WYDAWNICTWO SIGMA-NOT

NR 5 • (273) • ROK XLVII • 2026

INŻYNIERIA MATERIAŁOWA 5

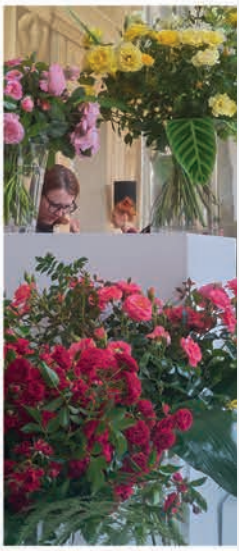
MATERIALS ENGINEERING

• MATERIAŁY i TECHNOLOGIE •

PL ISSN 0208-6247 e-ISSN 2449-9889
Indeks 36156
cena 85,00 zł (w tym 8% VAT)

42. Królewska Wystawy Róż „Royal Rose 2026”

Stara Oranżeria w Łazienkach Królewskich



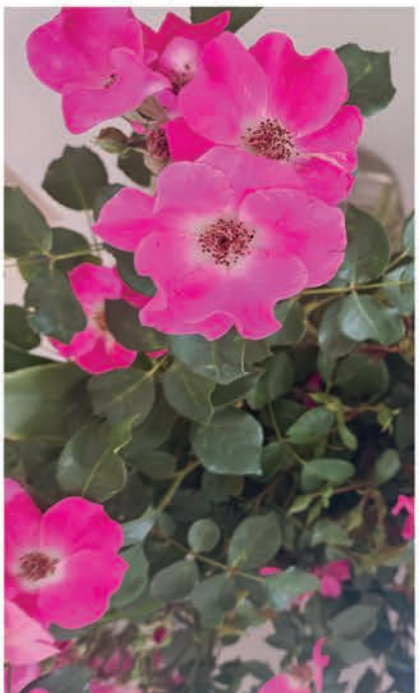


Foto: MBD

Wydawnictwo Czasopism i Książek Technicznych
***SIGMA-NOT* Spółka z o.o.**

WYDAWNICTWO
SIGMA-NOT

ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa
tel.: +48 22 818 09 18, +48 22 818 98 32
www.sigma-not.pl, e-mail: sekretariat@sigma-not.pl

Adres redakcji:
ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa
tel.: +48 22 818 09 18
www.imat.com.pl, e-mail: i.materialowa@sigma-not.pl

Prenumerata:
e-mail: prenumerata@sigma-not.pl, tel.: +48 22 840 35 89

Dział Reklamy i Marketingu:
e-mail: reklama@sigma-not.pl, tel.: +48 22 827 43 65

Skład i druk:
Zakład Poligrafii i Kolportażu Wydawnictwa SIGMA-NOT
tel. 22 833 40 69, drukarnia@sigma-not.pl

nakład do 100 egz. (w tym wersja cyfrowa)
cena 85,00 zł (w tym 8% VAT)
PL ISSN 0208-6247, e-ISSN 2449-9889, INDEKS 36156

Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za treść reklam i ogłoszeń.

KOLEGIUM REDAKCYJNE:
Redaktor Naczelny:
prof. dr hab. inż. Agnieszka SOBCZAK-KUPIEC
Sekretarz Redakcji:
mgr inż. Magdalena BOREK-DARUK

RADA NAUKOWA:
Dr inż. KRZYSZTOF BIERNAT, prof. PIMOT (Przewodniczący)
Dr hab. inż. JAN BARWICKI
Dr inż. BOGDAN BOGDAŃSKI
Prof. MICHAEL BRATYCHAK
Dr inż. MICHAŁ CHMIELAREK
Prof. dr hab. inż. ALEKSANDRA CZYRSKA-FILEMONOWICZ
Prof. dr hab. inż. ANNA FRACZKIEWICZ, Francja
Prof. Dr.-Ing. Habit. MAIK GUDE, Niemcy
Dr hab. inż. JOLANTA JANCZAK-RUSCH, Szwajcaria
Prof. Dr. RUDOLF KAWALLA, Niemcy
Dr ANNETTE KIPKA, Szwajcaria
Dr JACEK KOMENDA, Szwecja
Prof. Dr. JANOS L. LABAR DSc., Węgry
Dr hab. inż. WACŁAW MUZYKIEWICZ, prof. AGH
Doc. Ph.D. Eng. EDWARD PLESHAKOV, Ukraina
Dr JULIAN PLEWA DSc., Niemcy
Dr JAN A. PUSZYNSKI, USA
Dr inż. ADAM RYLSKI
Prof. Dr. Ing. JAROSLAV SOJKA, Czechy
Dr TOM TROCZYŃSKI, Kanada
Prof. ATHENA TSETSEKOU, Grecja

Wersja elektroniczna czasopisma
„Inżynieria Materiałowa" („Materials Engineering")
jest jego wersją pierwotną.

Dwumiesięcznik indeksowany parametrycznie
w bazach: BazTech, ERIHPlus, EBSCO, Index Copernicus

Artykuły publikowane w czasopiśmie są recenzowane przez
samodzielnych pracowników naukowych, specjalistów
w zakresie zagadnień przedstawianych w pracach.

Autor za publikację artykułu w czasopiśmie naukowym
„Inżynieria Materiałowa" („Materials Engineering")
otrzymuje 40 punktów
zgodnie z komunikatem Ministra Edukacji i Nauki
z dnia 17 lipca 2023 r. w sprawie wykazu czasopism naukowych
i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych.

WYDAWNICTWO SIGMA-NOT

NR 5 • (273) • ROK XLVII • 2026

INŻYNIERIA MATERIAŁOWA 5

MATERIALS ENGINEERING
• MATERIAŁY i TECHNOLOGIE •

PL ISSN 0208-6247 e-ISSN 2449-9889
Indeks 36156
cena 85,00 zł (w tym 8% VAT)

Czasopismo naukowo-techniczne redagowane przy współudziale
POLSKIEGO TOWARZYSTWA MATERIAŁOZNAWCZEGO

CONTENTS • SPIS TREŚCI

OD REDAKCJI 2

MADE IN POLAND

Przegląd badań naukowych i innowacji polskich naukowców w kraju i na świecie 3

Paweł Paczkowski, Natalia Sobczak, Jerzy Józef Sobczak

An experimental setup for visualization of liquid surface phenomena and assessment of material wettability

Stanowisko do wizualizacji zjawisk powierzchniowych cieczy oraz oceny zwilżalności materiałów 9

Adrian K. Antosik

Silicone pressure-sensitive adhesives modified by calcium silicate

Silikonowe kleje samoprzylepne modyfikowane krzemianem wapnia 15

Andrzej Błędzki, Magdalena Urbaniak, Andrzej Adamcio, Marcin Sobczyk, Szymon Demski, Anna Boczkowska, Holger Seidlitz, Mathias Köhler

Reusing and recycling of composite wind turbine blades. A review of current practices and prospects. Part 3. Various proposals offered by small and middle companies

Ponowne wykorzystanie i recykling kompozytowych łopat turbin wiatrowych. Przegląd obecnych praktyk i perspektywy. Część III. Różne propozycje oferowane przez małe i średnie firmy 21

WYDARZENIA

110 lat działalności Instytutu Chemii Przemysłowej 30

PREZENTACJA

Stowarzyszenie Absolwentów Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej 31

Zdjęcie na okładce: https://www.magnific.com/pl/app

Prenumerata INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ on-line na www.sigma-not.pl lub prenumerata@sigma-not.pl, i.materialowa@sigma-not.pl

Co róże mają wspólnego z inżynierią materiałową?

Więcej, niż mogłoby się wydawać.

We florystyce mamy do czynienia z niezwykle delikatnym materiałem, a stworzenie odpowiedniej kompozycji i konstrukcji wymaga nie lada precyzji.

Redakcja „Inżynierii Materiałowej" miała przyjemność uczestniczyć w otwarciu 42. Królewskiej Wystawy Róż „Royal Rose 2026" w Starej Oranżerii w Łazienkach Królewskich na zaproszenie Stowarzyszenia Naukowo-Technicznego Inżynierów i Techników Ogrodnictwa SITO NOT.

Kilka tysięcy róż, dziesiątki wystawców, odmiany z całego świata, róże konkursowe, wyjątkowe róże zapachowe polskich hodowców oraz Kolekcja Narodowa Odmian Uprawnych Róż Ogrodu Botanicznego PAN w Powsinie.

Ale wystawa pokazuje jeszcze jedną ważną rzecz: technika i sztuka wcale nie muszą się wykluczać.

Redakcja

Fotorelacja z wydarzenia na II okładce

MADE IN POLAND

Rozpowszechnienie wyników projektu RPLD.01.02.02-10-0038/19 pt. *„Opracowanie nowej technologii materiału na bazie polimeru silikonowego VMQ przeznaczonego do samochodowych wysoko wydajnościowych układów hamulcowych do projektów Porsche/Audi PPE i Volkswagen/Porsche MSB”*

PPHU Przedsiębiorstwo Tworzyw Sztucznych A.H.A. Tomczak Sp. j. zrealizowało projekt badawczo-rozwojowy nr RPLD.01.02.02-10-0038/19 pt. *„Opracowanie nowej technologii materiału na bazie polimeru silikonowego VMQ przeznaczonego do samochodowych wysoko wydajnościowych układów hamulcowych do projektów Porsche/Audi PPE i Volkswagen/Porsche MSB”*.

Przedmiotem projektu było opracowanie nowej technologii materiału elastomerowego na bazie polimeru silikonowego VMQ oraz technologii produkcji osłon przeznaczonych do wysoko wydajnościowych samochodowych układów hamulcowych. Projekt był realizowany przy wsparciu Funduszy Europejskich w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Łódzkiego na lata 2014–2020.

Celem projektu było uzyskanie materiału i wyrobów charakteryzujących się stabilnością właściwości fizykomechanicznych, wysoką odpornością termiczną oraz odpornością na oddziaływanie płynów hamulcowych i smarów. Opracowywane rozwiązanie miało odpowiadać wymaganiom stawianym komponentom stosowanym w nowoczesnych, wysoko wydajnościowych układach hamulcowych, w tym przeznaczonych do samochodów elektrycznych, hybrydowych oraz pojazdów klasy premium.

Realizację projektu podzielono na cztery następujące po sobie etapy. W pierwszym etapie przeprowadzono badania przemysłowe dotyczące koncepcji nowego materiału elastomerowego, zdefiniowano wymagania techniczne oraz opracowano założenia receptur materiałowych. Analizowano między innymi wpływ składu materiału, systemu sieciującego oraz rodzaju zastosowanych napełniaczy na właściwości mechaniczne i użytkowe materiału silikonowego. Drugi etap obejmował opracowanie i optymalizację materiału VMQ pod kątem odporności na długotrwałe oddziaływanie wysokich temperatur, płynów hamulcowych oraz smarów. Przeprowadzono badania właściwości fizykomechanicznych oraz testy przyspieszonego starzenia, pozwalające na wybór rozwiązań materiałowych najlepiej odpowiadających założonym wymaganiom technicznym. W trzecim etapie opracowano prototypy osłon przeznaczonych do zacisków hamulcowych. Prace obejmowały przygotowanie modeli, dokumentacji konstrukcyjnej oraz prototypowego oprzyrządowania, a następnie wykonanie i zbadanie prototypów w środowisku laboratoryjnym. Zweryfikowano ich właściwości, odporność na czynniki eksploatacyjne oraz możliwość wytwarzania z wykorzystaniem technologii wtryskowej. Ostatni etap miał charakter eksperymentalnych prac rozwojowych. Prototypy poddano testom w otoczeniu stanowiącym model rzeczywistych warunków funkcjonowania samochodowego układu hamulcowego. Badania obejmowały między innymi oddziaływanie wysokiej temperatury oraz mediów chemicznych występu-

Fundusze Europejskie Program Regionalny
Rzeczpospolita Polska
promuje łódzkie
Unia Europejska Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego

jących podczas eksploatacji pojazdu. Uzyskane wyniki potwierdziły prawidłowość przyjętych założeń technologicznych i możliwość przemysłowego zastosowania opracowanego rozwiązania.

Wszystkie zaplanowane etapy, kamienie milowe, wyniki oraz cele projektu zostały osiągnięte, a projekt zakończył się sukcesem. Jego głównym rezultatem było opracowanie nowej generacji materiału silikonowego VMQ, technologii jego przetwarzania oraz technologii produkcji osłon przeznaczonych do samochodowych układów hamulcowych. Powstała również dokumentacja techniczna i technologiczna niezbędna do prowadzenia powtarzalnej produkcji w warunkach przemysłowych.

Po zakończeniu prac badawczo-rozwojowych wyniki projektu zostały wdrożone do własnej działalności gospodarczej PPHU PTS Tomczak. Przeprowadzono próby technologiczne, wykonano pierwsze partie produkcyjne i uruchomiono seryjny proces produkcji wyrobów silikonowych przeznaczonych do wysoko wydajnościowych układów hamulcowych nowych modeli sportowych samochodów klasy premium. Wdrożenie rozszerzyło kompetencje przedsiębiorstwa w zakresie produkcji zaawansowanych wyrobów elastomerowych dla przemysłu motoryzacyjnego. W celu zabezpieczenia rezultatów prac badawczo-rozwojowych oraz ochrony opracowanego rozwiązania dokonano zgłoszenia patentowego.

Realizacja projektu przyczyniła się do zwiększenia potencjału badawczo-rozwojowego przedsiębiorstwa, rozszerzenia jego oferty technologicznej oraz wzmocnienia konkurencyjności na międzynarodowym rynku motoryzacyjnym. PPHU Przedsiębiorstwo Tworzyw Sztucznych A.H.A. Tomczak jest producentem wyrobów polimerowych dla branży motoryzacyjnej z ponad 35-letnim doświadczeniem. Firma jest strategicznym dostawcą międzynarodowych koncernów motoryzacyjnych działających na rynkach europejskich i światowych. Przedsiębiorstwo od wielu lat konsekwentnie realizuje strategię rozwoju opartą na podnoszeniu konkurencyjności poprzez regularne inwestycje w działalność badawczo-rozwojową oraz innowacje technologiczne.

Autorzy:
mgr Andrzej Tomczak
mgr Kamil Tomczak, MBA
mgr inż. Katarzyna Wierzbicka

PTS TOMCZAK

PPHU Przedsiębiorstwo Tworzyw Sztucznych A.H.A. Tomczak

Kontakt:
ul. Partyzancka 108, 95-200 Pabianice, Polska
Tel.: (48) 42 213 02 34
www.pts-tomczak.com.pl; e-mail: pts@ikki.com.pl

Fundusze Europejskie Program Regionalny
Rzeczpospolita Polska
promuje łódzkie
Unia Europejska Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego

Precyzyjnie programowane ciekłe kryształy

Polscy i Tajwańscy naukowcy opracowali sposób precyzyjnego sterowania światłem odbijanym przez ciekłe kryształy. Wynik może pomóc w budowie nowych wyświetlaczy, czujników, filtrów optycznych i zabezpieczeń.

Punktem wyjścia dla badaczy były dwa znane efekty: nanocząstki mogą zmieniać geometrię fazy błękitnej i poprawiać jej stabilność termiczną, a warstwy otaczające próbkę wpływają na uporządkowanie ciekłego kryształu przy powierzchni. Badacze połączyli oba rozwiązania. Pierwszy mechanizm działał od wewnątrz. Do ciekłego kryształu wprowadzono złote nanocząstki o średnicy niewiele ponad dwóch nanometrów. Pokryto je cząsteczkami przypominającymi budową ciekły kryształ, dzięki czemu mogły równomiernie rozproszyć się w materiale. Drugi mechanizm działał od zewnątrz: próbkę otoczono jedną z czterech cienkich warstw orientujących, oddziałujących z ciekłym kryształem z różną siłą. Przygotowano dwanaście kombinacji warstw i stężeń nanocząstek. Oba mechanizmy zmniejszały rozmiar komórki sieci, przesuwając odbijaną barwę w stronę krótszych fal, ale nie zmieniały jej sześciennej symetrii ani orientacji. Ich współdziałanie pozwoliło regulować odbicie w zakresie około 200 nanometrów oraz dostrajać je w krokach mniejszych niż 10 nanometrów. Najlepsza konfiguracja poszerzyła zakres stabilności termicznej fazy błękitnej z 5,5 do 18,4°C.

