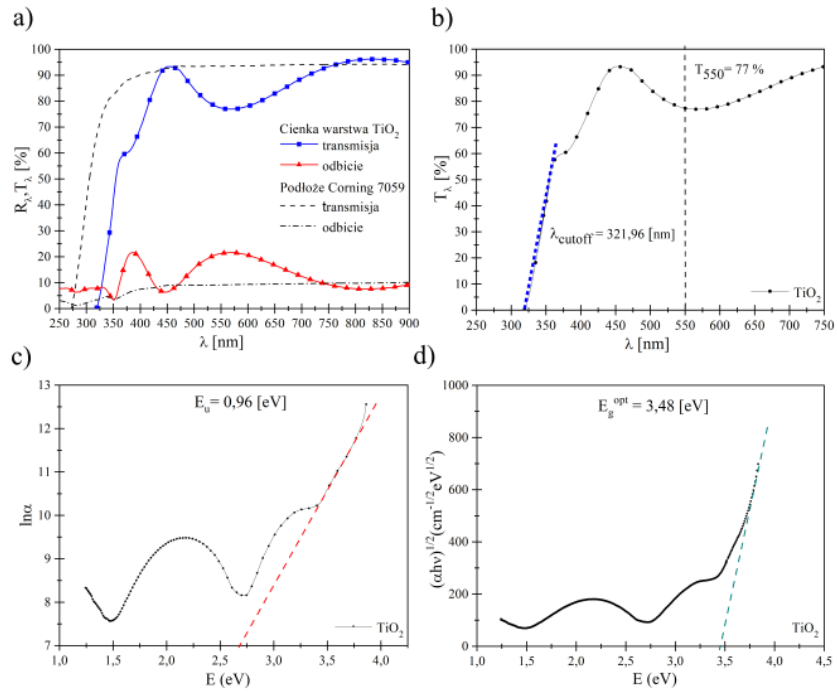


Rysunek 4. Trójwymiarowy profil chropowatości powierzchni cienkiej warstwy a) TiO_2, b) TiO_2:(2% at. Ag), c) TiO_2:(8% at. Ag) oraz d) zestawienie wartości parametru S_a (chropowatości) na powierzchni cienkich warstw, uzyskanych za pomocą profilometru optycznego. Oznaczenia: S_a – średnia arytmetyczna wysokość powierzchni cienkiej warstwy

Na rysunku 5 zamieszczono charakterystykę transmisji i odbicia światła cienkiej warstwy TiO_2, którą naniesiono na podłoże typu Corning. Na podstawie charakterystyki transmisji wyznaczono wartość T_{550}, czyli współczynnik transmisji światła warstwy dla długości fali λ = 550 nm (rys. 5b) w przypadku badanej powłoki było to 77%. Na podstawie tej charakterystyki wyznaczono także położenie długości fali odcięcia λ_{cutoff} = 321,9 nm. Oprócz tego, wyniki pomiarów transmisji oraz grubości cienkiej warstwy TiO_2, która wynosiła d = 200 nm, pozwoliły na wyznaczenie energii Urbacha. Parametr ten określono na podstawie charakterystyki lnα w funkcji energii, gdzie α to współczynnik absorpcji, wartość E_u = 0,96 eV. Należy dodać, że im wyższy jest ten parametr tym mniej uporządkowana i bardziej zdefektowana jest struktura powłok [35]. Z kolei na podstawie zależności Tauca dla przejść skośnych $(\alpha h\nu)^{-1/2}$ w funkcji energii określono szerokość optycznej przerwy energetycznej ($E_g^{opt.}$). Wartość tego parametru dla warstwy TiO_2 wynosiła 3,48 eV. Tabela 2 przedstawia zestawienie wartości wybranych parametrów wyznaczonych za pomocą charakterystyki transmisji i odbicia światła dla tej powłoki.

Tabela 2. Zestawienie wartości wybranych parametrów wyznaczonych na podstawie pomiarów charakterystyk transmisji i odbicia światła oraz z profilometru optycznego cienkiej warstwy TiO_2, naniesionej wysokoenergetyczną metodą napylania magnetronowego na podłoże typu Corning 7059

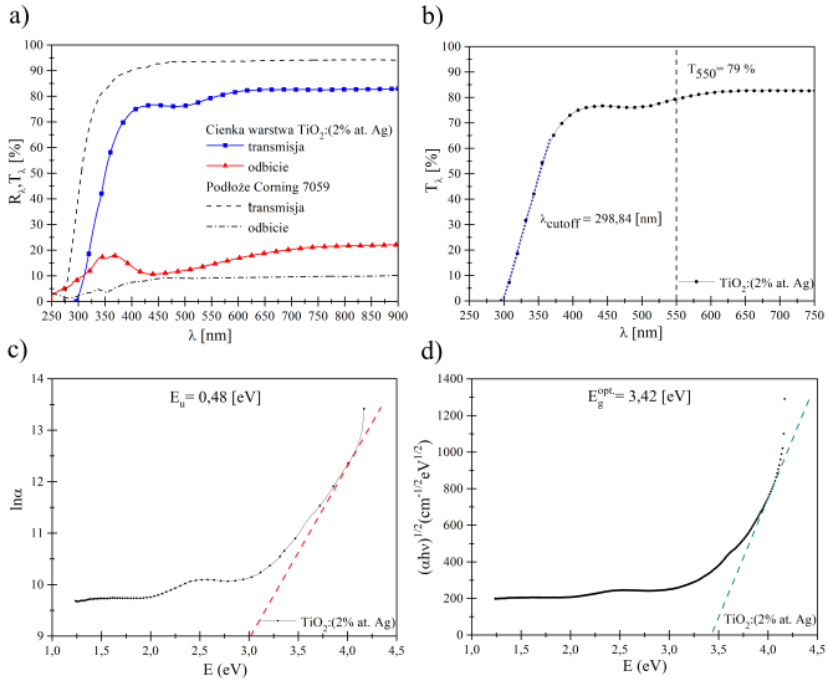
Cienka warstwa	T_{550}	R_{550}	λ_{cutoff}	$E_g^{opt.}$	E_u	d
–	[%]	[%]	[nm]	[eV]	[eV]	[nm]
TiO_2	77	21	321,96	3,48	0,96	200
Oznaczenia: T_{550} – współczynnik transmisji światła dla długości fali λ = 550 nm, R_{550} – współczynnik odbicia światła dla długości fali λ = 550 nm, λ_{cutoff} – długość fali odcięcia, $E_g^{opt.}$ – optyczna przerwa energetyczna, E_u – energia, Urbacha, d – grubość średnia						



Rysunek 5. Zestawienie wyników badań cienkiej warstwy TiO_2 naniesionej na podłoże typu Corning 7059: a) charakterystyka transmisji i odbicia światła; b) sposób wyznaczania wartości parametrów T_{550} i λ_{cutoff}; c) charakterystyka ln(α); d) wykres Tauca dla dozwolonych przejść skośnych $(\alpha h\nu)^{-1/2}$ w funkcji energii. Oznaczenia: T_{550} – wartość współczynnika transmisji dla λ = 550 nm, α – współczynnik absorpcji, E_u – energia Urbacha, $E_g^{opt.}$ – optyczna przerwa energetyczna

Charakterystyki transmisji i odbicia światła cienkiej warstwy TiO_2:(2% at. Ag), zostały zamieszczone na rysunku 6. Dzięki niej wyznaczono wartość współczynnika transmisji warstwy (rys. 6b), który wynosił 79%.

Poprzez tą charakterystykę także wyznaczono położenie długości fali odcięcia λ_{cutoff} = 298,8 nm. Na podstawie wyznaczonej wcześniej grubości d = 87 nm cienkiej warstwy TiO_2:(2% at. Ag) i wyników pomiaru transmisji wyznaczono energię Urbacha, która wyniosła odpowiednio E_u = 0,48 eV. Parametr ten określono na podstawie charakterystyki lnα w funkcji energii, gdzie α to współczynnik absorpcji. Z kolei szerokość optycznej przerwy energetycznej określono na podstawie zależności Tauca dla przejść skośnych $(\alpha h\nu)^{-1/2}$ w funkcji energii. Wartość tego parametru ($E_g^{opt.}$) dla warstwy TiO_2:(2% at. Ag) wynosiła 3,42 eV. Wartości wybranych parametrów zostały zestawione w tabeli 3. Parametry zostały wyznaczone za pomocą charakterystyki transmisji i odbicia światła. Przedmiotem badań parametrów przedstawionych w tabeli 3 była cienka warstwa TiO_2:(2% at. Ag) otrzymana metodą rozpylania magnetronowego na podłożu typu Corning 7059.



Rysunek 6. Zestawienie wyników badań cienkiej warstwy TiO_2:(2% at. Ag) naniesionej na podłoże typu Corning 7059: a) charakterystyka transmisji i odbicia światła; b) sposób wyznaczania wartości parametrów T_{550} i λ_{cutoff}; c) charakterystyka ln(α); d) wykres Tauca dla dozwolonych przejść skośnych $(\alpha h\nu)^{-1/2}$ w funkcji energii. Oznaczenia: T_{550} – wartość współczynnika transmisji dla λ = 550 nm, α – współczynnik absorpcji, E_u – energia Urbacha, $E_g^{opt.}$ – optyczna przerwa energetyczna

Tabela 3. Zestawienie wartości wybranych parametrów wyznaczonych na podstawie pomiarów charakterystyk transmisji i odbicia światła oraz z profilometru optycznego cienkiej warstwy TiO_2 :(2% at. Ag), naniesionej wysokoenergetyczną metodą napylania magnetronowego na podłoże typu Corning 7059

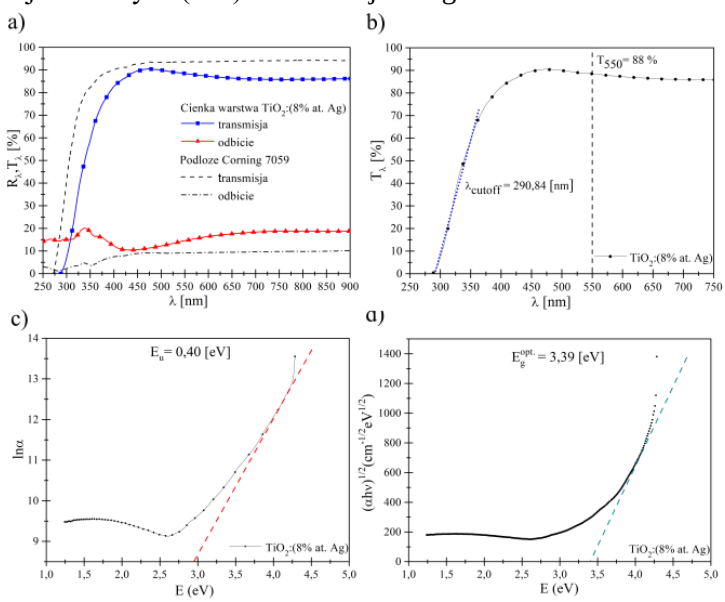
Cienka warstwa	T_{550}	R_{550}	λ_{cutoff}	$E_g^{opt.}$	E_u	d
–	[%]	[%]	[nm]	[eV]	[eV]	[nm]
TiO_2:(2% at. Ag)	79	14	298,84	3,42	0,48	87
Oznaczenia: T_{550} – współczynnik transmisji światła dla długości fali λ = 550 nm, R_{550} – współczynnik odbicia światła dla długości fali λ = 550 nm, λ_{cutoff} – długość fali odcięcia, $E_g^{opt.}$ – optyczna przerwa energetyczna, E_u – energia Urbacha, d – grubość średnia						

Tabela 4 przedstawia zestawienie wartości wybranych parametrów wyznaczonych za pomocą profilometru optycznego (grubość) oraz charakterystyki transmisji i odbicia światła, cienkiej warstwy TiO_2:(8% at. Ag), otrzymanej metodą rozpylania magnetronowego na podłożu typu Corning 7059. Natomiast rysunek 7 przedstawia charakterystykę transmisji i odbicia światła cienkiej warstwy TiO_2:(8% at. Ag), która została naniesiona na podłoże typu Corning 7059.

Tabela 4. Wykaz wartości wybranych parametrów wyznaczonych na podstawie pomiarów charakterystyk transmisji i odbicia światła oraz z profilometru optycznego cienkiej warstwy TiO_2:(8% at. Ag), naniesionej wysokoenergetyczną metodą napylania magnetronowego na podłoże typu Corning 7059

Cienka warstwa	T_{550}	R_{550}	λ_{cutoff}	$E_g^{opt.}$	E_u	d
–	[%]	[%]	[nm]	[eV]	[eV]	[nm]
TiO_2:(8% at. Ag)	88	11	290,84	3,39	0,40	109
Oznaczenia: T_{550} – współczynnik transmisji światła dla długości fali λ = 550 nm, R_{550} – współczynnik odbicia światła dla długości fali λ = 550 nm, λ_{cutoff} – długość fali odcięcia, $E_g^{opt.}$ – optyczna przerwa energetyczna, E_u – energia Urbacha, d – grubość średnia						

Na podstawie tej charakterystyki wyznaczono dwa podstawowe parametry: wartość współczynnika transmisji warstwy λ_{550} = 88% oraz położenie długości fali odcięcia λ_{cutoff} = 290,8 nm (rys. 7b). Wyniki pomiarów transmisji oraz wyznaczona grubość (d = 109 nm) cienkiej warstwy TiO_2:(8% at. Ag) pozwoliła na podstawie charakterystyki lnα w funkcji energii określić wartość energii Urbacha E_u = 0,40 eV. Szerokość optycznej przerwy energetycznej $E_g^{opt.}$ = 3,39 eV wyznaczono na podstawie zależności Tauca dla przejść skośnych $(\alpha h\nu)^{-1/2}$ w funkcji energii.



Rysunek 7. Zestawienie wyników badań cienkiej warstwy TiO_2:(8% at. Ag) naniesionej na podłoże typu Corning 7059: a) charakterystyka transmisji i odbicia światła; b) sposób wyznaczania wartości parametrów T_{550} i λ_{cutoff}; c) charakterystyka ln(α); d) wykres Tauca dla dozwolonych przejść skośnych $(\alpha h\nu)^{-1/2}$ w funkcji energii. Oznaczenia: T_{550} – wartość współczynnika transmisji dla λ = 550 nm, α – współczynnik absorpcji, E_u – energia Urbacha, $E_g^{opt.}$ – optyczna przerwa energetyczna

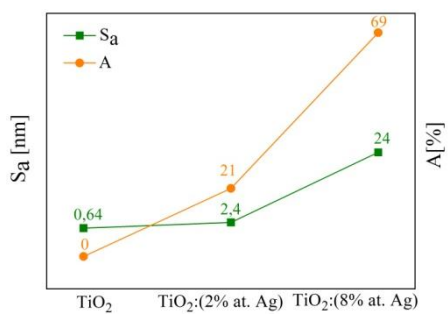
Analiza wpływu ilości dodatku Ag na właściwości cienkich warstw TiO_2 obejmuje zestawienie (tab. 5) wybranych parametrów wyznaczonych za pomocą charakterystyk transmisji i odbicia światła oraz grubości i chropowatości otrzymanych przy użyciu profilometru optycznego cienkich warstw na bazie TiO_2, TiO_2:(2% at. Ag) oraz TiO_2:(8% at. Ag), otrzymanych wysokoenergetyczną metodą rozpylania magnetronowego na podłożu typu Corning 7059.

Tabela 5. Wykaz wartości wybranych parametrów wyznaczonych na podstawie pomiarów charakterystyk transmisji i odbicia światła oraz z profilometru optycznego cienkich warstw TiO_2, TiO_2:(2% at. Ag), TiO_2:(8% at. Ag), naniesionych wysokoenergetyczną metodą napylania magnetronowego na podłoże typu Corning 7059

Cienka warstwa	T_{550}	R_{550}	λ_{cutoff}	$E_g^{opt.}$	E_u	d	S_a	$l_{śr}$	A
–	[%]	[%]	[nm]	[eV]	[eV]	[nm]	[nm]	[µm]	[%]
TiO_2	77	21	321,96	3,48	0,96	200	0,64	-	-
TiO_2:(2% at. Ag)	79	14	298,84	3,42	0,48	87	2,4	1,1	21
TiO_2:(8% at. Ag)	88	11	290,84	3,39	0,40	109	24	14,7	69

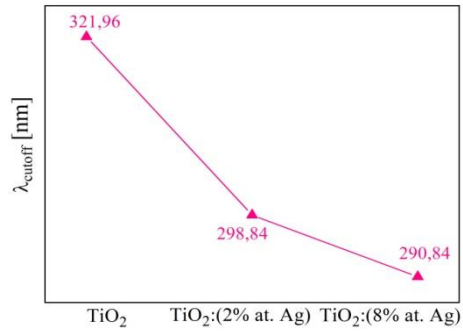
Oznaczenia: T_{550} – współczynnik transmisji światła dla długości fali λ = 550 nm, R_{550} – współczynnik odbicia światła dla długości fali λ = 550 nm, λ_{cutoff} – długość fali odcięcia, $E_g^{opt.}$ – optyczna przerwa energetyczna, E_u – energia Urbacha, d – grubość średnia, S_a – średnie arytmetyczne odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia, $l_{śr}$ – wartość średnicy aglomeratów, A – udział procentowy powierzchni próbki zajętej przez aglomeraty srebra

Wszystkie parametry pod wpływem domieszki Ag zmieniały swoje wartości. Przeźroczystość cienkich warstw wzrastała wraz z większą ilością domieszki srebra. Jednakże przy lepszej przezroczystości otrzymywano mniej uporządkowaną i bardziej zdefektowaną strukturę powłoki, o czym mówi parametr A. Wraz ze wzrostem ilości dodatku Ag na powierzchni cienkiej warstwy pojawiało się coraz więcej aglomeratów srebra o większej średnicy (rys. 8). Cienka warstwa domieszkowana srebrem w ilości 2% at. posiada aglomeraty o średnicy 1,1 µm, natomiast średnica aglomeratów srebra dla cienkiej warstwy TiO_2:(8% at. Ag) zwiększyła się o 13,6 µm. Warto jednak podkreślić, że przy większym udziale procentowym domieszki Ag także większa jest (rys. 8). Wartość ta dla warstwy TiO_2 wynosi 0,64 nm, natomiast dla warstwy TiO_2:(2% at. Ag) wartość ta powiększyła się o 1,7 nm, a dla cienkiej warstwy domieszkowanej srebrem w ilości 8% at. wzrosła aż o 23,3 nm.



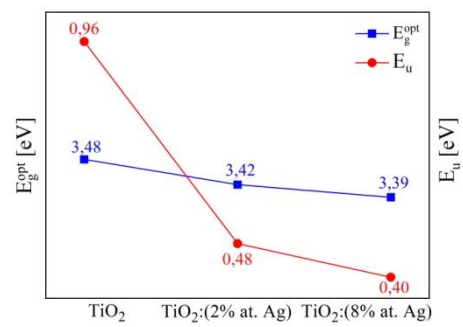
Rysunek 8. Zestawienie wyników pomiarów średniej arytmetycznej wysokości powierzchni cienkiej warstwy (S_a) oraz udział procentowy powierzchni próbek zajętych przez aglomeraty srebra (A) od ilość domieszki srebra cienkiej warstwy TiO_2

Rysunek 9 przedstawia zależność długości fali odcięcia od ilości dodatku srebra. Wartość λ_{cutoff} maleje wraz ze wzrostem ilość domieszki Ag w cienkiej warstwie na bazie TiO_2. Wartość długości fali odcięcia dla TiO_2:(2% at. Ag) spada o 23,12 nm względem warstwy TiO_2. Natomiast dla cienkiej warstwy domieszkowanej srebrem w ilości 8% at. spada o kolejne 8 nm.



Rysunek 9. Wpływ ilości domieszki srebra na długość fali odcięcia (λ_{cutoff}) cienkiej warstwy na bazie TiO_2

Rysunek 10 przedstawia zależność optycznej przerwy energetycznej i energii Urbacha od ilości dodatku srebra. Z wykresu można odczytać, że wraz ze wzrostem ilości dodatku srebra maleje wartość optycznej przerwy energetycznej, a także energii Urbacha. Wartość E_u dla cienkiej warstwy TiO_2 jest dwa razy większa niż dla TiO_2:(2% at. Ag). Natomiast wartość energii Urbacha cienkiej warstwy z domieszką srebra w ilości 8% at. spadła o 0,08 nm, czyli nieznacznie względem TiO_2:(2% at. Ag). Wartość optycznej przerwy energetycznej nie zmienia się tak drastycznie jak energia Urbacha, lecz posiada także charakter spadkowy przy wzroście ilości domieszki. Dla cienkiej warstwy z domieszką srebra w ilości 2% at. wartość $E_g^{opt.}$ spadła o 0,06 eV względem warstwy na bazie TiO_2. Przy zwiększeniu ilości domieszki srebra do 8% at. wartość ta spadla o 0,03 eV.



Rysunek 10. Zestawienie wyników pomiarów optycznej przerwy energetycznej ($E_g^{opt.}$) oraz energii Urbacha (E_u) od ilość domieszki srebra cienkiej warstwy TiO_2

5. Podsumowanie

Pracę poświęcono badaniom wpływu dodatku srebra na wybrane parametry optyczne oraz topografię powierzchni przeźroczystych cienkich warstw TiO_2. Przedmiotem badań były cienkie warstwy na bazie TiO_2, TiO_2:(2% at. Ag) oraz TiO_2:(8% at. Ag), otrzymanych wysokoenergetyczną metodą rozpylania magnetronowego na podłożu typu Corning 7059.

Analiza uzyskanych wyników wykazała, że wszystkie powłoki charakteryzują się dużą przezroczystością, wartość współczynnika transmisji wzrasta z 77% (dla TiO_2) do 88% dla TiO_2:(8% at. Ag), natomiast dla cienkiej warstwy domieszkowanej srebrem

w ilości 2% at. T_{550} wynosi 79%. Wartość długości fali odcięcia maleje z 321,96 nm do 290,84 nm wraz ze wzrostem domieszki srebra. Parametry optyczne takie jak optyczna przerwa energetyczna oraz energia Urbacha ma mniejszą wartość przy większej ilości domieszki Ag. Szerokość optycznej przerwy energetycznej kolejno dla cienkich warstwy na bazie TiO_2, TiO_2:(2% at. Ag), TiO_2:(8% at. Ag) wynosi 3,48 eV, 3,42 eV oraz 3,39 eV. Większe wartości optycznej przerwy energetycznej mogą być związane z nanokrystaliczną naturą cienkich warstwy TiO_2:Ag, wielkością ziaren i strukturą krystaliczną. Wartość energii Urbacha spada z 0,96 eV do 0,40 eV wraz z większą ilością dodatku Ag. Należy jednak dodać, że różnica wartości między cienką warstwą domieszkowaną srebrem w ilość 8% at. a 2% at. wynosi tylko 0,08 eV, można zatem stwierdzić, że mikrostruktury tych dwóch warstw mają podobne uporządkowanie. Ponadto cienkie warstwy na bazie TiO_2 z domieszką srebra posiadają aglomeraty na powierzchni. Cienka warstwa TiO_2:(2% at. Ag) posiada aglomeraty o średnicy 1,1 μm, które zajmują około 21% powierzchni powłoki. Z kolei warstwa z czterokrotnie większą ilością dodatku srebra posiada aglomeraty o znacznie większej średnicy, tj. 14,7 μm, które zajmują około 69% powierzchni warstwy. Również zaobserwowano, że wraz ze wzrostem ilości dodatku srebra wzrasta z 0,64 nm do 24 nm średnia arytmetyczna wysokość powierzchni cienkiej warstwy. Drastyczny wzrost, bo aż o 21,6 nm tego parametru można zauważyć przy domieszkowaniu srebrem cienkiej warstwy TiO_2 z ilości 2% at. do 8% at.

Literatura

1. Tjong S.C., Chen H., *Nanocrystalline materials and coatings*, Materials Science and Engineering: R: Reports, 45, 2004, s. 1-88.
2. Pacchioni G., Valeri S. (red.), *Oxide Ultrathin: Science and Technology*, Wiley-VCH, Niemcy 2012.
3. Diebold U., *The surface science of titanium dioxide*, Surface Science Reports, 48, 2003, s. 53-229.
4. Hanaor D. A. H., Sorrell C.C., *Review of the anatase to rutile phase transformation*, Journal of Materials Science, 46, 2011, s. 855-874.
5. Wojcieszaka D., Kaczmarek D., Domaradzki J., Mazur M., *Przeźroczyste powłoki 36moczyszczące na bazie TiO_2*, Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania, 54, 2013, s. 16-18.
6. Chang Y.Y., Shieh Y.N., Kao H.Y., *Optical properties od TiO_2 thin films after Ag ion implantation*, Thin Solid Films, 519, 2011, s. 6935-6939.
7. Guo Y., Zhang X.W., Weng W.H., Han G.R., *Structure and properties of nitrogen-doped titanium dioxide thin films grown by atmospheric pressure chemical vapor deposition*, Thin Solid Films, 515, 2007, s. 7117-7121.
8. Sen S., Mahanty S., Roy S., Heintz O., Bourgeois S., Chaumont D., *Investigation on sol–gel synthesized Ag-doped TiO_2 cermet thin films*, Thin Solid Films, 474, 2005, s. 245-249.
9. Ivanova T., Harizanova A., Koutzarova T., Vertruyen B., *Optical and structural characterization of TiO_2 films doped with silver nanoparticles obtained by sol–gel method*, Optical Materials, 36, 2013, s. 207-213.
10. San Vicente G., Morales A., Gutiérrez M.T., *Sol–gel TiO_2 antireflective films for textured monocrystalline silicon solar cells*, Thin Solid Films, 403-404, 2002, s. 335-338.
11. Takeda S., Suzuki S., Odaka H., Hosono H., *Photocatalytic TiO_2 thin film deposited onto glass by DC magnetron sputtering*, Thin Solid Films, 392, 2001, s. 338-344.
12. Prasad R.G.S.V., Basavaraju D., Rao K.N., Naveen C.S., Ebdrino J., Phani A.R., *Nanostructured TiO_2 and TiO_2-Ag Antimicrobial Thin Films*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1-6, 2011.