Źródło: https://www.magnific.com/pl/app

Koncepcję badań opracował Kamil Orzechowski z Politechniki Warszawskiej, a Wiktor Lewandowski z Uniwersytetu Warszawskiego odpowiadał za projekt nanocząstek. W badaniach uczestniczyli również naukowcy z Wojskowej Akademii Technicznej, Centrum Materiałów Polimerowych i Węglowych PAN w Zabrzu, Uniwersytetu Śląskiego oraz tajwańskiego National Sun Yat-sen University.

Precyzyjnie programowane ciekłe kryształy mogłyby w przyszłości trafić do wyświetlaczy, filtrów optycznych i czujników reagujących zmianą barwy na temperaturę, naprężenie lub określone substancje. Mogłyby też zabezpieczać dokumenty i produkty przed podrabianiem albo stać się elementem inteligentnych okien. Aby myśleć o wdrożeniach przemysłowych, badacze muszą jeszcze poprawić jednorodność materiału i opracować sposób jego wytwarzania na większą skalę.

Źródło: Serwis Nauka w Polsce – www.naukawpolsce.pl

Organożel do renowacji obrazów

Polscy naukowcy opracowali nanokompozytowy organożel, który usuwa z płótna masę woskowo-żywiczną stosowaną powszechnie podczas konserwacji dzieł sztuki od XIX wieku do początku wieku XXI. Nowa metoda bezpiecznie usunęła warstwy impregnujące z zabytkowego obrazu Włodzimierza Tetmajera „Scena rodzajowa na wsi" z 1889 r., znajdującego się w zbiorach Muzeum Śląskiego w Katowicach.

Organożel pNIPA-LAP opracowali oraz prace nad obrazem przeprowadzili: dr Klaudia Kaniewska i prof. Marcin Karbarz z Wydziału Chemii Uniwersytetu Warszawskiego, Anna Litwin i prof. Anna Sękowska z Akademii Sztuk Pięknych w Krakowie oraz dr Elżbieta Pilecka-Pietrusińska z Muzeum Narodowego w Warszawie.

Od XVII wieku konserwatorzy wzmacniali osłabione płótna obrazów różnymi masami klejowymi, woskowo-żywicznymi i emulsyjnymi. Miały one stabilizować strukturę dzieł, ale z czasem same stały się jednym z problemów konserwatorskich. Substancje te głęboko wnikają bowiem pomiędzy włókna płótna i trudno je usunąć. Tradycyjne metody oczyszczania takich warstw wymagają ryzykownych ingerencji - mechanicznego skrobania, stosowania toksycznych rozpuszczalników organicznych lub podgrzewania mas impregnujących. Organożel pNIPA-LAP działa wyłącznie w miejscu aplikacji i stopniowo uwalnia rozpuszczalnik, zmiękczając stare warstwy impregnujące. Nie rozlewa się na większej powierzchni płótna. Rozpuszczone zanieczyszczenia są częściowo wchłaniane przez strukturę żelu, co ogranicza konieczność mechanicznego usuwania materiału.

Foto: https://www.magnific.com/pl/app

Konserwacja obrazu Tetmajera to pierwsze zastosowanie opracowanego organożelu podczas faktycznej konserwacji zabytkowego obrazu. Praca przy nim była utrudniona z powodu obecności sztywnych warstw klejowych oraz licznych odspojeń warstwy malarskiej.

Jednak użycie organożelu umożliwiło kontrolowaną redukcję mas klejowych z odwrocia bez konieczności znacznej ingerencji mechanicznej, która mogłaby zagrozić odspojonym już łuskom farby. Po oczyszczeniu odwrocia możliwe było przeprowadzenie dalszych zabiegów konserwatorskich, obejmujących m.in. naprawę rozdarć płótna, stabilizację konstrukcji obrazu oraz retusz warstwy malarskiej. Prof. Marcin Karbarz z Wydziału Chemii UW zauważa, że opracowanie tak selektywnego i skutecznego materiału czyszczącego to milowy krok w konserwacji i restauracji malarstwa sztalugowego.

Badania są częścią prac prowadzonych w grupie Funkcjonalnych Materiałów Żelowych Uniwersytetu Warszawskiego nad zastosowaniem miękkich materiałów w konserwacji dzieł sztuki. Autorzy zaznaczają, że żadna metoda konserwatorska nie jest uniwersalna i każdy obiekt wymaga indywidualnych badań oraz testów. Jednak wyniki przeprowadzonych już badań wskazują, że nanokompozytowe organożele mogą się stać alternatywą dla klasycznych metod usuwania historycznych warstw impregnujących z zabytkowych obrazów.

Źródło: Serwis Nauka w Polsce – www.naukawpolsce.pl

Otwarcie Międzynarodowego Instytutu Chemii Analitycznej PAN w Toruniu

Międzynarodowy Instytut Chemii Analitycznej Polskiej Akademii Nauk (MIChA PAN) został w piątek otwarty w Toruniu. To ośrodek badawczo-wdrożeniowy, który ma działać w dziedzinach zdrowia, ochrony środowiska i bezpieczeństwa żywności.

Foto: Uczestnicy otwarcia siedziby MIChA PAN (red. "Przemysł Chemiczny")

– *Nauka jest motorem rozwoju gospodarczego. Utworzenie instytutu jest odpowiedzią na rosnące znaczenie chemii analitycznej i jej zastosowań we współczesnym świecie. Ta dziedzina odgrywa kluczową rolę m.in. w rozwoju technologii biomedycznych oraz farmacji i inżynierii materiałowej, wypracowuje też nowoczesne metody analiz i pomiarów dla ochrony środowiska i bezpieczeństwa żywności* – podkreślił marszałek województwa kujawsko-pomorskiego Piotr Całbecki.

Marszałek Piotr Całbecki i prezes PAN prof. Marek Konarzewski podpisali także porozumienie o współpracy ws. rozwoju nauki, badań naukowych i prac badawczo-rozwojowych oraz transferu wiedzy i komercjalizacji wyników badań naukowych. Chodzi o dziedziny, które łączą się z misją MIChA PAN.

MIChA PAN ma ściśle współpracować z Centrum Naukowo-Technologicznym im. Jana Czochralskiego, czyli marszałkowskim ośrodkiem naukowym.

– *Instytut, który będzie prowadził interdyscyplinarne badania m.in. w zakresie ochrony środowiska, bezpieczeństwa żywności i innowacji biomedycznych, będzie działał w modelu sieciowym. Centrala będzie w Toruniu, a jednostki w Gdańsku, Białymstoku, Warszawie, Łodzi, Lublinie, Krakowie, Wrocławiu i Poznaniu. Docelowo zatrudni 500 pracowników naukowych* – poinformowała rzecznik prasowa Urzędu Marszałkowskiego w Toruniu Beata Krzemińska.

Dyrektorem MIChA został prof. Bogusław Buszewski, który jest członkiem rzeczywistym PAN-u i wybitnym specjalistą w dziedzinie chemii analitycznej.

Źródło: Serwis Nauka w Polsce – www.naukawpolsce.pl

Rozpowszechnienie wyników projektu POIR.01.01.01-00-0282/21 pt. *„Opracowanie nowej generacji wyrobów polimerowych przeznaczonych do uszczelniania systemów chłodzenia nowo produkowanych samochodów elektrycznych i hybrydowych”*

PPHU Przedsiębiorstwo Tworzyw Sztucznych A.H.A. Tomczak Sp. j. zrealizowało projekt badawczo-rozwojowy nr POIR.01.01.01-00-0282/21 pt. *"Opracowanie nowej generacji wyrobów polimerowych przeznaczonych do uszczelniania systemów chłodzenia nowo produkowanych samochodów elektrycznych i hybrydowych”*.

Przedmiotem projektu było opracowanie nowego materiału polimerowego oraz technologii produkcji uszczelnień spełniających wymagania nowoczesnych systemów chłodzenia stosowanych w samochodach elektrycznych i hybrydowych. Projekt był realizowany przy wsparciu Funduszy Europejskich w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój na lata 2014–2020.

Celem projektu było uzyskanie nowej generacji wyrobów polimerowych charakteryzujących się podwyższonymi parametrami fizykomechanicznymi, wysoką odpornością na oddziaływanie niskich i wysokich temperatur, odpornością na płyny chłodzące i smary oraz wysokim poziomem czystości technicznej. Opracowywane uszczelnienia miały odpowiadać wymaganiom stawianym komponentom stosowanym w kompaktowych i wysoko wydajnych systemach chłodzenia układów elektrycznych i energoelektronicznych pojazdów. Szczególne znaczenie miała niezawodność uszczelnień, ponieważ ich właściwe funkcjonowanie ma bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo oraz trwałość całego układu chłodzenia.

Realizację projektu podzielono na cztery następujące po sobie etapy. W pierwszym etapie przeprowadzono badania przemysłowe dotyczące opracowania nowego materiału polimerowego na bazie EPDM. Zdefiniowano wymagania techniczne, opracowano założenia receptur materiałowych oraz przeprowadzono badania właściwości fizykomechanicznych materiału, jego odporności na wysokie i niskie temperatury oraz przyspieszone starzenie. Drugi etap obejmował optymalizację materiału pod kątem odporności na media chemiczne występujące w samochodowych systemach chłodzenia. Próbki materiałowe poddano między innymi oddziaływaniu płynów chłodzących i smarów w podwyższonych temperaturach, a uzyskane wyniki wykorzystano do dalszej modyfikacji receptur. W trzecim etapie opracowano i wykonano w środowisku laboratoryjnym prototypy uszczelnień polimerowych. Zweryfikowano ich właściwości mechaniczne i użytkowe oraz odporność na warunki eksploatacyjne. Równolegle przeprowadzono prace nad technologią umożliwiającą uzyskanie wysokiego poziomu czystości technicznej wyrobów polimerowych i opracowano demonstrator technologii linii pilotażowej. Ostatni etap miał charakter eksperymentalnych prac rozwojowych. Prototypy wykonane z wybranych materiałów poddano testom w otoczeniu stanowiącym model warunków rzeczywistego funkcjonowania. Badania obejmowały między innymi oddziaływanie płynu chłodzącego i smaru w wysokich

Fundusze Europejskie Inteligentny Rozwój
Rzeczpospolita Polska
NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju
Unia Europejska Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego

temperaturach. Uzyskane wyniki potwierdziły prawidłowość przyjętych założeń oraz możliwość przemysłowego wykorzystania opracowanego rozwiązania.

Wszystkie zaplanowane etapy, wyniki, kamienie milowe oraz cele projektu zostały osiągnięte, a projekt zakończył się sukcesem. Jego głównym rezultatem było opracowanie nowej generacji wyrobów polimerowych przeznaczonych do uszczelniania systemów chłodzenia samochodów elektrycznych i hybrydowych. Opracowano materiał polimerowy na bazie EPDM oraz technologię produkcji nowej generacji uszczelnień polimerowych do systemów chłodzenia. Osiągnięte właściwości materiału i prototypów potwierdziły ich odporność na warunki termiczne i chemiczne występujące podczas eksploatacji samochodowych systemów chłodzenia.

Po zakończeniu prac badawczo-rozwojowych wyniki projektu zostały wdrożone do własnej działalności gospodarczej PPHU PTS Tomczak. Przedmiotem wdrożenia są uszczelnienia polimerowe, w tym uszczelnienia typu gasket, wytwarzane z opracowanego materiału EPDM i przeznaczone do systemów chłodzenia nowo produkowanych samochodów elektrycznych i hybrydowych. Prace wdrożeniowe obejmowały przygotowanie dokumentacji konstrukcyjnej 2D i modeli 3D wyrobów, zaprojektowanie i wykonanie oprzyrządowania produkcyjnego w metalu oraz przygotowanie dokumentacji technologicznej i jakościowej. Przeprowadzono próby technologiczne, wykonano partie próbne wyrobów oraz przeprowadzono analizy służące potwierdzeniu możliwości prowadzenia stabilnej i powtarzalnej produkcji. Proces wdrożenia został przeprowadzony z wykorzystaniem metodologii APQP, obejmującej zaawansowane planowanie jakości oraz przygotowanie dokumentacji wymaganej przez klientów z branży motoryzacyjnej. Wdrożone wyroby produkowane i dostarczane są bezpośrednio do fabryk międzynarodowych koncernów motoryzacyjnych. Następnie są one montowane w kompletnych systemach chłodzenia, które trafiają do zakładów producentów samochodów i są instalowane w seryjnie produkowanych pojazdach elektrycznych i hybrydowych. Dostawy realizowane są zgodnie z wymaganiami branży motoryzacyjnej, na podstawie zamówień otwartych i harmonogramów dostaw w systemie just-in-time.

W celu zabezpieczenia rezultatów prac badawczo-rozwojowych oraz ochrony opracowanego rozwiązania dokonano zgłoszenia patentowego. Ochrona własności intelektualnej obejmuje rozwiązanie będące wynikiem przeprowadzonych badań oraz prac rozwojowych, stanowiące podstawę dalszego rozwoju technologii materiałów i wyrobów uszczelniających przeznaczonych do nowoczesnych systemów chłodzenia.

Realizacja projektu przyczyniła się do zwiększenia potencjału badawczo-rozwojowego przedsiębiorstwa, rozszerzenia jego oferty technologicznej oraz wzmocnienia konkurencyjności na międzynarodowym rynku motoryzacyjnym. PPHU Przedsiębiorstwo Tworzyw Sztucznych A.H.A. Tomczak jest producentem wyrobów polimerowych dla branży motoryzacyjnej z wieloletnim doświadczeniem. Firma dostarcza swoje produkty bezpośrednio do fabryk międzynarodowych koncernów motoryzacyjnych działających na rynkach europejskich i światowych. Przedsiębiorstwo konsekwentnie realizuje strategię rozwoju opartą na regularnych inwestycjach w działalność badawczo-rozwojową, innowacje technologiczne oraz rozwój kompetencji w zakresie produkcji zaawansowanych komponentów dla nowoczesnych pojazdów.

Autorzy:
mgr Andrzej Tomczak
mgr Kamil Tomczak, MBA
mgr inż. Katarzyna Wierzbicka

Fundusze Europejskie Inteligentny Rozwój
Rzeczpospolita Polska
NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju
Unia Europejska Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego

DOI: 10.15199/28.2026.5.1

Article reviewed. Received: 15.07.2026, accepted: 06.08.2026

An experimental setup for visualization of liquid surface phenomena and assessment of material wettability

Stanowisko do wizualizacji zjawisk powierzchniowych cieczy oraz oceny zwilżalności materiałów

PAWEŁ PACZKOWSKI* **ORCID: 0000-0001-7864-3530**
NATALIA SOBCZAK **ORCID: 0000-0002-5588-1648**
JERZY JÓZEF SOBCZAK **ORCID: 0000-0002-8878-1037**

Wydział Odlewnictwa, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, ul. Reymonta 23, 30-059 Kraków
* e-mail: paczkows@agh.edu.pl

The infiltration of molten metal into porous media plays a key role in the production of composite materials. High-temperature infiltration phenomena in preforms can be effectively replicated in low-temperature systems, enabling and accessible controlled analysis. The study presents methods for determining surface wettability using the sessile drop technique and for measuring surface tension via the capillary method. The experiment identifies the minimum height of a liquid liquid column at which surface tension forces are overcome in capillary tubes. The conclusion discusses the analogies and limitations of replicating high-temperature infiltration phenomena in capillary based low temperature analysis.

Keywords: *low-temperature infiltration experiments, custom wettability test stand, surface wettability, sessile drop method, capillary rise phenomena, surface tension measurement*

Proces infiltracji ciekłym metalem materiałów porowatych odgrywa kluczową rolę w technologii materiałów kompozytowych. Zjawiska zachodzące w trakcie wysokotemperaturowej infiltracji porowatych kształtek ceramicznych można skutecznie odwzorowywać w układach niskotemperaturowych, a nawet w warunkach pokojowych. W artykule przedstawiono metodę wyznaczania kąta zwilżania metodą kropli leżącej, napięcia powierzchniowego metodą kapilarną oraz opisano metodykę wyznaczania minimalnej wysokości słupa cieczy, przy której następuje samoistnie pokonanie siły napięcia powierzchniowego w kapilarach. Omówiono analogie i ograniczenia modelowania zjawisk infiltracji wysokotemperaturowej z wykorzystaniem eksperymentów niskotemperaturowych.

Słowa kluczowe: eksperymenty infiltracji niskotemperaturowej, stanowisko do badań zwilżalności, zwilżalność, metoda kropli leżącej, zjawisko podciągania kapilarnego, pomiar napięcia powierzchniowego

1. WSTĘP

W badaniach zwilżalności stosuje się profesjonalne systemy optyczne łączące precyzyjną rejestrację obrazu, automatyczne dozowanie cieczy oraz analizę profilu kropli opartą na modelu Younga–Laplace'a. Przykładem takiej aparatury są urządzenia Krüss DSA (DSA25, DSA100), oferujące wysoką rozdzielczość optyczną i pełną automatyzację pozycjonowania próbki [1]. Podobną funkcjonalność zapewnia seria DataPhysics OCA (OCA 15EC, OCA 25, OCA 50), umożliwiająca m.in. pomiar histerezy i kąta odrywania [2]. W zakresie pomiarów napięcia powierzchniowego i kąta zwilżania stosuje się tensjometry procesorowe, takie jak Krüss K100 [3].

W obszarze badań infiltracji cieczy w kapilarach lub w ośrodkach porowatych dostępne są urządzenia realizujące wybrane aspekty tego zjawiska, w tym porometry, służące do pomiaru przepływu gazu lub cieczy przez materiał porowaty oraz porozymetry, które wymuszają wnikanie cieczy do porów pod wysokim ciśnieniem, umożliwiając określenie ich rozkładu i charakterystyki wypełniania. Przykładem są porometry kapilarne CFP firmy Malvern Panalytical, umożliwiające pomiar przepływu cieczy lub gazu przez porowate struktury pod kontrolowanym ciśnieniem oraz analizę początku infiltracji [4]. Natomiast porozymetry rtęciowe AutoPore firmy Micromeritics pozwalają określić ciśnienie potrzebne do wypełnienia porów oraz rozkład ich średnic na podstawie kapilarnego wnikania cieczy pod wysokim ciśnieniem [5].

Celem pracy było zaprojektowanie i wykonanie autorskiego stanowiska badawczego umożliwiającego wizualizację oraz ilościową analizę zjawisk powierzchniowych cieczy w warunkach temperatury pokojowej. W literaturze znane są rozwiązania, w których modele przepływu ciekłego metalu są badane przy użyciu modeli opartych na roztworach wody [6]. Opracowana aparatura pozwala na wyznaczanie kąta zwilżania metodą kropli leżącej, określanie napięcia powierzchniowego metodą kapilarną oraz badanie infiltracji materiałów porowatych przez ciecz pod wpływem ciśnienia hydrostatycznego. Stanowisko stanowi alternatywę dla dostępnych systemów komercyjnych, pełniąc jednocześnie funkcję platformy

badawczej umożliwiającej odwzorowanie zjawisk wysokotemperaturowej infiltracji ciśnieniowej ciekłym metalem poprzez ich analizę w warunkach niskotemperaturowych.

2. METODYKA BADAŃ I MATERIAŁY BADAWCZE

Praca obejmuje modelowanie wysokotemperaturowego procesu infiltracji ciekłym metalem w warunkach laboratoryjnych, w temperaturze pokojowej. Zastosowano wodę jako ciecz modelową, co pozwoliło odtworzyć podstawowe mechanizmy kapilarnej penetracji w ośrodkach porowatych. Wyznaczono również kąt zwilżania metodą kropli leżącej oraz napięcie powierzchniowe metodą kapilarną.

Modelowanie zjawisk wysokotemperaturowych przy użyciu zaproponowanego stanowiska wymagało przyjęcia uproszczeń wynikających z braku występowania zjawisk takich jak:

- reaktywność między cieczą a kontaktującymi się materiałami,
- zależność napięcia powierzchniowego od temperatury,
- wpływ temperatury na właściwości cieczy,
- oddziaływanie gradientów temperatury i wynikających z nich przepływów termokapilarnych (efekt Marangoniego),
- histereza kąta zwilżania, czyli różnica pomiędzy kątem postępującym a cofającym, wynikająca z chropowatości i niejednorodności powierzchni.

2.1. WYZNACZANIE KĄTA ZWILŻANIA POWIERZCHNI METODĄ KROPLI LEŻĄCEJ

Przyjęta metoda kropli leżącej polega na umieszczeniu niewielkiej ilości cieczy (zwykle 1–10 ml) na badanej powierzchni i obserwacji kształtu utworzonej kropli. Do badań wykorzystano wodę jako ciecz modelową oraz dwa podłoża o zróżnicowanych właściwościach powierzchniowych: szkło, reprezentujące materiały o wysokiej energii powierzchniowej oraz polipropylen, typowy materiał niskoenergetyczny o charakterze hydrofobowym. Próbki przygotowano poprzez oczyszczenie i osuszenie powierzchni, aby zapewnić powtarzalność pomiarów.

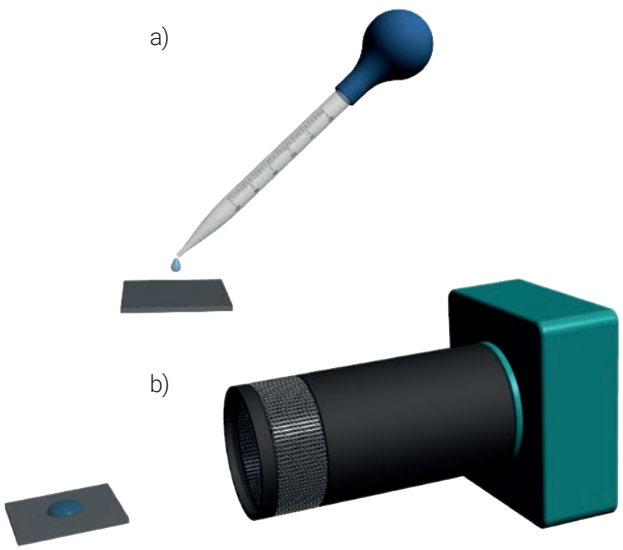


Fig. 1. Schematic representation of the contact angle determination using the sessile drop method for a liquid/solid system: a) deposition of the liquid drop, b) image acquisition using a digital microscope
Rys. 1. Schemat przebiegu wyznaczania kąta zwilżania metodą kropli leżącej w układzie ciecz/ciało stałe, a) nanoszenie kropli cieczy, b) akwizycja obrazu za pomocą mikroskopu cyfrowego

Stanowisko pomiarowe obejmuje statyw z uchwytem, mikroskop cyfrowy umożliwiający rejestrację profilu bocznego kropli oraz komputer służący do akwizycji i analizy obrazu. Układ ten pozwalał na stabilne ustawienie próbki oraz uzyskanie wyraźnego konturu kropli niezbędnego do dalszej analizy.

Procedura wyznaczania kąta zwilżania obejmowała trzy etapy:

- dozowanie kropli – naniesienie kropli wody o kontrolowanej objętości (1 ml) na powierzchnię próbki (rys. 1a);
- akwizycja obrazu – rejestracja bocznego profilu kropli za pomocą mikroskopu cyfrowego (rys. 1b);
- analiza kształtu kropli – wyznaczenie kąta zwilżania na podstawie konturu kropli z użyciem oprogramowania analitycznego.

2.2. WYZNACZANIE NAPIĘCIA POWIERZCHNIOWEGO METODĄ KAPILARNĄ

Po odtłuszczeniu kapilar i zmierzeniu ich średnicy wewnętrznej, kapilary umieszczano pionowo na statywie w taki sposób, aby ich dolne końce znajdowały się tuż nad powierzchnią cieczy w naczyniu ustawionym na podnośniku laboratoryjnym. Następnie, poprzez stopniowe podnoszenie naczynia, doprowadzano do zetknięcia cieczy z końcami kapilar, co skutkowało ustaleniem się wysokości słupów cieczy w kapilarach (rys. 2a).

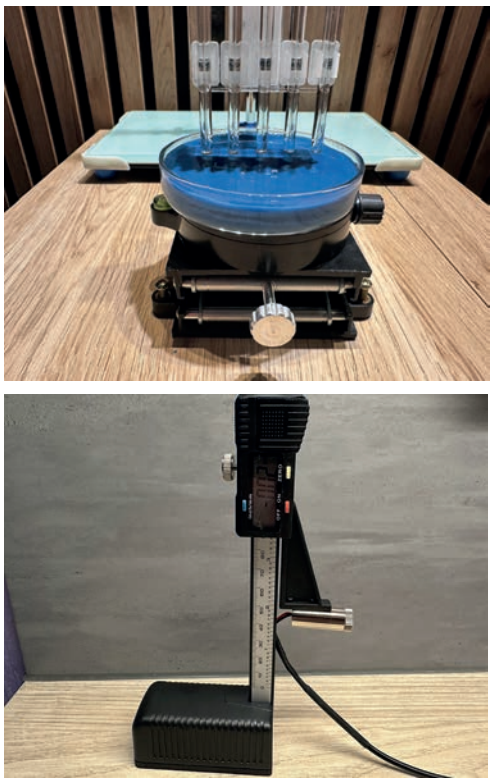


Fig. 2. Photographs of the developed test stand for determining surface tension: a) capillary holder with laboratory jack, b) height gauge with line-laser module
Rys. 2. Zdjęcia opracowanego stanowiska do wyznaczania napięcia powierzchniowego, a) statyw z kapilarami oraz podnośnik laboratoryjny, b) wysokościomierz z laserem liniowym

Za pomocą wysokościomierza laserowego (rys. 2b) wykonywano pomiar wysokości słupa cieczy w kapilarach. Ciecz stanowiła roztwór wody z barwnikiem spożywczym. Do barwienia zastosowano wodny roztwór barwnika Brilliant Blue FCF (E133), będącego solą disodową barwnika azowego o wzorze sumarycznym $C_{37}H_{34}N_2Na_2O_9S_3$. Barwnik ten jest powszechnie stosowany w przemyśle spożywczym i charakteryzuje się wysoką rozpuszczalnością w wodzie oraz stabilnością barwy. Wykorzystując cztery identyczne kapilary ustawione na tej samej wysokości, uzyskiwano uśrednione wyniki dla jednej próby.

Zaprezentowane stanowisko badawcze do wyznaczania napięcia powierzchniowego cieczy składa się ze statywu z uchwytem do pionowego mocowania kapilar, zlewki z badaną cieczą, mikrometru do pomiaru średnicy kapilary, wysokościomierza laserowego oraz termometru laboratoryjnego do zmierzenia temperatury cieczy w celu określenia jej gęstości. Dodatkowo zadbano o stabilizację układu pomiarowego, eliminując drgania i przypadkowe przesunięcia kapilar, co pozwoliło uzyskać powtarzalne i precyzyjne odczyty wysokości słupa cieczy.

2.3. BADANIE INFILTRACJI SAMORZUTNEJ MATERIAŁÓW POROWATYCH PRZEZ CIECZ

Badania infiltracji przeprowadzono z wykorzystaniem zaprojektowanego stanowiska pomiarowego, którego widok przedstawiono na rys. 3, a schemat funkcjonalny na rys. 4. Układ składa się z dwóch zbiorników: górnego **GZ**, wyposażonego w wymienne kapilary o określonej średnicy oraz dolnego **DZ**, w którym umieszczono pompę P o regulowanej wydajności. Pompa tłoczy ciecz do górnego zbiornika, umożliwiając kontrolę wysokości słupa cieczy w zbiorniku z kapilarami.

Wysokość słupa cieczy w **GZ** rejestrowano za pomocą czujnika różnicy ciśnień **CRC**, wyposażonego w dwa króćce pomiarowe: Low (ciśnienie atmosferyczne) oraz High (ciśnienie na dnie zbiornika). Na podstawie zmierzonego ciśnienia hydrostatycznego, znanej gęstości cieczy oraz przyspieszenia ziemskiego system pomiarowy automatycznie wyznacza aktualną wysokość słupa cieczy.

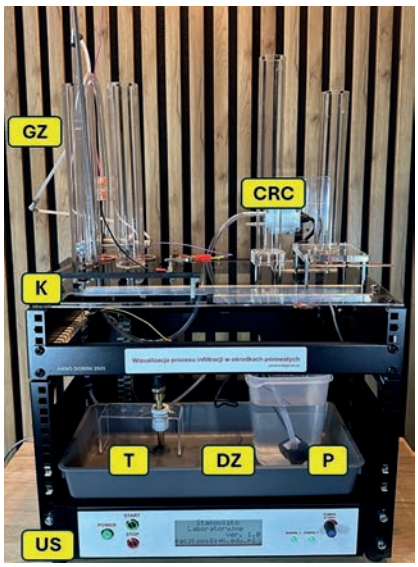


Fig. 3. Photograph of the laboratory setup for investigating the infiltration of porous materials by a liquid
Rys. 3. Zdjęcie stanowiska laboratoryjnego do badania infiltracji materiałów porowatych przez ciecz

Przepływ cieczy przez kapilarę monitorowano za pomocą czujnika konduktometrycznego **K**, składającego się z dwóch elektrod: jednej umieszczonej w górnym zbiorniku (rys. 5a), a drugiej pod kapilarą (rys. 5b). Zamknięcie obwodu elektrycznego następuje w momencie, gdy przewodząca ciecz - przy danej wysokości słupa – przepływa przez kapilarę i styka się z obiema elektrodami, co pozwala jednoznacznie określić moment rozpoczęcia infiltracji.

Stanowisko umożliwia stosowanie kapilar o różnych średnicach i stanowi zintegrowany system pomiarowo-sterujący, realizujący sterowanie pompą, pomiar temperatury, detekcję przejścia cieczy przez kapilarę oraz wyznaczanie wysokości słupa cieczy. Wszystkie elementy zasilano niskim, bezpiecznym napięciem zgodnym z III klasą ochronności (SELV).

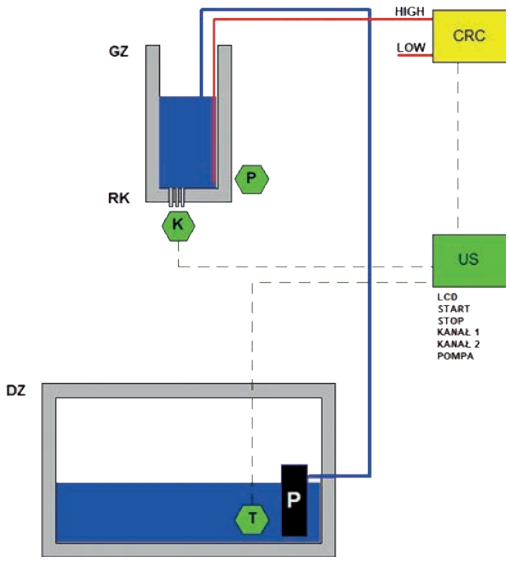
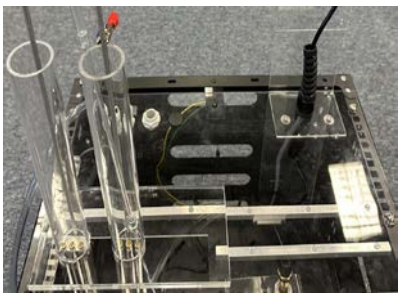


Fig. 4. Functional schematic of the laboratory setup for investigating the infiltration of porous materials by a liquid
Rys. 4. Schemat funkcjonalny stanowiska laboratoryjnego do badania infiltracji materiałów porowatych przez ciecz

a)



b)

Fig. 5. Conductometric sensor: a) probe in the upper reservoir (conductive rod with an insulated red tip), b) probe positioned beneath the capillary; the photograph captures the moment when water exits the capillary and the liquid drop contacts the lower probe
Rys. 5. Czujnik konduktometryczny, a) sonda w górnym zbiorniku (przewodzący pręt z izolowaną czerwoną końcówką), b) sonda pod kapilarą, na zdjęciu uwidoczniono chwilę przejścia wody przez kapilarę i połączenie kropli cieczy z dolną sondą

3. PODSTAWY TEORETYCZNE BADANYCH ZJAWISK

3.1. WYZNACZANIE KĄTA ZWILŻANIA POWIERZCHNI METODĄ KROPLI LEŻĄCEJ

Kąt zwilżania jest to kąt, jaki tworzy styczna do powierzchni kropli pomiarowej osadzonej na powierzchni ciała stałego, w punkcie styku trzech faz stałej, ciekłej i gazowej. Taki punkt nosi miano punktu potrójnego (rys. 6). Graniczną wartością kąta zwilżania jest Θ = 90°, który dzieli badane pary materiałów ciecz/ciało stałe na zwilżalne (Θ < 90°) oraz niezwilżalne (Θ > 90°) [7–12].