13. Ziental D., Czaczyńska-Goslinska B., Młynarczyk D.T., Głowacka-Sobotta A., Stanisz B., Goslinski T., Sobotta Ł., *Titanium Dioxide Nanoparticles: Prospects and Applications in Medicine*, Nanomaterials, 10, 2020, s. 387.
14. Negishi N., Iyda r., Hashimoto K., Fujishima A., *Preparation of Transparent TiO_2 Thin Film Photocatalyst and Its Photocatalytic Activity*, Chemistry Letters, 24, 1995, s. 841-842.
15. Jang N.S., Kim M.S., Kim S.H., Lee S.K., Kim J.M., *Direct growth of titania nanotubes on plastic substrates and their application to flexible gas sensors*, Sensors and Actuators B: Chemical, 199, 2014, s. 361-368.
16. Fischer D., *Influence of substrate temperature and silver-doping on the structural and optical properties of TiO_2 films*, Thin Solid Films, 598, 2016, s. 204-213.
17. Kaczmarek D. (red), *„Modyfikacja wybranych właściwości cienkich warstw TiO_2"*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2008.
18. Fernandes R., Patel N., Dholam R., Adami M., Miotello A., *Low energy ion-beam modification of TiO_2 photocatalyst thin film for visible light absorption*, Surface and Coatings Technology, 203, 2009, s. 2579-2583.
19. Wang Z., Helmersson U., Käll P.O., *Optical properties of anatase TiO_2 thin films prepared by aqueous sol–gel process at low temperature*, Thin Solid Films, 405, 2002, s. 50-54.
20. Daviðsdóttir S., Shabadi R., Galca A.C., Andersen I.H., Dirscherl K., Ambat R., *Investigation of DC magnetron sputtered TiO_2 coatings: Effect of coating thickness, structure, and morphology on photocatalytic activity*, Applied Surface Science, 313, 2014, s. 677-686.
21. Kafizas A., Noor N., Carmalt C.J., Parkin I.P., *TiO_2-based transparent conducting oxides; the search for optimum electrical conductivity using a combinatorial approach*, Journal of Materials Chemistry C, 1, 2013, s. 6335-6346.
22. Mazur M., Sieradzka K., Kaczmarek D., Domaradzki J., Wojcieszak D., Domanowski P., Prociów E., *Investigation of physicochemical and tribological properties of transparent oxide semiconducting thin films based on Ti-V oxides*, Materials Science-Poland, 31, 2013, s. 434-445.
23. Zuo J., *Deposition of Ag nanostructures on TiO_2 thin films by RF magnetron sputtering*, Applied Surface Science, 256, 2010, s. 7096-7107.
24. Domaradzki J. (red), *Powłoki optyczne na bazie TiO_2*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2010.
25. Asenova I., Manova D., Mändl S., *Incorporation of nitrogen into TiO_2 thin films during PVD processes*, Journal of Physics: Conference Series, 559, 2014, 012008.
26. Mungkalasiri J., Bedel L., Emieux F., Doré J., Renaud R.N.R., *Sarantopoulos C., Maury F., CVD Elaboration of Nanostructured Ti_2Ag Thin Films with Efficient Antibacterial Properties*, Chemical Vapor Deposition, 16. 2010, s. 35-41.
27. Heo C.H., Lee S.B., Boo J.H., *Deposition of TiO_2 thin films using RF magnetron sputtering method and study of their surface characteristics*, Thin Solid Films, 475, 2005, s. 183-188.
28. Sena S., Mahanty S., Roy S., Heintz O., Bourgeois S., Chaumont D., *Investigation on sol–gel synthesized Ag-doped TiO_2 cermet thin films*, Thin Solid Films, 474, 2005, 245-249
29. Chrysicopoulou P., Davazoglou D., Trapalis C., Kordas G., *Optical properties of very thin (<100 nm) sol–gel TiO_2 films*, Thin Slid Films, 323, 1998, s. 188-193.
30. Wang Z., Helmersson U., Kall P.O., *Optical properties of anatase TiO_2 thin films prepared by aqueous sol–gel process at low temperature*, Thin Solid Films, 405, 2002, s. 50-54.
31. Djaoued y., Ozga K., Wojciechowski A., Reshak A.H., Robichaud J., Kityk I.V., *Photoinduced effects in TiO_2 nanocrystalline films with different morphology*, Journal of Alloys and Compounds, 508, 2010, s. 599-605

32. Hou X., Ma J., Li D., Wang X., Shen Y., Yu T., *Influence of V+-implantation on structural, chemical, optical and nanomechanical properties of TiO_2 films*, Vacuum, 89, 2013, s. 147-152.
33. Hari M., Joseph S.A., Mathew S., Radhakrishnan P., Nampoori V.P.N., *Band-gap tuning and nonlinear optical characterization of Ag:TiO_2 nanocomposites*, Journal of applied physics, 112, 2012, 074307.
34. Zhao C., Krall A., Zhao H., Zhang Q., Li Y., *Ultrasonic spray pyrolysis synthesis of Ag/TiO_2 nanocomposite photocatalysts for simultaneous H_2 production and CO_2 reduction*, International Journal of Hydrogen Energy, 37, 2012, s. 9967-9976.
35. Choudhury B., Choudhury A., *Oxygen defect dependent variation of band gap, Urbach energy and luminescence property of anatase, anatase–rutile mixed phase and of rutile phases of TiO_2 nanoparticles*, Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 56, 2014, s. 364-371.

Wpływ srebra na właściwości optyczne cienkowarstwowych powłok optycznych TiO_2

Streszczenie
W ciągu ostatnich lat na znaczeniu zyskały tlenki metali z uwagi na ich liczne zalety oraz pożądane właściwości, zwłaszcza w zastosowaniu do optoelektroniki. W niniejszej pracy przedstawiono zagadnienia związane z charakteryzacją właściwości powłok optycznych na bazie dwutlenku tytanu. Szczególną uwagę poświęcono powłokom TiO_2 z dodatkiem srebra. Materiały te wybrano ze względu na ich właściwości. Celem pracy było określenie wpływu dodatku srebra na wybrane parametry optyczne oraz topografię powierzchni przeźroczystych warstw TiO_2, które wytworzono wysokoenergetyczną metodą rozpylania magnetronowego na podłożach typu Corning 7059. W pracy przedstawiono wyniki pomiarów i analizę charakterystyk transmisji i odbicia światła powłok TiO_2, TiO_2:(2% at. Ag), TiO_2:(8% at. Ag), a także rezultaty pomiarów topografii powierzchni z użyciem profilometru optycznego oraz zdjęcia mikroskopowe – również przedstawiające powierzchnię wytworzonych warstw. Analiza wyników pokazała, że dodatek srebra w znacznym stopniu wpływa na właściwości cienkich warstwy na bazie TiO_2. W szczególności, wykazało to porównanie wartości takich parametrów jak współczynnik transmisji i odbicia światła dla długości fali równej 550 nm (T_{550}, R_{550}), położenie krawędzi optycznej absorpcji (λ_{cutoff}), wartość energii Urbacha (E_u) oraz szerokość optycznej przerwy energetycznej ($E_g^{opt.}$). Ponadto wykazano, że cienkie warstwy TiO_2 z dodatkiem srebra posiadają aglomeraty Ag na swojej powierzchni. Uzyskane wyniki zostały przedyskutowane w odniesieniu do literatury.
Słowa kluczowe: cienkie warstwy, TiO_2, srebro, właściwości optyczne, rozpylanie magnetronowe

The influence of silver on the optical properties of TiO_2 optical thin-film coatings

Abstract
In recent years, metal oxides have gained in importance due to their numerous advantages and desirable properties, especially in optoelectronics applications. This paper presents issues related to the characterization of the properties of optical coatings based on titanium dioxide. Particular attention was paid to TiO_2 coatings with the addition of silver. These materials were selected for their different properties. The aim of the study was to determine the effect of silver addition on selected optical parameters and the surface topography of transparent TiO_2 thin films, which were produced by the high-energy magnetron sputtering method on Corning 7059 substrates. The paper presents the results of measurements and analysis of the transmission and reflection characteristics of TiO_2, TiO_2: (2 at. % Ag), TiO_2: (8 at. % Ag) thin films, as well as the results of surface topography measurements using an optical profilometer and microscopic photos – also showing the surface area of the produced coatings. The analysis of the results showed that the addition of silver significantly influences the properties of thin films based on TiO_2. In particular, it was demonstrated by the comparison of the values of parameters such as the light transmission and reflection coefficient for a wavelength of 550 nm (T_{550}, R_{550}), the position of the optical absorption edge (λ_{cutoff}), the Urbach energy value (E_u) and the width of the optical energy gap ($E_g^{opt.}$). Moreover, it has been shown that thin films of TiO_2 with the addition of silver have Ag agglomerates on their surface. The obtained results were discussed in relation to the literature.
Keywords: thin films, TiO_2, silver, optical properties, magnetron sputtering

Tomasz Śliwa[1], Kamil Zdziebko[2], Tomasz Kowalski[3]

Badania otworowych wymienników ciepła w Laboratorium Geoenergetyki na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie

1. Wprowadzenie

Obecnie coraz większe znaczenie w dziedzinie energetyki zajmują źródła odnawialne, do których można zaliczyć energię geotermalną. Ten rodzaj energii można udostępniać za pomocą otworów wiertniczych. Energię geotermalną dzieli się na dwa główne typy: niskotempretaurową i wysokotemperaturową.

Według Haenela i in. (1988) za przemieszczanie się energii cieplnej w płytszej części litosfery Ziemi do głębokości 20-40 kilometrów odpowiedzialny jest głównie proces kondukcji [1]. Za podstawowe źródło energii cieplnej Ziemi (ponad 80% jej wartości) uważa się energię cieplną, powstającą w sposób nieprzerwany w wyniku rozpadu zawartych w skałach naturalnych pierwiastków promieniotwórczych (głównie w płaszczu ziemskim). Najbardziej interesujące obszary geotermalne, z punktu widzenia eksploatacji, są związane ze strefami magmowymi, w miejscach aktywnych sejsmicznie, współczesnej aktywności wulkanicznej. Zlokalizowane są one zazwyczaj na obrzeżach płyt tektonicznych, gdzie temperatura już na niedużych głębokościach może osiągać wysokie wartości. Najważniejsze anomalie, umiejscowione w strefach sejsmicznych, występujących w strefach subdukcji i ryftowych. Obserwuje się je w zachodniej części Stanów Zjednoczonych, na Filipinach, w Japonii, Nowej Zelandii, Kamczatce, Islandii, we Włoszech oraz na terenie krajów Ameryki Środkowej [2, 3]. W perspektywie uwzględniającej zastosowanie energii geotermalnej w skali świata, największy udział pod względem zainstalowanej mocy i zużycia ciepła w zastosowaniach bezpośrednich od wielu lat notuje się dla ogrzewania pomieszczeń (przy wykorzystaniu ciepła wód wydobywanych z głębokich otworów oraz geotermalnych pomp ciepła współpracujących z wymiennikami otworowymi).

Niemniej jednak wykorzystanie energii geotermalnej jest coraz bardziej powszechne m.in. w Polsce i Kanadzie. Szczególnie mowa tu o energii niskotemperaturowej. Płytką geotermię opisywano już od dawna [4-8]. Pozyskiwana ona jest za pomocą otworowych wymienników ciepła. Jest to najpopularniejsze rozwiązanie, dostępne dla użytkowników zarówno indywidualnych, jak i przemysłowych, które można wykonać w każdej litologii [9, 10]. Bardzo podobnym rozwiązaniem, które również jest w fazie

[1] sliwa@agh.edu.pl, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Laboratorium Geoenergetyki, Katedra Wiertnictwa i Geoinżynierii, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, www.geotermia.agh.edu.pl.

[2] kzdziebko@agh.edu.pl, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Laboratorium Geoenergetyki, Katedra Wiertnictwa i Geoinżynierii, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, www.geotermia.agh.edu.pl.

[3] tkowal@agh.edu.pl, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Laboratorium Geoenergetyki, Katedra Wiertnictwa i Geoinżynierii, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, www.geotermia.agh.edu.pl.

rozwoju, są także termopale zwane palami energetycznymie [11-14]. Wymienniki otworowe pozwalają na dostarczenie ciepła zarówno dużym obiektom takim jak centra handlowe, jak i małym domom jednorodzinnym, co uwydatnia ich wielopłaszczyznową możliwość działania. Na dzień 31 grudnia 2018 r. w Polsce szacowane jest ponad 56 000 geotermalnych pomp ciepła (od 10 do 200 kW). Ich łączna moc wynosiła co najmniej 650 MWt, a produkcja ciepła 3 100 TJ/rok [15].

2. Wprowadzenie badania i nauczanie o systemach otworowych wymienników ciepła

Odpowiedzią na zwiększone zainteresowanie energią geotermalną, a w głównej mierze otworowymi wymiennikami ciepła są działania podejmowane na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Zespół badawczy Laboratorium Geoenergetyki prowadzi szerokie działania z zakresu geotermii, zarówno pod kątem naukowym, jak i dydaktycznym.

2.1. Utworzenie Laboratorium Geoenergetyki

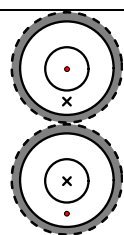
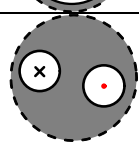
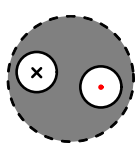
Laboratorium Geoenergetyki AGH powstało w 2008 roku przy Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie i od początków swej działalności zajmuje się wykonywaniem badań naukowych i specjalistycznych analiz w zakresie energetyki geotermalnej, ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień związanych z tematyką otworowych wymienników ciepła.

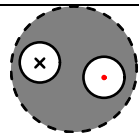
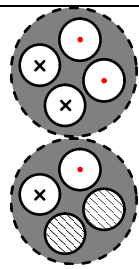
Rysunek 1. Wykonywanie otworowych wymienników ciepła na terenie AGH w Krakowie [opracowanie własne]

Jako początek działalności Laboratorium Geoenergetyki twórcy przyjmują trzy główne wydarzenia, do których można zaliczyć przygotowanie i zgłoszenie wniosku grantowego na wykonanie i badania otworowych wymienników ciepła (styczeń 2007 r.), opracowanie i wykonanie pierwszego w Polsce testu reakcji termicznej (TRT – *Thermal Response Test*), co miało miejsce na przełomie lat 2007/2008, a także początek wiercenia otworów w celu pozyskiwania ciepła Ziemi – otworowych wymienników ciepła – na terenie AGH (rys. 1).

Na stacji polowej przy budynku Laboratorium znajduje się 5 otworowych wymienników ciepła o różnej konstrukcji (tab. 1). Wymienniki służą jako źródło ciepła i chłodu do ogrzewania i klimatyzacji sali audytoryjnej w budynku Wydziału. System wspomagany jest przy pomocy kolektorów słonecznych (rys. 2). W budynku Laboratorium znajdują się dwie geotermalne pompy ciepła o mocy po 13 kW każda.

Tabela 1. Konstrukcje wymienników otworowych odwierconych w 2008 roku

1	2	3	4	5	6	7	8
Numer otworowego wymiennika ciepła	Nazwa otworowego wymiennika ciepła	Konstrukcja otworowego wymiennika ciepła	Odległość pomiędzy osiami rur [mm]	Zaczyn uszczelniający	Średnica rury zewnętrznej [mm]	Grubość ścianki rury [mm]	Materiał rury
1	LG -1a		nie dotyczy	zaczyn bazujący na cemencie, λ = 1,2 W/(mK)	90 40	5,4 2,4	PE
2	LG -2a		50	zaczyn bazujący na cemencie, λ = 1,2 W/(mK)	40	2,4	PE
3	LG -3a		50	zaczyn bazujący na cemencie ze zwiększonym przewodnictwem cieplnym (ThermoCem), λ = 2,0 W/(mK)	40	2,4	PE

4	LG -4a		50	żwir o granulacji od 8 do 16 mm i dwa korki iłowe – Compactonit, λ = 1,8 W/(mK)	40	2,4	PE
5	LG -5a		40	zaczyn bazujący na cemencie, λ = 1,2 W/(mK)	32	2,4	PE

Źródło: [10]

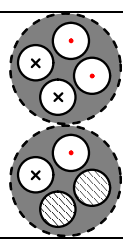
Rysunek 2. Kolektory słoneczne pozyskujące ciepło do magazynowania w górotworze oraz znajdujące się przed nimi pokrywy studzienek otworowych wymienników ciepła [opracowanie własne]

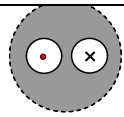
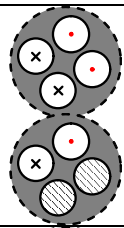
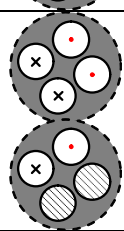
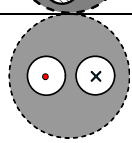
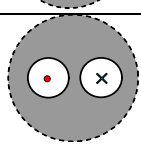
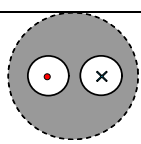
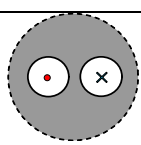
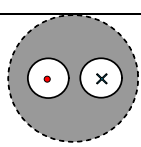
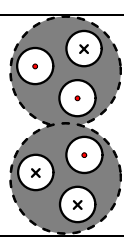
Na wyposażeniu Laboratorium Geoenergetyki znajdują się m.in. aparatura do przeprowadzania testu TRT, otworowe wymienniki ciepła, urządzenie do pomiaru przewodności cieplnej FOX 50, geotermalne pompy ciepła pracujące w dwóch kierunkach (ciepło/chłód), stanowisko pomiarowe mocy grzewczej, laboratoryjne modele centrycznego wymiennika ciepła, sonda do profilowania temperaturowego otworu NIMO-T, kamera termowizyjna i termometr wykonujący pomiary w podczerwieni, przepływomierz ultradźwiękowy dla bezinwazyjnych pomiarów prędkości przepływu cieczy w rurach, dwa wilgotnościomierze, stacja meteo, kolektory słoneczne (5 sztuk), każdy o innej konstrukcji, instalacja oczyszczająca parking ze śniegu działająca w oparciu o ciepło pochodzące z górotworu (w lecie działa jako kolektor słoneczny), miernik poziomu nośnika ciepła w wymienniku i oprogramowanie specjalistyczne, tj.: TOUGH 3.0 (*Transport Of Unsaturated Groundwater and Heat*), BoHEx (*Borehole Heat Exchanger*), EED (*Earth Energy Designer*), OZC auditor oraz inne.

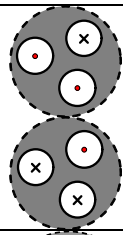
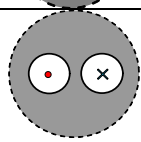
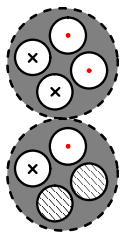
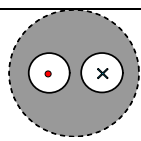
W 2017 roku na terenie Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie powstało pole badawcze otworowych wymienników ciepła (rys. 3), w których skład wchodzi czternaście wymienników otworowych o różnych konstrukcjach (tab. 2), w tym także wymienniki ukośne.

Rysunek 3. Wiercenie nowych otworowych wymienników ciepła na Akademii Górniczo-Hutniczej w 2017 r. [opracowanie własne]

Tabela 2. Konstrukcje wymienników otworowych odwierconych w 2017 roku

1	2	3	4	5	6	7	8
Numer otworowego wymiennika ciepła	Nazwa otworowego wymiennika ciepła	Konstrukcja otworowego wymiennika ciepła	Odległość pomiędzy osiami rur [mm]	Zaczyn uszczelniający	Średnica rury zewnętrznej, [mm]	Grubość ścianki rury, [mm]	Materiał rury
1	LG-1b		40	zaczyn uszczelniający o podwyższonej przewodności cieplnej (TermorotaS)	32	3,0	PE, rura gładka

2	LG-2b		50	zaczyn uszczelniający o podwyższonej przewodności cieplnej (TermorotaS)	32	3,0	PE.. rura typu turbocol lector
3	LG-3b		40	zaczyn uszczelniający o podwyższonej przewodności cieplnej (TermorotaS)	32	3,0	PE.. rura typu turbocol lector
4	LG-4b		40	zaczyn uszczelniający o podwyższonej przewodności cieplnej (TermorotaS)	32	3,0	PE.. rura typu turbocol lector
5	LG-5b		50	zaczyn uszczelniający o podwyższonej przewodności cieplnej (TermorotaS)	40	3,0	PE.. rura gładka
6	LG-6b		50	zaczyn uszczelniający o odwyższonej przewodności cieplnej (TermorotaS)	40	3,0	PE.. rura typu turbocol lector
7	LG-7b		55	zaczyn uszczelniający o podwyższonej przewodności cieplnej (TermorotaS)	45	3,3	PE.. rura typu turbocol lector
8	LG-8b		40	zaczyn uszczelniający o podwyższonej przewodności cieplnej (TermorotaS)	32	3,0	PE.. rura typu turbocol lector
9	LG-9b		40	zaczyn uszczelniający o podwyższonej przewodności cieplnej (TermorotaS) w interwale 0-20 m	32	2,9	PE.. rura typu turbocol lector
10	LG-10b		40	zaczyn uszczelniający o podwyższonej przewodności cieplnej (TermorotaS)	40	3,0	PE.. rura typu turbocol lector

11	LG-11b		40	zaprawa murarska	40	3,0	PE, rura typu turbocol lector
12	LG-12b		40	cement	32	2,9	PE, rura typu turbocol lector
13	LG-13b		40	zaczyn uszczelniający o podwyższonej przewodności cieplnej (TermorotaS)	Pierwsza U-rurka: - φ32 – Turbocollector - φ40 – Turbocollector Druga U-rurka: - φ32 – gładka rura - φ40 – gładka rura	2,9 3,0 3,0 3,0	PE, rura typu turbocol ector oraz gładka rura
14	LG-14b		40	zaczyn uszczelniający o podwyższonej przewodności cieplnej (TermorotaS) z grafitem	32	2,9	PE, rura typu turbocol lector

Źródło: [10]

2.2. Granty badawcze

Zespół Laboratorium Geoenergetyki zaangażowany jest w wiele działań naukowych, zarówno w kraju, jak i za granicą. Poniżej pokrótce przedstawiono najważniejsze obecnie działania naukowe i realizowane projekty [16].

2.2.1. Projekt międzynarodowy – Innovation in Underground Thermal Energy Storages with Borehole Heat Exchangers (BHEsINNO)

Projekt realizowany jest w ramach środków programu POLNOR 2019 i jest owocem współpracy międzynarodowej pomiędzy AGH, University of Stavanger i firmą MuoviTech Polska Sp. z o.o. Jako czas realizacji projektu zaplanowano okres 36 miesięcy z zakończeniem badań w 2023 r., a jednym z otrzymanych rezultatów będzie wykonanie zespołu otworowych wymienników ciepła, które posłużą do ogrzania i chłodzenia obiektów w Zespole Pałacowo-Parkowym w Młoszowej należącym do AGH.

Obecne rozwiązania pozyskiwania i magazynowania ciepła (ang. *Underground Thermal Energy Storage (UTES)*) znajdują szczególnie istotną rolę w zaspokojeniu zapotrzebowania na ciepło w krajach północnych, tj. Norwegia i Szwecja, ale również w centralnej i wschodniej Europie (tj. np. Polska i Ukraina). Projekt o nazwie „Inno-

vation in Underground Thermal Energy Storages with Borehole Heat Exchangers" skupia się na rozwoju innowacyjnych konstrukcji otworowych wymienników ciepła, których celem jest intensyfikacja i ukierunkowanie na coraz efektywniejsze pozyskiwanie ciepła z górotworu, co jest definiowane jako efektywność (jednostkowa) wymiennika w jednostkach W/m dla otworowego wymiennika ciepła.

Zaplanowane w projekcie innowacyjne konstrukcje zawierają zastosowanie nowych układów rur i kompozytów w centrycznych konstrukcjach otworowych wymienników ciepła. Następnym krokiem jest szczegółowe zbadanie zastosowanych rozwiązań i porównanie układów centrycznych pozwalających na wykonywanie otworowych wymienników ciepła w większych głębokościach, względem powszechnie stosowanych układów wymienników ciepła składających się z tradycyjnych U-rurek.

Metodyka badania będzie bazowała na matematycznym modelowaniu pojedynczych otworowych wymienników ciepła oraz układów składających się z wielu otworowych wymienników ciepła, tworzących zespoły z uwzględnieniem ich wzajemnego oddziaływania. Utworzone modele matematyczne zostaną zwalidowane z wynikami otrzymanymi z testów przeprowadzonych bezpośrednio na wykonanych otworach. W tym celu przewidziane jest wykonanie testów reakcji termicznej (*ang. TRT – Thermal Response Test*), a następnie interpretacja otrzymanych wyników za pomocą trzech metod, dla otrzymania wyników jakościowych. Dodatkowo przeprowadzony zostanie nowy typ testu na bazie minimum trzech testów reakcji termicznej otworowego wymiennika ciepła, wyznaczając za jego pomocą efektywną przewodność cieplną badanych konstrukcji, w zależności od parametrów eksploatacyjnych wymiennika, tj. mocy grzewczej i strumienia objętości nośnika ciepła.

Kolejną bardzo istotną innowacją projektu jest przeprowadzenie badań parametrów technologii wiercenia podczas wykonywania otworowych wymienników ciepła, analiza uzyskanych wyników, a następnie ich optymalizacja. Następnie opracowana zostanie metoda do zastosowania w miejscu wykonywania otworowych wymienników ciepła mająca na celu zmniejszenie kosztów ich wykonywania i polepszenia jakości wierceń, co jest szczególnie istotne przy wykonywaniu dużych inwestycji składających się ze znacznej liczby otworowych wymienników ciepła.

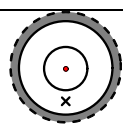
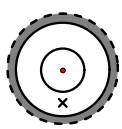
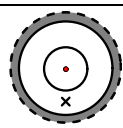
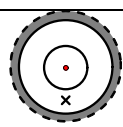
Wykonywane konstrukcje zaprojektowane zostały w taki sposób (tab. 3), aby wykluczyć wpływ wielu zmiennych podczas określania efektywności pozyskiwania energii, pozwalając tym samym wyznaczyć wpływ badanego parametru na otrzymywaną moc cieplną. W projekcie będzie badany wpływ parametrów:

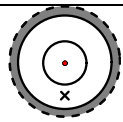
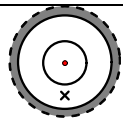
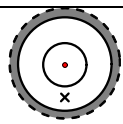
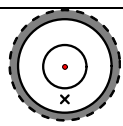
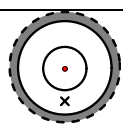
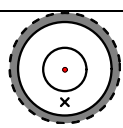
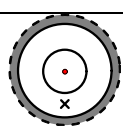
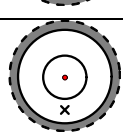
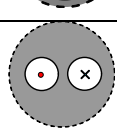
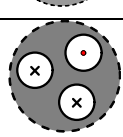
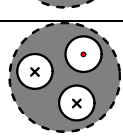
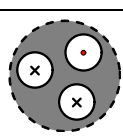
- głębokość, dochodząca do 300 m;
- powierzchnia wymiany ciepła;
- konstrukcja otworowego wymiennika ciepła;
- zaczyn uszczelniający otworowy wymiennik ciepła;
- dodatki do zaczynu uszczelniającego otworowy wymiennik ciepła;
- średnice rur wymiennika ciepła;
- grubości ścianek rur wymiennika ciepła;
- materiał zastosowany do wykonania rur;
- geometria przepływu nośnika ciepła;
- charakter przepływu nośnika ciepła (turbulentny/laminarny);
- średnica otworowego wymiennika ciepła;
- odchylenie od pionu.

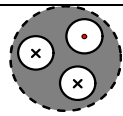
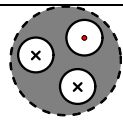
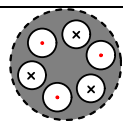
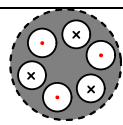
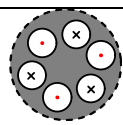
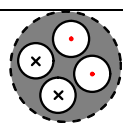
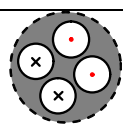
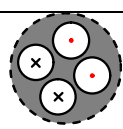
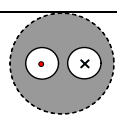
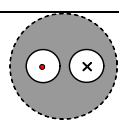
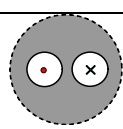
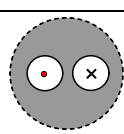
Dodatkowo dla wykonania optymalizacji parametrów wiercenia dla wykonywania otworowych wymienników ciepła, zbadany zostanie wpływ czynników:

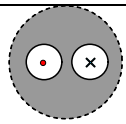
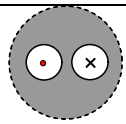
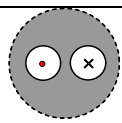
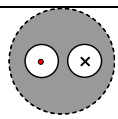
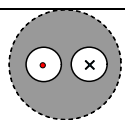
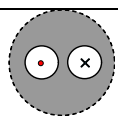
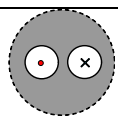
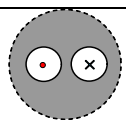
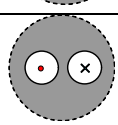
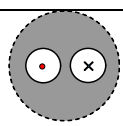
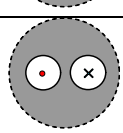
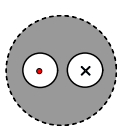
- metoda wykonywania wiercenia;
- nacisk osiowy na świder;
- prędkość obrotowa świdra;
- ciśnienie sprężonego powietrza dla napędu dolnego młotka (w metodzie udarowo-obrotowej);
- typ zastosowanych zębów świdra;
- stan i zużycie zębów zastosowanego świdra;
- głębokość i postęp wiercenia względem przewiercanej litologii skał;
- porównanie zastosowanych technologii różnych producentów świdrów.