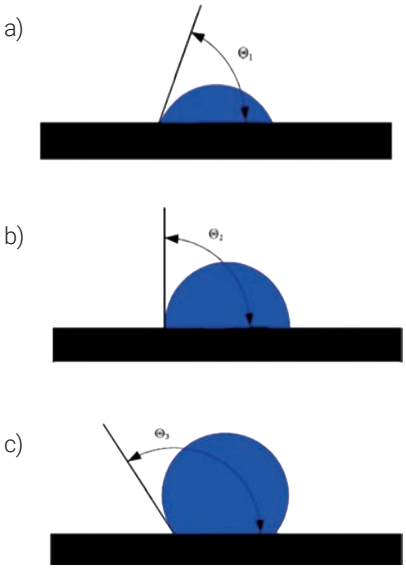


Fig. 6. Contact angle for a liquid deposited on a flat substrate: a) wetting system, Θ_1 < 90°, b) neutral wetting condition, Θ_2 = 90°, c) non-wetting system, Θ_3 > 90°
Rys. 6. Kąt zwilżania dla cieczy naniesionej na płaskie podłoże, a) układ zwilżalny Θ1 < 90°, b) układ graniczny Θ2 = 90°, c) układ niezwilżalny Θ3 > 90°

3.2. WYZNACZANIE NAPIĘCIA POWIERZCHNIOWEGO METODĄ KAPILARNE

Metoda kapilarna polega na obserwacji zachowywania się słupa cieczy w cienkiej rurce na skutek napięcia powierzchniowego cieczy pomiędzy cieczą a ściankami rurki [13–16]. Ciężar słupa cieczy w kapilarze o przekroju kołowym, wyrażony w niutonach, wynosi:

$$F_G = \rho\, g\, V = \rho\, g\, \pi r^2\, h \tag{1}$$

gdzie: ρ – gęstość cieczy [kg/m³], g – przyspieszenie ziemskie [m/s²], r – promień kapilary [m], h – wysokość słupa cieczy [m].

Siła napięcia powierzchniowego na styku cieczy ze ścianką rurki, wyrażona w niutonach wynosi:

$$F_\sigma = L\, \sigma\, \cos\Theta = 2\pi r\, \sigma\, \cos\Theta \tag{2}$$

gdzie: σ – napięcie powierzchniowe cieczy [N/m], L – obwód przekroju kapilary = 2 π r [m], θ – kąt zwilżania [°].

W stanie równowagi siła ciężkości słupa cieczy jest równa sile napięcia powierzchniowego:

$$\rho\, g\, \pi r^2\, h = 2\pi r\, \sigma\, \cos\Theta \tag{3}$$

skąd napięcie powierzchniowe cieczy w funkcji wysokości słupa cieczy i kąta zwilżania materiału kapilary przez ciecz o zadanej gęstości wynosi:

$$\sigma = \frac{1}{2}\,\frac{r\, h\, \rho\, g}{\cos\Theta} \tag{4}$$

3.3. BADANIE INFILTRACJI SAMORZUTNEJ MATERIAŁÓW POROWATYCH PRZEZ CIECZ

Ciśnienie hydrostatyczne wywołane słupem cieczy o wysokości h wyraża się wzorem:

$$P = \rho\, g\, h \;\leftrightarrow h = \frac{P}{\rho\, g} \tag{5}$$

Wbudowany system pomiarowy wyznacza wysokość słupa cieczy na podstawie ciśnienia hydrostatycznego (wyznaczonego przez czujnik różnicy ciśnień CRC), gęstości cieczy i przyspieszenia ziemskiego (wzór 5).

Analogicznie jak przy wyznaczaniu ciśnienia hydrostatycznego, w celu określenia wysokości h słupa cieczy w górnym zbiorniku (wzór 6), możemy zapisać zależność opisującą ciśnienie hydrostatyczne działające na kapilary umieszczone w dnie tego zbiornika:

$$P_H = \rho\, g\, h \tag{6}$$

Wielkość ciśnienia kapilarnego P_K wynikająca z wartości napięcia powierzchniowego cieczy oraz kąta zwilżania powierzchni kapilary przez ciecz wynosi:

$$P_K = \frac{2\,\sigma\,\cos\Theta}{r} \tag{7}$$

W stanie równowagi kapilarnej ciśnienie kapilarne P_K przeciwdziała ciśnieniu hydrostatycznemu P_H. Warunek równowagi można zapisać jako:

$$P_K = P_H \tag{8}$$

Stąd można wyznaczyć minimalną wysokość słupa cieczy, przy której następuje samoistne wnikanie cieczy do rurki kapilarnej:

$$h > \frac{2\,\sigma\,\cos\Theta}{\rho\, g\, r} \tag{9}$$

4. WYNIKI I DYSKUSJA

4.1. WYZNACZANIE KĄTA ZWILŻANIA METODĄ KROPLI LEŻĄCEJ

Zarejestrowany obraz kropli zapisywano jako plik graficzny, po czym wyznaczono kąt zwilżania, określając styczną do konturu kropli w punkcie potrójnym. Opracowana aplikacja automatycznie obliczała i wyświetlała wartość kąta na ekranie (rys. 7). Jako ciecz użyto roztworu wodnego z barwnikiem Brilliant Blue FCF, a materiałem podłoża było szkło (rys. 8a) oraz polipropylen (rys. 8b). Dla szkła uzyskano układ zwilżalny o kącie Θ = 57°, natomiast dla polipropylenu uzyskano układ niezwilżalny o kącie Θ = 102°, co odzwierciedla różnice w energii powierzchniowej obu materiałów.

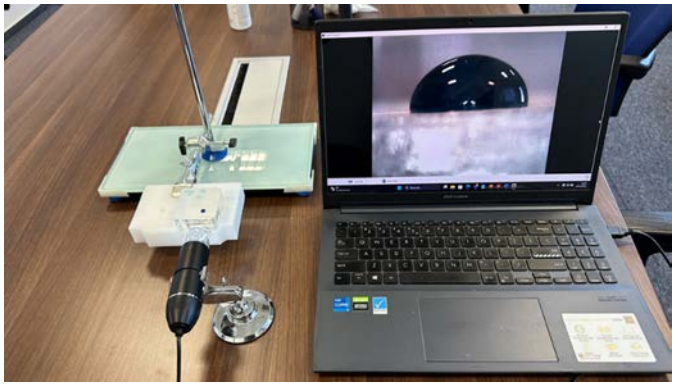


Fig. 7. Test stand for determining the contact angle (sessile drop holder, digital microscope, and captured image on a computer)
Rys. 7. Stanowisko do wyznaczania kąta zwilżania (statyw z kroplą leżącą, mikroskop cyfrowy i zdjęcie w komputerze)

a)

b)

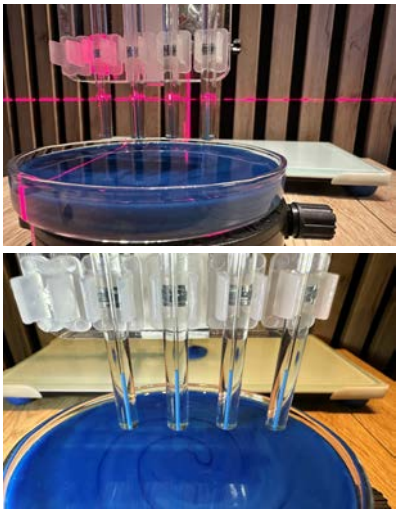


Fig. 9. Tripod with capillaries, a) capillaries filled with liquid due to capillary forces, b) height-gauge laser module
Rys. 9. Statyw z kapilarami, a) wypełnionymi cieczą wskutek działania sił kapilarnych, b) z laserem wysokościomierza

a)

b)

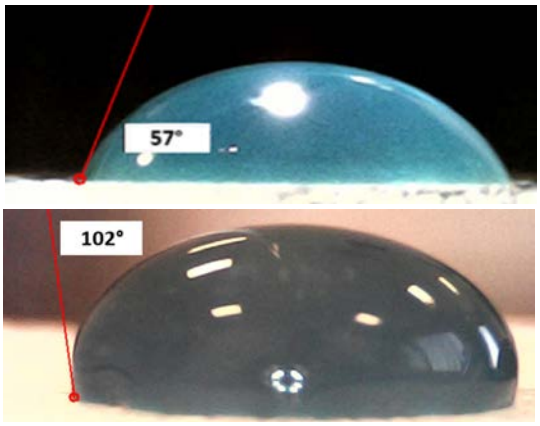


Fig. 8. Wetting angle determined using computer-based image analysis, illustrating the influence of substrate type on the contact angle in the examined system: a) wetting system, Θ = 57°, b) non-wetting system, Θ = 102°
Rys. 8. Kąt zwilżania wyznaczony w programie komputerowym ilustrujący wpływ rodzaju podłoża na wielkość kąta zwilżania w badanym układzie: a) układ zwilżalny Θ = 57°, b) układ niezwilżalny Θ = 102°

a) b)

Fig. 10. Setup for determining the parameters of spontaneous infiltration, a) photograph of the liquid column in the upper reservoir of height h, b) display indicating the current liquid column height (6.81 cm) and the liquid column height at which the fluid passed through the capillary – 3.78 cm
Rys. 10. Stanowisko do wyznaczania parametrów infiltracji samoistnej, a) zdjęcie słupa cieczy w górnym zbiorniku o wysokości h, b) wyświetlacz wskazujący bieżącą wysokość słupa cieczy (6,81 cm) oraz wysokość słupa wody, przy której ciecz przeszła przez kapilarę – 3,78 cm

4.2. WYZNACZANIE NAPIĘCIA POWIERZCHNIOWEGO METODĄ KAPILARNĄ

Na podstawie pomiaru wysokości słupa cieczy w kapilarach (rys. 9), wyznaczono napięcie powierzchniowe roztworu (wzór 10), uzyskując wartość 43,1 mN/m, niższą od napięcia powierzchniowego czystej wody ze względu na obecność barwnika obniżającego energię powierzchniową cieczy.

$$\sigma = \frac{0{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 8{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 \cdot 9{,}81}{2 \cdot \cos 60°} \tag{10}$$

$$\sigma = 43{,}1\ mN/m$$

4.3. BADANIE INFILTRACJI SAMORZUTNEJ MATERIAŁÓW POROWATYCH PRZEZ CIECZ

Badania przeprowadzono dla kapilar mosiężnych o średnicy 0,3 mm. Zmierzony kąt zwilżania θ dla układu mosiądz/woda wyniósł 70°. Przyjęto następujące dane wyjściowe:

- napięcie powierzchniowe wody w temperaturze 21 °C: σ = 0,0728 N/m;
- gęstość wody: ρ = 1000 kg/m³.

Dla powyższych danych krytyczna wysokość słupa cieczy wynosi:

$$h = \frac{2\,\sigma\,\cos\Theta}{\rho\,g\,r} = \frac{2 \cdot 0{,}0728 \cdot 0{,}342}{1000 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}00015} = 0{,}0338\ m \tag{11}$$

Z równania (11) wynika, że przy wysokości słupa cieczy h = 3,38 cm ciśnienie hydrostatyczne równoważy ciśnienie kapilarne. Dla wyższych wartości h ciecz przepływa przez kapilary, co jest rejestrowane przez czujnik konduktometryczny i wyświetlane na ekranie LCD (rys. 10b).

Wynik pomiaru wynosi 3,78±0,50 cm, a niepewność wynika ze składowych związanych z kątem zwilżania, średnicą kapilary, napięciem powierzchniowym oraz gęstością cieczy.

Błąd względny pomiaru wynosił więc:

$$h = \frac{|h_{RZ} - h_T|}{h_T}\ 100\% = \frac{0{,}4}{3{,}38}\ 100\% = 11{,}8\% \tag{12}$$

Różnica między wartością obliczoną i zmierzoną może wynikać ze zróżnicowania geometrii kapilar, histerezy kąta zwilżania, niedokładności przyrządów pomiarowych, zanieczyszczenia we-

wnętrznej powierzchni kapilar, drgań wywołanych pracą pompy oraz opóźnienia reakcji czujnika konduktometrycznego (wzór 12).

Przyjmując, że krytyczna wysokość słupa cieczy wynosi 3,38 cm (wzór 11), a wartość pomierzona z uwzględnieniem niepewności mieści się w przedziale [3,28; 4,28] cm (rys. 10b), należy stwierdzić, że pomiar jest zgodny z wartością teoretyczną w granicach niepewności.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Opracowane stanowisko pomiarowe wykorzystuje proste kapilary o średnicach od 0,2±0,1 do 1,0±0,1 mm. Taka konstrukcja gwarantuje wysoką powtarzalność uzyskiwanych wyników. W przypadku infiltracji ciśnieniowej ceramicznych preform porowatych ciekłym metalem, wielkość porów jest znacznie mniejsza – od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów [17]. Infiltracja zależy od sił kapilarnych i ciśnienia zewnętrznego, ale proces zwilżania różni się zasadniczo. Ciecz na szklanej lub metalowej powierzchni kapilary wykazuje kąt zwilżania mniejszy od 90°, co sprzyja samoistnemu wnikaniu cieczy, podczas gdy kąty zwilżania ciekłych metali mogą przyjmować szeroki zakres wartości, często przekraczający 90°, co wymusza stosowanie wysokiego ciśnienia i zabiegów modyfikujących powierzchnię porów [18]. Ponadto ciecz niskotemperaturowa jest obojętna chemicznie, dzięki czemu pomiary nie ulegają zaburzeniu przez reakcje z materiałem kapilary, natomiast ciekłe metale mogą reagować z preformą, zmieniając właściwości powierzchniowe i efektywnie zmniejszając średnicę porów w trakcie procesu [19]. W przypadku cieczy niskotemperaturowej infiltracja jest samoistna. Natomiast przy odlewnictwie ciśnieniowym konieczne jest wytworzenie ciśnienia zewnętrznego, pokonującego ciśnienie kapilarne, co z założenia wymusza penetrację ciekłego metalu do porów preformy [20-22].

ŹRÓDŁO FINANSOWANIA

Artykuł został sfinansowany w ramach projektu OPUS 21 Narodowego Centrum Nauki, ID: 2021/41/B/ST5/02787, pt. „Biodegradowalne hierarchiczne porowate stopy magnezu wytwarzane na drodze reakcji gazowo-eutektycznej w połączeniu z techniką infiltracji".

LITERATURA

[1] https://images.kruss-scientific.com/files/kruss-techdata--dsa30-en.pdf
[2] https://www.dataphysics-instruments.com/resources/Downloads/OCA_EN.pdf
[3] https://merazet.pl/wp-content/uploads/img/e0474c2c.pdf
[4] https://www.malvernpanalytical.com/en/assets/malvern%20panalytical%20-%20micromeritics%20-%20accupore%20brochure_tcm50-106178.pdf
[5] https://www.malvernpanalytical.com/en/products/product--range/autopore-v
[6] Yuan L., Yang J.: Water analogue validation of numerical model for fluid flow during slow shot phase in die casting process, International Journal of Cast Metals Research, 21(6), 2008, 401–407, DOI: 10.1179/136404608X370198.
[7] Staronka A., Holtzer M.: Podstawy fizykochemii procesów metalurgicznych i odlewniczych. Skrypt AGH nr 1251, Wyd. II uzupełnione, Kraków (1991).
[8] de Gennes P.-G., Brochard-Wyart F., Quéré D.: Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves. Springer, New York (2004).
[9] Wang X., Fu C., Zhang C., Qiu Z., Wang B.: A comprehensive review of wetting transition mechanism on the surfaces of microstructures from theory and testing methods, Materials, 15(14), 2022, 4747, DOI: https://doi.org/10.3390/ma15144747
[10] Karimdoost A., et al.: Thirty years of contact angles reveal universal design rules for wetting control, Scientific Reports, 2026, DOI: 10.1038/s41598-026-40965-x.
[11] Chowdhury E.H., Sohan M.S.H., Gonzalez-Valle C.U.: Understanding surface wettability: insights from experiments, molecular simulations, and first-principles theory, Nanoscale, 18(18), 2026, DOI: 10.1039/d5nr05460e.
[12] Bolysbek D., Uzbekaliyev K., Assilbekov B.: Rock wettability alteration induced by the injection of various fluids: A review, Applied Sciences, 14(19), 2024, 8663, DOI: 10.3390/app14198663.
[13] Baek S., Jeong S., Seo J., Lee S., Park S., Choi J., Jeong H., Sung Y.: Effects of Tube Radius and Surface Tension on Capillary Rise Dynamics of Water/Butanol Mixtures, Applied Sciences, 11(8), 2021, 3533, DOI: 10.3390/app11083533.
[14] Boduroglu S., Bashir R.: Review of Capillary Rise Experiments for Surface-Active Solutes in the Subsurface, Geotechnics, 2(3), 2022, 706–730, DOI: 10.3390/geotechnics2030034.
[15] Javed-Khan H., et al.: Interplay of capillarity and reactivity at rock/fluid interfaces, Advances in Colloid and Interface Science, 356, 2026, 103975, DOI: 10.1016/j.cis.2026.103975.
[16] Li P., et al.: Dynamic capillary effects in layered porous media: dependence on flow direction and displacement front stability, Journal of Hydrology, 2026, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2026.135730.
[17] Konopka K.: Novel Ceramic-Metal Composites with Metal Phase from Micro to Nanosize, Solid State Phenomena, 101–102, 2005, 139–142, DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.101-102.139.
[18] Léger, A., Weber, L., & Mortensen, A., 2015. Influence of the wetting angle on capillary forces in pressure infiltration. Acta Materialia, 91, 57-69, DOI: doi.org/10.1016/j.actamat.2015.03.002.
[19] Sobczak N.: Zwilżalność, struktura i właściwości granic rozdziału w układzie Al/Al.O., Kompozyty (Composites), 2003, R.3, nr 7, 301-312.
[20] Sobczak J.J., Wojciechowski A., Rudnik D.: Infiltracja ciśnieniowa w wytwarzaniu materiałów kompozytowych. Studium analityczno-literaturowe, Wyd. ITS, 2009, 194 s.
[21] Peddeti K., Sobczak N., Bigos A., Sobula S., Olejnik E., Biegun K., Kurtyka P., Zak K., Sobczak J.J.: Composite castings based on ferrous alloys reinforced by ceramic spatial structure, Materials Letters, 366, 2024, art. 136514.
[22] Lu Z., Zeng C., Zhang Y., Lu H.: Study of the pore size influence on infiltration of porous media considering capillary effect, Capillarity, 14(1), 2025, 1–12, DOI: 10.46690/capi.2025.01.01.

DOI: 10.15199/28.2026.5.2

Article reviewed. Received: 05.06.2026, accepted: 18.06.2026

Silicone pressure-sensitive adhesives modified by calcium silicate

Silikonowe kleje samoprzylepne modyfikowane krzemianem wapnia

ADRIAN K. ANTOSIK* **ORCID: 0000-0002-3954-6612**

West Pomeranian University of Technology in Szczecin, Faculty of Chemical Technology and Engineering, Department of Organic Chemical Technology and Polymer Materials, Piastów Ave. 42, 71-065 Szczecin, Poland

* e-mail: adriankrzysztofantosik@gmail.com

This study optimizes silicone pressure-sensitive adhesives (SiPSAs) by incorporating calcium silicate (CS) as a functional filler. Two grades (CS 400 and CS 1250) were blended into a solvent-borne silicone matrix at 0.1–3.0 wt.% using a peroxide crosslinker to fabricate self-adhesive tapes. The formulations were characterized by pot-life, adhesion, loop tack, cohesion, SAFT, and shrinkage testing. Modified samples experienced a viscosity increase, gelling after 7 days. Low filler loadings (0.1–0.5 wt.%) exerted a reinforcing effect, peaking peel adhesion at 12.10 N/25 mm (0.5 wt.% CS 400), while higher loadings reduced adhesion due to particle agglomeration. Crucially, calcium silicate preserved the matrix's excellent cohesive strength and thermal resistance (SAFT) across all concentrations. Furthermore, 3.0 wt.% CS 400 improved dimensional stability nearly 4-fold, reducing shrinkage from 0.75% to 0.18%. The finer CS 400 grade performed best, demonstrating that controlled CS modification yields high-performance, dimensionally stable SiPSA tapes.

Keywords: *calcium silicate, modification, surface properties, silicone pressure-sensitive adhesives*

W pracy zbadano silikonowe kleje wrażliwe na docisk (SiPSA) modyfikowane krzemianem wapnia (CS) jako napełniaczem. Dwie odmiany (CS 400 i CS 1250) wprowadzono do matrycy silikonowej w ilościach 0,1–3,0% wag. w celu wytworzenia taśm samoprzylepnych. Kompozycje oceniono pod kątem żywotności, adhezji, tacku, kohezji, SAFT i skurczu. Modyfikowane próbki żelowały po 7 dniach wskutek wzrostu lepkości. Niskie zawartości napełniacza (0,1–0,5% wag.) wykazały efekt wzmacniający, podnosząc adhezję do 12,10 N/25 mm (0,5% wag. CS 400), podczas gdy wyższe stężenia pogarszały parametry adhezyjne przez aglomerację cząstek. Dodatek CS we wszystkich stężeniach pozwolił zachować doskonałą kohezję i odporność termiczną (SAFT) matrycy. Ponadto dodatek 3,0% wag. CS 400 zmniejszył skurcz z 0,75% do 0,18%, poprawiając stabilność wymiarową blisko 4-krotnie. Napełniacz drobnocząsteczkowy (CS 400) okazał się najefektywniejszy, co potwierdza potencjał tej metody w produkcji stabilnych taśm SiPSA.

Słowa kluczowe: krzemian wapnia, modyfikacje, właściwości powierzchniowe, silikonowe kleje samoprzylepne

1. INTRODUCTION

Pressure-sensitive adhesives (PSAs) represent a versatile class of materials widely utilized across both industrial sectors and consumer households. Their broad adaptability allows for applications ranging from advanced biomedical engineering - such as wound care dressings requiring a precise balance of compliance, elasticity, and structural integrity to conform to human skin - to heavy-duty industrial bonding, where exceptional adhesion, robust cohesion, and resilience against harsh environmental conditions are paramount [1–2].

As a distinct category of polymer-based materials, PSAs maintain inherent tackiness at ambient temperatures, enabling them to form strong bonds with various substrates under minimal applied pressure via physical, non-covalent interactions. Unlike reactive or solvent-borne adhesive systems, PSAs are applied in solid form as pre-crosslinked films (frequently supported by a carrier) and do not depend on chemical curing, thermal melting, or solvent evaporation to achieve bond strength. To perform effectively, a PSA must exhibit a precise synergetic combination of high molecular mobility, strong internal (cohesive) strength, extended relaxation times, and long-term resistance to aging. The commercial self-adhesive market relies heavily on established raw materials, including acrylic copolymers, styrene-based block copolymers—such as styrene-isoprene-styrene (SIS) and styrene--butadiene architectures—styrene-butadiene rubbers, polyesters, natural rubber, and polysiloxanes. Over the past two decades, research has also increasingly focused on bio-based formulations derived from renewable resources as sustainable alternatives to traditional petrochemical-based feedstocks [3–7].

Among specialized high-performance adhesives, silicone--based formulations occupy a prominent position. These systems are composed of non-stoichiometric silicone elastomers with a low crosslinking density, maintaining the polymer network near its gelation point. Due to their outstanding adhesion to diverse substrate surfaces and robust internal cohesion, silicone PSAs are highly favored for critical, high-demanding applications. Furthermore, their characteristically low surface

tension promotes rapid polymer chain mobility at the interface, allowing the adhesive to wet irregular surfaces effectively and maximize the true contact area. An additional benefit of silicone adhesives is their clean, residue-free removal, which ensures effortless debonding without contaminating the substrate surface [8–12].

Calcium silicate, with the chemical formula $CaSiO_3$, is a versatile mineral with a unique structural matrix that provides it with high thermal stability, chemical inertness, and the ability to microreinforce structures in composites. The mentioned physicochemical properties allow this mineral to find wide, interdisciplinary applications in many key sectors of industry, medicine, and agriculture. In agrotechnology, it serves as an effective soil conditioner with a deacidifying effect, optimizing the structure of the substrate, while the bioavailable silicon it contains stimulates plant resistance to biotic and abiotic stress and strengthens cell walls, directly translating into improved quality and longer storage life of crops. In building materials engineering and ceramics, wollastonite is valued as a component of Portland cement clinker, refractory and insulating materials, and as a flux and phase stabilizer that reduces glaze defects. In the biomedical and dental sectors, it is used as a bioactive regenerative substrate and a component of endodontic bio-cements, capable of forming a hydroxyapatite layer. Its potential is further enhanced in the chemical and cosmetics industries, where it serves as a functional filler, sorbent, and rheological modifier for dispersion systems [13–16].

The objective of this study was to develop silicone pressure-sensitive adhesive (PSA) formulations modified with a calcium silicate filler to enhance their used properties. The resulting compositions were subsequently utilized to fabricate high-performance self-adhesive tapes for specialized applications. Since the incorporation of such fillers into silicone pressure-sensitive adhesives has not been previously documented in the literature, this work systematically investigates their viability and impact on PSA performance. To evaluate the influence of the filler on the adhesive matrix, the pot-life of the prepared formulations was monitored, and the mechanical performance of the resulting self-adhesive tapes was comprehensively characterized through adhesion, cohesion, tack, and shrinkage testing.

2. EXPERIMENTAL

2.1. MATERIALS

The pressure-sensitive adhesive (PSA) matrix utilized in this work was Dowsil Q2-7388 (Dow Corning, USA), a solvent-borne silicone formulation engineered for an optimal balance of adhesion and tack, elevated thermal stability (up to at least 260°C/500°F), and minimal volatile content to reduce oven-dust formation. Two grades of calcium silicate differing in particle fineness, designated as CS 400 and CS 1250 (Imerys, Paris, France), served as functional fillers – applications and properties information are shown in Table 1. The curing mechanism was driven by the addition of 2,4-dichlorobenzoyl peroxide (DClBPO) (Novichem Ltd., Chorzów, Poland) as the crosslinking agent.

2.2. PREPARATION OF PSA MODIFIED WITH CALCIUM SILICATE

The adhesive formulations were prepared by first blending the Q2-7388 silicone matrix with 1.5 wt.% of the DClBPO crosslinking agent (calculated relative to the dry polymer weight), yielding a homogeneous organic mixture with a 50 wt.% solid polymer content. Subsequently, the calcium silicate fillers were incorporated into the mixture under vigorous blending to ensure a uniform particulate dispersion. The filler loading was systematically varied at 0.1 wt.%, 0.5 wt.%, 1.0 wt.%, and 3.0 wt.% based on the total polymer mass, maintaining a processable compound viscosity.

The resulting modified adhesive was coated onto a 50 µm polyester carrier film at a constant deposition speed of 5 cm/s, targeting a dry coating weight of approximately 45 g/m². The coated films were passed through a heated air tunnel at 110°C for 10 minutes to induce solvent evaporation and crosslinking. Finally, the cured adhesive layer was protected by lamination with a 36 µm-thick polyester release liner.

Table 1. Application and properties of calcium silicate depending on the fineness
Tabela 1. Zastosowanie i właściwości krzemianu wapnia w zależności od rozdrobnienia

	CS 400	CS 1250
Type	Very fine / Ultra fine	Finely ground (400 mesh sieve)
Aspect Ratio	Usually around 3:1	Usually around 5:1
Key Physical Characteristics	Low binder requirement, high whiteness, excellent reinforcement	Excellent wear resistance, non-toxic, and abrasion-resistant
Applications	Advanced industrial coatings, metal primers, automotive finishes, plastics (reinforcement)	Architectural and powder coatings, improved coverage, talc/syenite replacement

2.3. METHODS

Pot-life determines the timeframe within which a freshly mixed adhesive remains workable for coating before experiencing a critical increase in viscosity (generally a two- to four-fold increase from the baseline). This evaluation is performed under ambient conditions and commences immediately upon blending the adhesive components.

Adhesion characterizes the interfacial forces and interactions establishing a bond between two distinct surfaces or phases. As a cornerstone of bonding efficiency, it was quantified via peel adhesion testing in accordance with the **FINAT FTM 1** standard (180° Peel Adhesion). The specimens were peeled at a constant crosshead speed of 300 mm/min [17].

Cohesion defines the internal structural strength of the bulk adhesive and is typically quantified through shear strength testing. This performance metric depends heavily on the adhesive film thickness, temperature, and the concentration of the crosslinking agent. Cohesive strength was measured using the **FINAT FTM 8** method (Resistance to Shear from a Standard Surface) to determine the adhesive's capacity to withstand static parallel shear stress [17].

Tests were conducted under both room temperature (23°C) and elevated temperature (70°C) conditions. Mechanistically, a 25 × 175 mm adhesive strip is applied to a stainless steel panel to create a defined 25 × 25 mm bonding area. A 1 kg weight is then suspended from the free end of the strip inside a climate chamber, and the time-to-failure (complete detachment) is logged automatically by electronic sensors.

Tack (commonly known as initial grab or instantaneous stickiness) represents the adhesive's ability to form an immediate bond upon minimal contact without external pressure. Tack properties were verified via the **FINAT FTM 9** protocol (Loop Tack Measurement) [17].

During this procedure, a 25 × 175 mm adhesive-coated specimen is formed into a loop (adhesive side facing outward) and secured in the upper grip of a tensile tester. A standard metal or glass plate (25 × 30 mm) is positioned horizontally in the lower grip. The instrument lowers the loop to achieve a 25 × 25 mm contact area with the plate and instantly reverses to separate the materials at 300 mm/min. The maximum force recorded during separation defines the tack value.

The **SAFT test (Shear Adhesion Failure Temperature)** was utilized to evaluate the thermal boundary limits of the adhesive. While utilizing an identical sample configuration to the static cohesion test (25 × 25 mm bonded area, 1 kg load), the specimens are exposed to a dynamic thermal ramp rather than a static temperature. The temperature was raised linearly from 23°C to 225°C at a constant heating rate of 1°C/min. The exact temperature at structural failure and the corresponding failure mode were documented. Each adhesive composition was evaluated in quadruplicate to ensure statistical reproducibility.

Shrinkage dimensional stability was investigated according to the **FINAT FTM 14** standard [14]. A 10 × 10 cm PVC film coated with the target adhesive is bonded to an aluminum substrate using a calibrated roller, followed by a 72-hour conditioning phase at 23°C. Post-conditioning, the film edges are trimmed flush with the plate, and an 8 cm crosswise incision is made directly in the center of the film.

The sample is subsequently aged in an oven at 70°C for 7 days. Material shrinkage is determined by monitoring the progressive opening (widening) of the central slits at specific intervals: 10 and 30 minutes; 1, 3, 8, and 24 hours; and daily from day 2 through day 7].

3. RESULTS AND DISCUSSION

Table 1 outlines the viscosity profiles of the adhesive formulations modified with the maximum loading of each filler. Upon the incorporation of the fillers, a time-dependent increase in viscosity was observed during storage, culminating in the gelation of all samples approximately 7 days post-preparation. This rheological behavior aligns with well-documented literature data regarding the modification of commercial silicone resins with various fillers, including silicone-based particulates. While the more finely divided filler yielded slightly lower viscosity values, these differences were insufficient to meaningfully alter the overall pot-life or processability of the compositions [12, 18-19].