Tabela 3. Planowane konstrukcje w systemie geotermalnym dla ogrzania/chłodzenia Zespołu Pałacowo-Parkowego w Młoszowej

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nazwa otworowego wymiennika ciepła	Głębokość owc*/ minimalna średnica świdra, m/mm	Konstrukcja otworowego wymiennika ciepła	Odległość pomiędzy osiami rur [mm]	Materiał wypełniający/ uszczelniający	OD rury 1 [mm]	OD rury 2 [mm]	Grubość ścianki rury [mm]	Materiał rury (zewnętrzna/ wewnętrzna rura)
LG-1c	100/143		N/A	Rehau	nowy kompozyt			
LG-2c	100/143		N/A	MuoviTherm				
LG-3c	100/143		N/A	ThermoCem o podwyższonej przewodności				
LG-4c	200/143		N/A	MuoviTherm				

LG-5c	300/143		N/A	MuoviTherm				
LG-6c	300/143		N/A	MuoviTherm	90	40+32	3	1×PE+2×PP
LG-7c	200/143		N/A	MuoviTherm	90	40	3,7	1×PE+1×PE
LG-8c	200/143		N/A	MuoviTherm	90	50	3,7	1×PE+1×PP
LG-9c	200/143		N/A	MuoviTherm	90	40	3,7	1×PE+1×PP
LG-10c	200/143		N/A	MuoviTherm	90	40+32	3,7 + 3,0	1×PE+2×PP
LG-11c	200/143		N/A	MuoviTherm + grafit	90	50	3,7	1×PE+1×PP
LG-12c	200/143		N/A	MuoviTherm + grafit	90	50 + 40	3,7	1×PE+2×PP
LG-13c	200/143		max	MuoviTherm + grafit	90	–	3,7	PE
LG-14c	100/143		max	MuoviTherm	1x45+2x32	–	4,1 + 2x3,0	PE
LG-15c	150/143		max	MuoviTherm	1x45+2x32	–	4,1 + 2x3,0	PE
LG-16c	150/143		max	MuoviTherm	1x45+2x32	–	4,1 + 2x3,0	PE+PP

LG-17c	200/143		max	MuoviTherm + grafit	1x45+2x32	–	4,1 + 2x3,0	PE
LG-18c	200/143		max	MuoviTherm	1x45+2x32	–	4,1 + 2x3,0	PE
LG-19c	100/143		max	MuoviTherm	32	–	3	PE
LG-20c	150/143		max	MuoviTherm	32	–	3	PE
LG-21c	200/143		max	MuoviTherm	32	–	3	PE
LG-22c	100/143		max	MuoviTherm	32	–	3	PE
LG-23c	150/143		max	MuoviTherm	32	–	3	PE
LG-24c	200/143		max	MuoviTherm	32	–	3	PE
LG-25c	100/143		max	MuoviTherm	40	–	3,7	PE
LG-26c	150/143		min	MuoviTherm	40	–	3,7	PE
LG-27c	150/143		max	Rehau	40	–	3,7	PE
LG-28c	150/143		max	MuoviTherm	40	–	3,7	PE

LG-29c	150/143		max	ThermoCem o podwyższonej przewodności	40	–	3,7	PE
LG-30c	200/143		max	MuoviTherm	40	–	3,7	PE
LG-31c	150/143		min	MuoviTherm	40	–	3,7	PE
LG-32c	150/143		max	ThermoCem	40	–	3,7	PE
LG-33c	100/143		min	MuoviTherm	40	–	3,7	PE
LG-34c	100/143		min	MuoviTherm	40	–	3,7	PE
LG-35c	100/120		max	MuoviTherm + grafit	40	–	3,7	PE
LG-36c	100/120		max	MuoviTherm + grafit	40	–	3,7	PE
LG-37c	100/120		max	MuoviTherm grafit	40	–	3,7	PE
LG-38c	100/120		min	MuoviTherm	40	–	3,7	PE
LG-39c	100/120		min	MuoviTherm	40	–	3,7	PE
LG-40c	100/120		min	MuoviTherm	40	–	3,7	PE

Źródło: [opracowanie własne]

2.2.2. Sękowa GT-1

Kolejnym projektem badawczym jest wykonywany na zlecenie Gminy Sękowa oraz Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej projekt badawczy, dotyczący koncepcji głębokiego wymiennika ciepła.

Realizacja projektu będzie opierała się na analizie wyników pomiarów temperatury wykonanych w otworze Sękowa GT-1 pod kątem jego wykorzystania jako głębokiego otworowego wymiennika ciepła. Zaprezentowana została wariantowa koncepcja głębokiego otworowego wymiennika ciepła wykorzystującego otwór Sękowa GT–1 (wykonana w oparciu o już istniejące dane o konstrukcji otworu uzupełnione o informacje pozyskane z dokumentacji powykonawczej). Wskazano koncepcję optymalną. Opisano warunki pracy w trybie chłodniczym (magazynowym). Ponadto, opracowana została ocena potencjału i parametrów energetycznych głębokiego otworowego wymiennika ciepła wykorzystującego negatywny otwór geotermalny Sękowa GT-1, a także charakterystyka geoenergetyczna głębokiego otworowego wymiennika ciepła. Przygotowana została również ocena konstrukcji, stanu technicznego, potencjału i parametrów energetycznych odwiertów Gorlice-12 i Gorlice-13 (sąsiadujących z otworem Sękowa GT-1) pod kątem możliwości i zasadności ich wykorzystania w formie głębokich otworowych wymienników ciepła.

2.2.3. Energia geotermalna: podstawa niskoemisyjnego ciepłownictwa, poprawy warunków życia i zrównoważonego rozwoju

Członkowie zespołu Laboratorium Geoenergetyki brali również udział w międzynarodowym grancie Energia geotermalna: podstawa niskoemisyjnego ciepłownictwa, poprawy warunków życia i zrównoważonego rozwoju. Głównym wykonawcą grantu był Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, Pracownia Odnawialnych Źródeł Energii. Celem tego projektu był transfer wiedzy, technologii i dobrych praktyk stosowania w ciepłownictwie w budynkach energii geotermalnej (OZE) z Norwegii, Islandii do Polski. Projekt przyczynił się m.in. do budowania potencjału, wzrostu akceptacji i wiedzy wielu grup interesariuszy co do szerszego stosowania geotermii, niskoemisyjnej zrównoważonej gospodarki, poprawy warunków życia oraz budowania współpracy bilateralnej [17].

2.2.4. Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza

Zespół Laboratorium Geoenergetyki prowadzi również pracę naukową wspieraną przez projekt Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza. Jest to program wprowadzony przez nową ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce i stanowi jeden z kluczowych elementów reformy nauki i szkolnictwa wyższego. Priorytetem programu jest wyłonienie i wsparcie uczelni, które będą dążyć do osiągnięcia statusu uniwersytetu badawczego, a także będą w stanie skutecznie konkurować z najlepszymi ośrodkami akademickimi w Europie i na świecie. Jedną z uczelni realizujących projekt jest AGH [18, 19].

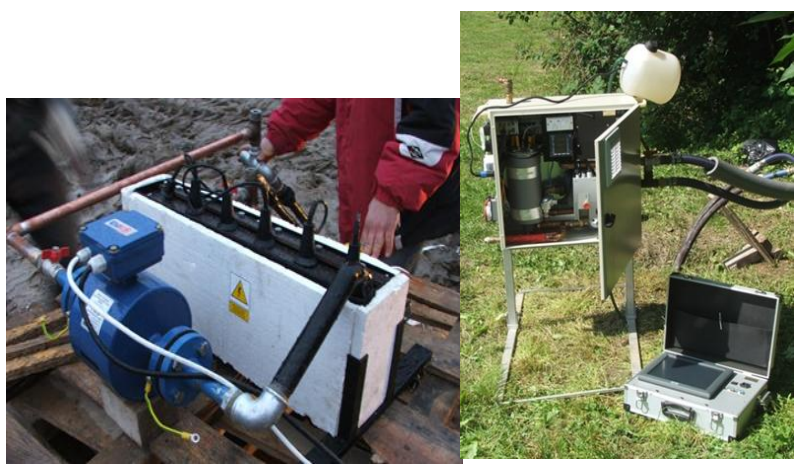
Jednym z działań prowadzonych przez Laboratorium Geoenergetyki jest grant uczelniany na prace badawcze realizowane z udziałem doktorantów Badania głębokich otworowych wymienników ciepła na bazie otworów wiertniczych przeznaczonych do likwidacji. Praca realizowana jest w obrębie Priorytetowego Obszaru Badawczego

Zrównoważone technologie energetyczne, odnawialne źródła energii i magazyny energii oraz zarządzanie zasobami. Projektowanie, wytwarzanie, aplikacja, synergia i integracja procesów. Prace w grancie będą polegać na opracowaniu metod adaptacji głębokich otworów, głównie naftowych (ropnych i gazowych), do pozyskiwania ciepła geotermalnego. W przypadku, gdy warunki geologiczne na to pozwalają możliwe jest pozyskiwanie wód geotermalnych poprzez odpowiednią adaptację otworu. Jeśli natomiast brak poziomów wodonośnych możliwych do wykorzystania, potencjalnie każdy z otworów może funkcjonować jako (głęboki) otworowy wymiennik ciepła.

Drugim działaniem w ramach Inicjatywy Doskonałości – Uczelnia Badawcza jest działanie polegające na doposażeniu istniejącej infrastruktury naukowo-badawczej. Planowane jest wykonanie innowacyjnych otworowych wymienników ciepła oraz dubletu geotermalnego na polach badawczych Laboratorium Geoenergetyki. Praca realizowana jest w obrębie Priorytetowego Obszaru Badawczego – Zrównoważone technologie energetyczne, odnawialne źródła energii i magazyny energii oraz zarządzanie zasobami. Projektowanie, wytwarzanie, aplikacja, synergia i integracja procesów.

2.3. Testy Reakcji Termicznej

Za pomocą Testu Reakcji Termicznej (TRT) możliwe jest poznanie parametrów cieplnych przewiercanych skał. Jest to zagadnienie szczególnie ważne, aby móc prawidłowo dobrać konstrukcje, liczbę oraz rozmieszczenie otworowych wymienników ciepła. Test Reakcji Termicznej jest metodą na określenie oceny faktycznych właściwości cieplnych górotworu w badanym miejscu [10]. Test reakcji termicznej wymienników otworowych polegają na pomiarze zmian temperatury nośnika ciepła podczas jego cyrkulacji w obiegu zamkniętym z dostarczeniem lub odbieraniem energii cieplnej o stałej mocy grzewczej. Należy w układzie powierzchniowym zapewnić brak wpływu warunków atmosferycznych na pomiary temperatur [20]. Laboratorium Geoenergetki wykonało w okresie 10 lat istnienia ponad 150 testów reakcji termicznej w całej Polsce. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono udoskonalenie sprzętu do TRT na przestrzeni lat.



Rysunek 4. Zestaw do wykonywania Testu Reakcji Termicznej, po lewej Wersja 1 (2006 r.), po prawej Wersja 2 (2008 r.) [opracowanie własne]

Rysunek 5. Zestaw do wykonywania Testu Reakcji Termicznej, po lewej Wersja 3 (2015 r.), po prawej Wersja 4 (2016 r.) [opracowanie własne]

2.4. Działalność studentów w Kole Naukowym Geowiert

Na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu prężnie działa Studenckie Koło Naukowe Geowiert. Studenci udzielający się w organizacji zajmują się badaniami z zakresu wiertnictwa, geoinżynierii oraz szeroko pojętych zagadnień związanych z energią geotermalną.

2.4.1. Granty rektorskie

Co roku Koło Naukowe Geowiert składa wnioski o Granty Rektora AGH. W ramach tych działań w ostatnich latach przeprowadzono wiele ciekawych badań naukowych. W 2018 roku zrealizowano granty o następujących tytułach: Modelowanie wyników testu reakcji termicznej pod kątem efektywności podziemnych magazynów ciepła oraz Badania zaczynów uszczelniających z dodatkiem produktów grafenowych w geotermii. W 2019 roku zrealizowano grant pod tytułem: Badania zaczynów do uszczelniania otworów wiertniczych w geotermii z dodatkiem sproszkowanych metal i ich rud. W 2020 roku zrealizowano granty o następujących tytułach: Model laboratoryjny otworowego wymiennika ciepła oraz Badania zaczynów uszczelniających o obniżonej przewodności cieplnej w perspektywie zapobiegania stratom energii cieplnej przy zastosowaniu w głębokich otworach geotermalnych. W 2021 roku Studenckie Koło Naukowe Geowiert uzyskało finansowanie następujących grantów:

- dobór technologicznych parametrów wiercenia dla redukcji kosztów wykonywania dużych instalacji z otworowymi wymiennikami ciepła, którego produktem końcowym jest opracowanie programu komputerowego dla wyznaczenia optymalnych parametrów wiercenia otworowych wymienników ciepła;
- badania rozpływu ciepła w górotworze pod kątem podziemnego magazynowania, głównym celem projektu jest zbadanie efektu naturalnej regeneracji zasobów ciepła w górotworze, na skutek przepływającej wody podziemnej w podanym interwale głębokości;
- projekt dwuczęściowy pt. Geoenergetyka otworowa: (część 1) – Wykorzystanie otworów wiertniczych do magazynowania energii oraz (część 2) – opracowanie matematycznego modelu oceny ekonomicznej innowacyjnego systemu ogrzewania na bazie głębokiego otworowego wymiennika ciepłą na przykładzie Kampusu AGH.

Sumaryczna kwota dofinansowania na 2021 rok dla koła naukowego równa jest 300185,00 zł.

2.4.2. Granty ministerialny

Ponadto Koło Naukowe Geowiert uzyskało grant w ramach programu pod nazwą Studenckie koła naukowe tworzą innowacje. Tytuł złożonego projektu to Głęboki otworowy wymiennik ciepła na bazie wybranego negatywnego otworu geotermalnego. Przedmiotem projektu jest stworzenie oprogramowania komputerowego służącego do projektowania głębokich otworowych wymienników ciepła na bazie: a) otworów przeznaczonych do likwidacji (wyeksploatowanych i/lub negatywnych), b) zlikwidowanych otworów wiertniczych. Wstępna walidacja projektu oparta będzie na istniejących na terenie AGH otworowych wymiennikach oraz na bazie planowanych do wykonania (obecnie na etapie przetargu) głębszych wymienników otworowych na terenie Zespołu Pałacowo-Parkowego w Młoszowej. Wstępna walidacja może być oparta również na głębokim otworowym wymienniku (ponad 2 tys. m), który może być zrealizowany na bazie negatywnego otworu geotermalnego.

Głównym celem projektu jest zwiększenie wykorzystania energii geotermalnej do produkcji energii elektrycznej i cieplnej w Polsce oraz na świecie, poprzez różne zabiegi promocyjne przeprowadzonych symulacji pracy zaprojektowanego systemu grzewczego, jak również stworzonego w tym celu oprogramowania.

3. Dotychczasowe wyniki badań otworowych wymienników ciepła na terenie AGH w Krakowie

W latach 2008 i 2009 wykonywano na wymiennikach otworowych testy reakcji termicznej, przy zmiennych:

- strumieniach objętości nośnika ciepła;
- mocach grzewczych;
- rodzajach nośnika ciepła (woda i roztwór glikolu propylenowego);
- czasach trwania testu;
- kierunkach cyrkulacji (dotyczy otworu centrycznego).

Cały układ laboratoryjny w 2009 roku badany z wodą jako nośnikiem ciepła. W 2010 roku wodę zastąpiono 30% glikolem monopropylenowym.

Wykonano badania na modelu otworowego wymiennika ciepła nad wpływem prędkości przepływu w poszczególnych przestrzeniach wymiennika centrycznego na wymianę ciepła [3]. W tym celu wymieniano rury wewnętrzne tak, aby regulować średnicą wewnętrzną i centryczną. Zmieniając rury wewnętrzne, zmieniano także przewodność cieplną kolumny wewnętrznej (poprzez zmianę materiału rur i ich liczbę, która budowała kolumnę wewnętrzną).

W całej metodyce niezmiernie ważnym czynnikiem jest zakres pomiarowy TRT branego do interpretacji, a w szczególności do określania współczynnika kierunkowego prostej regresji w układzie półlogarytmicznym. Stąd dla ukazania wpływu tej wielkości w tabeli 4 podano uzyskane wyniki dla dwóch najczęściej przyjmowanych początków linii prostej to jest: $t = (5 \cdot r^2)/\alpha$ oraz $t = (20 \cdot r^2)/\alpha$.

Istotą testu reakcji termicznej jest wprowadzanie lub pobieranie z wymiennika otworowego energii przy stałej mocy grzewczej.

Odpowiednie punkty oznaczają:

- t_0 – początek fazy grzewczej testu (włączenie grzałek);
- t_1 – punkt załamania krzywej;

- t_2 – czas odpowiadający $t = 5 \cdot r_o^2/\alpha$;
- t_3 – czas odpowiadający $t = 20 \cdot r_o^2/\alpha$;
- t_4 – połowa czasu trwania fazy grzewczej testu;
- t_5 – koniec fazy grzewczej testu (wyłączenie grzałek).

Dla analizowanych testów na podstawie regresji liniowych określono współczynniki nachylenia prostych, biorąc pod uwagę następujące przedziały danych (numeracja zgodna z tabelą 4):

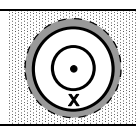
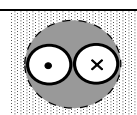
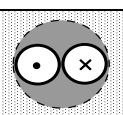
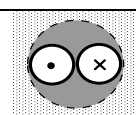
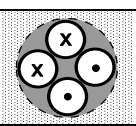
- od t_0 do t_5;
- od t_1 do t_5;
- od t_2 do t_5;
- od t_0 do t_2;
- od t_0 do t_3;
- od t_2 do t_3;
- od t_1 do t_4;
- od t_3 do t_5.

Poszczególne zakresy pomiarowe opisano poniżej.

1. Cała faza grzewcza.
2. Od punktu załamania do końca fazy grzewczej.
3. Od punktu charakterystycznego $t = 5 \cdot r_o^2/\alpha$ do końca fazy grzewczej.
4. Od początku fazy grzewczej do punktu charakterystycznego $t = 5 \cdot r_o^2/\alpha$
5. Od początku fazy grzewczej t_0 do punktu charakterystycznego $t = 20 \cdot r_o^2/\alpha$
6. Pomiędzy punktami charakterystycznymi $t = 5 \cdot r_o^2/\alpha$ oraz $t = 20 \cdot r_o^2/\alpha$
7. Od punktu załamania do połowy czasu trwania fazy grzewczej testu.
8. Od punktu charakterystycznego $t = 20 \cdot r_o^2/\alpha$ do końca fazy grzewczej testu.

Sapińska-Śliwa i in. (2019) przedstawili wyniki interpretacji testów z wykorzystaniem trzech metod. Istnieją trzy metody interpretacji wyników z testów reakcji termicznej. Parametry wyznaczane to efektywna przewodność cieplna λ_{ef} i opór termiczny otworu wiertniczego R_b [21]. Znajomość tych parametrów jest niezbędna do prawidłowego zaprojektowania wymienników otworowych i działania geotermalnych pomp ciepła. Obecnie w użyciu jest metoda klasyczna.

Tabela 4. Porównanie wyników interpretacji testów

Nazwa otworu		LG-1a	LG-2a	LG-3a	LG-4a	LG-5a
Konstrukcja						
		centryczna	pojedyncza U-rura z cementem	pojedyncza U-rura z cementem o podwyższonym przewodnictwie	pojedyncza U-rura ze żwirem	podwójna U-rura
Obliczone wartości	λ_{mk}	1,917	<u>1,753</u>	2,003	**2,802**	1,962
	λ_{msro}	2,121	<u>1,829</u>	1,981	**2,716**	1,980
	λ_{mp}	<u>1,905</u>	**2,403**	2,072	2,075	1,980
	σ_λ	0,121	0,355	0,047	0,397	0,010

	$R_{b.mk}$	0,151	0,151	0,124	**0,045**	0,135
	$R_{b.msro}$	0,161	0,116	**0,091**	0,134	0,102
	$R_{b.mp}$	0,138	0,147	**0,093**	0,097	0,099
	σ_R	0,012	0,019	0,019	0,045	0,020

Obliczonymi wartościami są: λ_{mk} – przewodność cieplna górotworu (metoda klasyczna), W· K^{-1}· m^{-1}, λ_{mp} – przewodnictwo cieplne górotworu (metoda punktowa), W· K^{-1}· m^{-1}, λ_{msro} - przewodnictwo cieplne górotworu (metoda stałej rezystywności), σ_λ – odchylenie standardowe przewodnictwa cieplnego, W· K^{-1}· m^{-1}, $R_{b.mkcm}$ – opór cieplny otworu (metoda klasyczna), K·m·W^{-1}, $R_{b.mp}$ – opór cieplny otworu (metoda punktowa), K·m·W^{-1}, $R_{b.msro}$ – opór cieplny otworu wiertniczego (metoda stałej rezystywności otworu), K·m·W^{-1}, σ_R – odchylenie standardowe oporu cieplnego, K·m·W^{-1}, k – współczynnik nachylenia (prostych) linii trendów, przedstawiający funkcję temperatury nośnika ciepła względem logarytmu naturalnego czasu TRT, -. Źródło: [21]

Podkreślone wartości oznaczają najgorsze wyniki dla każdej z poszczególnych metod, natomiast pogrubione wyniki są najbardziej korzystne. Najkorzystniejsza przewodność odpowiada wartości największej, a najkorzystniejszy opór wartości najmniejszej.

4. Wnioski

Badania Laboratorium Geoenergetyki skupiają się na zagadnieniach wiertnictwa i otworowej eksploatacji ciepła/chłodu i jest to jedyne laboratorium posiadające tak dużą liczbę różnorodnych konstrukcji na świecie. Stworzenie trzeciego zespołu otworowych wymienników ciepła pozwoli dokładnie zbadać wpływ poszczególnych parametrów konstrukcyjnych na efektywność pozyskiwanego ciepła z górotworu. Ponadto zbadane zostaną parametry wiercenia otworowych wymienników ciepła, a z uzyskane wyniki zostaną poddane optymalizacji w kryteriach czasu i kosztu wykonania instalacji.

Najkorzystniejszą opornością termiczną charakteryzuje się otwór LG-4a, gdzie wyniosła ona 0,045 K·m·W^{-1} dla klasycznej metody. Dla metody punktowej oraz metody stałej rezystancji termicznej otworu wyniki wskazują, że otworowy wymiennik ciepła LG-3a ma najmniejszą oporność termiczną. Rozbieżności mogą się brać z niedoskonałości samej metody pomiaru oraz błędów podczas odczytu temperatury w trakcie trwania testu reakcji termicznej.

Nowe metody wyznaczania współczynników charakterystycznych z testu reakcji termicznych dają różniące się wyniki w porównaniu do metodyki klasycznej. Największe odchylenie standardowe dla przewodności termicznej można zaobserwować w otworze LG-4a, gdzie wyniosło ono 0,397, reszta wyników odchylenia utrzymuję się na dużo mniejszym poziomie, co może wskazywać na dobrą relację pomiędzy odczytem wyników efektywnej przewodności termicznej dla obydwu metod. Niewielkimi odchyleniami standardowymi cechuje się również oporność termiczna. Jednak po otworze LG-4a można zaobserwować, że w poszczególnych przypadkach mogą zajść znaczące różnice, które najprawdopodobniej są uzależnione od czasu trwania testu reakcji termicznej.

Metoda stałej rezystywności termicznej zapewnia wyniki, które nie zależą w żadnej mierze od czasu trwania testu, przez co można wysunąć teorię, że może być ona metodą pewniejszą i dającą pewniejsze wyniki współczynników otworowych wymienników ciepła z testu reakcji termicznej, a co za tym idzie lepsze dopasowanie konstrukcji otworowych wymienników ciepła do danych współczynników.

Podziękowania

Praca powstała w ramach dofinansowania z funduszy norweskich 2014-2021 za pośrednictwem Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu POLNOR 2019 Call nr NOR/POLNOR/BHEsINNO/0018/2019.

Literatura

1. Haenel R., Rybach L., Stegna L., *Handbook of Terrestial Heat-Flow Density Determination*, Springer Netherlands Kluwer AP, Netherlands 1988, s. 1-486.
2. Bauer M., Freeden W., Jacobi H., Neu T., *Handbuch Tiefe Geothermie: Prospektion, Exploration, Realisierung*, Springer Spektrum, Berlin 2014, s. 1-854.
3. Śliwa, T., Gonet, A., Złotkowski, A., Sapińska-Śliwa, A., Bieda, A., Kowalski, T., *Laboratorium Geoenergetyki: 10 lat działalności: Geotermia na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie*, Laboratory of Geoenergetics Book Series, vol. 4, Wydawnictwo Fundacji "Wiertnictwo–Nafta–Gaz, Nauka i Tradycje", Kraków 2017, s. 1-198.
4. Crandall A.C., *House Heating with Earth Heat Pump*, Electrical World, 126/19, 1946, s. 94-95.
5. Kemler E.N., *Methods of Earth Heat Recovery for the Heat Pump*, Heating and Ventilating, 9, 1947, s. 69-72.
6. Ingersoll L. R., Adler F.T., Plass H.J., Ingersoll A.C., *Theory of earth heat exchangers for the heat pump*, ASHVE Transactions, 56, 1950, s. 167-188.
7. Śliwa T., *Wybrane systemy geotermalne w skałach suchych*, Konferencja Naukowa Aktualny stan i perspektywy rozwoju górnictwa w aspekcie ochrony środowiska 13-14 maja 1996 r.,
8. Śliwa T., *Wybrane systemy geotermalne w aspekcie warunków geologicznych*, Zeszyty Naukowe AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, 15, 1998, s. 199-208.
9. Bertani R., *Geothermal Energy: An Overview on Resources and Potential*, Session 1, Geothermall Electricity Production: Possibilities, Technical And Economic Feasibility In Central European Region, International Geothermal Days, Conference & Summer School, Slovakia, 2009.
10. Śliwa T., Sapińska-Śliwa A., Knez D., Bieda A., Kowalski, T., Złotkowski A., *Borehole Heat Exchangers, Production and storage of heat in the rock mass*, Laboratory of Geo-energetics book series vol. 2, Drilling, Oil and Gas Foundation, Krakow 2016, s. 1-177.
11. Koene F. G. H., van Helden W. G. J., Romer J. C., *Energy piles as cost effective ground heat exchangers*, Proceedings TERRASTOCK 2000, Stuttgart, Germany, 28 August – 1 September 2000
12. Vasilescu A-R., *Design and execution of energy piles: Validation by in-situ and laboratory experiments*, Doctorate Thesis, L'École Centrale de Nantes, 2019, s. 1-155.
13. Schröder B., Hanschke T*., Energiepfhähle - umweltfreundliches Heizen und Kühlen mit geothermisch aktivierten Stahlbetonfertigpfählen*, Bautechnik, 80, 2003, s. 925-927.
14. Brandl H., *Energy foundations and other thermo active ground structures*, Geotechnique, 56(2), 2006, s. 81-122.
15. Kępińska B., *Geothermal Energy Country Update Report from Poland, 2015-2019*, Proceedings World Geothermal Congress 2020, Reykjavik, Iceland, April 26 – May 2 2020.
16. www.geotermia.agh.edu.pl [data dostępu 10.03.2021].
17. https://min-pan.krakow.pl/projekty/2017/12/01/energia-geotermlna-podstawa-niskoemisyjnego-cieplownictwa-poprawy-warunkow-zycia-i-zrownowazonego-rozwoju/ [data dostępu 15.04.2021].
18. https://www.agh.edu.pl/uczelnia-badawcza/ [data dostępu 15.04.2021].

19. https://www.gov.pl/web/edukacja-i-nauka/program-inicjatywa-doskonalosci--uczelnia-badawcza [data dostępu 10.03.2021].
20. Gonet A., Śliwa T., Stryczek S., Sapińska-Śliwa A., Jaszczur M., Pająk L., Złotkowski A., *Metodyka identyfikacji potencjału cieplnego górotworu wraz z technologią wykonywania i eksploatacji otworowych wymienników ciepła*, Wydawnictwa AGH, Kraków 2011, s. 1-440.
21. Sapińska-Śliwa A., Śliwa T., Leśniak P., *Efektywna przewodność cieplna i opór termiczny otworowych wymienników ciepła o różnych konstrukcjach*, AGH Drilling, Oil, Gas, 36/2, 2019.

Badania systemów otworowych wymienników ciepła w Laboratorium Geoenergetyki na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie

Streszczenie
W publikacji autorzy skupiają się na działalności badawczej i rozwoju systemów geotermalnych należących do Laboratorium Geoenergetyki na Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Scharakteryzowane zostały dwa już istniejące systemy geotermalne wykorzystywane w badaniach, a także służące do ogrzewania/chłodzenia obiektów uczelnianych za pomocą geotermalnych pomp ciepła.
Ponad dziesięć lat działalności i badań Zespołu badawczego Laboratorium Geoenergetyki w dziedzinie pozyskiwania energii geotermalnej pozwoliło na pozyskanie znaczącego doświadczenia i rozwoju technologii dla konstrukcji i zastosowań wymienników ciepła w obszarze odnawialnych źródeł energii.
Te doświadczenia obejmują obszary badań, rozwoju i nauczania. Powstało wiele prac w oparciu o dane, zarówno z instalacji opisanych w niniejszym artykule, jak i innych badanych na terenie Polski. W Krakowie na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu istnieje również program podyplomowy na kierunku Geoenergetyka i Geoinżynieria.
Dzięki pozyskanemu długoletniemu doświadczeniu oraz chęci dalszego rozwoju, Laboratorium Geoenergetyki uczestniczy w wielu projektach, do których można zaliczyć takie zagadnienia jak: rozwój i efektywne wykorzystanie głębokich wymienników ciepła, badania i rozwój w zakresie posiadanej aparatury dla testów głębokich konstrukcji, a także projekt międzynarodowy mający m.in. na celu utworzeniu trzeciego zespołu otworowych wymienników ciepła składającego się z minimalnie 34 konstrukcji służących do ogrzania i chłodzenia zespołu pałacowo-parkowego w Młoszowej.
Słowa kluczowe: otworowe wymienniki ciepła, energia geotermalna, podziemne magazyny energii i ciepła

Research on Borehole Heat Exchanger of Geoenergetics Laboratory at the AGH University of Science and Technology in Krakow

Abstract
In this material, the authors focus on the research and development of geothermal systems belonging to the Geoenergy Laboratory at the AGH University of Science and Technology in Krakow. The two existing geothermal systems characterized in the article have been used in many studies, as well as they also have been used for heating / cooling university facilities with the use of geothermal heat pumps.
Over ten years of activity and research of the Research Team of the Geoenergy Laboratory in the field of geothermal energy acquisition allowed for gaining significant experience and technology development for the construction and application of heat exchangers in the field of renewable energy sources.
These experiences cover the areas of research, development and teaching. A lot of works have been created based on data from both the installations described in this article and other tested installations in Poland. In Krakow, at the Faculty of Drilling, Oil and Gas, there is also a postgraduate program in Geoenergy and Geoengineering.
Thanks to the many years of experience gained and the willingness to further develop, the Geoenergetics Laboratory participates in many projects, which include such issues as: development and effective use of deep heat exchangers, research and development in the field of equipment for deep construction testing, as well as an international project aimed at creating a third borehole heat exchangers system consisting of a minimum of 34 structures for heating and cooling the palace and park complex in Młoszowa.
Keywords: borehole heat exchangers, geothermal energy, borehole thermal energy storage

Marcin Kryjak[1]

Rola architekta w wyborze i stosowaniu odnawialnych źródeł energii

1. Wstęp

Technologii wykorzystujących odnawialne źródła energii, tj.: energię słoneczną, wiatrową, geotermalną, wodną czy biopaliwa jest coraz więcej. Są to różnego rodzaju panele fotowoltaiczne, kolektory słoneczne, wiatraki, gruntowe wymienniki ciepła, pompy ciepła, rekuperatory itd. Konieczność ochrony środowiska, zwiększające się potrzeby użytkowników oraz zmieniające się przepisy prawne wpływają w ostatnich latach znacząco na to jak postrzegamy budynek jako miejsce zamieszkania.

Celem publikacji jest wypracowanie i przedstawienie kompleksowego systemu wykorzystującego odnawialne źródła energii, niewpływającego niekorzystnie na estetykę oraz układ funkcjonalny projektowanych lub modernizowanych budynków.

Problemem badawczym poruszonym w niniejszym opracowaniu jest niewłaściwie rozumiana przez środowisko architektoniczne potrzeba wdrażania, właśnie przez architektów, już na etapie prac przedprojektowych i koncepcyjnych technologii wykorzystujących odnawialne źródła energii oraz określenie roli architekta w prawidłowym wyborze i właściwym stosowaniu technologii w projektowanych budynkach.

W pracy przyjęto następujące badania i metody badawcze:

- badania literatury;
- analiza dostępnych na rynku technologii wykorzystujących odnawialne źródła energii;
- analizę symulacyjną oprogramowania umożliwiającego optymalizację energetyczną budynku na przykładzie projektowanego domu jednorodzinnego;
- studium przypadku wraz z analizą pomiarów i wyników praktycznego zastosowania technologii wykorzystujących odnawialne źródła energii w budynku mieszkalnym wybudowanym w latach 80. i poddanym termomodernizacji w roku 2019.

W badanych obiektach decyzję o zastosowanych systemach podjął architekt w oparciu o empiryczne doświadczenia w projektowaniu budynków mieszkalnych. Wyniki tych analiz mogą stanowić podstawę do badania opłacalności i skuteczności zastosowanych technologii wykorzystujących odnawialne źródła energii.

2. Metodyka

Badania przeprowadzono na podstawie dwóch domów jednorodzinnych:

- użytkowanego od 32 lat domu architektów poddanego termomodernizacji;
- nowego domu z zaprojektowanym przez architekta OZE zrealizowanego niezgodnie z projektem.

[1] marcin.kryjak@polsl.pl, Doktorant na WSD PŚ, Katedra Projektowania Architektury Mieszkaniowej i Użyteczności Publicznej, Wydział Architektury, Politechnika Śląska, www.polsl.pl.

W badanym domu poddanym termomodernizacji, na podstawie szczegółowej analizy rynku i dostępnych systemów wykorzystujących odnawialne źródła energii (dalej OZE) oraz obliczeń, wykonano następujące prace:

- zainstalowano na dachu 31 paneli fotowoltaicznych (rys. 1) o mocy 9,61 kWp, które zapewniają prawie bezkosztową eksploatację domu;
- zamontowano centralę wentylacyjną z rekuperacją i wbudowaną pompą ciepła o mocy 1,3 kW, dla której dolnym źródłem jest gruntowy płytowy wymiennik ciepła pod trawnikiem przed domem i która zapewnia ogrzewanie zimą i klimatyzację w latem;
- zrezygnowano z przyłącza gazu, a piec gazowy do ciepłej wody użytkowej zastąpiono przepływowymi podgrzewaczami elektrycznymi;
- ocieplono ściany, dach i stropy nad piwnicą, a stolarkę wymieniono 8 lat wcześniej na okna o U = 1,1 [W/(m^2*K)], ale nie docieplono podłogi na gruncie, nie udało się też wyeliminować wszystkich mostków termicznych.

W domu tym prowadzone są szczegółowe pomiary produkcji energii elektrycznej z paneli fotowoltaicznych zlokalizowanych na południowej połaci dachu, ilości energii oddanej i pobranej z sieci elektroenergetycznej oraz zużytej bezpośrednio, pomiary zużycia energii przez poszczególne odbiorniki, np.: pompę ciepła, centralę wentylacyjną z rekuperacją, podgrzewacze elektryczne, urządzenia AGD i RTV, sprzęt biurowy, saunę, basen itd. Monitorowana jest też ilość energii cieplnej dostarczanej przez pompę ciepła oraz uzyskanej z GWC i odzyskanej z rekuperacji.

Rysunek 1. Fotografia po lewej przedstawia dach domu przed termomodernizacją; po prawej po termomodernizacji. Z dachu usunięto wszystkie kominy i zarazem mostki termiczne [17]

Wcześniej dom ten był ogrzewany z miejskiej sieci ciepłowniczej, a ciepła woda z pieca gazowego. Uzyskiwane dane są porównywane do ilości ciepła dostarczanego z PEC (Przedsiębiorstwo Energetyki Cieplnej) i ilości zużywanego gazu oraz ilości zużywanej wcześniej energii elektrycznej. Dane te mogą stanowić więc podstawę do badania opłacalności i skuteczności zastosowanych technologii wykorzystujących odnawialne źródła energii oraz zaproponowania przez architekta optymalnego systemu wykorzystania energii już na etapie koncepcji.

Realizowany nowy dom zaprojektowany został w standardzie energooszczędnym (EUco $\leq$ 40 kW/m^2/rok), jego bryła jest korzystna pod względem energetycznym i bez mostków termicznych, a usytuowanie na działce uwzględnia optymalne wykorzystanie energii słonecznej. Zastosowane w tym domu odnawialne źródła energii zostały zapro-

ponowane i zaprojektowane przez architekta już na etapie wstępnych ustaleń z inwestorem na podstawie doświadczeń biura w projektowaniu takich obiektów. Wskazują one też, że w projektowanych obiektach, w których decyzje o zastosowanych systemach nie podejmuje architekt, dochodzi do problemów z ich skutecznością i właściwą pracą. Powodem tego jest zbytnie skomplikowanie zastosowanych systemów i niepotrzebne rozbudowanie instalacji w późniejszych etapach projektu. W przypadku paneli fotowoltaicznych niewłaściwe usytuowanie z uwagi na estetykę oraz stosowanie nieefektywnych kolektorów słonecznych w obiektach mieszkaniowych. Przykładem tego jest dom w Mikołowie, w którym zakres instalacji OZE został zrealizowany niezgodnie z propozycjami architekta i nie spełnił oczekiwań.

3. Kompleksowy system wykorzystujący odnawialne źródła energii

W obiektach mieszkaniowych jednorodzinnych i wielorodzinnych powinno się dobrać i zastosować optymalne technologie wykorzystujące odnawialne źródła energii, które zapewnią przyszłym użytkownikom zero lub niskoenergetyczny obiekt przy minimalnym wpływie na jego formę, estetykę i funkcję. Obiektywnie i najlepiej może to zrobić właśnie architekt już na etapie koncepcji, uwzględniając stan wiedzy o systemach OZE, technologiach i materiałach.

Warto się też zastanowić, które technologie wykorzystujące odnawialne źródła energii w Polsce są najbardziej racjonalne i które najlepiej się sprawdzają pod względem efektywności i rachunku ekonomicznego.

Sporządzane przez architektów analizy dostępnych na rynku systemów OZE i ich zastosowania w projektach oraz konsultacje z producentami i dostawcami takich systemów pozwoliły na sformułowanie następujących stwierdzeń:

- Z dostępnych odnawialnych źródeł energii prosta w montażu i korzystna cenowo jest w Polsce produkcja energii elektrycznej panelami fotowoltaicznymi z energii słonecznej, mniej opłacalna jest z energii wiatrowej, efektywność pozostałych technologii jest marginalna. Wyprodukowaną samodzielnie energię elektryczną można i należy wykorzystywać do zasilania urządzeń grzewczych, wentylacyjnych, RTV i AGD w domu oraz do produkcji ciepła do ogrzewania i chłodu do klimatyzacji, a także do podgrzewania ciepłej wody użytkowej.
- Z uwagi na coraz lepsze parametry izolacyjności budynków w ogólnym bilansie strat ciepła, udział procentowy strat ciepła poprzez wentylację jest coraz większy, a nawet dominujący. Wymiana powietrza w budynku jest niezbędna i wymagana przepisami. Optymalnym rozwiązaniem jest więc stosowanie wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej z rekuperacją, dzięki której odzyskujemy już ponad 90% ciepła z powietrza wywiewanego.
- Jednym z medium umożliwiającym rozprowadzenie ciepła lub chłodu w domu może być powietrze nawiewane do pomieszczeń. W przypadku wentylacji mechanicznej nie generuje żadnego dodatkowego kosztu, wystarczy je podgrzać lub schłodzić. Nie są wtedy wymagane instalacje co i gazowa. Eliminuje się też niebezpieczeństwo zalania mieszkania, wybuchu gazu czy inne awarie.
- Ekonomicznym źródłem ciepła w domu jest pompa ciepła powietrze-powietrze, która wykorzystując energię elektryczną, podgrzewa lub schładza nawiewane powietrze. Pompa ta może być zainstalowana przy lub w centrali wentylacyjnej,

ograniczając do minimum zakres instalacji. Nie ma wtedy potrzeby doprowadzania gazu lub sieci ciepłowniczej do budynku, czy zapewniania innych nośników energii. Uzupełnieniem takiego systemu może być elektryczne ogrzewanie podłogowe lub promiennikami.

- Dla pompy ciepła dolnym źródłem może być gruntowy wymiennik ciepła. Optymalnie bezprzeponowy, płytowy pod budynkiem. Wykorzystuje on energię geotermalną oraz eliminuje zapotrzebowanie na moc szczytową i stabilizuje temperaturę powietrza dostarczanego do pompy ciepła. Jednocześnie oczyszcza powietrze i reguluje jego wilgotność.
- W przypadku własnej energii elektrycznej z paneli fotowoltaicznych uzasadnione jest podgrzewanie wody użytkowej w przepływowych podgrzewaczach elektrycznych, lokalizowanych bezpośrednio przy punktach poboru wody. Eliminuje się wówczas źródło wytwarzania i rozprowadzenie instalacji ciepłej wody, ograniczające sprawność instalacji i będące powodem nadmiernego zużycia wody.

Stosowanie powyższych zaleceń pozwala na znaczące ograniczenie ilości instalacji w mieszkaniu czy budynku, poprawę bezpieczeństwa użytkowania i zmniejszenie ryzyka awarii. Jednocześnie umożliwia obniżenie kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych oraz zapewnia wyższy komfort zamieszkania i pozwala na lepszą aranżację pomieszczeń.

Jaka więc rysuje się przyszłość w zakresie energooszczędności, systemów wentylowania, ogrzewania i chłodzenia budynków oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej? Które systemy mogą oraz powinni promować i stosować w swoich projektach architekci przy ewentualnej współpracy ze specjalistami już na samym początku prac projektowych i jak to robić w uzasadniony i racjonalny sposób?

4. Regulacje prawne

Obecnie istnieje wiele przepisów regulujących kwestie oszczędności energii i izolacyjności cieplnej oraz ochrony środowiska a na rynku jest ogromna ilość sposobów oraz systemów do ogrzewania i ciepłej wody zasilanych różnymi rodzajami nośnika energii.

Najważniejsze przepisy to:

- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej (dalej Rozporządzenie) [1]
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (dalej Warunki techniczne) [2]

Zgodnie z Rozporządzeniem, wszystkie urządzenia elektryczne charakteryzują się najwyższą sprawnością wytwarzania, regulacji i wykorzystania ciepła w przestrzeni ogrzewanej (tab. 2 – sprawność wytwarzania ciepła z nośnika energii i tab. 3 – sprawność regulacji i wykorzystania ciepła) oraz wytwarzania i wykorzystania ciepłej wody (tab. 9 – sprawność wytwarzania ciepła z nośnika energii i tab. 12 – sprawność przesyłu ciepła do zaworów czerpalnych). Zatem stosowanie urządzeń elektrycznych w projektach powinno być dominujące. Uwzględniając łatwość wytwarzania energii elektrycznej ze słońca, to projektowanie budynków zero lub niskoenergetycznych

powinno być promowane i upowszechniane. O tym trzeba jednak decydować jeszcze przed przystąpieniem do projektowania i architekci mają tu największe możliwości, gdyż jako pierwsi mają bezpośredni kontakt z inwestorem oraz koordynują projekt od początku do końca [1, 2].

Czy architekci mogą ograniczyć się do stosowania sprawdzonych już systemów opartych na powyższych konkluzjach? Należy uznać, że odpowiednim z punktu widzenia ochrony środowiska nośnikiem energii jest energia elektryczna, pozyskiwaną indywidualnie z energii słonecznej i wiatrowej. Wszystkie urządzenia do wentylacji, ogrzewania i klimatyzacji oraz ciepłej wody powinny być zasilane taką energią. Przyjmując, że powietrze wentylacyjne podgrzane lub schłodzone w gruntowych wymiennikach wykorzystujących energię geotermalną, może być medium dostarczającym ciepło w zimie i chłód latem to bardzo uprości się i ograniczy systemy instalacyjne w mieszkaniach oraz zmniejszy koszty inwestycyjne i eksploatacyjne.

Zbędne są wówczas kotły węglowe, na biomasę i gazowe, piece olejowe i kaflowe, kominki itd. Podobnie wodne instalacje centralnego ogrzewania z grzejnikami, zaworami termostatycznymi i ogrzewaniem wodnym podłogowym lub płaszczyznowym, Do wytwarzania ciepłej wody użytkowej nie będą potrzebne węzły cieplne, kotły, piece, zasobniki ciepłej wody, obiegi cyrkulacyjne.

W obiektach architektury mieszkaniowej jednorodzinnej i wielorodzinnej uzasadnione jest stosowanie opisanego dalej kompleksowego systemu.

5. Lokalizacja i odniesienie do kontekstu miejsca

Na etapie wyboru działki i sytuowania na niej budynku należy uwzględnić uwarunkowania i możliwości prawidłowego wykorzystania odnawialnych źródeł energii zgodnie z Warunkami technicznymi. Regulują one w § 60 oświetlenie i nasłonecznienie, w § 13 przesłanianie, w dziale X oszczędność energii i izolacyjność cieplną, a w załączniku nr 2 wymagania izolacyjności cieplnej i inne wymagania związane z oszczędnością energii. [2]

Istotnie jest więc uzgodnienie na samym początku prawidłowego usytuowania budynku na działce w stosunku do stron świata, z optymalnym uwzględnieniem nasłonecznienia i przesłaniania pod kątem wykorzystania energii słonecznej. Należy też przeanalizować zagospodarowanie działki pod względem możliwości usytuowania pod budynkiem lub powierzchniami utwardzonymi gruntowych wymienników ciepła, a także określić możliwości retencji wody opadowej i pozostawienia maksymalnej powierzchni biologicznie czynnej.

6. Optymalizacja formy budynku

Na wstępnym etapie, już przy projektowaniu bryły i formy projektowanego budynku, można uwzględnić optymalne wykorzystanie odnawialnych źródeł energii bez wywierania negatywnego wpływu na jakość architektury. Głównym celem takiej optymalizacji wykorzystania OZE jest poszukiwanie form niewykluczających się i ich udoskonalanie, a nie dążenie do maksymalnego wykorzystania OZE.

Optymalizacja bryły odbywa się poprzez jej prostotę i zwartość oraz eliminację mostków termicznych przez stosowanie np. przekładek termicznych na balkonach (rys. 2). Uzasadniona jest rezygnacja lub ograniczanie zbędnych elementów podnoszących koszty budowy i sprawiających problemy użytkowe, takich jak: skomplikowane

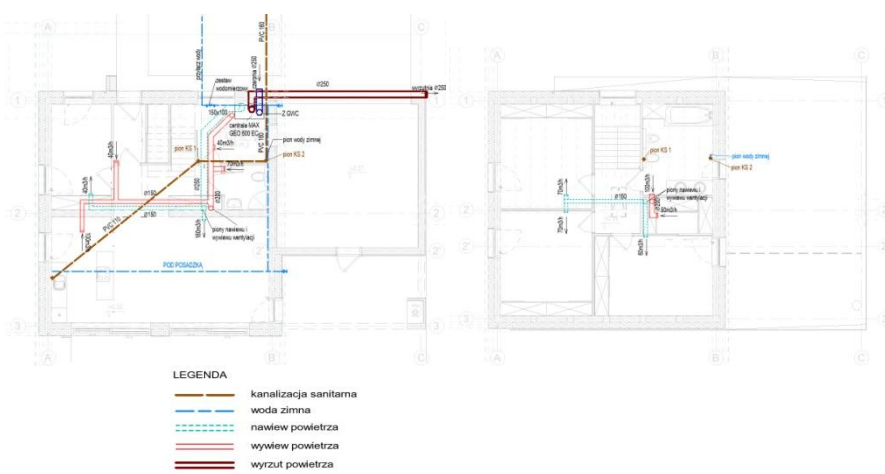
dachy wielospadowe, mansardy, lukarny, wykusze, balkony, tarasy, dobudówki itp. Optymalną bryłą pod względem oszczędności energii jest kula, a w przypadku budynków bryła zbliżona do sześcianu z dachem płaskim lub dwuspadowym. Nie wyklucza to jednak poszukiwania przez architektów innych form, które jednocześnie będą tworzyły ciekawą i nowoczesną architekturę oraz będą spełniały wymagania ochrony środowiska i zasady zrównoważonego rozwoju.

Rysunek 2. Projektowany dom zeroenergetyczny dla prywatnego inwestora [17]

7. Rozwiązania technologiczne

Kompleksowy i racjonalny system wykorzystania odnawialnych źródeł energii w budownictwie mieszkaniowym może składać się z elementów i urządzeń zasilanych energią elektryczną, wytwarzających energię cieplną (ogrzewania, podgrzewania wody oraz chłodzenia) i wykorzystujących energię geotermalną oraz słoneczną do produkcji własnej energii elektrycznej.

Powyższy system (rys. 3) zastosowano w projektowanych domach jednorodzinnych, w których zoptymalizowano formę budynku i jego usytuowanie na działce oraz w obiekcie istniejącym poddanym termomodernizacji.

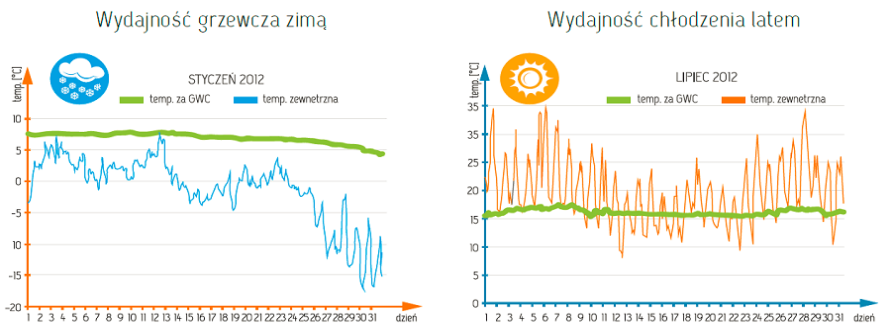


Rysunek 3. Schematy rozprowadzenia instalacji w projektowanym domu jednorodzinnym. Po lewej rzut parteru, po prawej rzut piętra [17]

7.1. Gruntowy wymiennik ciepła

W budownictwie mieszkaniowym istnieje możliwość wykorzystania energii geotermalnej najlepiej poprzez płytowe bezprzeponowe gruntowe wymienniki ciepła – GWC. Najkorzystniej jest lokalizować je pod budynkami pomiędzy fundamentami lub pod powierzchniami utwardzonymi, wykorzystując te same roboty ziemne i ograniczając tym samym koszty inwestycyjne.

GWC stanowią korzystne dolne źródło ciepła lub chłodu dla powietrznych pomp ciepła i stanowią naturalny bufor energii ciepła, chłodu i wilgoci poprzez dostarczanie zimą powietrza o dodatniej temperaturze a latem chłodnego. GWC stabilizują temperaturę dostarczanego powietrza i eliminują zapotrzebowanie na moc szczytową, gdyż temperatura dostarczanego powietrza wacha się od ok. 3°C w zimie nawet przy dużych mrozach do ok. 17°C w lecie przy upałach (rys. 4).



Rysunek 4. Wydajność gruntowego wymiennika ciepła – grzewcza zimą i chłodzenia latem [15]

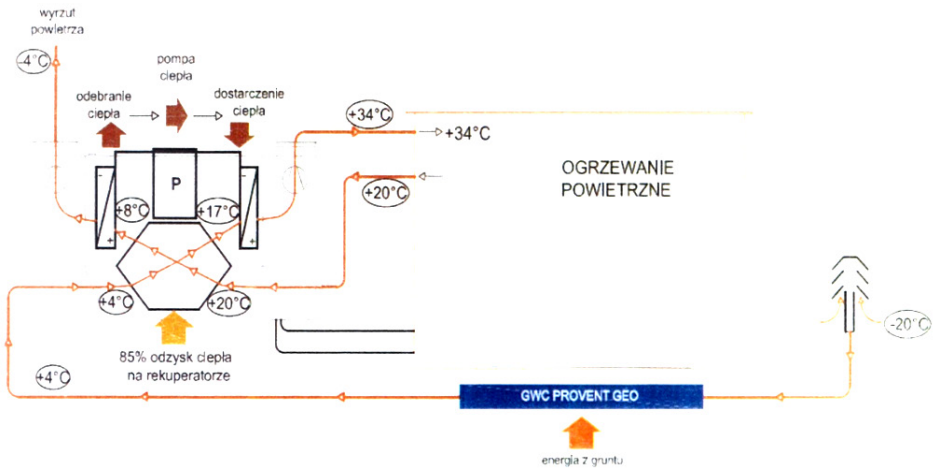
Płytowy GWC składa się z systemu modułów specjalnie opracowanych płyt, których budowa zapewnia tzw. bezprzeponowy przepływ powietrza wewnątrz wymiennika w bezpośrednim kontakcie z gruntem. Powietrze potrzebne do wentylacji pobierane jest przez czerpnię i rozprowadzane poprzez kolektor pod powierzchnię płyt. Tutaj dzięki bezpośredniemu kontaktowi z gruntem, zależnie od posiadanej temperatury, powietrze ulega naturalnemu ogrzaniu lub ochłodzeniu, dowilżaniu lub osuszeniu oraz oczyszczeniu.

7.2. Centrala z rekuperacją i pompą ciepła

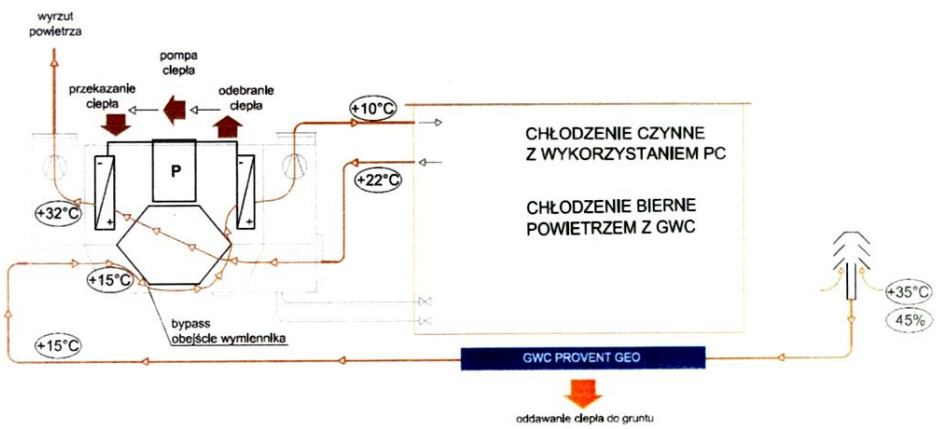
W każdym mieszkaniu czy domu skuteczną wentylację oraz ekonomiczne ogrzewanie i klimatyzację może zapewnić jedno urządzenie, tj. centrala wentylacyjno-grzewczo-klimatyzacyjna z rekuperacją i pompą ciepła, współpracująca z gruntowym wymiennikiem ciepła.

Obecne przepisy wymagają szczelności budynku i skutecznej wentylacji oraz odpowiedniej wymiany powietrza w mieszkaniu. Wentylacja grawitacyjna tego nie zapewnia i usuwa bezpowrotnie ogrzane powietrze na zewnątrz. Dlatego tak ważne jest odzyskiwanie ciepła z usuwanego powietrza poprzez rekuperatory, które obecnie potrafią odzyskać większość ciepła i bardzo ograniczyć zapotrzebowanie na ciepło w budynku.

W zimie ogrzewanie obiektu jest realizowane przez nadmuch ciepłego powietrza wentylacyjnego (zewnętrznego) ogrzanego do temperatury 35-40^{0}C, (rys. 5) a w lecie klimatyzacja przez nadmuch chłodnego powietrza (rys. 6), z centrali, którą można zlokalizować w domu w pomieszczeniu gospodarczym a w mieszkaniu np. pod sufitem w przedpokoju.