Table 2 summarizes the adhesion and tack properties of the silicone pressure-sensitive adhesive tapes modified with calcium silicate. The incorporation of the filler significantly altered the mechanical performance of the adhesive layer relative to the neat polymer control (0.0 wt.%, exhibiting an adhesion of 10.90 N/25 mm and a tack of 9.18 N). At low filler loadings

Table 2. Influence on calcium silicate high content on viscosity of Si-PSA
Tabela 2. Wpływ dużej zawartości krzemianu wapnia na lepkość Si-PSA

Filler content [% by mass]	Viscosity [Pa·s]					
	1 day	2 days	3 days	5 days	7 days	10 days
CS 400						
3.0	15.3	16.5	17.9	20.0	23.0	gel
CS 1250						
3.0	13.2	13.5	15.1	17.3	21.2	gel

Table 3. Adhesion and tack of prepared silicon pressure-sensitive adhesive compositions with different filler content
Tabela 3. Adhezja i kleistość przygotowanych kompozycji samoprzylepnych klejów silikonowych o różnej zawartości wypełniacza

Filler content [% by mass]	Adhesion [N/25 mm]	Tack [N]
0.0	10.90	9.18
CS 400		
0.1	12.00	10.65
0.5	12.10	9.89
1.0	9.77	8.96
3.0	9.89	8.49
CS 1250		
0.1	11.85	9.06
0.5	11.20	9.13
1.0	10.68	9.23
3.0	10.30	6.83

Table 4. Thermal resistance and cohesion of prepared silicon pressure-sensitive adhesive compositions with different filler content
Tabela 4. Odporność termiczna i kohezja przygotowanych kompozycji samoprzylepnych klejów silikonowych z różną zawartością wypełniacza

Filler content, % by mass	Measurement test		
	Cohesion [h]		SAFT [°C]
	20°C	70°C	
0.0	>72	>72	>225
CS 400			
0.1	>72	>72	>225
0.5	>72	>72	>225
1.0	>72	>72	>225
3.0	>72	>72	>225
CS 1250			
0.1	>72	>72	>225
0.5	>72	>72	>225
1.0	>72	>72	>225
3.0	>72	>72	>225

(0.1–0.5 wt.%), a reinforcing effect was observed, leading to an increase in adhesion – peaking at 12.10 N/25 mm for the 0.5 wt.% CS 400 formulation – accompanied by a slight enhancement or stabilization of tack. Conversely, higher filler loadings (1.0–3.0 wt.%) induced a substantial deterioration in these parameters. At a concentration of 3.0 wt.%, adhesion fell below the baseline reference, dropping to 9.89 N/25 mm for CS 400 and 10.30 N/25 mm for CS 1250. Tack performance followed a similar downward trend, reaching its minimum at 3.0 wt.% for CS 1250 (6.83 N versus the initial 9.18 N). This sharp decline indicates that an excess of solid particles at the adhesive interface impairs the polymer's ability to achieve instantaneous wet-out and establish immediate contact with the substrate. Furthermore, this detrimental effect can be attributed to filler agglomeration, which disrupts the continuity of the adhesive matrix. However, given that these reductions remain relatively moderate, the behavior may also reflect a characteristic shift in the adhesion-cohesion balance in favor of enhanced cohesive strength [19–21].

Table 3 summarizes the cohesive properties evaluated at both ambient and elevated temperatures, alongside the results from the SAFT (Shear Adhesion Failure Temperature) test, which defines the thermal boundary limits of the modified formulations. Remarkably, all investigated specimens – irrespective of the filler grade (CS 400 vs. CS 1250) or loading level (ranging from 0.0 to 3.0 wt.%) – demonstrated identical, maximum-tier cohesive strength and thermal resistance, with no performance degradation observed. The incorporation of calcium silicate within this concentration range preserved the outstanding thermal stability inherent to the parent silicone matrix. This exceptional retention of performance indicates excellent compatibility between the inorganic filler and the modified silicone resin network [12, 22].

The introduction of calcium silicate (in the CS 400 and CS 1250 varieties) into the structure of silicone pressure-sensitive adhesives (SiPSA) caused a clear, concentration-dependent reduction in their linear shrinkage as a function of time, characterized by nonlinear kinetics with a rapid increase in the first 24 hours and a tendency towards dimensional stabilization between the 6th and 7th day of measurement (Table 4). The pure polymer matrix (0.0% wt. filler) showed the highest final shrinkage at the level of 0.75%, while the implementation of an even minimal amount of calcium silicate (0.1% wt.) allowed for a dramatic reduction of this parameter to 0.25% for CS 400 and 0.32% for CS 1250. A further, monotonic decrease in shrinkage values progressed with increasing composite filling, reaching an optimum for a concentration of 3.0 wt.%, where the final values were only 0.18% (CS 400) and 0.23% (CS 1250), respectively, representing a nearly 3– to 4-fold improvement in dimensional stability compared to the control sample. Comparatively, the CS 400 calcium silicate demonstrated systematically higher structural efficiency across the entire spectrum of tested concentrations and time intervals than the CS 1250 variety. This phenomenon should be interpreted as a stronger restriction of the segmental mobility of siloxane chains and a more effective blocking of internal stress relaxation, which most likely

Table 5. Shrinkage of silicone pressure-sensitive adhesives with various calcium silicate content
Tabela 5. Skurcz klejów silikonowych samoprzylepnych o różnej zawartości krzemianu wapnia

Time / Filler content, % by mass	10 min	30 min	1 h	3 h	8 h	24 h	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	7 days
0.0	0.16	0.19	0.27	0.36	0.4	0.43	0.51	0.58	0.65	0.71	0.75	0.75
CS 400												
0.1	0.08	0.08	0.09	0.11	0.14	0.16	0.18	0.20	0.21	0.22	0.25	0.25
0.5	0.07	0.07	0.08	0.10	0.13	0.15	0.17	0.19	0.22	0.23	0.24	0.24
1.0	0.05	0.06	0.08	0.09	0.10	0.11	0.14	0.16	0.18	0.20	0.20	0.20
3.0	0.04	0.05	0.07	0.08	0.10	0.10	0.11	0.14	0.16	0.18	0.18	0.18
CS 1250												
0.1	0.11	0.12	0.13	0.15	0.18	0.20	0.22	0.26	0.28	0.30	0.32	0.32
0.5	0.09	0.10	0.11	0.13	0.15	0.16	0.20	0.24	0.27	0.30	0.30	0.30
1.0	0.07	0.07	0.08	0.11	0.14	0.15	0.16	0.18	0.22	0.24	0.25	0.25
3.0	0.05	0.05	0.06	0.10	0.12	0.13	0.14	0.16	0.20	0.21	0.23	0.23

results from the greater development of the interfacial surface (smaller particle size or larger specific surface area) of the CS 400 variety, which determines a denser network of interactions at the polymer-filler interface. In all cases, the addition of filler resulted in reduced shrinkage [12, 23–24].

4. CONCLUSIONS

In summary, the introduction of structural calcium silicate varieties into SiPSA matrices provides an effective method for optimizing their dimensional stability without compromising the thermal stability and cohesive strength of the composites. Strict control of the filler degree remains a key factor determining the applicability of the developed systems. While critically limiting linear shrinkage and maximizing adhesion are achieved at low filler concentrations (0.1–0.5 wt.%), further increasing the dispersed phase content (up to 3.0 wt.%) induces unfavorable rheological changes (gelation kinetics) and a decrease in adhesion parameters due to agglomeration effects. Comparatively, the finer-fine filler (CS 400) exhibits better structural performance than the CS 1250 variety, which results from a denser network of interactions at the polymer-filler interface and more effective inhibition of internal stress relaxation.

FUNDING

This research was funded by the National Center for Research and Development (NCBiR) as part of the LIDER initiative. Project number LIDER/9/0028/L-11/19/NCBR/2020.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank Taconic Polska Sp. z o.o. for its help in obtaining a prototype of adhesive tape on an industrial scale. In addition, thanks are also due to Dolpap Ltd. (Chojnów, Poland) for providing fluorosiliconized PET film used as a protective layer.

REFERENCES

[1] Licbarski A, Bartkowiak M, Czech Z. Influence of Selected Crosslinking Agents and Selected Unsaturated Copolymerizable Photoinitiators Referring to the Shrinkage Resistance of Solvent-Based Acrylic Pressure-Sensitive Adhesives. Polymers (Basel). 2022;14. https://doi.org/10.3390/polym14235190.
[2] Vendamme R, Schüwer N, Eevers W. Recent synthetic approaches and emerging bio-inspired strategies for the development of sustainable pressure-sensitive adhesives derived from renewable building blocks. J Appl Polym Sci 2014;131. https://doi.org/10.1002/app.40669.
[3] Dhawale P V., Vineeth SK, Gadhave R V., Fatima M. J. J, Supekar MV, Thakur VK, et al. Tannin as a renewable raw material for adhesive applications: a review. Mater Adv 2022;3:3365–88. https://doi.org/10.1039/D1MA00841B.
[4] Fitzgerald DM, Colson YL, Grinstaff MW. Synthetic pressure sensitive adhesives for biomedical applications. Progress in polymer science, 2023;142:101692. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2023.101692.
[5] Feldstein MM, Siegel RA. Molecular and nanoscale factors governing pressure-sensitive adhesion strength of viscoelastic

polymers. J Polym Sci Part B Polym Phys 2012;50:739–72. https://doi.org/10.1002/polb.23065.
[6] Pradeep SV, Kandasubramanian B, Sidharth S. A review on recent trends in bio-based pressure sensitive adhesives. The Journal of Adhesion, 2023;99:2145-2166. https://doi.org/10.1080/00218464.2023.2176761.
[7] Creton C. Pressure-Sensitive Adhesives: An Introductory Course. MRS Bull 2003;28:434–9. https://doi.org/10.1557/mrs2003.124.
[8] Mazurek P, Vudayagiri S, Skov AL. How to tailor flexible silicone elastomers with mechanical integrity: a tutorial review. Chem Soc Rev 2019;48:1448–64. https://doi.org/10.1039/C8CS00963E.
[9] Zhang G, Tu Y, Wang H, Huang Y, Shi J, Jiang S, Zhou Y, Longbo Q, Tang Y, Wang C, Wu K. (2026). Silicone release films with enhanced delamination strength via rigid–flexible synergistic regulation based on MQ–PDMS modifiers. Reactive and Functional Polymers, 106739. https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2026.106739.
[10] Chiaula V, Mazurek P, Eiler J, Nielsen AC, Skov AL. Glycerol-silicone adhesives with excellent fluid handling and mechanical properties for advanced wound care applications. Int J Adhes Adhes 2020;102:102667. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102667.
[11] Bhattacharyya M., Haridas CPA., Selvan TM., Mondal T. Synthesis of organic-silicone hybrid elastomer-based pressure-sensitive adhesive for triboelectric nanogenerator. Journal of Macromolecular Science, Part A, 2025;62:1006-1015. https://doi.org/10.1080/10601325.2025.2568986.
[12] Antosik AK, Makuch E, Gziut K. Influence of modified attapulgite on silicone pressure-sensitive adhesives properties. J Polym Res 2022;29:135. https://doi.org/10.1007/s10965-022-02981-z.
[13] Richardson IG. The calcium silicate hydrates. Cement and concrete research, 2008;38:137-158. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.11.005.
[14] Lothenbach B, Nonat A. Calcium silicate hydrates: Solid and liquid phase composition. Cement and Concrete Research, 2015;78:57-70. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.019.
[15] Tang S, Wang Y, Geng Z, Xu X, Yu WAH, Chen J. Structure, fractality, mechanics and durability of calcium silicate hydrates. Fractal and Fractional, 2021;5:47. https://doi.org/10.3390/fractalfract5020047.
[16] Alizadeh R, Beaudoin, JJ, Raki L. Mechanical properties of calcium silicate hydrates. Materials and Structures, 2011:44:13-28. https://doi.org/10.1617/s11527-010-9605-9.
[17] FINAT. Technical Handbook Test Methods. 10th ed. The Hague, The Netherlands: Fédération Internationale des Fabricants et Transformateurs d'Adhesifs et Thermocollants sur Papiers et Autres Support; 2019.
[18] Tang J, Bai Y, Chen X. An investigation of inorganic fillers on rheological properties and tensile strength of epoxy repair coating using mixture design method. Constr Build Mater 2021;307:124866. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124866.
[19] Zhang B, Chang Z, Li J, Li X, Kan Y, Gao Z. Effect of kaolin content on the performances of kaolin-hybridized soybean meal-based adhesives for wood composites. Compos Part B Eng 2019;173:106919. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106919.
[20] Czech Z, Kowalczyk A, Pełech R, Wróbel RJ, Shao L, Bai Y, et al. Using of carbon nanotubes and nano carbon black for electrical conductivity adjustment of pressure-sensitive adhesives. Int J Adhes Adhes 2012;36:20–4. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2012.04.004.
[21] Czech Z, Arabczyk W, Hełminiak A, Kowalczyk A. Influence of iron carbide filler in carbon matrix on the adhesive properties of acrylic pressure-sensitive adhesives. Int J Adhes Adhes 2013;40:210–4. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2012.07.010.
[22] Salasinska K, Barczewski M, Górny R, Kloziński A. Evaluation of highly filled epoxy composites modified with walnut shell waste filler. Polym Bull 2018;75:2511–28. https://doi.org/10.1007/s00289-017-2163-3.
[23] Salasinska K, Polka M, Gloc M, Ryszkowska J. Natural fiber composites: the effect of the kind and content of filler on the dimensional and fire stability of polyolefin-based composites. Polimery 2016;61:255–65. https://doi.org/10.14314/polimery.2016.255.
[24] Wolf C, Angellier-Coussy H, Gontard N, Doghieri F, Guillard V. How the shape of fillers affects the barrier properties of polymer/non-porous particles nanocomposites: A review. J Memb Sci 2018;556:393–418. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.03.085.

DOI: 10.15199/62.2024.2.4

Przedruk z czasopisma "Przemysł Chemiczny" nr 2/2024, str. 241–250

Reusing and recycling of composite wind turbine blades. A review of current practices and prospects. Part 3. Various proposalsoffered by small and middle companies

Ponowne wykorzystanie i recykling kompozytowych łopat turbin wiatrowych. Przegląd obecnych praktyk i perspektywy. Część III. Różne propozycje oferowane przez małe i średnie firmy

ANDRZEJ BŁĘDZKI [1,*] ORCID: 0000-0003-3579-7534
MAGDALENA URBANIAK[1] ORCID: 0000-0002-0701-6908
ANDRZEJ ADAMCIO[2]
MARCIN SOBCZYK[2]
SZYMON DEMSKI[3] ORCID: 0000-0001-7355-407X
ANNA BOCZKOWSKA[3] ORCID: 0000-0002-3694-1342
HOLGER SEIDLITZ[4,5] ORCID: 0000-0003-0024-1624
MATHIAS KÖHLER[5]

[1] Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin, Polska;
[2] Anmet, Szprotawa, Polska;
[3] Politechnika Warszawska, Polska;
[4] Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg, Niemcy;
[5] Fraunhofer Institute for Applied Polymer Research IAP, Wildau, Niemcy
*e-mail: andrzej.bledzki@zut.edu.pl

Przedstawiono sposoby ponownego wykorzystania łopat turbin wiatrowych przez małe i średnie firmy (m.in. polską firmę Anmet) oraz dokonano przeglądu różnych propozycji recyklingu. Zaprezentowano nowe możliwości systemów rozdrabniających oraz obiekty architektury, budownictwa drogowego, a także bloki geotechniczne, platformy pływające i wieże widokowe. Uwzględniono także kompozytowe płyty wiórowe oraz odzysk włókien węglowych w procesie pirolizy odpadów.

Keywords: *kompozyty polimerowe, łopaty turbin wiatrowych, globalne projekty dotyczące recyklingu, potencjalne trendy rozwojowe, praktyczny odzysk i ponowne wykorzystanie, włókna węglowe z recyklingu*

A review, with 32 refs., of various new proposals for recycling and re-using of wind turbine blades by small companies (including the Polish Anmet company). New projects on shredding blades as well as on architecture objects, road construction, geotechn. blocks, floating plat-forms and observation towers were presented. Prodn. of composite chipboard panels and recovery of carbon fibers by waste pyrolysis were also included.