Rysunek 5. Schemat pracy centrali w zimie – ogrzewanie [15]



Rysunek 6. Schemat pracy centrali w lecie – klimatyzacja [15]

Centrala jest kompleksowym rozwiązaniem zapewniającym najwyższy komfort pomieszczeń, zgodnie z normą PN-EN 15251. System pracuje całkowicie na powietrzu zewnętrznym, pomagając zapewnić zdrowe warunki bytowe. Ma właściwości bakteriobójcze, bez posiadania żadnego wkładu antybakteryjnego. Właściwości te zapewnia naturalne działanie mikroflory gruntu, z którą płynące przez bezprzeponowy wymiennik powietrze jest w bezpośrednim kontakcie. Działanie antybakteryjne potwierdzone jest niezależnymi badaniami Państwowego Zakładu Higieny [16].

Przewody wentylacyjne mogą być wykonane z rur stalowych typu Spiro lub dowolnych kanałów prostokątnych i mogą być rozprowadzone, zaizolowane termicznie

i obudowane pod stropem w holach i korytarzach. Nawiew powietrza do pomieszczeń czystych: pokoi i sypialni, wywiew z pomieszczeń higieniczno-sanitarnych: łazienek, toalet, kuchni, garderób i pomieszczeń gospodarczych.

7.3. Panele fotowoltaiczne

Do produkcji energii elektrycznej ze słońca, w każdym budynku można instalować panele fotowoltaiczne o mocy zbliżonej do zapotrzebowania na energię elektryczną w obiekcie na potrzeby ogrzewania, wentylacji, klimatyzacji i ciepłej wody oraz potrzeby bytowe, tj. zasilanie urządzeń AGD i RTV, oświetlenie itp.

Panele najlepiej jest instalować na dachach pochyłych lub płaskich na dedykowanej konstrukcji, ale można też je instalować od strony nasłonecznionej na elewacjach, np. jako balustrady lub osłony albo jako zadaszenia parkingów itp. Moc generatora fotowoltaicznego zależna jest od usytuowania paneli w zależności od kąta nachylenia i azymutu, co przedstawia poniższa tabela.

Tabela 1. Kąt nachylenia dachu i efektywność paneli fotowoltaicznych

Kąt nachylenia dachu > Odchylenie w Azymucie	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
0	90%	97%	99%	**100%**	99%	95%	90%	80%	75%	65%
10	90%	95%	98%	99%	98%	95%	90%	80%	75%	65%
20	90%	95%	95%	98%	95%	90%	85%	80%	75%	65%
30	90%	95%	95%	95%	95%	90%	85%	80%	75%	65%
40	90%	95%	95%	95%	95%	90%	85%	80%	70%	65%
50	90%	95%	95%	95%	90%	90%	85%	80%	70%	65%
60	90%	90%	95%	90%	90%	85%	80%	75%	70%	65%
70	90%	90%	90%	90%	85%	85%	80%	75%	70%	60%
80	90%	90%	90%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%
wschód/zachód 90°C	90%	90%	90%	85%	85%	80%	75%	70%	65%	60%

Źródło: Opracowanie własne oparte o tabele producenta paneli El-sun https://el-sun.pl

Dane w tabeli wyraźnie pokazują, że różnice są niewielkie, a możliwości montażu są nieograniczone i tylko od architektów zależy, czy ich instalowanie nie wpłynie na wygląd budynku, a może nawet inspirować do poszukiwania nowych form.

W Polsce mamy obecnie dość przystępne przepisy dotyczące instalacji fotowoltaicznych, głównie w zakresie dotacji oraz możliwości akumulowania nadmiaru wyprodukowanej w lecie energii elektrycznej w sieci elektroenergetycznej i wykorzystania jej w okresie zimowym.

7.4. Ciepła woda z elektrycznych podgrzewaczy przepływowych

Odrębnym aspektem jest wytwarzanie ciepłej wody w mieszkaniu. Nie jest uzasadnione łączenie jej wytwarzanie z ogrzewaniem w projektowanej charakterystyce energetycznej budynku, szczególnie w zakresie doboru urządzeń grzewczych i obliczania zapotrzebowania energii na ciepła wodę.

Przyjęte w Rozporządzeniu wg p. 5.3. i tabeli 27 wartości jednostkowego zapotrzebowania na ciepła wodę w zależności od powierzchni prowadzą do nieprawidłowych wyników, co w efekcie zniekształca charakterystykę energetyczną [1].

Na przykład w budynku o powierzchni 220 m^2, zamieszkałym przez 2 dorosłe osoby należałoby przyjąć zapotrzebowanie w wysokości 4122 kWh/rok. Tymczasem w domu takim w ciągu roku osoby te faktycznie zużyły zgodnie z prowadzonymi pomiarami zaledwie 1040 kWh energii elektrycznej na ogrzewanie ciepłej wody w przepływowych podgrzewaczach elektrycznych, czyli 4-krotnie mniej. Zużycie to mogłoby być jeszcze niższe, gdyby wszystkie podgrzewacze były przy punktach poboru, bo nawet umywalka umieszczona 2 m od podgrzewacza potrzebuje kilkunastu sekund by z kranu płynęła ciepła woda. Zdarza się, że odkręcając kurek z ciepłą wodą, korzystamy z zimnej, zanim dopłynie ta podgrzana. A woda która zdążyła się nagrzać, pozostaje w instalacji.

Natomiast w mieszkaniu 2-pokojowym o powierzchni 36 m^2, zamieszkałym przez rodzinę z dwójką dzieci, należałoby przyjąć 770 kWh/rok, tymczasem w mieszkaniu tym rodzina będzie potrzebować co najmniej 4000 kWh energii do pogrzania ciepłej wody. Uwzględniając określone w tabeli 10 i 12 Rozporządzenia wartości sprawności i strat ciepła, zapotrzebowanie to może wynieść nawet 8000 kWh/rok i jednocześnie zużywa się o wiele więcej wody. Występują tutaj nieścisłości, które dyskwalifikują taki sposób obliczania charakterystyki energetycznej.

Korzystając więc z własnej energii elektrycznej, produkowanej panelami fotowoltaicznymi, uzasadnione jest instalowanie przepływowych podgrzewaczy elektrycznych bezpośrednio przy punktach poboru, dla których zgodnie z tabelą 12 Rozporządzenia sprawność wynosi 1,00. Cena takich urządzeń jest bardzo konkurencyjna, a instalowanie nieskomplikowane. [1]

W nowo projektowanych domach nie ma uzasadnienia projektowanie instalacji centralnej ciepłej wody, tym bardziej z cyrkulacją i zasobnikami, której źródłem ciepła jest kocioł gazowy lub olejowy, węzeł cieplny czy podgrzewacz, bo zgodnie z Rozporządzeniem ich sprawność, szczególnie w zakresie przesyłu jest niewielka (nawet 0,4) i powoduje znacząco większe zużycie wody. Najbardziej ekonomiczne byłyby pompy ciepła przy punktach poboru, które mogłyby zużywać 3-krotnie mniej energii elektrycznej, ale jest to obecnie jeszcze nieopłacalne inwestycyjnie. [1]

Na oszczędność energii i wody bardzo znacząco wpływa świadomość użytkowników w zakresie jej zużycia na poszczególne czynności. Zgodnie z pomiarami w badanym domu na cotygodniową kąpiel w wannie z hydromasażem zużyto w ciągu roku ok. 250 kWh energii a na codzienną 5-min. kąpiel pod prysznicem ok. 600 kWh energii, zmywarka przy włączeniu co 2-gi dzień zużywa ok. 250 kWh itd.

7.5. Dodatkowe ciepło z ogrzewania elektrycznego

Ogrzewanie powietrzem wentylacyjnym ustawionym na wymaganą temperaturę w całym domu czy mieszkaniu może być niewystarczające w niektórych pomieszczeniach, takich jak łazienki, w których wymagana jest temperatura wyższa np. 25^0C. Nic nie stoi na przeszkodzie, aby dogrzewać te pomieszczenia elektrycznym ogrzewaniem podłogowym lub różnego rodzaju grzejnikami zasilanymi prądem z paneli fotowoltaicznych. Można też dogrzewać promiennikami elektrycznymi, które nie ogrzewają powietrza a powierzchnie przedmiotów, również naszą skórę. Promiennik może ogrzewać tylko te powierzchnie, przy których się znajdujemy, jak na przykład lustro podczas korzystania z umywalki albo wannę podczas kąpieli dziecka i może być włączany tylko w czasie wykonywania tych czynności.

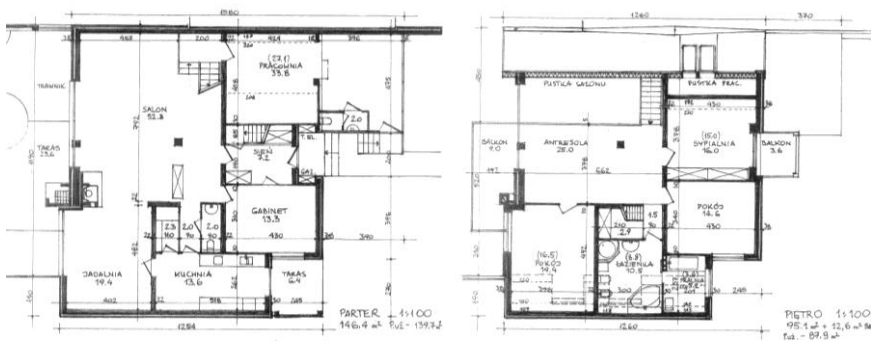
7.6. Przydomowa oczyszczalnia ścieków i retencja wody opadowej

Do budynków jednorodzinnych i małej zabudowy wielorodzinnej znajdującej się poza śródmieściem, gdzie istnieje problem z przyłączeniem do sieci kanalizacyjnej, uzasadnione jest stosowanie przydomowych oczyszczalni ścieków oraz zbiorników retencyjnych. Wodę opadową można wykorzystywać do celów gospodarczych i spłukiwania toalet. Przydomowe oczyszczalnie ścieków nie potrzebują budowy długich sieci kanalizacyjnych poza centrum miasta oraz nie wymagają wywozu ścieków jak w przypadku szamba. Ich działanie jest również zgodne z zasadami zrównoważonego rozwoju.

8. Studium przypadku

8.1. Istniejący dom jednorodzinny poddany termomodernizacji

Dokonano analizy doświadczeń i wyników pomiarów domu jednorodzinnego, w którym zastosowano kompletny system wykorzystujący odnawialne źródła energii (rys. 7). Dom zlokalizowany jest na Śląsku, wybudowany w technologii tradycyjnej w latach 80., parterowy z użytkowym poddaszem, częściowo podpiwniczony, o powierzchni użytkowej 220 m^2, składający się z obszernej części dziennej z antresolą i 3 sypialń, gabinetu i dużej pracowni. Dom zaprojektowano dla 4 osobowej rodziny (2+2) architektów wykonujących pracę zawodową w domu. Obecnie dom zamieszkały jest przez 2 starsze osoby.



Rysunek 7. Rzuty domu jednorodzinnego przed termomodernizacją. Po lewej rzut parteru, po prawej rzut poddasza [17]

Zastosowany system pozwolił na uzyskanie domu zbliżonego do zeroenergetycznego, gdyż właściciele ograniczyli wcześniejsze roczne koszty eksploatacji z ok. 11 800 zł do ok. 400 zł w ciągu pierwszego roku użytkowania zastosowanego systemu. Pozwoliła na to instalacja fotowoltaiczna, rezygnacja z ciepła z sieci miejskiej i rezygnacja z przyłącza gazu. Wcześniejsze koszty eksploatacyjne w latach 2016-2018 to: zużycie 100-110 GJ, tj. 27 800-30 600 kWh energii cieplnej z sieci PEC za cenę ok. 7 600 zł, średnio ok. 6 000 kWh energii elektrycznej za cenę ok. 3 600 zł i średnio ok. 180 m^3 gazu, tj. ok. 2 000 kWh za cenę ok. 600 zł,

Instalacja fotowoltaiczna o mocy 9,61 kWp wyprodukowała w ciągu roku 10 920 kWh energii elektrycznej z 31 paneli fotowoltaicznych, bezpośrednio zużyto 2 702 kWh, do sieci oddano 8 218 kWh a pobrano 6 734 kWh. Uwzględniając 20%

oddanych energetyce, tj. 1 644 kWh, do dyspozycji właścicieli zostało 9 276 kWh energii elektrycznej, którą zużyli w całości.

Zużycie energii było następujące: na ogrzewanie centrala z rekuperacją i pompą ciepła zużyła 4 160 kWh energii, podgrzewacze elektryczne przepływowe na ciepłą wodę zużyły ok. 1 040 kWh, na utrzymanie basenu i sauny zużyto ok. 1 400 kWh, pozostałe ok. 2 700 kWh zużyto na zasilanie urządzeń AGD i RTV oraz oświetlenie, w tym np.: lodówka z zamrażarką zużyły rocznie ok. 450 kWh, kuchnia ok. 550 kWh a sprzęt RTV ok. 700 kWh.

8.2. Projektowane domy zeroenergetyczne

Projektowane domy jednorodzinne zeroenergetyczne (rys. 2 i 3) uwzględniają optymalizację formy pod względem energetycznym i korzystne usytuowania na działce z uwagi na wykorzystanie energii słonecznej. Są to domy parterowe z użytkowym poddaszem, z garażem przybudowanym, niepodpiwniczone, o powierzchni użytkowej 130 m^2, składające się z części dziennej na parterze i 3 sypialń na poddaszu. Domy takie realizowane są przez prywatnego inwestora oraz kilka w zespole przez dewelopera.

Zastosowany w takim domu system umożliwi zużywanie mniejszej ilości energii niż można pozyskać z zastosowanych odnawialnych źródeł energii: GWC, rekuperacji i paneli fotowoltaicznych, zapewniając użytkownikom bezkosztową eksploatację. Do ogrzewania i wentylacji w domu takim potrzeba w ciągu roku ok. 6 000 kWh energii cieplnej.

Instalacja fotowoltaiczna o mocy 8,91 kWp wyprodukuje w ciągu roku wg szacunków ok. 9 000 kWh energii elektrycznej, Uwzględniając 20% oddanych energetyce, do wykorzystania zostanie ok. 7 600 kWh energii. Centrala wentylacyjno-grzewczo-klimatyzacyjna z rekuperacją i pompą ciepła o mocy 0,9 kW zużyje ok. 3 500 kWh energii elektrycznej i dostarczy w ciągu roku ok. 9 000 kWh energii cieplnej nawet bez uwzględnienia GWC i rekuperacji, czyli znacznie więcej niż zapotrzebowanie. Na potrzeby ciepłej wody z podgrzewaczy elektrycznych przepływowych, zasilanie urządzeń i oświetlenie pozostanie ponad 4 000 kWh energii elektrycznej, co zapewni bezkosztową eksploatację domu.

9. Analiza wyników

W domu istniejącym przed termomodernizacją zapotrzebowanie na energię cieplną wynosiło ok. 30 000 kWh, tj. ok. 136 kWh/m^2/rok, co jest wynikiem przeciętnym dla budynków realizowanych w tych czasach. Po termomodernizacji zapotrzebowanie ograniczono do ok. 80 kWh/m^2/rok, więc łączne zapotrzebowanie wynosi teraz ok. 17 600 kWh. Pompa ciepła, rekuperacja i GWC, w którym temperatura wahała się od 2°C w styczniu do 18°C w lipcu, dostarczyły ok. 14 000 kWh energii, wystąpił więc niedobór ok. 3 600 kWh. Właściciele uzupełnili ten niedobór ogrzewaniem w kominku, spalając ok. 2,0 m^3 drewna, które dało ok. 4 500 kWh energii cieplnej.

W nowo projektowanych domach energooszczędnych (rys. 2 i 3), w których zapotrzebowanie na energię użytkową do wentylacji i ogrzewania jest poniżej 40 kWh/m^2/rok, a w pasywnych może być nawet poniżej 15 kWh/m^2/rok, system taki sprawdzi się doskonale. Jest też konkurencyjny inwestycyjnie, gdyż znacząco ogranicza zakres instalacji oraz może zapewnić właścicielom bezkosztową eksploatację.

Zastosowany system zapewnia optymalne wykorzystanie odnawialnych źródeł energii, jest zero lub nisko energetyczny i zero emisyjny. Nie wpływa również, co ważne dla inwestora, na podwyższenie kosztu budowy, ale tylko przy podjęciu pewnych decyzji już na etapie projektowania, jak na przykład odpowiednia bryła i forma budynku właściwie usytuowanego na działce, niwelowanie mostków termicznych itp.

10. Podsumowanie

Wdrażanie przez architektów przy współpracy ze specjalistami odpowiednich technologii wykorzystujących odnawialne źródła energii już na wstępnych etapach przygotowania inwestycji i projektowania pozwala architektom na dużą swobodę kształtowania formy i funkcji obiektu bez potrzeby usilnej ingerencji w estetykę. Nie jest ograniczeniem dowolności w projektowaniu i poszukiwaniu optymalnych rozwiązań.

Przedstawiony w artykule kompleksowy system wykorzystania OZE w budownictwie mieszkaniowym został wypracowany przez architektów na podstawie analiz i praktycznych doświadczeń. System ten upraszcza i bardzo ogranicza zakres instalacji potrzebnych do wentylacji, ogrzewania, klimatyzacji i ciepłej wody oraz w pełni wykorzystuje własną energię elektryczną ze słońca i energię geotermalną.

Zawód architekta jest interdyscyplinarny i to architekt koordynuje wszystkie prace projektowe od etapu wstępnych rozmów z inwestorem aż do zakończenia budowy. Już na etapie wstępnych prac może w odpowiedni sposób określić i przygotować projekt pod kątem optymalnego wykorzystania OZE. Wymienione w pracy projekty to przykłady projektowania zeroenergetycznego dzięki decyzjom architekta i jego postrzeganiu projektu jako całości. Reasumując, rola architekta w wyborze i stosowaniu systemów wykorzystujących OZE w projektach budynków mieszkaniowych powinna być ważna i dominująca.

Praca ta przedstawia i podkreśla rolę architektów w zrównoważonym projektowaniu i poszukiwaniu rozwiązań mających na celu ograniczenie wpływu architektury na środowisko i podwyższenie standardu życia użytkowników.

Literatura

1. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej.
2. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.
3. Nowelizacja ustawy Prawo energetyczne wraz z ustawami o OZE i mikro instalacjach, tworzą tzw. Mały trójpak energetyczny obowiązujący w Polsce od 11 września 2013 r.
4. Nowelizacja ustawy Prawo energetyczne, Dz.U. 2013, poz. 984 z dnia 26 lipca 2013 r.
5. Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska
6. Uchwała Sejmu Rzeczypospolitej z dnia 19 stycznia 1995 r. w sprawie polityki zrównoważonego rozwoju.
7. Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. – Prawo Budowlane.
8. Twardowski M., *Słońce w architekturze*, Wyd. Arkady, 1970.
9. Chwieduk D., *Jaworski M., Energia odnawialna w budownictwie, magazynowanie energii*, Wyd. PWN, 2018.
10. Celadyn W., *Czynnik energetyczny w kształtowaniu architektonicznym*, Archivolta, nr 2, 1999.

11. Majerska-Pałubicka B., *Zintegrowane Projektowanie Architektoniczne w kontekście zrównoważonego rozwoju, doskonalenie procesu*, Wyd. Politechnika Śląska, 2014.
12. Niezabitowska E. *Metody i techniki badań w architekturze*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2014.
13. Chwieduk D., *Energetyka słoneczna w budynku*, Wyd. Arkady, 2011.
14. Neufert E., Neufert. *Podręcznik projektowania architektoniczno-budowlanego*, Wyd. Arkady, 2016.
15. https://www.pro-vent.pl/
16. Interpretacja wyników pomiarów zanieczyszczenia mikrobiologicznego powietrza obok ujęcia z GWC firmy Pro-Vent https://www.wymiennikgruntowy.pl/wp-content/uploads/2020/10/badania-wplywu-gwc-pro-vent-na-jakosc-powietrza.pdf
17. Opracowanie autora

Rola architekta w wyborze i stosowaniu odnawialnych źródeł energii

Streszczenie
Coraz to większy wybór technologii wykorzystujących odnawialne źródła energii, zmieniające się prawo i potrzeby użytkowników oraz wpływ na środowisko przekształcają nasze postrzeganie budynku jako miejsca zamieszkania.
Celem publikacji jest wypracowanie i przedstawienie kompleksowego systemu wykorzystującego odnawialne źródła energii. Systemu nie wpływającego niekorzystnie na estetykę i funkcjonalność projektowanych budynków oraz określenie właściwej roli architekta w prawidłowym wyborze i uzasadnionym stosowaniu technologii wykorzystujących odnawialne źródła energii w projektach.
Na podstawie dostępnych na rynku technologii i studium przypadku praktycznego wykorzystania odnawialnych źródeł energii w budynku poddanemu termomodernizacji przeprowadzono analizę opłacalności i skuteczności zastosowanych technologii.
Określono i zaproponowano najbardziej racjonalny i kompleksowy system spełniający standardy nowoczesnego budynku zero energetycznego. Odpowiednio zaimplementowany w projekcie na odpowiednim etapie projektowania nie będzie niekorzystnie wpływał na estetykę czy funkcję budynku.
Słowa kluczowe: odnawialne źródła energii, zrównoważony rozwój, zeroenergetyczny, zintegrowane projektowanie, centrala wentylacyjna z rekuperacją

The role of the architect in the selection and use of renewable energy sources

Abstract
The increasing choice of renewable energy technologies, dynamic law, user needs and the impact on the environment are significantly changing our perception of where we live.
The aim of the work is to develop and present a comprehensive system that uses renewable energy sources, which does not adversely affect the aesthetics and functionality of the designed buildings, and to determine the proper role of the architect in the correct selection and justified use of technologies using renewable energy sources in projects.
Based on the technologies available on the market and a case study of the practical use of renewable energy sources in a building subjected to thermal modernization, an analysis of the profitability and effectiveness of the technologies used was carried out.
The most rational and comprehensive system was determined and proposed. The system meets the standard of a modern zero-energy building which, if properly implemented in the project at the appropriate stage of design, will not adversely affect the aesthetics or function of the building.
Keywords: renewable energy sources, sustainable development, zero-energy building, , heat recovery and ventilation systems

Antonina Chłopecka[1]

Problematyka odpowiedzialności cywilnoprawnej za ruch autonomicznych samochodów

1. Wprowadzenie do problematyki autonomicznych samochodów

Autonomiczne samochody nie są już postrzegane wyłącznie jako odległa, futurystyczna wizja. Obecnie bowiem, autonomiczne pojazdy zaczęły być na coraz szerszą skalę testowane na drogach, jak też przeprowadzane są badania dotyczące ich bezpieczeństwa. W niektórych państwach, autonomiczne pojazdy zostały dopuszczone także do użytku osób prywatnych. Wciąż jednak brak jest kompleksowych regulacji dotyczących omawianej problematyki. Regulacje, które zostały wprowadzone w nielicznych państwach (takich jak Stany Zjednoczone, czy Wielka Brytania), nie regulują bowiem w sposób kompleksowy zagadnienia odpowiedzialności cywilnoprawnej za ruch autonomicznych samochodów.

W pierwszej kolejności, dokładniejszego określenia wymaga przedmiot analizy. Mianowicie, by można było tworzyć regulacje odpowiedzialności cywilnoprawnej za ruch autonomicznych samochodów, należy skonstruować definicję legalną pojazdu autonomicznego, zawierającą szczegółowe warunki, które pojazd powinien spełniać, pozwalające na zakwalifikowanie danego pojazdu do klasy samochodów autonomicznych. Nadto, zdefiniować także należy pojęcie dysponenta pojazdu autonomicznego.

Dopiero bowiem po wypracowaniu odpowiednich definicji, zastanowić należy się nad tym, w jaki sposób powinna zostać uregulowana – w polskim porządku prawnym – odpowiedzialność cywilnoprawna za ruch autonomicznych samochodów (zarówno wobec innych uczestników ruchu, pasażerów pojazdów autonomicznych, jak i osób trzecich). W tym celu, konieczne jest przeprowadzenie analizy obecnie obowiązujących przepisów w kontekście problematyki autonomicznych pojazdów, a także wskazanie zakresu niezbędnych zmian w celu dostosowania obecnie obowiązujących przepisów prawnych do omawianej problematyki.

Wreszcie, rozważenia również wymaga konieczność skonstruowania w przyszłości systemu, w którego ramach funkcjonować mogłyby pojazdy autonomiczne. System taki, w mojej ocenie, pozwoliłby na zapewnienie większego bezpieczeństwa na drogach.

2. Definicja pojazdu autonomicznego i jego dysponenta

2.1. Pojazd autonomiczny

Omówienie problematyki autonomicznych samochodów należy rozpocząć od zdefiniowania wskazanego pojęcia, bowiem to od skonstruowania prawnej definicji autonomicznego pojazdu zależeć w istocie będą dalsze pytania o właściwe normy prawne, jakim pojazdy te powinny podlegać. W celu ustalenia zakresu pojęcia „pojazd autonomiczny", z racji na dotychczas nieugruntowane w praktyce prawnej znaczenie tego określenia, sięgnąć należy w szczególności do utworzonych już klasyfikacji

[1] Uniwersytet Warszawski.

automatyzacji pojazdów. Klasyfikacje te zostały utworzone między innymi przez takie organizacje, jak Amerykański urząd ds. bezpieczeństwa ruchu drogowego (**NHTSA**)[2], *Society of Automotive Engineers International* (**SAE**), czy Europejską Radę Doradczą ds. Badań Transportu Drogowego (**ERTRAC**)[3] powołaną przez Parlament Europejski.

Wszystkie wskazane wyżej klasyfikacje zasługują na uwagę, jednakże poniżej odwołam się do klasyfikacji stworzonej przez SAE, gdyż jest to klasyfikacja, którą posługuje się między innymi Unia Europejska. Ponadto, w mojej ocenie, klasyfikacja ta jest najbardziej przejrzysta i pozwala na najlepsze zrozumienie różnicy pomiędzy pojazdem zautomatyzowanym a w pełni autonomicznym. SAE, w stworzonej przez siebie klasyfikacji, wyodrębniła pięć poziomów automatyzacji pojazdów[4].

Najniższy poziom automatyzacji nazwany został przez SAE poziomem *Hands on*. Jak sugeruje bowiem angielska nazwa, z założenia kierowca powinien być cały czas zaangażowany w jazdę i sterowanie pojazdem. To kierowca podejmuje kluczowe decyzje związane z ruchem pojazdu, pojazd zaś wyposażony jest w pewne podstawowe funkcje wspomagające kierowcę (tempomat, kontrola prędkości, asystent parkowania). Jako kolejny poziom automatyzacji, wyróżniony został przez SAE poziom *Hands off*, zgodnie z którym zautomatyzowany system ma możliwość przejęcia pełnej kontroli nad pojazdem. Nie zwalnia to jednak kierowcy z obowiązku stałego monitorowania jazdy i otoczenia, by w razie potrzeby móc podjąć reakcję i przejąć manualną kontrolę nad pojazdem. W dalszej kolejności, organizacja SAE wskazała poziom *Eyes off*, wymagający uwagi kierowcy jedynie w ograniczonym, określonym przez producenta zakresie – i wyłącznie po wezwaniu do podjęcia interwencji przez pojazd. Wreszcie, wyróżniony został tzw. poziom *Mind off*, niewymagający dla zachowania bezpieczeństwa jakiejkolwiek uwagi ze strony kierowcy. Jednakże – co istotne – muszą zostać spełnione określone warunki jazdy (przykładowo korki uliczne, jazda na autostradzie). Zgodnie zaś z najwyższym poziomem automatyzacji, nie jest wymagana jakakolwiek (nawet potencjalna) ingerencja ludzka w ruch pojazdu.

Na powyższym gruncie, wskazać należy, iż pojazdem autonomicznym będzie pojazd w pełni zautomatyzowany. Pojazdy zautomatyzowane w części, wyposażone w takie elementy jak tempomat, czy system parkowania, stanowią już obecnie rozwiązanie powszechne. Tworząc definicję legalną pojazdu autonomicznego, należałoby się odnieść do wypracowanych już definicji. Organizacja SAE odznacza się w tym zakresie dużym autorytetem. To do jej klasyfikacji poziomów automatyzacji odwołują się między innymi dokumenty Unii Europejskiej. Także ustawodawstwa stanowe w Stanach Zjednoczonych często w tworzeniu definicji legalnych posługują się klasyfikacją wskazanej organizacji. Pojazdem autonomicznym więc jest pojazd, który może zostać opisany za pomocą czwartego lub piątego poziomu automatyzacji według SAE.

W konsekwencji, pojazd autonomiczny należałoby zdefiniować jako pojazd wyposażony w system, który nigdy nie wymaga dla zachowania bezpieczeństwa uwagi ze strony kierowcy (jednakże tylko w określonych warunkach jazdy lub szczególnych okoliczności, takich jak korki uliczne) lub jako system, do którego obsługi z założenia nie jest wymagana jakakolwiek ludzka interwencja [1]. Bardziej szczegółowe warunki

[2] Automated Driving Systems | NHTSA.
[3] Ertrac – Welcome.
[4] SAE International.

techniczne, jakie powinien spełniać pojazd, by zostać uznany za autonomiczny powinny być także określone i zawarte chociażby w aktach wykonawczych.

Racjonalnym rozwiązaniem (przynajmniej w początkowym stadium wdrażania pojazdów autonomicznych) wydaje się, także wprowadzone przez ustawodawstwo Wielkiej Brytanii, tworzenie listy pojazdów autonomicznych[5]. Lista ta mogłaby tworzyć klasyfikację takich pojazdów, według ich właściwości i rodzajów, aby uniknąć późniejszych wątpliwości, czy pojazd rzeczywiście jest pojazdem autonomicznym. Umieszczenie pojazdu (w sposób rodzajowy) na utworzonej liście warunkowałoby także dopuszczenie go do ruchu po drogach publicznych i innych miejscach na terytorium RP.

Odniesienie się do klasyfikacji stworzonej przez SAE powinno zastąpić definicję wprowadzoną w ustawie w dnia 20 czerwca 1997 roku Prawo o ruchu drogowym[6]. Określa ona bowiem w przepisie art. 65k, że pojazdem autonomicznym jest pojazd samochodowy, wyposażony w systemy sprawujące kontrolę nad ruchem tego pojazdu i umożliwiające jego ruch bez ingerencji kierującego, który w każdej chwili może przejąć kontrolę nad tym pojazdem. Definicja ta nie określa rzeczywistej zależności, jaka występować powinna między pojazdem autonomicznym a jego pasażerem. Nie jest jasne, w jakich okolicznościach, tzw. kierujący powinien móc przejąć kontrolę nad pojazdem i w jakich okolicznościach, jeżeli w ogóle, jest to obligatoryjne. Nie jest też oczywiste, czy wymóg obecności kierującego w pojeździe związany jest z dokonywaniem przez niego jakichkolwiek czynności (przykładowo związanych z monitorowaniem i kontrolowaniem otoczenia wokół pojazdu). Definicje wprowadzone przez SAE określają natomiast, czy uwaga osoby obecnej w pojeździe powinna być skupiona na pojeździe, czy może ona całkowicie odwrócić swoją uwagę od jazdy.

W dalszej kolejności podkreślić należy jedną z najistotniejszych kwestii, a mianowicie to, iż ruch autonomicznych samochodów możliwy jest dzięki samouczącym się algorytmom, a więc algorytmom sztucznej inteligencji (**SI**).

Wskazać w tym miejscu trzeba, iż algorytm SI, dzięki wykorzystywaniu procesu uczenia się – obok wiedzy przekazanej mu przez twórcę – może zdobywać także nową wiedzę, niedostępną dla jego twórcy (twórca może mieć mniejszą wiedzę, a przy tym bardziej ograniczone zdolności poznawcze) [2]. Dzięki pozyskiwaniu nowych informacji, system SI ma możliwość jeszcze szerszego rozwiązywania danej kategorii problemów, w sposób niezależny od zasobów wiedzy posiadanych przez programistę. W opisany wyżej sposób działają również algorytmy SI autonomicznych samochodów. Programista ma za zadanie przekazać systemowi wiedzę tzw. wyjściową (między innymi zasady ruchu drogowego), poszczególne, skonkretyzowane problemy pojawiające się na drodze. System SI ma za zadanie rozwiązać algorytm samodzielnie, nie zawsze w sposób dający się przewidzieć – nawet przez jego twórcę [3, 4].

Zasygnalizować jedynie należy, iż wykorzystanie algorytmów SI wiązać się będzie z różnorakimi dylematami etycznymi, w obliczu których będzie musiał stanąć nie tylko twórca algorytmu autonomicznego pojazdu, ale przede wszystkim ustawodawca.

[5] Automated and Electric Vehicles Act 2018 – Parliamentary Bills – UK Parliament.
[6] Ustawa z dnia 20 czerwca 1997 r. – Prawo o ruchu drogowym (t.j. Dz. U. z 2021 r. poz. 450 z późn. zm.).

2.2. Dysponent pojazdu autonomicznego

Kwestią wymagającą szerszego omówienia jest status prawny osoby będącej tzw. **dysponentem pojazdu autonomicznego**. Jest to problem, który rzadko jest rozważany w literaturze dotyczącej samochodów autonomicznych, a moim zdaniem kluczowy, jeśli chodzi o ustalanie odpowiedzialności za wypadki z udziałem tychże pojazdów.

W niniejszym miejscu nasuwają się dwie odpowiedzi. W myśl pierwszej z nich, dysponentem będzie formalnoprawny właściciel, w szczególności programista (twórca, osoba posiadająca licencję), który skonstruował mechanizm funkcjonowania danego samochodu.

Zgodnie z drugą, dysponentem pojazdu będzie osoba, która każdorazowo korzysta z niego, celem przemieszczenia się z miejsca na miejsce. Będzie więc nim osoba korzystająca z pojazdu, niezależnie od tego, jaki posiada tytuł prawny w stosunku do rzeczy. Można równocześnie przyjąć rozwiązanie zawarte w art. 436 Kodeksu cywilnego[7] (**k.c.**) i za dysponenta pojazdu autonomicznego uważać jego samoistnego posiadacza lub osobę, której posiadacz samoistny oddał środek komunikacji w posiadanie zależne. Rozwiązanie to z pewnością ma swoje zalety, jest ono bowiem ukształtowane w interesie ewentualnego poszkodowanego ruchem pojazdu i pozwala na łatwiejsze przypisanie odpowiedzialności.

W zależności od tego, jaka definicja zostałaby przyjęta przez ustawodawcę, w sposób odmienny kształtowałaby się odpowiedzialność dysponenta samochodu autonomicznego. W mojej ocenie, **znaczenie powinno mieć to, kto jest faktycznym dysponentem** autonomicznego pojazdu, nie zaś twórcą jego oprogramowania czy posiadaczem licencji. Oczywiście nie zmienia to faktu, iż dysponent powinien móc skierować odpowiednie roszczenia do twórcy lub posiadacza licencji, w sytuacji wadliwej konstrukcji pojazdu lub stworzenia wadliwego oprogramowania.

3. Problematyka odpowiedzialności cywilnoprawnej

De lege lata do określenia odpowiedzialności cywilnoprawnej samoistnego posiadacza pojazdu mechanicznego stosuje się normy wynikające z przepisu art. 436 k.c. w zw. z art. 435 k.c., zgodnie z którym samoistny posiadacz środka komunikacji ponosi odpowiedzialność za szkodę na osobie lub mieniu, wyrządzoną komukolwiek przez ruch tego pojazdu, chyba że szkoda nastąpiła wskutek siły wyższej albo wyłącznie z winy poszkodowanego lub osoby trzeciej, za którą nie ponosi odpowiedzialności. W sytuacji, gdy posiadacz samoistny oddał środek komunikacji w posiadanie zależne, odpowiedzialność ponosi posiadacz zależny (§ 1). Z kolei, § 2 art. 436 k.c. przewiduje, iż w razie zderzenia się mechanicznych środków komunikacji poruszanych za pomocą sił przyrody wymienione osoby mogą wzajemnie żądać naprawienia poniesionych szkód tylko na zasadach ogólnych. Również tylko na zasadach ogólnych osoby te są odpowiedzialne za szkody wyrządzone tym, których przewożą z grzeczności. Z powyższego wynika, iż w § 1 odpowiedzialność samoistnego posiadacza opiera się na zasadzie ryzyka, § 2 zaś – na powrót nakazuje stosowanie ogólnych zasad odpowiedzialności, a więc zasadę winy.

Powyżej wskazany przepis odnosi się do odpowiedzialności za szkodę powstałą w związku z ruchem pojazdu zautomatyzowanego – jednak nie w pełni zautoma-

[7] Ustawa z dnia 23 kwietnia 1964 r. Kodeks cywilny (t.j. Dz. U. z 2020 r. poz. 1740 z późn. zm.).

tyzowanego, a więc autonomicznego. Normy prawne w nim zawarte nie uwzględniają więc specyficznych okoliczności związanych z posługiwaniem się algorytmem sztucznej inteligencji.

W pierwszej kolejności, wskazać należy, iż odpowiedzialność dysponenta autonomicznego samochodu powinna również **opierać się na zasadzie ryzyka.** Ustawodawca dąży bowiem do oparcia odpowiedzialności danej osoby za szkodę na zasadzie ryzyka, gdy podejmowane przez nią czynności stwarzają szczególne niebezpieczeństwo dla innych podmiotów – a więc, gdy z uwagi na wykonywanie tych czynności, z dość dużym prawdopodobieństwem wyrządzona może zostać szkoda innej osobie. Nie ma bowiem żadnych przesłanek, na podstawie których można byłoby stwierdzić, iż posługiwanie się autonomicznymi samochodami jest mniej ryzykowane niż posługiwanie się samochodami zautomatyzowanymi w części. Należy bowiem pamiętać o możliwości wystąpienia w każdym z tych pojazdów usterki technicznej, czy nieprzewidywalnych działań sztucznej inteligencji w odniesieniu do samochodu autonomicznego. Nieprzewidywalność działań algorytmów SI powoduje, iż nie jest możliwe przewidzenie przez dysponenta wyrządzenia potencjalnej szkody, jak również w konsekwencji oszacowanie jej rozmiarów [5].

Zgadzając się jednak, że odpowiedzialność dysponenta autonomicznego samochodu powinna opierać się na zasadzie ryzyka, należy rozważyć, w jakich przypadkach dysponent będzie się mógł od tej odpowiedzialności zwolnić – a więc jakie przesłanki egzoneracyjne powinny zostać przewidziane przez ustawodawcę [6].

Okolicznościami egzoneracyjnymi, które najczęściej wskazywane są przez ustawodawcę są następujące sytuacje: jeżeli szkoda nastąpiła wskutek siły wyższej (*vis maior*), gdy nastąpiła ona wyłącznie z winy poszkodowanego lub też z winy osoby trzeciej, za którą podmiot odpowiedzialny nie ponosi odpowiedzialności. Rozważyć więc należy, czy uregulowanie przesłanek egzoneracyjnych w taki sposób, jak wskazany powyżej – w przypadku szkody powstałej w związku z poruszaniem się autonomicznego samochodu – zasługuje na aprobatę.

Po pierwsze, analizie należy poddać przesłankę egzoneracyjną pod postacią siły wyższej. Tak w doktrynie, jak i judykaturze podkreślane jest, iż pojęcie siły wyższej należy rozumieć w sposób obiektywny. A zatem, za *vis maior* zostanie w konsekwencji uznane zdarzenie zewnętrzne w stosunku do urządzenia, z którym związana jest odpowiedzialność odszkodowawcza. Zwrócić należy także uwagę inne cechy zdarzenia będącego siłą wyższą, a mianowicie niemożliwość przewidzenia (rozumiana ten sposób, iż przy obiektywnej ocenie zdarzeń można wskazać co najwyżej na bardzo niski stopień prawdopodobieństwa jego pojawienia się) oraz niemożliwość zapobieżenia jego skutkom. Za przykład siły wyższej wskazać można takie zjawiska przyrodnicze, jak powodzie, huragany, trzęsienia ziemi, ale także pewnego rodzaju zdarzenia, które są wywoływane przez człowieka, jak na przykład działania wojenne, gwałtowne rozruchy oraz akty władzy publicznej [7].

Kwestią kluczową jest, że przesłanka egzoneracyjna pod postacią siły wyższej będzie przesłanką zewnętrzną w stosunku do działań podejmowanych przez algorytm sztucznej inteligencji. Należy więc wykluczyć sytuacje, gdy za siłę wyższą uznane zostaną same działania podejmowane przez algorytm SI. W mojej ocenie, ustawodawca powinien dopuścić możliwość zwolnienia się przez dysponenta autonomicznego samo-

chodu z odpowiedzialności, w sytuacji gdy szkoda nastąpiła na skutek siły wyższej. W innym bowiem wypadku, odpowiedzialność za ruch autonomicznych samochodów stałaby się zbliżona do odpowiedzialności absolutnej, co mogłoby wpłynąć przede wszystkim na ograniczenie rozwoju nowych technologii związanych z autonomicznymi pojazdami – dysponenci nie byliby bowiem skłonni do ponoszenia aż tak szeroko zakreślonej odpowiedzialności. Co prawda, istnieją obszary, w których zasadne byłoby rozszerzenie odpowiedzialności dysponenta SI także do odpowiedzialności za szkodę powstałą na skutek siły wyższej, jednak powinny to być obszary, które stwarzają szczególnie wysokie ryzyko wyrządzenia szkody (przykładowo użycie SI do obsługi elektrowni atomowej).

Kolejną okolicznością egzoneracyjną, którą należy poddać analizie w kontekście możliwości powołania się na nią przez dysponenta autonomicznego samochodu w celu zwolnienia się z odpowiedzialności za szkodę, jest okoliczność, iż szkoda nastąpiła z winy osoby trzeciej, za którą dysponent ten nie ponosi odpowiedzialności. Za osobę trzecią należy przy tym uznać osobę, która nie pozostaje w jakimkolwiek stosunku prawnym z dysponentem autonomicznego samochodu i nie bierze udziału w czynności, która związana jest z posługiwaniem się autonomicznym samochodem przez dysponenta.

Wskazać w tym miejscu należy, iż algorytmy sztucznej inteligencji w ogólności (a w szczególności te wykorzystywane w autonomicznych pojazdach), z uwagi na wykorzystywane technologie, mogą potencjalnie stanowić atrakcyjny obiekt, w stosunku do którego osoby trzecie mogą kierować działania o charakterze hackerskim, czy też nawet działania o charakterze terrorystycznym.

Nawet gdy, przy tworzeniu algorytmu SI autonomicznego pojazdu, zostanie zastosowany wysoki, odpowiedni poziom zabezpieczeń przed niepożądanymi działaniami pochodzącymi ze strony osób trzecich, nie zawsze będzie możliwe do przewidzenia, czy w każdym przypadku będą one w stanie skutecznie zapobiec wskazanym powyżej działaniom. Ponadto, same niepożądane działania osób trzecich oraz motywy tych działań mogą nie być możliwe do przewidzenia. W sytuacji zastosowania niewystarczających zabezpieczeń, odpowiedzialność dysponenta autonomicznego samochodu wydaje się oczywista. Jednakże do naruszenia zabezpieczeń algorytmu SI znajdującego się w autonomicznym pojeździe, może dojść także wtedy, gdy zabezpieczenia te będą skonstruowane w sposób prawidłowy. W sytuacji, gdy szkoda została wyrządzona w wyniku działania osoby trzeciej, za którą dysponent SI nie ponosi odpowiedzialności, nie zawsze będzie możliwe bezproblemowe wykrycie sprawcy takiego działania, czy wyegzekwowanie odpowiedzialności od rzeczywistego sprawcy (np. w przypadku ataku hackerskiego dokonanego przez niezidentyfikowaną grupę hackerów). W takiej sytuacji, w mojej ocenie, niezbędne jest umożliwienie przypisania odpowiedzialności na zasadzie ryzyka dysponentowi samochodu autonomicznego, także w sytuacji, gdy szkoda wynikła z działania osoby trzeciej, za którą nie ponosi on odpowiedzialności. Oczywiście, należy także podkreślić, iż w przypadku, gdy system zabezpieczeń przed niepożądanymi działaniami osób trzecich został skonstruowany w sposób nieprawidłowy – dysponent autonomicznego pojazdu powinien mieć roszczenie regresowe do twórcy pojazdu lub też, roszczenia te powinny móc zostać bezpośrednio

skierowane do twórcy algorytmu (zarówno przez poszkodowanego, jak i przez dysponenta autonomicznego samochodu) [8].

Kolejna okoliczność egzoneracyjna, która wymaga omówienia, odnosi się do możliwości wyłączenia odpowiedzialności dysponenta autonomicznego samochodu, w sytuacji gdy szkoda wynikła wyłącznie z winy poszkodowanego. By stwierdzić, iż szkoda wynikła z wyłącznej winy poszkodowanego, należy poczynić ustalenia, z których wynika, że wina ta jest na tyle poważna, iż zgodnie z zasadami nauki i doświadczenia życiowego, inne okoliczności sprawy nie powinny i nie mogą być brane pod uwagę. Wina ta powinna więc przeważać w sposób decydujący i bezdyskusyjny nad innymi okolicznościami badanej sprawy. W mojej ocenie, dysponent autonomicznego pojazdu, powinien mieć możliwość zwolnienia się z odpowiedzialności w sytuacji, gdy szkoda wynika wyłącznie z winy poszkodowanego. Należy wskazać, iż pewnymi swoimi zachowaniami poszkodowany może spowodować szkodę, mimo iż szkoda ta nie powstałaby w sytuacji styczności poszkodowanego z pojazdem zautomatyzowanym w części (a nie pojazdem autonomicznym). Konieczne jest więc nie tylko stwierdzenie, że szkoda wynikła wyłącznie z winy poszkodowanego, ale także stwierdzenie, iż poszkodowany miał świadomość, iż ma do czynienia z algorytmem SI (autonomicznym samochodem), jak również wiedział jakie powinien w związku z tym działania podejmować.

W odniesieniu do odpowiedzialności za ruch autonomicznych samochodów wątpliwości budzi również zasadność zastosowania normy wynikającej z art. 436 § 2 k.c., zgodnie z którą w razie zderzenia się mechanicznych środków komunikacji poruszanych za pomocą sił przyrody wymienione osoby mogą wzajemnie żądać naprawienia poniesionych szkód tylko na zasadach ogólnych. Również tylko na zasadach ogólnych osoby te są odpowiedzialne za szkody wyrządzone tym, których przewożą z grzeczności. Powyższe oznacza, iż w przypadku zderzenia się dwóch autonomicznych samochodów, dysponenci tych pojazdów mogliby wzajemnie żądać naprawienia poniesionych szkód w zależności od tego, kto ponosi winę za zdarzenie [9]. Jednakże w jaki sposób i czy w ogóle można badać winę dysponenta autonomicznego samochodu, jeżeli to algorytm SI odpowiedzialny jest za sterowanie pojazdem? W mojej ocenie, badanie zawinienia dysponenta mogłoby się ograniczać wyłącznie do badania pewnych specyficznych okoliczności. Mianowicie wskazać należy, iż dysponent autonomicznego samochodu powinien zostać zobligowany przede wszystkim do używania pojazdu zgodnie z instrukcją stworzoną przez producenta. Wszelkie zaś zawinione odstępstwa od instrukcji i wynikłe z tego powodu szkody powinny w konsekwencji obciążać dysponenta pojazdu. W zakres obowiązków dysponenta autonomicznego samochodu powinny wchodzić również inne czynności wynikające ze sporządzonej przez producenta instrukcji, polegające w szczególności na dokonywaniu pewnych działań zachowawczych. Wymienić tutaj można między innymi dokonywanie aktualizacji oprogramowania, w miarę dokonywania w nim zmian przez producenta. Każda bowiem aktualizacja oprogramowania miałaby na celu poprawę bezpieczeństwa korzystania z pojazdu. W celu zapewnienia lepszej ochrony potencjalnie poszkodowanym wskutek ruchu autonomicznego samochodu, należałoby przerzucić ciężar dowodu na dysponenta autonomicznego pojazdu (mowa tu w szczególności o osobie przewożonej „z grzeczności").

Z powyższych rozważań wynika, iż to na dysponencie autonomicznego pojazdu powinien spoczywać obowiązek wykazania, iż jego działania były prawidłowe i zgodne z instrukcją stworzoną przez producenta. Odmiennie więc niż w przypadku przepisu art. 415 k.c., gdzie niezbędne jest wykazanie przez poszkodowanego winy sprawcy szkody. Gdyby bowiem, to poszkodowany musiałby udowodnić winę – w rozumieniu art. 415 k.c. – dysponenta pojazdu, bardzo prawdopodobne, iż przeprowadzenie takiego dowodu byłoby w wielu przypadkach bardzo utrudnione, a często nawet niemożliwe [10].

4. System koordynujący ruch pojazdów autonomicznych

4.1. Istota systemu koordynującego ruch pojazdów autonomicznych

Istotną kwestią, która wymaga omówienia i przeanalizowania jest konieczność i potrzeba stworzenia w przyszłości (w miarę upowszechnienia się autonomicznych samochodów na drogach publicznych) systemu koordynującego ruch pojazdów autonomicznych.

System koordynujący ruch pojazdów zmierzać ma bowiem do zagwarantowania bezpieczeństwa tego ruchu i uniknięcia potencjalnych kolizji i wypadków. System koordynujący ruch pojazdów autonomicznych może przybierać różne postacie i odmienny charakter prawny. Może on zostać ukształtowany jako tzw. „miejskim" lub też system scentralizowany. W obrębie systemu scentralizowanego zastanowić się natomiast należy, czy system taki powinien przybrać postać systemu korporacyjnego, czy państwowego. Omówić należy też istotę systemu w ogólności.

Propozycje utworzenia tego rodzaju systemu (również uwzględniającego ruch pojazdów zautomatyzowanych w części) pojawiają się między innymi na poziomie unijnym. I tak, Unia Europejska przedstawiła koncepcję Inteligentnego Systemu Transportu Współdziałającego (**C-ITS**)[8]. Wskazany wyżej system ma w założeniu umożliwić użytkownikom dróg i osobom zarządzającym ruchem na wymianę informacji i wykorzystanie tych informacji do skoordynowania ich działań w ramach ruchu na drogach publicznych. W dodatku, C-ITS dzięki wykorzystaniu techniki cyfrowej łączności między pojazdami i między pojazdami a odpowiednią infrastrukturą – ma na celu poprawę bezpieczeństwa na drogach, zwiększenie wydajności ruchu i komfortu jazdy, pomagając kierowcy w podejmowaniu właściwych decyzji i dostosowaniu się do sytuacji na drodze. W założeniu wykorzystywać on ma z łączność bezprzewodową oraz inne technologie informacyjne w celu natychmiastowej wymiany informacji w wyżej przedstawionych konfiguracjach. Podkreślane jest, że komunikacja między pojazdami, infrastrukturą i innymi użytkownikami dróg ma także istotne znaczenie dla zwiększenia bezpieczeństwa w przyszłym ruchu autonomicznych pojazdów i ich pełnej integracji z całym systemem transportu.

Konieczność stworzenia takiego systemu wydaje się tym bardziej potrzebna, iż w przyszłości, gdy autonomiczne samochody będą już zjawiskiem powszechnym na drogach, technologie obecne w samym pojeździe mogą nie być wystarczające same w sobie dla zapewnienia bezpieczeństwa ruchu.

[8] Studies – Intelligent Transport Systems | Mobility and Transport (europa.eu).

Jedną z możliwości jest stworzenie państwowego systemu koordynującego ruch pojazdów autonomicznych. Państwowy system z całą pewnością rozwiązywałby problem wielości systemów na szczeblu np. samorządowym, czy regionalnym oraz problemów komunikacyjnych i koordynacyjnych między nimi.

Dany autonomiczny pojazd byłby w zasięgu jednego systemu, poruszając się po terytorium całego kraju. Rozwiązanie takie, aczkolwiek pożądane z technicznego punktu widzenia, rodzi jednak inne wątpliwości, można rzec nawet, że natury konstytucyjnej. Mianowicie zadać sobie można pytanie o granice w jakich powinno działać państwo. Czy pożądane byłoby, żeby to państwo mogło zarządzać systemem, który dostarczałby mu wielu istotnych informacji na temat użytkowników pojazdów autonomicznych? Należy pamiętać, że system koordynujący ruchem pojazdów byłby w stanie dostarczyć szczegółowych informacji o miejscu pobytu danego pojazdu autonomicznego, pokonywanej przez niego trasy i częstotliwości jej pokonywania etc., a tym samym dostarczałby informacji na temat użytkownika takiego pojazdu. Powstaje pytanie w jaki sposób państwo mogłoby wykorzystać zgromadzone w systemie informacje. Kwestia ta, dotycząca charakteru i sposobu gromadzonych danych, czy ewentualnej możliwości ich wykorzystywania wymagałaby szczegółowego uregulowania na poziomie co najmniej ustawowym. Jest to oczywiście po części problem natury filozoficzno-prawnej, dotyczący granic w jakich powinno działać państwo i jego ingerencji w sferę prywatną obywateli. Uważam jednak, że jest to kwestia na tyle istotna, że wymaga chociaż zasygnalizowania.

Istnieją także inne niebezpieczeństwa związane z istnieniem jednego, scentralizowanego systemu państwowego. Scentralizowany system koordynujący ruch samochodów autonomicznych z całą pewnością mógłby się stać celem podatnym na ataki z zewnątrz. Można sobie wyobrazić, jak atrakcyjny mógłby być powyższy system z punktu widzenia hakera, czy terrorysty. Uzyskanie w nielegalny sposób dostępu do systemu koordynującego ruch pojazdów na drogach publicznych przez taką osobę lub grupę osób niewątpliwie stwarzałoby bezpośrednie niebezpieczeństwo dla uczestników ruchu. Państwo, przy założeniu istnienia systemu scentralizowanego, musiałoby zainwestować w zabezpieczenie go przez nieprzewidzianymi zagrożeniami płynącymi z zewnątrz od osób trzecich, czy nawet innymi zewnętrznymi zagrożeniami, nie pochodzącymi bezpośrednio od ludzi, ale przykładowo związanymi ze zjawiskami atmosferycznymi. Podsumowując, system ten ze względów bezpieczeństwa powinien być jednak zdecentralizowany lub powinien posiadać bardzo wysoki poziom zabezpieczeń przed potencjalnymi zagrożeniami.

Pod rozwagę należy wziąć również możliwość przekazania stworzenia i zarządzania systemem koordynującym ruch pojazdów autonomicznych w ręce prywatnego przedsiębiorstwa. Takie rozwiązanie pozwoliłoby na wyeliminowanie zagrożeń związanych z funkcjonowaniem systemu zarządzanego przez państwo, które przedstawiłam powyżej. Powierzenie tego zadania wyspecjalizowanemu prywatnemu podmiotowi byłoby moim zdaniem rozwiązaniem rozsądnym nie tylko z technicznego punku widzenia, ale także z perspektywy ochrony obywateli przed nadmierną ingerencją państwa. Nie eliminowałoby to jednak potrzeby regulacji tego obszaru. Prawdopodobnie konieczne byłoby także ustanowienie monopolu jednego przedsiębiorstwa w celu wyeliminowania wielości systemów. Nie uważam tego jednak za kwestię oczywistą,

bowiem nie są jeszcze znane szczegółowe techniczne rozwiązania dotyczące kompatybilności kilku systemów i możliwości ich współdziałania.

Powyższe rozważania dotyczyły systemu koordynującego ruch pojazdów autonomicznych, którego zasięg ograniczałby się tylko do jednego państwa. Problematyka wydaje się jednak szersza. Innym problemem, wymagającym zasygnalizowania, jest to, jak ten system powinien funkcjonować w przypadku poruszania się pojazdów autonomicznych po terytoriach różnych państw. Kwestią więc, która wymagałaby również uregulowania jest utworzenie systemu transgranicznego. Regulacje dotyczące tego systemu niewątpliwie powinny powstać także na szczeblu ponadnarodowym, na poziomie prawa unijnego. W przypadku jednak próby zorganizowania systemu między innymi państwami niż państwa członkowskie Unii Europejskiej, konieczne byłoby uregulowanie tej kwestii na poziomie międzynarodowym.