Słowa kluczowe: polymer composites, wind turbine blades, global recycling projects, potential development trends, practical recovery and reuse, recycled carbon fibers

1. WSTĘP

W recyklingu kompozytowych łopat turbin wiatrowych ważną alternatywą są innowacyjne rozwiązania w zakresie zmiany wykorzystania całych łopat turbin wiatrowych [1]. Continuum Composite Recycling (Dania) ponownie wykorzystuje kompozyty uzyskane z łopat turbin wiatrowych, stosując technologię transformacji neutralnej uwzględniającą emisję CO_2. Firma wykorzystuje głównie części z włókna szklanego/poliuretanu, które są mechanicznie przekształcane w surowe, podstawowe elementy. Następnie przygotowywane są unikatowe mieszanki i produkowane są panele o dużej gęstości. Panele kompozytowe mogą mieć zastosowanie w budownictwie lub mogą być formowane w procesie prasowania w produkty codziennego użytku, takie jak fasady, drzwi przemysłowe i blaty kuchenne [2].

Enel Green Power (Rzym, Włochy) i Energy Vault (Lugano, Szwajcaria) oferują alternatywne metody wykorzystania łopat turbin wiatrowych. Jednym z proponowanych rozwiązań jest wytwarzanie

1. INTRODUCTION

Another alternative is innovative repurposing solutions of whole wind turbine blades1). Continuum Composite Recycling (Denmark) reuses composites obtained from wind turbine blades via a CO_2-neutral transformation technology. The company works mainly with glass fiber/polyurethane parts, which are mechanically transformed into raw, basic constituents. Afterwards, unique blends are prepared, and high-density panels are manufactured. Composite panels can be used in the construction industry or formed into day-to-day products such as facades, industrial doors and kitchen countertops through the pressing process [2].

Enel Green Power (Rome, Italy) and Energy Vault (Lugano, Switzerland) offer alternative ways to utilize wind turbine blades. The first proposed solution is to make products from shredded blades for the construction industry or furniture ma-

wyrobów z rozdrobnionych łopat dla przemysłu budowlanego lub produkcji mebli. Innym, bardziej innowacyjnym rozwiązaniem jest produkcja bloków kompozytowych z recyklatu w ramach systemu EVx (rozwiązanie magazynowania energii opracowane przez Energy Vault). System EVx opiera się na wykorzystaniu siły grawitacji i ruchu wody w celu magazynowania i odprowadzania energii elektrycznej [3].

Naukowcy z Uniwersytetu Nauk Stosowanych w Windesheim (Zwolle, Niderlandy) we współpracy z producentem żywicy AOC (Zwolle, Niderlandy) i specjalistą ds. gospodarki odpadami SUEZ (Paryż, Francja) opracowali inną metodę ponownego wykorzystania kompozytów ze zużytych łopat turbin wiatrowych EoL. Opracowana metoda nosi nazwę techniki *push-pultrusion*. W tej metodzie paski lub płatki powstałe w wyniku cięcia łopat turbin wiatrowych wykorzystuje się w nowych wyrobach, takich jak ściany oporowe, meble, belki prowadzące i maty dźwigowe. Opracowana technika wykorzystuje do 70% materiału pochodzącego z recyklingu, charakteryzuje się niskim śladem węglowym i nadaje się do wdrożenia przemysłowego [1]. Sieć Re-Wind Network, w skład której wchodzą University College Cork, Queens University Belfast, Georgia Tech i Munster Technological University, zbudowała kładkę dla pieszych, wykorzystując jako jej dźwigary dwie przetworzone łopaty wiatrowe LM 13.4 firmy Nordex (Rockstock, Niemcy). Kładkę o rozpiętości 6 m i szerokości 2 m, zainstalowano w kamieniołomie w Draperstown w Magherafelt w Irlandii Północnej [4].

Inna koncepcja przygotowana przez Re-Wind opisuje budowę 8,5-metrowej kładki dla pieszych w Cork (Irlandia Północna). Jeszcze innym przykładem jest koncepcja wykorzystania zużytych łopat turbin wiatrowych do budowy konstrukcji mostowej, opracowana w ramach pracy magisterskiej Johanny Kullberg i Davida Nygrena na Politechnice Chalmers w Göteborgu (Szwecja). Zakładała ona zastosowanie odcinków dwóch łopat o długości 20 m, ułożonych równolegle obok siebie nad przeszkodą, ale niepołączonych konstrukcyjnie, tj. pracujących jako niezależne belki [5].

2. PONOWNE WYKORZYSTANIE I RÓŻNE PROPOZYCJE RECYKLINGU ŁOPAT TURBIN WIATROWYCH FIRMY ANMET

Przedsiębiorstwo Wielobranżowe Anmet Andrzej Adamcio ze Szprotawy (Polska) powstało w 1999 r. jako firma zajmująca się recyklingiem metali. Dostarcza ona kompleksowe rozwiązania dla właścicieli i operatorów farm wiatrowych w zakresie cięcia, transportu i recyklingu łopat, a od 2015 r. firma rozszerzyła swoje usługi o recykling wyeksploatowanych łopat turbin wiatrowych. Firma Anmet opracowała także technologię odzyskiwania włókien węglowych z łopat turbin wiatrowych i pracuje nad nowymi materiałami i produktami wykonanymi z kompozytów po ich recyklingu [6].

W toku działań firma Anmet pozyskała nowych partnerów, którzy pomagają dalej rozwijać się w zakresie i jakości działalności firmy. Najpierw, w 2019 r. powstała we współpracy z niemieckim partnerem marka *Wings for Living* [7], która zajmuje się promowaniem i dystrybucją na cały świat wykonanych przez firmę Anmet mebli oraz wyrobów z recyklingu łopat. Od 2020 r. dołączyła także grupa GP Renewables [8], która wspiera wiedzą oraz pomaga w budowaniu

nufacturing. The other, more innovative, solution is to manufacture composite blocks as a part of the EVx system, a solution for storing energy developed by Energy Vault. The EVx system relies on gravity's power and water's movement to store and discharge electricity, with composite blocks manufactured from recyclate [3].

The researchers from Windesheim University of Applied Sciences (Zwolle, Netherlands) in partnership with resin manufacturer AOC (Zwolle, Netherlands) and waste management specialist SUEZ (Paris, France), developed another repurposing method for EoL composite wind turbine blades. The developed method is called the "push-pultru-sion technique". In this method, strips or flakes obtained by cutting wind turbine blades are manufactured in new components, e.g. a retaining wall, furniture, guiding beams and crane mats. The developed technique uses up to 70% of recycled material, has a low carbon footprint and is ready for industrial implementation [1].

Re-Wind Network, comprising the University College Cork, Queens University Belfast, Georgia Tech and Munster Technological University, constructed a foot-bridge using two repurposed LM 13.4 wind blades from Nordex (Rockstock, Germany) as bridge girders. The Blade Bridge, with a span of 6 m and a 2 m width, was situated in a quarry in Draperstown, Magherafelt in Northern Ireland [4].

Another conception prepared by Re-Wind describes the construction of an 8.5-m footbridge in Cork (North Ireland). Another example is a concept for using used wind turbine propellers to build a bridge structure developed as part of the master's thesis of Johanna Kullberg and David Nygren at Chalmers University of Technology in Gothenburg (Sweden). It assumed the use of sections of two propellers 20 m long, arranged in parallel side by side over an obstacle, but not structurally connected, i.e. working as independent beams [5].

2. VARIOUS PROPOSAL FOR RECYCLING AND REUSING OF WIND TURBINE BLADES BY ANMET FIRM

Przedsiębiorstwo Wielobranżowe Anmet Andrzej Adamcio from Szprotawa (Poland) was set up in 1999 as a company dealing with metal recycling. It provides complex solutions for owners and operators of wind turbine farms as far as blade shredding, transport and recycling is concerned. Since 2015, the company has widened its range of services to include recycling of used-up wind turbine blades. Anmet has developed its own technology of recovering carbon fiber from turbine blades and is investigating new materials and products made from recycled composites [6].

During its operation, Anmet gained new partners who help the company to further develop and to maintain its quality. In 2019, in cooperation with a German partner, the trademark Wings For Living [7] was created. It is responsible for the promotion and global distribution of furniture and other products made by Anmet from recycled blades. GP Renewables [8] followed suit in 2020. It supports the mother company

relacji biznesowych z klientami. Z końcem 2022 r. stworzono także wspólnie markę *GP Reblade* [9], aby jeszcze skuteczniej docierać do klientów i świadczyć usługi na jak najwyższym poziomie.

Firma Anmet została laureatem Polsko-Niemieckiej Nagrody Gospodarczej w 2021 r., zorganizowanej przez Polsko-Niemiecką Izbę Przemysłowo-Handlową (AHK Polska) w Warszawie. Wspólnie z niemieckim partnerem Anmet uruchomił projekt ponownego wykorzystania i rynkowego recyklingu łopat turbin wiatrowych. W ten sposób powstało *Wings for Living*, które sprzedaje meble z łopat do użytku zewnętrznego. Designerskie meble znalazły już swoich pierwszych klientów i cieszą się coraz większą popularnością [10].

Projekt *DecomTools* rozpoczęty w 2018 r. (Interreg Region Morza Północnego – nr projektu 20180305091606) obejmował fazę likwidacji morskich farm wiatrowych. Przedstawiono trzy koncepcje dla wycofanych z eksploatacji łopat: procedura w piecach cementowych, polegająca na pirolizie i polegająca na zmianie przeznaczenia, przy czym wszystkie trzy koncepcje miały swoje specyficzne zalety i wady [11].

3. CIĘCIE ŁOPAT

Cięcie łopat prowadzone jest za pomocą linowej piły ramowej, która mocowana jest bezpośrednio do ramienia koparki gąsienicowej o wadze 18–30 t. Mocowanie odbywa się przy użyciu uniwersalnych złączy odpowiednich dla danego typu maszyny. Lina diamentowa posiada specjalnie dobrane koraliki z ostrzami o odpowiednim kształcie i wymiarach. Konstrukcja piły umożliwia cięcie łopat o średnicy w piaście do 4 m.

Cięcie odbywa się na mokro z natryskiem wody. Na ogół wykonuje się 2–4 cięcia, tak aby uzyskać odcinki o długości do 12 m. Taka długość umożliwia transport łopat za pomocą zwykłych samochodów typu ciągnik siodłowy z naczepą. Podczas jednego cięcia powstaje 0,5–3 kg wiórów kompozytowych. Aby ograniczyć zapylenie środowiska, wióry wychwytywane są przez rozpylaną wodę i trafiają w postaci zawiesiny na rozłożoną matę filtracyjną, gdzie są osadzane. Średnica wiórów kompozytowych waha się w zakresie 0,1–5 mm. Na jedno cięcie używa się średnio 1 m^2 włókniny. Włókninę zabiera się wraz z pociętymi łopatami i po wysuszeniu oddaje się do utylizacji. Włóknina stanowi w 80% materiał z recyklingu. Na jedno cięcie zużywa się 20–50 L wody. W projektowaniu jest obecnie system umożliwiający używanie wody w obiegu zamknię tym (odzysk ok. 80% wody). System będzie się składał z gumowego basenu umieszczanego w miejscu cięcia pod łopatą, ekranów elastycznych osłaniających przed rozpryskiem wody, zbiornika z pompą oraz systemu filtracyjnego. Cały system jest konstrukcją autorską Przedsiębiorstwa Wielobranżowego Anmet Andrzej Adamcio ze Szprotawy (Polska). Użycie tego systemu będzie umożliwiać cięcie łopat w miejscach o najbardziej rygorystycznych wymogach ochrony środowiska.

4. ARCHITEKTURA

Jedną z metod recyklingu łopat jest wykonywanie z nich tzw. małej architektury, czyli różnego rodzaju mebli z przeznaczeniem do użytku zarówno zewnętrznego, jak i wewnątrz pomieszczeń. Do małej architektury zaliczają się: ławki, leżaki, huśtawki, stoliki,

with its expertise and ability to build business relationships with customers. At the end of 2022, another trade mark GP Reblade [9] was created to even more successfully reach clients and serve them at the highest level.

Anmet was awarded by Polish-German Chamber of Industry and Commerce (AHK Polska) in Warsaw, in 2021. Together with a German partner, Anmet implemented a project on how to recycle wind turbine blades. This is how Wings for Living was created. It sells outdoor furniture made with recycled blades. Designer furniture is getting more and more popular with the customers [10].

As DecomTools project started in 2018 (Interreg North Sea Region – Project Number 20180305091606) it had a focus on decommissioning phase of offshore wind farms. It provided three circular concepts for decommissioned blades: cement kiln route, pyrolysis, and repurposing, with all three having their special pros and cons [11].

3. SHREDDING BLADES

Blades are cut into shreds with a frame saw, which is mounted directly on the arm of a tracked excavator (mass 18–30 t). The saw is connected to the excavator with universal connectors, specific for the machine. The diamond wire has specially selected beads with cutting elements of an appropriate shape and size. The construction of the saw enables cutting blades with the diameter at the hub of 4 m.

The cutting process occurs under water flow. Typically, from 2 to 4 incisions are made to prepare components with the length of up to 12 m. This length allows blades to be transported with universal articulated trucks with a trailer. Between 0.5 and 3 kg of composite chip is produced during one cut. Chip is captured by the sprayed water and goes as a mixture on a filtration mat. The diameter of compo-site chip is between 0.1 and 5 mm. An average of 1 m2 of non-woven fabric is used for one incision. The non-woven fabric is collected together with blades and after drying it is utilized. 80% of the fabric is made of recycled materials. Between 20 and 50 L of water are used for one incision. At the design stage there is a circular system that uses water in a closed circuit (recovery of approximately 80% of water). The system will consist of: a rubber basin placed under the blade during cutting, flexible screens that prevent water from splashing, a tank with a pump and a filtration system. The whole system is an original invention of Anmet from Szprotawa (Poland). The system will enable to cut blades in locations with the most rigorous standards of environmental protection.

4. ARCHITECTURE

Small architecture is a method of recycling blades, in which furniture for indoor or outdoor use is made. Small architecture includes benches, deck chairs, swings, tables, bicycle sheds, bus stops, sheds with solar panels, plant pots, retaining walls, bicycle stands, sculptures, e.g. a fish or a giraffe. All of these objects con-

wiaty rowerowe, przystanki autobusowe, wiaty z fotowoltaiką, donice, murki oporowe, stojaki rowerowe, rzeźby artstystyczne (np. ryba, żyrafa). Wyroby te wykonane są co najmniej w 80% z materiału łopat. Uzupełnieniem takich konstrukcji są deski kompozytowe wykonane z materiałów z recyklingu odzieży lub drewna. Używane są też tu nieduże ilości stalowych elementów w postaci złączy śrubowych, rur, płaskowników, profili. W procesie produkcji używa się niewielkich ilości farb i żywic w celu naprawy powierzchni i nadania im estetycznego wyglądu. Trwałość elementów architektonicznych szacuje się zwykle na kilkadziesiąt lat. Konstrukcje powstają na podstawie projektów własnych. W ramach współpracy z Uniwersytetem Zielonogórskiem stworzono koncepcje dużych form artystycznych składających się z kilkudziesięciu łopat. Koncepcje te mają odgrywać rolę atrakcji turystycznych, szczególnie na terenach z niewielką szatą roślinną oraz na terenach pustynnych. Powierzchnie boczne łopat mogą posłużyć do zamocowania paneli fotowoltaicznych. W jednej z tych koncepcji (*WINGS*) do jej budowy wykorzystuje się 20 i więcej łopat w całości i bezodpadowo.

Szesnaście wzorów użytkowych „Mała architektura z łopat elektrowni wiatrowych" jest zastrzeżonych w EUIPO (Urząd Unii Europejskiej ds. Własności Intelektualnej), nr 006996617. Odpady powstające przy produkcji małej architektury oddawane są do recyklingu lub służą do produkcji paliwa alternatywnego.

Przykłady obiektów małej architektury z łopat elektrowni wiatrowych przedstawiono na rys. 1, obiektów inżynieryjnych na rys. 2–4 i 6–9, a obiektów artystycznych na rys. 5.

Designerskie meble znalazły już swoich pierwszych klientów i cieszą się coraz większą popularnością. Sprzedano ponad 350 mebli, które trafiły do Polski, Niemiec, Niderlandów, Grecji, Anglii, Francji, Czech oraz Austrii i Szwajcarii. Ceny można znaleźć u dystrybutora.

Podczas WindEurope Annual Event 2022 w Bilbao (5–7 kwietnia 2022 r.) firma Anmet prezentowała swoje meble na stanowisku promocyjnym oraz wzięła udział w panelu, podczas którego informowała o tych rozwiązaniach [12].