4.2. Odpowiedzialność podmiotu zarządzającego systemem koordynującym ruch pojazdów autonomicznych

Moje wcześniejsze rozważania, dotyczące odpowiedzialności cywilnoprawnej, odnosiły się do odpowiedzialności dysponentów pojazdów autonomicznych za szkody wyrządzone w związku z ruchem tych pojazdów. W niniejszym miejscu wskażę na potencjalne rozwiązania odnoszące się do regulacji związanych z odpowiedzialnością podmiotu zarządzającego systemem koordynującym ruch pojazdów autonomicznych – oczywiście jeżeli taki system by powstał.

W mojej ocenie, na gruncie obowiązujących przepisów, zastosowanie mógłby znaleźć art. 435 k.c. Zgodnie z § 1 powyższego przepisu, prowadzący na własny rachunek przedsiębiorstwo lub zakład wprawiany w ruch za pomocą sił przyrody (pary, gazu, elektryczności, paliw płynnych itp.) ponosi odpowiedzialność za szkodę na osobie lub mieniu, wyrządzoną komukolwiek przez ruch przedsiębiorstwa lub zakładu. Przesłankami egzoneracyjnymi, wyłączającymi odpowiedzialność prowadzącego przedsiębiorstwo lub zakład jest sytuacja, gdy szkoda nastąpiła wskutek siły wyższej albo wyłącznie z winy poszkodowanego lub osoby trzeciej, za którą nie ponosi odpowiedzialności. Przepis ten konstruuje więc zaostrzoną odpowiedzialność prowadzącego przedsiębiorstwo lub zakład wprawianego w ruch za pomocą sił przyrody.

W przypadku przedsiębiorstw (zakładów) wprawianych w ruch za pomocą sił przyrody, a stanowiących własność Skarbu Państwa, lub jednostek samorządu terytorialnego, należałoby przyjąć ich odpowiedzialność opartą na art. 435 k.c., a nie na art. 417 k.c. W doktrynie argumentuje się, że przepis 417 k.c. dotyczy sfery *imperium* (sprawowanie władzy publicznej), podczas gdy wykonywanie funkcji gospodarczych do tej strefy nie należy. Należy ono do sfery *dominium* działania państwa, które należy do zakresu art. 435 k.c. Pod tak rozumianym przedsiębiorstwem lub zakładem niewątpliwie można umiejscowić podmiot zarządzający systemem koordynującym ruch pojazdów autonomicznych, niezależnie, czy jego charakter własnościowy będzie państwowy czy też nie, oraz niezależnie od tego, czy będzie on nastawiony na prowadzenie działalności gospodarczej.

Hipoteza art. 435 k.c. stanowi, że zakład lub przedsiębiorstwo powinno być wprawiane w ruch za pomocą sił przyrody. Jako egzemplifikację sił przyrody omawiany artykuł wymienia parę, gaz, elektryczność oraz paliwa płynne. Nie jest to jednak katalog zamknięty, wymienione są jedynie przykładowe siły przyrody. Przedsiębiorstwo lub

zakład w rozumieniu art. 435 k.c. charakteryzują się tym, że ich istnienie i praca w danych warunkach czasu i miejsca są uzależnione od wykorzystania sił przyrody oraz że bez użycia tych sił wymienione jednostki nie osiągnęłyby celu, dla jakiego zostały stworzone[9]. Niewątpliwie do funkcjonowania systemu koordynującego ruch pojazdów autonomicznych niezbędna jest energia elektryczna. Jest to warunek *sine qua non* funkcjonowania takiego podmiotu, a nie jedynie element dodatkowy.

Z powyższych rozważań wynika, że *de lege lata* do odpowiedzialności podmiotu zarządzającego systemem koordynowania ruchem pojazdów autonomicznych możliwe jest zastosowanie art. 435 k.c. Nie oznacza to jednak, że przepis ten odpowiada na wyzwania, jakie stawia ruch pojazdów autonomicznych i konieczność ustalenia odpowiednich reguł odpowiedzialności. Jestem zdania, że *de lege ferenda* reżim odpowiedzialności stosowany w sytuacjach szkód wyrządzonych ruchem pojazdów autonomicznych, wynikających z nieprawidłowego funkcjonowania systemu zarządzającego tym ruchem powinien być zaostrzony, w stosunku do reżimu wynikającego z art. 435 k.c.

Po pierwsze, w przypadku systemu koordynującego ruch pojazdów autonomicznych za niewłaściwe uważam pozostawienie przesłanki egzoneracyjnej, polegającej na wyłączeniu odpowiedzialności odszkodowawczej, gdy szkoda powstała wyłącznie z winy osoby trzeciej, za którą zakład lub przedsiębiorstwo nie ponosi odpowiedzialności. Działalność takiego przedsiębiorstwa lub zakładu, polegająca na zarządzaniu ruchem na drogach publicznych jest niezwykle istotna z punktu widzenia społecznego. Niesie ona także za sobą pewne ryzyka i niebezpieczeństwa. Prawidłowe funkcjonowanie systemu warunkuje bowiem bezpieczeństwo na drogach publicznych. Ponadto specyfika działania systemu, polegająca na umożliwieniu przesyłania informacji między uczestnikami ruchu drogowego, w celu umożliwienia bezpiecznego przemieszczania się po drogach, wymaga, by system ten był szczególnie regulowany. Można wyobrazić sobie sytuację, w której zamierzone działania osoby trzeciej (np. działania hackerskie, czy działalność terrorystyczna) celowo ingerują w funkcjonowanie systemu koordynującego ruch pojazdów autonomicznych. Sytuacje takie, jak opisana powyżej nie zawsze mogą być możliwe do przewidzenia. Trudno także przewidzieć, czy możliwe będzie bezproblemowe wykrycie sprawcy takiego działania. Z uwagi właśnie na takie nieprzewidziane sytuacje, odpowiedzialność podmiotów zarządzających systemem wymaga zaostrzenia. Z uwagi właśnie na szczególną wagę działalności, polegającej na koordynacji ruchu na drogach publicznych i wymogu zapewnienia w związku z tym jak największego bezpieczeństwa, konieczne moim zdaniem jest wyłączenie niniejszej przesłanki egzoneracyjnej. Osoby trzecie powinny natomiast odpowiadać wobec państwa za szkody wyrządzone swoim zachowaniem, powinny więc ponosić odpowiedzialność regresową wobec Skarbu Państwa. Powiązana wydaje się też być kwestia odporności systemu na wspomniane przeze mnie ataki hackerskie. Rozważona powinna być również kwestia odpowiedzialności twórcy systemu i jego oprogramowania za ich odporność na działania hackerskie. Odpowiedzialność należałoby ustalić poprzez wskazanie, czy system ten był należycie zabezpieczony przez jego twórcę i czy atak hackerski był możliwy do uniknięcia.

[9] Zob. wyrok Sądu Najwyższego z dnia 18 września 2002 r., sygn. akt III CKN 1334/00.

Zastanawiając się nad właściwym uregulowaniem kwestii odpowiedzialności, sięgnę do ustawy Prawo atomowe z dnia 29 listopada 2000 r. (**Prawo atomowe**)[10]. Kwestia odpowiedzialności w niniejszej ustawie uregulowana jest w rozdziale 12, dotyczącym odpowiedzialności cywilnej za szkody jądrowe. Zgodnie z Prawem atomowym szkodą jądrową jest szkoda na osobie, szkoda na mieniu lub szkoda w środowisku jako dobru wspólnym. Art. 101 analizowanej ustawy określa osoby odpowiedzialne za szkodę jądrową. Według powyższego przepisu, osoba eksploatująca ponosi wyłączną odpowiedzialność za szkodę jądrową spowodowaną wypadkiem jądrowym w urządzeniu jądrowym lub związaną z tym urządzeniem. Wyłączenie odpowiedzialności ma miejsce jedynie w przypadku, gdy szkoda nastąpiła bezpośrednio wskutek działań wojennych lub konfliktu zbrojnego. Jeżeli poszkodowany, na skutek umyślnego zachowania, przyczynił się do powstania lub zwiększenia szkody, sąd może zwolnić całkowicie lub częściowo osobę eksploatującą z obowiązku naprawienia szkody w odniesieniu do szkody doznanej przez poszkodowanego. Analiza powyższych uregulowań pozwala stwierdzić, że choć odpowiedzialność za szkody atomowe nie jest odpowiedzialnością absolutną, to egzoneracja osoby odpowiedzialnej jest ograniczona do bardzo nielicznej grupy przypadków, gdy szkoda jest następstwem działań wojennych lub konfliktu zbrojnego. Nawet w przypadku tzw. przyczynienia się osoby poszkodowanej, zwolnienie podmiotu z odpowiedzialności cywilnoprawnej może nastąpić tylko fakultatywnie decyzją sądu. Przyczynienie to musi także być skutkiem umyślnego działania osoby poszkodowanej. Ponadto w przepisie mowa o tym, że sąd może zwolnić całkowicie lub częściowo osobę eksploatującą z obowiązku naprawienia szkody tylko w odniesieniu do szkody doznanej przez poszkodowanego. Nie może zwolnić osoby odpowiedzialnej z obowiązku naprawienia innych szkód (np. szkody wyrządzonej w środowisku). Wyłączone są również przypadki nieumyślnego, choć zawinionego przyczynienia się. Powyższy reżim odpowiedzialności jest znacznie surowszy, niż przewidziany w art. 435 k.c.

Podsumowując, biorąc pod uwagę specyfikę uregulowań Prawa atomowego, zastosowanie przewidzianego w nim reżimu odpowiedzialności w stosunku do podmiotu zarządzającego systemem koordynacji ruchu pojazdów autonomicznych wydaje się zbyt rygorystyczne. Uważam jednak, że właściwym rozwiązaniem byłoby przyjęcie systemu odpowiedzialności będącego pośrednim pomiędzy systemem odpowiedzialności przyjętym w art. 435 k.c., a w Prawie atomowym. Przede wszystkim, co zostało już przeze mnie wyżej omówione, właściwym rozwiązaniem byłoby wyłączenie przesłanki egzoneracyjnej, która zwalnia podmiot z odpowiedzialności, gdy szkoda jest wynikiem wyłącznego działania osoby trzeciej, za którą podmiot ten nie ponosi odpowiedzialności.

Należałoby się także zastanowić nad uregulowaniem sytuacji, gdy poszkodowany przyczynił się do powstania szkody wskutek umyślnego zachowania. Jestem zdania, iż kwestia odpowiedzialności w tym przypadku powinna wyglądać podobnie jak odpowiedzialność w Prawie atomowym. Podmiot nie byłby automatycznie zwolniony z takiej odpowiedzialności wobec osoby poszkodowanej, ale dopiero sąd mógłby go zwolnić z odpowiedzialności po rozważeniu stanu faktycznego danej sprawy. Podmiot

[10] Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe (t.j. Dz. U. z 2021 r. poz. 623).

byłby jednak nadal odpowiedziany za inne szkody wyrządzone przez poszkodowanego innym osobom.

Nie uważam za zasadne jednak, by za przykładem Prawa atomowego rezygnować z przesłanki egzoneracyjnej, jaką jest siła wyższa. Specyfika Prawa atomowego zadecydowała o wyłączeniu przesłanki siły wyższej, pozostawiając jedynie przesłankę egzoneracyjną wystąpienia działań wojennych lub konfliktu zbrojnego. Rozwiązanie takie jest spowodowane wysokim poziomem niebezpieczeństwa, jakie stwarza działalność uregulowana w ustawie Prawo atomowe, który to skłonił ustawodawcę do wyeliminowania przesłanki egzoneracyjnej w postaci siły wyższej z Prawa atomowego. Wydaje się jednak, że taka konieczność nie występuje w przypadku uregulowania odpowiedzialności w przypadku powstania szkód związanych z funkcjonowaniem systemu zarządzającego ruchem na drogach publicznych. Jest to jednak kwestia pośrednio zależna od rozwiązań technicznych wprowadzonych w związku z takim systemem.

5. Podsumowanie

Rozważania zawarte w niniejszym rozdziale, ukazują jak wiele problemów natury prawnej łączy się z wykorzystaniem na drogach autonomicznych samochodów. Co prawda, pojazdy autonomiczne w chwili obecnej są w wielu krajach (w tym w Polsce) w fazie testów, jednakże jest to właśnie odpowiedni moment na zastanowienie się nad przyszłymi regulacjami prawnymi i stopniowe wdrażanie nowych rozwiązań. W dzisiejszym świecie nowe technologie rozwijają się w sposób dynamiczny i w pewnym momencie społeczeństwo może zostać postawione przed faktem dokonanym, pojawieniem się na drogach autonomicznych pojazdów. Z uwagi na konieczność zapewnienia względnej pewności prawa i bezpieczeństwa publicznego, regulacje dotyczące autonomicznych pojazdów powinny wyprzedzić faktyczne pojawienie się tych pojazdów na drogach. W pierwszej kolejności są to problemy elementarne – by rozważać w ogóle problematykę odpowiedzialności za ruch autonomicznych samochodów, należy w sposób precyzyjny zdefiniować podstawowe pojęcia, a mianowicie pojęcie autonomicznego pojazdu, jak też dysponenta tegoż pojazdu. Redefinicji i uzupełnienia wymaga więc wszystkim zakres pojęć, którymi operują prawnicy. Podkreślić także trzeba, iż *de lege lata* obowiązujące regulacje prawne – dotyczące samoistnych posiadaczy pojazdów mechanicznych – wydają się niedostosowane do pojawienia się na drogach autonomicznych samochodów. W szczególności, uwypuklone zostało, jakie problemy wiążą się z zastosowaniem zasady winy do odpowiedzialności dysponenta autonomicznego pojazdu. Nie zawsze też okoliczności egzoneracyjne, za pomocą których osoba odpowiedzialna na zasadzie ryzyka będzie mogła się zwolnić z odpowiedzialności, powinny znaleźć zastosowanie w sytuacji szkody wyrządzonej poprzez ruch pojazdu autonomicznego. Kolejną kwestią jest konieczność i potrzeba utworzenia w przyszłości systemu koordynującego ruch pojazdów autonomicznych – system taki pozwoli na zapewnienie większego bezpieczeństwa w przypadku pojawienia się na drogach na masową skalę autonomicznych pojazdów.

Literatura

1. Lin P., *The robot car of tomorrow may just be programmed to hit you*, May 6, 2014. Retrieved on May 29, 2014 from: The Robot Car of Tomorrow May Just Be Programmed to Hit You, Center for Internet and Society (stanford.edu).
2. Białko M., Sztuczna inteligencja i elementy hybrydowych systemów ekspertowych, Koszalin 2005, s. 16.
3. Wawrzyński P., *Podstawy sztucznej inteligencji*, Warszawa 2014, s. 9.
4. Rojszczak M., *Prawne aspekty systemów sztucznej inteligencji – zarys problemu*; w: *Sztuczna inteligencja, blockchain, cyberbezpieczeństwo oraz dane osobowe. Zagadnienia wybrane,* (red.) K. Flaga-Gieruszyńska, J. Gołaczyński, D. Szostek, C.H. Beck, 2019.
5. Domagała M., *Zagrożenia związane z wprowadzeniem pojazdów autonomicznych jako przykład negatywnych skutków rozwoju sztucznej inteligencji* (w:) *Prawo sztucznej inteligencji*, red. L. Lai, M. Świerczyński, Warszawa 2020, s. 229
6. Frącczak Ł., Matusiak-Frącczak M., *Odpowiedzialność cywilna za wypadki komunikacyjne z udziałem pojazdów autonomicznych*, PiP 2019, nr 11, s. 114-124.
7. Karaszewski G. [w:] *Kodeks cywilny. Komentarz*, red. J. Ciszewski, P. Nazaruk, Warszawa 2019, art. 435.
8. Webb K.C., *Products Liability and Autonomous Vehicles: Who's Driving Whom?*, Richmond Journal of Law & Technology 2016, nr 4.
9. Gudowski J., Bieniek G., *Art. 436. W: Kodeks cywilny. Komentarz. Tom III. Zobowiązania. Część ogólna*, wyd. II. Wolters Kluwer Polska, 2018.
10. Olejniczak A. [w:] *Kodeks cywilny. Komentarz. Tom III. Zobowiązania – część ogólna, wyd. II*, red. A. Kidyba, Warszawa 2014, art. 415.

Problematyka odpowiedzialności cywilnoprawnej za ruch autonomicznych samochodów

Streszczenie

Autonomiczne samochody, są obecnie na szeroką skalę testowane na drogach publicznych, co więcej w niektórych państwach mogą być już użytkowane także przez osoby prywatne. Brak jest jednak kompleksowych regulacji prawnych dotyczących problematyki odpowiedzialności prawnej za ruch tych pojazdów, szczególnie wtedy, gdy ruchem tym kierują algorytmy sztucznej inteligencji. Transport samochodowy jest systemem na tyle skomplikowanym (i wchodzącym w interakcje z innymi zjawiskami), że jego nieprzewidywalność wymusza stworzenie systemów samouczących się – a zatem również nieprzewidywalnych. Te regulacje, które zostały wprowadzone w nielicznych państwach nie odnoszą się do podstawowych kwestii związanych z problematyką odpowiedzialności cywilnoprawnej za szkody spowodowane ruchem tych pojazdów. W artykule wyrażona jest opinia, że ruch pojazdów autonomicznych na drogach publicznych, w celu zagwarantowania jego bezpieczeństwa i płynności, powinien być koordynowany przez specjalnie utworzony w tym celu system informatyczny. Mógłby on funkcjonować jako system znajdujący się w rękach podmiotu prywatnego, jako system państwowy lub samorządowy. Wymaga to jednak decyzji ustawodawcy. Ustawodawca, regulując zasady działania tego systemu, powinien też zająć się zdefiniowaniem zasad działania algorytmu tego systemu – nie tylko w sferze technicznej, ale i prawnej.

Bardzo prawdopodobne jest jednak, że autonomiczne samochody pojawią się masowo na drogach, nim uda się utworzyć system służący do koordynowania ich ruchu. W związku z tym konieczne jest określenie przynajmniej podstawowych zasad odpowiedzialności dysponentów tych pojazdów. Obecnie obowiązujące w prawie polskim regulacje (art. 436 k.c.), nie są wystarczające dla określenia odpowiedzialności dysponenta. nie zawierają np. przesłanek oceny winy dysponenta, który nie steruje pojazdem w sytuacji zderzenia się dwóch pojazdów. Ponadto, brak w systemie prawnym tak elementarnych kwestii, jak wyczerpująca definicja legalna samochodu autonomicznego (roli tej nie spełnia definicja zawarta w ustawie Prawo o ruchu drogowym). W rozdziale proponuję ogólne kierunki regulacji powyższych kwestii, w zakresie w jakim jest to możliwe w rozdziale monografii.

W rozdziale dokonana została (w zakresie ogólnym i przykładowym) analiza obecnie obowiązujących regulacji prawnych, jak także analiza dokumentów o zasięgu międzynarodowym, jak też literatury – zarówno polskiej, jak i zagranicznej.
Słowa kluczowe: autonomiczne pojazdy, sztuczna inteligencja, odpowiedzialność cywilnoprawna

The concept of the civil liability for autonomous vehicles usage

Abstract
Autonomous vehicles are not only thoroughly tested on a mass scale, but – in some of the countries – can be also already used by a private individual. Unfortunately, there are no complex legal regulations concerning the issue of legal responsibility – especially, in case of vehicles controlled by artificial intelligence algorithms. Road transport is a system which is so complicated and codependent on other factors, that its unpredictability. Given the fact that road transport is so complicated and codependent on other factors, there is a need for creation of self-learning systems which will also be, sadly, unpredictable in some ways. Legal regulations which have been already implemented in some countries are not related to the issue of civil-law responsibilities for potential damage caused by the traffic of autonomous vehicles. The author states that there is a need for implementation of IT systems which not only will help to coordinate the traffic of self-driving vehicles, but also mitigate the risk of road accidents. Such a system could be operated by the state, as well as the private companies. Nonetheless, such a decision is up to the legislature, as it should not only define the various boundaries for actions of such a system, but also the technical details.
It is highly probable that autonomous vehicles will start to be used on a mass scale before such a system described above could be created. In view of that fact, there is a necessity to define the basic principles of civil liability of autonomous cars' owners. The current polish legal regulations (art. 436 of polish Civil Code) are simply not sufficient, as they don't define the presumption of guilt for the road accident involving autonomous cars. What is more, they lack the complex, legal definition of the autonomous vehicle (the definition included in polish *The law on Road Transport* act is not compliant).
The author performs the analysis of the current legal regulations and suggests which means and methods could be implemented to properly resolve the issue.
Keywords: autonomous vehicles, artificial intelligence, civil liability

Alicja Nowakowska[1]

Modelowanie sieciowe w analizie interakcji międzybiałkowych

1. Wstęp

W dobie nieustającego wzrostu informacji o charakterze biologicznym, jakiego doświadczamy w dzisiejszych czasach, nie jest niczym zaskakującym, że rozwiązania z dziedziny Big Data są popularnym tematem w analizie danych przyrodniczych. Ekstrakcja informacji, ich analiza i wreszcie samo przechowywanie są kwestiami fundamentalnymi dla rozwoju naszej wiedzy na temat życia na Ziemi. Techniki inspirowane modelowaniem matematycznym już dziś są dostępne i szeroko stosowane w medycynie, okazując się obiecującym kierunkiem badań. Predykcja rezultatu zastosowanej terapii, identyfikacja genów skorelowanych z jednostkami chorobowymi, czy też bardziej precyzyjne narzędzia diagnostyczne to kilka z kluczowych aplikacji zmieniających jakość i długość życia pacjentów.

Jednym z najbardziej istotnych źródeł wielu informacji tego typu są badania nad interakcjami międzybiałkowymi. Białka, jako biomolekuły biorące udział w procesach budulcowych, enzymatycznych, metabolicznych, transportowych, a wreszcie i w komunikacyjnych są podstawowym tematem w studiach nad przyczynami zaburzeń chorobotwórczych. O wielkim znaczeniu jest aspekt interakcji w jakie nieustannie wchodzą między sobą podczas wykonywania przypisanych im zadań. Te systemy wzajemnych powiązań można matematycznie modelować, używając sieci zdefiniowanych jako $G(V, E)$, gdzie V to zbiór analizowanych białek (wierzchołków), a E to zbiór połączeń (krawędzi) między nimi, które reprezentują istnienie interakcji międzybiałkowych [1].

Tak rozumiana analiza sieciowa jest ważnym narzędziem, inspirowanym technikami Big Data, które można zastosować do modelowania systemów biologicznych. Możliwe korzyści z niej wynikające obejmują dokładniejsze zrozumienie mechanizmów molekularnych stojących za złożonymi procesami chorobotwórczymi, a także opracowanie możliwie najlepszych terapii.

Aktualne wyniki badań w tej dziedzinie wraz z ogólną topologiczną charakterystyką sieci międzybiałkowych (PPIN) zostały przedstawione w niniejszej pracy.

2. Ekstrakcja danych na temat interakcji międzybiałkowych

Do najbardziej powszechnych technik eksperymentalnych generujących informacje na temat interakcji międzybiałkowych należą drożdżowe systemy dwuhybrydowe. W początkowej fazie przeprowadza się metaanalizę literaturową lub też analizę próbek eksperymentalnych, wyodrębniając istotne dla badanego procesu biologicznego białka. Następnie łączone są one z jednym z fragmentów czynnika transkrypcyjnego i wprowadzane do komórek drożdżowych. Jeżeli komplementarne fragmenty czynnika transkrypcyjnego znajdują się obok siebie, co ma miejsce tylko, gdy dane białka wchodzą ze sobą w interakcję, obserwuje się mierzalną ekspresję genu [2]. Dzięki tak zaprojekto-

[1] Politechnika Wrocławska.

wanemu eksperymentowi możliwym jest przebadanie nawet do kilku tysięcy białek w celu identyfikacji interakcji między nimi [3]. Niemniej jednak warto pamiętać, że ta technika, jak i inne jej podobne są obarczone pewnym błędem i wielokrotnie generowane są fałszywie pozytywne rezultaty [4] wpływające na późniejszą strukturę sieci.

Oprócz przeprowadzania własnych eksperymentów laboratoryjnych możliwa jest także ekstrakcja danych z wielu już istniejących, powszechnie dostępnych baz. Na początek warto wspomnieć o IntAct Molecular Interaction Database [5], która zawiera informacje o ponad stu tysiącach białek i interakcjach między nimi. Rekordy są wprowadzane na podstawie analizy dostępnych publikacji o charakterze eksperymentalnym, a każdy z nich ma przypisaną wartość czynnika wiarygodności obliczanego na podstawie użytej metody detekcji oraz liczby artykułów potwierdzających interakcję. Zostały także przygotowane gotowe tematyczne zbiory danych, takie jak te na temat białek związanych z chorobami neurodegeneracyjnymi, czy rakiem. Mimo łatwego dostępu do danych z IntAct, należy zachować ostrożność przy pracy na nich ze względu na spore zróżnicowanie użytych technik eksperymentalnych, a także istnienie rekordów związanych z organizmami innymi niż ludzki.

Do innych powszechnie używanych źródeł należy STRING [6] umożliwiający identyfikację interaktorów zadanych białek oraz pobranie powstających sieci. PubMed jest także interesującą alternatywą, choć bardziej pracochłonną, gdyż wymaga samodzielnej analizy artykułów traktujących na temat interakcji między interesującymi białkami. Istnieją także projekty takie jak Human Reference Interactome [7] mające na celu stworzenie mapy sieciowej dla wszystkich białek ludzkiego organizmu (tak zwanego interaktomu). Niemniej jednak skala tych przedsięwzięć, choć ogromna, wciąż jest niewystarczająco duża, by opracować i przybliżyć więcej niż kilka do kilkunastu procent rzeczywistej sieci. Ponadto ogólny charakter takich badań, w których uwzględnia się tylko białka, których stężenie w jakim występują jest wystarczająco znaczące, uniemożliwia dokładną identyfikację wielu z możliwych interaktorów. Tak skonstruowana metodologia może zaburzyć późniejszą charakterystykę topologiczną systemu.

Biorąc pod uwagę trudności związane z ekstrakcją sieci, podejście statystyczne umożliwiające ich walidację oraz ewentualne wprowadzanie korekt wydaje się być naturalnym rozwiązaniem. Tak zwany problem predykcji połączenia jest często podejmowany za pomocą algorytmów mierzących podobieństwo białek na podstawie wspólnych sąsiadów, które kandydaci posiadają tudzież wspólnych lokalnych topologicznych lub biologicznych cech. Często tak zdefiniowane modele są trenowane, a następnie testowane na dostępnych danych na podstawie struktur obecnych w uczeniu maszynowym takich jak sieci neuronowe, drzewa decyzyjne, czy też maszyny wektorów nośnych [8, 9]. Niektóre z zaawansowanych nowoczesnych algorytmów są w stanie osiągnąć dokładność nawet 99% [10]. Niemniej jednak, z powodu braku powszechnej ich implementacji w najczęściej używanych pakietach służących analizie sieciowej, rzadko praktycy je stosują.

3. Pakiety używane w analizie sieci PPIN

Po zebraniu danych najczęściej są one wprowadzane do aplikacji takich jak Cytoscape [11] lub Gephi [12]. Pierwsze ze wspomnianych narzędzi jest w szczególności użyteczne z punktu widzenia biologów zajmujących się analizą systemów, gdyż to dla nich zostało stworzone. Posiada zaimplementowane liczne dodatkowe pakiety umożli-

wiające nie tylko kalkulację podstawowych miar, lecz także uzupełnienie danych o informacje na temat procesów molekularnych. Gephi to aplikacja głównie ukierunkowana na atrakcyjną wizualizację grafów, dzięki której także początkowa analiza może zostać przeprowadzona. Niemniej jednak, najistotniejszą wadą obu pakietów są ich ograniczone programistyczne możliwości, stąd popularność bibliotek takich jak Igraph lub networkx w Pythonie i R. Warto także wspomnieć o graph-tool dostępnym w pierwszym wspomnianym języku, którego istotą stworzenia było usprawnienie algorytmów grafowych [13]. To znacząco zwiększa potencjał analityczny w przypadku dużych sieci, takich jak te dotyczące interakcji międzybiałkowych, które potrafią osiągać rozmiary kilku tysięcy wierzchołków.

4. Topologiczna charakterystyka sieci

W tym rozdziale, w celu prezentacji możliwych wyników otrzymywanych w analizie PPIN wykorzystano sieć interakcji białek związanych z rakiem pobraną z gotowych zbiorów IntAct. Sieć ma 5025 wierzchołków oraz 12122 połączeń. Obliczenia przeprowadzono używając biblioteki graph-tool w Pythonie.

4.1. Podstawowe miary

Najistotniejszą miarą używaną w analizie sieci jest stopień wierzchołka. W kontekście systemów interakcji międzybiałkowych jest on rozumiany jako liczba interaktorów, które białko posiada, a więc liczba połączeń wychodzących z wierzchołka. W analizowanych sieciach PPIN rozróżnienie na połączenia wchodzące i wychodzące jest niepotrzebne, gdyż interakcje mają charakter binarny – jeśli białko A ma interaktora B to zawsze białko B także wchodzi w interakcję z A.

Sieci interakcji międzybiałkowych, tak jak i wiele innych sieci rzeczywistych, charakteryzuje obecność licznych wierzchołków o niewielkim stopniu oraz kilku tak zwanych hubów posiadających nieoczekiwanie dużą liczbę połączeń [14]. Przykładowy rozkład stopnia wierzchołka dla sieci interakcji białek związanych z rakiem został przedstawiony na rysunku 1.

Rysunek 1. Histogram stopnia wierzchołka dla sieci rakowej [opracowanie własne]

Obserwowana konstrukcja systemu często nazywana jest własnością braku skali objawiającą się grubym ogonem w rozkładzie, który przynajmniej częściowo można opisać, używając prawa potęgowego zdefiniowanego jako [14]:

$$p_k = Ck^{-?} \tag{1}$$

gdzie: p_k – to prawdopodobieństwo, że losowo wybrany wierzchołek ma stopień k, C – to stała charakterystyczna dla danego zbioru, γ – to parametr skali.

Dla sieci rzeczywistych w tym PPIN γ najczęściej przyjmuje wartości od 2 do 3. Oznaczają one istotny wpływ hubów na ogólną strukturę sieci, które, ze względu na swój duży rozmiar w tym reżimie, znacząco skracają długości ścieżek w sieci. Dla wspomnianych danych γ została dopasowana za pomocą metody największej wiarygodności zaimplementowanej w pakiecie poweRlaw [15] w R i wynosi 2.21.

Rysunek 2. Histogram długości najkrótszych ścieżek dla sieci rakowej [opracowanie własne]

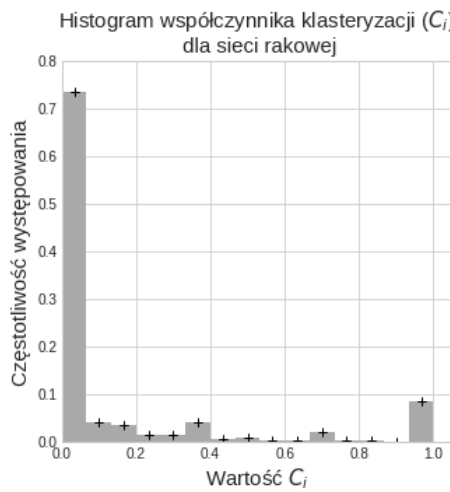
Kolejnym kluczowym parametrem używanym w analizie sieciowej jest rozkład długości ścieżek. Jest on najczęściej przedstawiany jako średnia długości najkrótszych ścieżek wychodzących z danego wierzchołka do każdego innego wierzchołka. Jeżeli sieć składa się z kilku podsieci takie badanie powinno być zmodyfikowane, gdyż nie istnieje żadna droga między niepołączonymi komponentami. Przykładowy rozkład długości najkrótszych ścieżek dla rozważanej sieci rakowej jest przedstawiony na rysunku 2. Jak można zauważyć, wierzchołki w sieciach PPIN są umieszczone stosunkowo blisko siebie, ponieważ tylko kilka skoków jest potrzebnych, by dojść z jednego członka systemu do drugiego. Taka obserwacja jest nazywana własnością małego świata, a czasem nawet ultramałego jeśli $2 < \gamma < 3$ [14].

Innym podstawowym badaniem, które można wykonać dla sieci jest obliczenie współczynnika klasteryzacji dla każdego z jej wierzchołków. Jego definicja jest następująca [14]:

$$C_i = \frac{2L_i}{k_i(k_i-1)} \tag{2}$$

gdzie: k_i – to liczba sąsiadów wierzchołka i, L_i – to liczba połączeń między sąsiadami wierzchołka i.

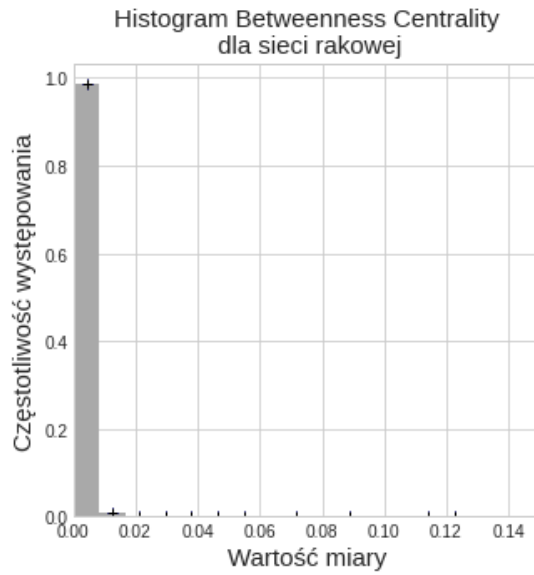
Tak zdefiniowana miara ma na celu pokazać jak bardzo połączeni są sąsiedzi agenta i, a tym samym jak bardzo sklasteryzowane jest jego otoczenie. Dla zobrazowania możliwego rozkładu C_i histogram tej miary dla już uprzednio analizowanej sieci rakowej można zobaczyć na rysunku 3. Na podstawie wykresu widać, że w sieciach PPIN możliwe jest występowanie tak zwanych klastrów, a więc regionów o bardzo dużym zagęszczeniu połączeń, które objawia się wysokimi wartościami parametru C_i.



Rysunek 3. Histogram współczynnika klasteryzacji C_i dla sieci rakowej [opracowanie własne]

4.2. Inne miary

Poruszony już wcześniej problem stopnia wierzchołka jest podstawową próbą rozwiązania problemu mierzenia centralności, a więc poziomu istotności wierzchołka. Choć wspomniana miara jest fundamentalna, istnieją też inne próby zdefiniowania, co to znaczy być najważniejszym w sieci. Do jednej z nich należy Betweenness Centrality obliczana jako liczba najkrótszych ścieżek przechodzących przez dany wierzchołek dzielona przez całkowitą liczbę wszystkich najkrótszych ścieżek w sieci [16]. Wierzchołki przyjmujące wysokie wartości tego parametru są nazywane wąskimi gardłami, gdyż to one łączą ze sobą fragmenty sieci. Przykładowy histogram Betweenness Centrality dla znanej już sieci rakowej został przedstawiony na rysunku 4. Podobnie jak w przypadku rozkładu stopnia wierzchołka, w sieciach PPIN niewiele wierzchołków jest istotnych z tej perspektywy, lecz kilka z nich przyjmuje znacząco wyższe wartości tej miary niż reszta.



Rysunek 4. Histogram Betweenness Centrality dla sieci rakowej [opracowanie własne]

Do innych mniej powszechnie używanych, lecz wciąż istotnych parametrów sieci, należy współczynnik asortatywności. Ma on na celu ujawnienie, czy wierzchołki podobne do siebie preferują połączenia między sobą, czy też raczej wybierają interaktorów innych od siebie. Podobieństwo najczęściej definiowane jest w kontekście stopnia stopnia wierzchołka, co formalnie może być zapisane w następujący sposób [14]:

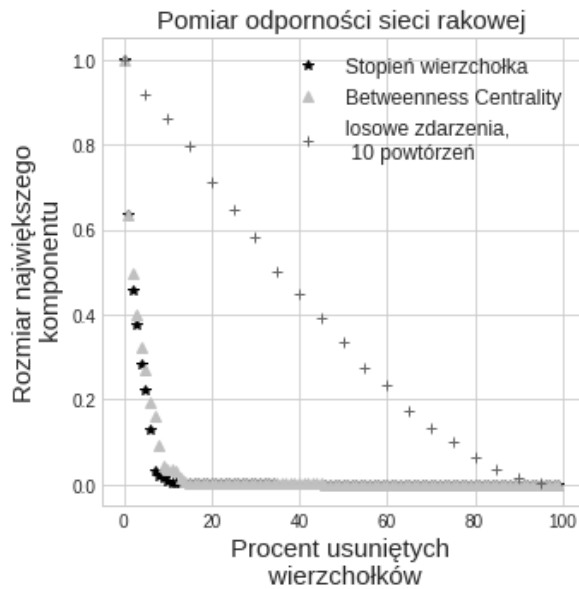
$$r = \frac{?_x e_{xx} - ?_x a_x a_x}{1 - ?_x a_x a_x} \qquad (3)$$

gdzie: e_{xx} – to część wszystkich połączeń sieci, które są między wierzchołkami o stopniu x, a_x – to część wszystkich połączeń, w których jeden z wierzchołków ma stopień x.

Pierwsza suma pojawiająca się w liczniku opisuje część wszystkich połączeń zaczynających się i kończących się w wierzchołkach tego samego typu (mających ten sam stopień), a druga suma to część połączeń wspomnianego rodzaju, które pojawiłyby się przy losowym rozkładzie krawędzi sieci między wierzchołkami. Jeżeli $r < 0$, to sieć jest nieasortatywna, a więc taka, w której huby preferują wierzchołki o niższym stopniu. Gdy $r > 0$, sieć ma charakter asortatywny, w której wierzchołki o niskim stopniu wybierają siebie nawzajem, tak samo jak i te o wyższych wartościach liczby połączeń. Sieci PPIN są zazwyczaj w niewielkim stopniu asortatywne, tak jak i rozważny system dotyczący raka, dla którego wartość r wynosi -0.001.

Na koniec warto wspomnieć o odporności sieci na ataki i losowe zdarzenia. Taka analiza jest szczególnie istotna z punktu widzenia biologicznych zastosowań, w których często badacze są zainteresowani, czy drobny błąd w odczytaniu DNA lub podanie leku szybko doprowadzi do rozpadu sieci. By to sprawdzić, na początek sortuje się wierzchołki zgodnie z zadaną miarą centralności, którą najczęściej jest stopień wierzchołka. W kolejnym kroku usuwa się pewien procent pierwszych wierzchołków zgodnie z zadanym kryterium sortującym, a następnie mierzy wielkość powstałego

największego połączonego komponentu (największej podsieci), a więc liczbę wierzchołków, którą posiada. Obliczona wartość jest dzielona przez rozmiar sieci na początku symulacji, a procedura jest powtarzana dla kolejnych wartości procentowych zwiększanych o zadany krok. W symulacjach losowych zdarzeń, w przeciwieństwie do właśnie opisanego algorytmu dla ataków, wierzchołki nie są sortowane, lecz mają losową kolejność na liście. Eksperyment jest powtarzany dla wielu list, a z odpowiadających rozmiarów największych komponentów oblicza się średnią wielkość, która jest przyporządkowywana do danego procenta [14]. Tak zdefiniowane procedury z krokiem 5% dla stopnia wierzchołka i Betweenness Centrality zostały zastosowane dla sieci rakowej. Zasymulowano losowe zdarzenia, używając 10 list z różną kolejnością pojawiania się wierzchołków i tym samym krokiem. Wielkości największego komponentu dla kolejnych usuwanych części sieci we wszystkich trzech sytuacjach zostały przedstawione na wykresie 1.



Wykres 1. Pomiar odporności sieci rakowej [opracowanie własne]

PPIN tak samo jak i inne sieci wykazujące własność braku skali są systemami odpornymi na losowe błędy, co widać w wolno zmniejszającym się rozmiarze największego komponentu w funkcji części usuniętych wierzchołków. Jeżeli zaś chodzi o ataki, sytuacja jest zupełnie inna, gdyż wystarczy niewielki ułamek usuniętych agentów mających najwyższe miary centralności, a sieć ulega rozpadowi. To ilustruje ogromny wpływ jaki mają huby i wąskie gardła na strukturę systemów.

5. Zastosowania topologicznej charakterystyki sieci

Przedstawione metody obliczeniowe mają szerokie zastosowanie w rozumieniu systemów interakcji białkowych. Choć niektóre z metod są częściej używane niż inne, wszystkie wykazują ogromny potencjał badawczy w wielu projektach.

5.1. Priorytetyzacja

Do najczęściej używanych w analizie biologicznej modeli należą przedstawione miary centralności – stopień wierzchołka i Betweenness Centrality. Po wyodrębnieniu białek związanych z interesującą jednostką chorobową oraz stworzeniu sieci interakcji najczęściej stawianym celem jest stworzenie listy rankingowej. Jej zadaniem jest ekstrakcja najważniejszych dla danego systemu białek, a zatem takich, których eliminacja tudzież modyfikacja działania miałaby największy wpływ na sieć, a więc w konsekwencji na mechanizm choroby. W ten sposób analiza sieciowa może być użyta do identyfikacji najlepszych celów terapeutycznych oraz biomarkerów schorzenia. Przykładem tak przeprowadzonych badań jest projekt Azodi et. al sprawdzający wspomnianymi miarami sieć PPIN celiakii [17]. Na podstawie obliczeń wykazano, że białka szoku cieplnego, tak jak i w innych chorobach immunologicznych, odgrywają kluczową rolę także w tej przypadłości, a w związku z tym mogą być traktowane jako obiecujące cele terapeutyczne. Istotna funkcja białek opiekuńczych w celiakii, a także zaburzenia związane ze stresem oksydacyjnym, czy procesami naprawy to kolejne wnioski dotyczące mechanizmów molekularnych systemu wyciągnięte na podstawie identyfikacji hubów oraz wąskich gardeł. Podobny rodzaj analizy przeprowadzono także dla innych chorób takich jak Parkinson [18], czy rak jamy ustnej [19], co zaowocowało wyodrębnieniem kilku wcześniej nieznanych biomarkerów.

Choć metoda jest obiecująca, wciąż istnieje potrzeba tworzenia nowych, lepiej działających mechanizmów priorytetyzacji, które łączą analizę topologiczną wraz z wiedzą z dziedziny biologii molekularnej. Przykładem może być fuzja miar topologicznych takich jak współczynnik klasteryzacji, stopień wierzchołka, analiza rozkładu najkrótszych ścieżek oraz innych miar centralności wraz z wiedzą na temat prawdopodobieństwa mutacji białka przedstawiona dla sieci Parkinsona w [20]. Także i tu postawionym celem jest identyfikacja jak najlepszych celów terapeutecznych.

Jak widać, złożone choroby onkologiczne oraz neurodegeneracyjne są największym beneficjentem i obiektem prac tego typu.

5.2. Analiza mechanizmów molekularnych

Innym fundamentalnym zastosowaniem PPIN jest analiza mechanizmów biologicznych, które tworzą system. Najczęściej w tym celu stosuje się aplikacje wzbogacające sieć o wiedzę na temat ścieżek molekularnych oraz funkcji białek ją tworzących. W ten sposób możliwym jest odkrycie powiązań między schorzeniami takimi jak Alzheimer i Parkinson. Dzięki tego rodzaju analizie zidentyfikowano procesy, które są zaburzone w obu chorobach – funkcjonowanie mitochondriów i mechanizmy stresu oksydacyjnego [23]. Wykazano powiązania między Parkinsonem, a rakiem, procesami zapalnymi i cukrzycą [24], a także między rakiem piersi i jelita grubego [25].

Często tworzy się także sieci odpowiadające interakcjom międzybiałkowym występujących podczas infekcji wirusowej. Definiuje się wtedy połączony system PPIN gospodarz-patogen. Po uzupełnieniu go o informacje biologiczne możliwym było przeanalizowanie w ten sposób wirusa SARS-CoV-2, ujawniając białka biorące udział w wywoływaniu burzy cytokin, a co za tym idzie potencjalne cele terapeutyczne [26].

Innym zastosowaniem sieci interakcji międzybiałkowych, w tym kontekście, jest analiza możliwych mechanizmów ewolucyjnych stojących za pojawianiem się syste-

mów w obserwowanej postaci. W tym celu klasyczne histogramy stopnia wierzchołka, badania odporności sieci, a także asortatywności okazują się być pomocne w tworzeniu możliwych modeli matematycznych opisujących proces kształtowania się sieci [14].

5.3. Predykcja

Możliwa jest także predykcja fenotypu na podstawie wiedzy o systemie. W [22] przedstawiono przykład spersonalizowanej analizy sieciowej przeprowadzonej dla pacjentów onkologicznych. Na jej podstawie przewidywano odpowiedź organizmu na zastosowaną terapię.

Choć większość przedstawionych rozwiązań ma głównie medyczny charakter, do pierwszoplanowych zastosowań PPIN należy także przewidywanie funkcji białka na podstawie jego lokalizacji w sieci. Jest to robione zgodnie z zasadą, że znajdujące się obok siebie wierzchołki prawdopodobnie mają podobną funkcję biologiczną. Informacja ta najczęściej łączona jest z innymi źródłami, by stworzyć kompleksowy system przewidujący [21].

6. Podsumowanie

W niniejszej pracy przedstawiono metodologię związaną z przeprowadzaniem analiz sieci interakcji międzybiałkowych. Omówiono niektóre ze stosowanych technik eksperymentalnych oraz narzędzi informatycznych. Przedstawiono zbiór metod matematycznych, które mogą być użyte w badaniach nad sieciami PPIN. Podkreślono, które z nich są najbardziej powszechnie wykorzystywane, a które nie. Następnie omówiono możliwe zastosowania tego rodzaju analizy, ze szczególną atencją traktując korzyści medyczne z nią związane. Na tej podstawie potencjał sieci PPIN został zilustrowany.

Bez wątpienia sieci interakcji międzybiałkowych są jedną z technik obliczeniowych zdolnych do zrewolucjonizowania naszej wiedzy na temat systemów biologicznych. Choć klasycznym podejściem jest analiza poszczególnych białek, systemy ich interakcji przedstawione w formie map to narzędzia, które umożliwiają zrozumienie szerszego kontekstu procesów rządzących organizmami. Fuzja metod matematycznych i biologicznych, których przykłady przedstawiono, to studium interdyscyplinarności pomagającej pogłębiać wiedzę na temat chorób, możliwych metod ich leczenia oraz powiązań między nimi.

Niemniej jednak, nie można zapominać o ogromnych wyzwaniach związanych z tego rodzaju badaniami. Bez wątpienia są nimi niedokładność eksperymentów, a więc danych, na których praca jest wykonywana, a także ograniczone zasoby obliczeniowe, czasem uniemożliwiające przetestowanie i analizę takiej ilości danych jaką badacz, by chciał. Ponadto teoretyczne predykcje dotyczące zastosowań PPIN nie zawsze są wdrażane w laboratorium, pozostając tylko obliczeniowymi analizami.

Rozwój technik matematycznych, statystycznych, informatycznych oraz eksperymentalnych nieustannie przyspiesza, co pozwala sądzić, że w przyszłości sieci PPIN, które już dziś są pomocne, w przyszłości będą jeszcze ważniejsze i istotne dla medycyny i biologii.

Literatura

1. Safari-Alighiarloo N., Taghizadeh M., Rezaei-Tavirani M., Goliaei B., Peyvandi A. A., *Protein-protein interactions network (PPI) and complex diseases,* Gastroenterology and Hepatology from Bed to Bench, 7(1), 2014, s. 17-31.
2. Wong J.H., Alfatah M., Sin M.F., Sim H.M., Verma C.S., Lane D.P., Arumugam P., *A yeast two-hybrid system for the screening and characterization of small-molecule inhibitors of protein–protein interactions identifies a novel putative Mdm2-binding site in p53,* BMC Biology, 108, 2017.
3. Haenig C., Atias N., Taylor A.K., Mazza A., Schaefer M.H., Russ J., Riechers S.P., Jain S., Coughlin M., Fontaine J.F., Freibaum B.D., Brusendorf L., Zenkner M., Porras P., Stroedicke M., Schnoegl S., Arnsburg K., Boeddrich A., Pigazzini L., Heutink P., Taylor J.P., Kirstein J., Andrade-Navarro M.A., Sharan R., Wanker E.E., *Interactome Mapping Provides a Network of Neurodegenerative Disease Proteins and Uncovers Widespread Protein Aggregation in Affected Brains,* Cell Reports, 32(7):108050, 2020.
4. Schneider M., Johnson J.R., Krogan N.J., Chanda1 S.K., *Viral Pathogenesis (Third Edition) From Basics to Systems Biology,* Academic Press, 2016, s. 157-167.
5. EMBL-EBI. IntAct Molecular Interaction Database. https://www.ebi.ac.uk/intact/.
6. Jensen L.J., Kuhn M., Stark M., Chaffron S., Creevey C., Muller J., Doerks T., Julien P., Roth A., Simonovic M., Bork P., Mering C., *STRING 8--a global view on proteins and their functional interactions in 630 organisms,* Nucleic Acids Research, 37(Database issue):D412-6, 2009.
7. Luck et. al, *A reference map of the human binary protein interactome*, Nature, 580(7803):402-408, 2020.
8. Lei C., Ruan J., *A novel link prediction algorithm for reconstructing protein–protein interaction networks by topological similarity*, Bioinformatics, 29(3):355-364, 2012.
9. Chen X. W., Liu M., *Prediction of protein–protein interactions using random decision forest framework*, Systems Biology, 24 2005, 2005, s. 4394-4400.
10. Yang F., Fan K., Song D., Lin H., *Graph-based prediction of Protein-protein interactions with attributed signed graph embedding,* BMC Bioinformatics, 323, 2020.
11. Shannon P., Markiel A., Ozier O., Baliga N.S., Wang J.T., Ramage D., Amin N., Schwikowski B., Ideker T., *Cytoscape: a software environment for integrated models of biomolecular interaction networks,* Genome Research, 13(11):2498-504, 2003.
12. Bastian M., Heymann S., Jacomy M., *Gephi: An Open Source Software for Exploring and Manipulating Networks*, International AAAI Conference on Weblogs and Social Media, 2009.
13. Peixoto T.P., *graph-tool: Efficient network analysis*, https://graph-tool.skewed.de/.
14. Barabasi A.-L., *Network Science*,. Cambridge University Press, 2016.
15. Gillespie C. S., *Fitting Heavy Tailed Distributions: the PoweRlaw Package*, Journal of Statistical Software, 65, 2014.
16. Perez C., Germon R., *Graph Creation and Analysis for Linking Actors: Application to Social Data*, [w:] Perez C., Germon R. (red.), *Automating Open Source Intelligence, Algorithms for OSINT*, Syngress, 2016.
17. Azodi M.N., Peyvandi H., Rostami-Nejad M, Safaei A., Rostami K., Vafaee R., Heidari M., Hosseini M., Zali M.R., *Protein-protein interaction network of celiac disease*, Gastroenterology and Hepatology from Bed to Bench, 9(4):268-277, 2016.
18. Rakshit H., Rathi N., Roy D., *Construction and Analysis of the Protein-Protein Interaction Networks Based on Gene Expression Profiles of Parkinson's Disease*, PLOS ONE, 9(8): e103047, 2014.

19. Amiri N., Atan D., Koushki M., Tavirani M. R., Ahmadi N. A., *Protein-Protein Interaction Network Analysis of Salivary Proteomic Data in Oral Cancer Cases*, Asian Pacific Journal of Cancer Prevention, 19(6): 1639-1645, 2016.
20. Prajapati R., Emerson I. A., *Gene Prioritization in Parkinson's Disease Using Human Protein–Protein Interaction Network*, Journal of Computational Biology, 27(11), 2020.
21. Cao R., Cheng J., *Integrated protein function prediction by mining function associations, sequences, and protein–protein and gene–gene interaction networks*, Methods, 93:84-91, 2016.
22. Taylor I. W., Linding R., Warde-Farley D., Liu Y., Pesquita C., Faria D., Bull S., Pawson T., Morris Q., Wrana J. L., *Dynamic modularity in protein interaction networks predicts breast cancer outcome*, Nature Biotechnology, 27(2):199-204, 2009.
23. Kelly J., Moyeed R., Carroll C., *Gene expression meta-analysis of Parkinson's disease and its relationship with Alzheimer's disease*, Molecular Brain, 12(1), 2019.
24. Moran L.B., Graeber M.B., *Towards a pathway definition of Parkinson's disease: a complex disorder with links to cancer, diabetes and inflammation*, Neurogenetics, 9(1):1-13, 2008.
25. Zamanian-Azodi M., Rezaei-Tavirani M., Rahmati-Rad S., Hasanzadeh H., Tavirani M. R., Seyyedi S. S., *Protein-Protein Interaction Network could reveal the relationship between the breast and colon cancer*, Gastroenterology and Hepatology from Bed to Bench, 8(3):215-224, 2015.
26. Li J., Guo M., Tian X., Wang X., Yang X., Wu P., Liu C., Xiao X., Qu Y., Yin Y., Wang C., Zhang Y., Zhu Z., Liu Z., Peng C., Zhu T., Liang Q., *Virus-Host Interactome and Proteomic Survey Reveal Potential Virulence Factors Influencing SARS-CoV-2 Pathogenesis*, Clinical and Translational Resource and Technology Insights, 2(1):99-112.e7, 2021.

Modelowanie sieciowe w analizie interakcji międzybiałkowych

Streszczenie
Sieci interakcji międzybiałkowych to topologiczne mapy reprezentujące białka jako wierzchołki oraz krawędzie jako interakcje między nimi. Metody eksperymentalne służące do ich identyfikacji oraz techniki obliczeniowe używane w analizie takich systemów zostały przedstawione w niniejszej pracy. Omówiono topologiczną charakterystykę tych systemów na przykładzie sieci rakowej, podkreślając istotną rolę jaką pełni rozkład stopnia wierzchołka. Przytoczono przykłady innych parametrów, takich jak pomiar odporności sieci, umożliwiających wgląd w strukturę sieci oraz mechanizmy ewolucyjne za nią stojące. Następnie na podstawie przeglądu literatury traktującej o zastosowaniach PPIN zilustrowano ogromny potencjał takich badań w głębszym rozumieniu jednostek chorobowych oraz identyfikacji możliwych celów terapeutycznych.
Słowa kluczowe: sieci interakcji międzybiałkowych, topologia sieci, choroby

Network analysis for protein-protein interaction systems

Abstract
Protein-protein interaction networks are topological maps that represent proteins as nodes and interactions between them as connections. Experimental methods used for their generation as well as computational techniques applied in this kind of analysis are presented in this work. On the basis of a cancer network the topological characterization of these systems was performed and the crucial role of the degree distribution was underlined. Other measures such as robustness examination were mentioned in order to show their usefulness in the structure investigation and evolution mechanisms analysis. Next, the literature review on protein-protein interaction networks applications was done and their enormous potential, with regards to disease understanding and drug target identification, was highlighted.
Keywords: protein-protein interaction networks, network topology, disease

Indeks Autorów

Bara M. 74
Buliński Z. 74
Chłopecka A. 177
Czerwińska K. 90
Dutkowski K. 61, 101
Eliasz P. 74
Gucwa M. 114
Juda J. 7
Kałdoński T. 7, 36
Kałdoński T.J. 7, 36
Kowalski T. 143
Kryjak M. 163
Nowakowska A. 192
Pacana A. 90
Pokora P. 128
Sikora M. 128
Skroński Ł. 114
Szweda Z. 74
Śliwa T. 143
Winczek J. 114
Wojcieszak D. 128
Zdziebko K. 143