Firma Anmet wraz z Instytutem Sztuk Wizualnych Uniwersytetu Zielonogórskiego przedstawiła meble, które wcześniej zaprojektowały studentki tej uczelni na wystawę czasową Województwa Lubuskiego w ramach stoiska Polski na EXPO Dubai 2020 [13, 14], a także podczas 4 Desing Days w dniach 26–29 stycznia 2023 r. w Katowicach [15].

Firma Anmet otrzymała wyróżnienie jako innowacyjne mikroprzedsiębiorstwo za najciekawsze innowacje wprowadzone na rynek w latach 2019–2021 podczas gali Kongresu Gospodarczego Marszałka Województwa Lubuskiego, która odbyła się 13 października 2022 r. Ponadto firma Anmet otrzymała nagrodę za współpracę międzynarodową, dzięki wygenerowaniu innowacji procesowych i produktowych przy odzyskiwaniu włókien węglowych oraz powtórnym wykorzystaniu łopat turbin wiatrowych. W wyniku wykorzystania materiałów powstały m.in. nowy rodzaj płyty OSB z udziałem mielonych łopat,

tain a minimum of 80% material from the blades. The structure is complemented with composite planks made from recycled clothing or wood. A small number of steel elements, such as bolts, pipes, flat bars and profiles, is also used in the structure. A small amount of paints and resins are used to repair surface and for the structure to look nice. The life of the product is estimated to be several dozen years. The structures are made according to our own design. Some concepts consisting of several dozen blades were created in cooperation with the University of Zielona Góra. The designs are supposed to play the role of tourist attractions, particularly in terrain with little vegetation and in dessert. The side planes of blades can be used to mount photovoltaic panels. In the "WINGS" concept, 20 and more blades are used as whole elements, without any waste.

Sixteen designs in the category "Small architecture from wind turbine blades" are patented in EUIPO (European Union Intellectual Property Office) – number 006996617. The waste generated during the production of small architecture is fur-ther recycled and used to produce an alternative fuel.

Some examples of small architecture built from wind tur-bine blades are shown in Fig. 1a and 1b, some engineering objects are presented in Fig. 2–4 and 6–9 and objects of art can be seen in Fig. 5.

Designer furniture has found its first customers and is getting to be more popular. 350 furniture units have been sold in Poland, Germany, the Netherlands, Greece, England, France, Czech Republic, Austria and Switzerland. Prices can be found at the distributors'.

During the annual event of WindEurope 2022 in Bilbao (5–7 April 2022), Anmet presented its furniture at a promotion outlet and participated in a panel, where it talked about its solutions [12].

Anmet, together with the Institute of Visual Arts from the University of Zielona Góra, presented furniture designed by students in the university's competition, as part of Poland's contribution to EXPO Dubai 2020 [13, 14] and during 4 Design Days, 26–29 January 2023 in Katowice [15].

Anmet was awarded as an innovative micro-company for the most interesting innovation implemented 2019–2021, at the gala evening of Business Congress organized by the marshal of Lubuskie region, on 13 October 2022. Anmet was awarded for international cooperation which resulted in process and product innovations

a)

b)

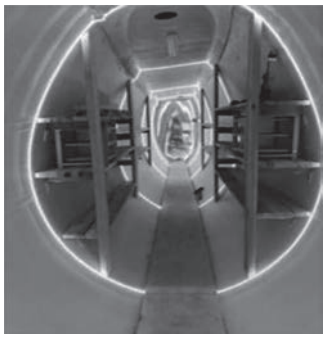
Fig. 1. (a) A bench in front of European Parliament Edifice in Brussels, (b) a table with a chair
Rys. 1. (a) Ławka przed gmachem Parlamentu Europejskiego w Brukseli, (b) stół wraz z siedziskiem

a)

b)

Fig. 2. (a) A stairs, (b) a deck
Rys. 2. (a) Schody, (b) pomost

a)



b)

Fig. 4. A cellar: (a) look from outside, (b) look from inside
Rys. 4. Piwniczka: (a) widok z zewnątrz, (b) widok wewnątrz

Fig. 3. Bus stop
Rys. 3. (a) Przystanek, (b) wiata

Fig. 5. Garden embellishment – a fish
Rys. 5. Ozdoba ogrodowa – figura ryby

meble i mała architektura oraz bloki konstrukcyjne i geotechniczne do umocnień zboczy i osuwisk [16].

5. BUDOWNICTWO DROGOWE

Kolejną metodą powtórnego wykorzystania łopat jest budowa różnego rodzaju mostów i kładek o rozpiętościach do 100 m. Pierwszą taką konstrukcją na świecie była kładka rowerowo-piesza oddana do użytku w grudniu 2021 r. w Szprotawie (woj. lubuskie). Całkowita długość kładki wyniosła 22 m, szerokość 4,25 m, a rozpiętość między podporami ponad 16 m. Kładkę wykonano z dwóch 11-metrowych odcinków łopat LM 23 połączonych stalowymi kołnierzami. Pomost ze stalowymi barierkami, spoczywający na 10 stalowych żebrach kratownicowych (każde z 10 żeber indywidualnie dopasowano do

owing to the recovery of carbon fiber and recycling of wind turbine blades. The recovered and recycled material was used to produce a new kind of oriented strand boards (OSB) that contained shredded blades, furniture, small architecture, construction blocks and geotechnical blocks for reinforcement of hills and landslides [16].

5. ROAD CONSTRUCTION

Another method of reusing blades is building different types of bridges and foot bridges with distances between supports of up to 100 m. The first structure of this kind in the world was a foot-bicycle bridge completed in December 2021. The total length was 22 m with the distance between supports of over 16 m. The bridge was made with two 11 m LM 23 blades connected with steel flanges. The bridge rests on 10 steel truss elements (each element is individually fitted), bolted to the side plane of blades. It is made from composite planks, with steel railing. Even now, it is the longest structure of this kind in the world. The

a)

b)

Fig. 6. A bridge for pedestrians and cyclists over the river Szprotawa
Rys. 6. Kładka dla pieszych i rowerzystów nad rzeką Szprotawa

miejsca montażu) przykręconych do powierzchni bocznych łopaty, został wykonany z desek kompozytowych. Jak dotychczas jest to najdłuższa tego typu konstrukcja na świecie. Ciężar kładki wynosi 6 t. Przygotowanie łopat do wykonania kładki polegało na dokonaniu oględzin stanu łopat, odnowieniu pokrycia lakierniczego, wywierceniu otworów w miejscu mocowania żeber do łopaty. Konstrukcję przęsła kładki zgłoszono do opatentowania bądź już otrzymano patent w Polsce [17], Danii [18], Niderlandach [19], Niemczech [20] i Wielkiej Brytanii [21].

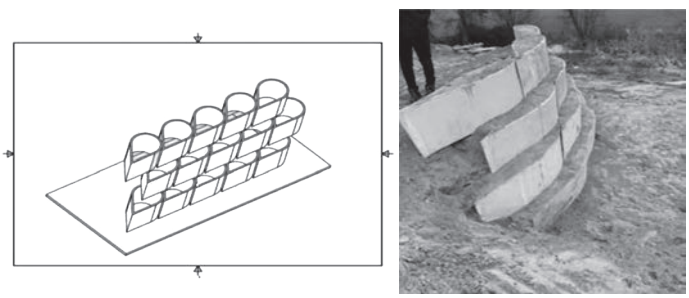
Projekt architektoniczny kładki dla pieszych i rowerzystów (rys. 6) wykonano w Politechnice Rzeszowskiej. Prace były w połowie finansowane w projekcie PARP nr POIR.02.03.02-08-0004/19-00 ,,Alternatywa utylizacji turbin wiatrowych starszej generacji. Wykorzystanie kompozytowych lopat do budowy mostowych obiektów inżynierskich". Kładkę wykonano w firmie Anmet.

Dwubiegowa kładka dla pieszych i rowerzystów, wykonana na podbudowie łopaty turbiny wiatrowej, została przerzucona przez rzekę Szprotawę dla ułatwienia komunikacji między ulicami Sienkiewicza i Chrobrego. Jest to pierwszy taki projekt zrealizowany w Polsce [5, 22–25].

Zaletą konstrukcji jest jej lekkość oraz odporność na warunki atmosferyczne, przede wszystkim elementu nośnego wykonanego z łopaty, która to nie wymaga konserwacji. Opracowano kolejne projekty koncepcyjne kładki o rozpiętości między podporami 50 m. W założeniu kładka ma być zawieszona na linach, a pylony mają być wykonane z lopat. Przewiduje się możliwość przejazdu karetki pogotowia przez taką kładkę. Dla uproszczenia budowy opracowano uniwersalne żebra wykonane ze stali, które nadają się do zastosowania do każdego rodzaju łopaty i mogą być takie same na całej długości kładki. Przy wykonaniu dźwiga rów z łopat powstaje bardzo niewielka ilość odpadów, głównie przy wierceniu otworów montażowych i cięciu łopat na długość. Pozostałość po cięciu łopaty jest wykorzystywana do budowy elementów małej architektury. Ponadto kładka może być zastosowana w miejscach trudno dostępnych, gdzie istnieją warunki do spławienia kładki (po uprzednim uszczelnieniu) do miejsca montażu.

6. BLOKI GEOTECHNICZNE

Duży potencjał tkwi w wykorzystaniu łopat pociętych w plastry do wznoszenia umocnień nasypów drogowych, kolejowych i innych. Wykonywanie ich polega głównie na pocięciu lopat na plastry o długości ok. 0,6 m prostopadle do osi łopat i pogrupo-



a) b)

Fig. 7. Gabion: (a) according to patent26), (b) during construction
Rys. 7. Gabion: (a) schemat wg patentu26), (b) w trakcie budowy

weight of the bridge is 6 t. The preparation procedure involved checking the condition of the blades, painting blades with lacquer, drilling holes for mounting the elements to the blades. The structure of the span was patented or the patent is pending in Poland [17], Denmark [18], Netherlands [19], Germany [20], the UK [21].

The bridge for pedestrians and cyclists (Fig. 6) was designed in Rzeszow University of Technology. 50% of the works was financed by PARP nr POIR.02.03.02-08-0004/19-00 "The alternative of utilizing wind turbines of older generation. The reuse of composite blades for build-ing bridges". The bridge was made in Anmet.

The 22 m long and 4.25 m wide two-way bridge for pedestrians and cyclists was made in 2021 using wind turbine blades and was placed across the river Szprotawa to facilitate transport. It is the first project of this kind implemented so far in Poland [5, 22–25].

The advantage of bridge is the fact that it is light and that it is resistant to elements. This is particularly true of the load-bearing component made from a blade, which does not need to be maintained. We have new concept designs of bridges where the distance between supports is 50 m. In the concept, the bridge is supposed to be hanging on ropes and pylons are to be made from blades. Additionally, an ambulance will be able to pass through the bridge. For simplicity, the gilt elements will be universal and made of steel. They can be used for any type of blade and they are the same along the whole length of the bridge. The girders are made of blades, too. There is a small amount of waste generated when drilling holes and when cutting blades to the right length. The remaining part of the blade is used to build architecture elements. In terrain that is difficult to reach, it is possible to float the bridge (after it has been sealed) to its destination where it will be mounted.

6. GEOTECHNICAL BLOCKS

A high potential can be found in using blades shredded into layers for building reinforcement of road or rail track embankments. Blades are cut into layers that are approximately 0.6 m long perpendicular to the blade axis and grouped according to their size. Then they are placed stepwise, one on top of another. The space in-between is filled with any material available locally. No special aggregate has to be used, like for gabions.

Blade material is resistant to elements and soil. For 1 km of the element 2 m high, you can use 3000 geotechnical blocks with a total weight of 180 t, which is roughly equivalent to 30 blades 30 m long. This solution has either been patented or patent is pending in Poland (Fig. 7a) [26], Germany [27] and the USA [28]. This solution was designed in cooperation with Rzeszow University of Technology.

7. FLOATING PLATFORMS

This solution enables to build floating buoys from long blade elements. Blades are cut to make elements with the required length. They are connected using a light truss. The stiffness of blades is used to the constructor's advantage. Therefore stiff blades become a part of the structure. Thus, the cost can be lowered.

waniu ich wymiarowo. Tak powstałe bloki ustawia się schodkowo jeden za drugim i wypełnia dowolnym materiałem dostępnym w pobliżu budowy. Nie trzeba stosować specjalnych rodzajów kruszyw, jak w przypadku gabionów.

Materiał łopat jest odporny na warunki atmosferyczne oraz na kontakt z glebą. Na budowę 1 km konstrukcji o wysokości 2 m z bloków geotechnicznych trzeba użyć 3000 bloków o łącznej wadze ok. 180 t, co odpowiada średnio 30 łopatom o długości 30 m każda. Opracowanie bloku do zastosowań geotechnicznych zostało zgłoszone do opatentowania bądź otrzymało patent w Polsce [26] (rys. 7a), Niemczech [27] i USA [28]. Projekt taki powstał przy współudziale Politechniki Rzeszowskiej.

7. PŁYWAJĄCE PLATFORMY

Platforma to rozwiązanie umożliwiające budowę pływaków wykonanych z długich odcinków łopat. Wykonanie ich polega na pocięciu łopaty na odcinki o wymaganej długości i połączeniu ich konstrukcją w postaci lekkiej kratownicy. Przy projektowaniu platform ocenia się sztywność konstrukcyjną łopat, mając także na uwadze koszty budowy. Poszycie łopat zapewnia wystarczającą szczelność całej konstrukcji platformy. Dla zapewnienia niezatapialności wnętrze łopaty można wypełnić styropianem lub pianką z recyklingu. Miejsca cięcia zakleja się, używając żywic i mat szklanych. Wyporność konstrukcji wykonanej do testów w firmie Anmet wynosi 6 t. Konstrukcja wykonana została z dwóch odcinków łopaty typu VESTAS 66. Odcinki wycięte ze środkowej części łopaty mają długość po 11,3 m i ważą łącznie 2 t. Konstrukcja pływa już od roku (rys. 8). Zanurzenie bez obciążenia wynosi 0,45 m. Użycie odcinków łopat wyciętych przy piaście umożliwia zwiększenie wyporności o 30%. Platformy mogą być wykorzystywane do budowy pływających farm fotowoltaicznych, platform kąpielowych, pływających pomostów lub domów na wodzie. Pokład pomostu można wykonać z drewna lub kompozytu.

8. WIEŻE WIDOKOWE

Wieża widokowa opiera się na dwóch całych łopatach. Materiał łopaty jest w tym przypadku wykorzystany w 100%. W konstrukcji wieży wykorzystuje się ponadto stal, drewno, kompozyt z recyklingu (deski kompozytowe). Wieże można budować zarówno z większych, jak i mniejszych łopat, oraz z różnej ich liczby. Koncepcja jest jeszcze nie zrealizowana (rys. 9).

9. PŁYTY KOMPOZYTOWO-WIÓROWE

Płyta składa się z mielonego kompozytu pochodzącego ze zmielonych łopat elektrowni wiatrowych lub innych konstrukcji kompozytowych, z wiórów drzewnych i żywic syntetycznych. Płyta zwykle zawiera 5–60% mas. rozdrobnionego kompozytu. Pozostałe składniki to wióry drzewne i kleje syntetyczne standardowo używane przy produkcji płyt wiórowych. Technologia wytwarzania jest dokładnie taka sama jak w przypadku standardowych płyt wiórowych, dzięki temu płyty z użyciem kompozytów można produkować w istniejących za-

Fig. 8. A floating platform
Rys. 8. Pływająca platforma

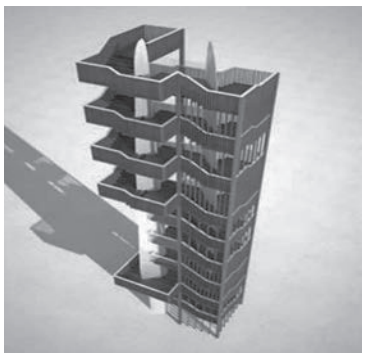


Fig. 9. The concept of an observation tower
Rys. 9. Koncepcja wieży widokowej

The texture of blade material ensures necessary tightness. To make the element floatable, the inside space between blades can be filled with polystyrene or with recycled foam. The places of the cut are covered with resin and glass mats. The displacement of the structure made in Anmet was 6 t. The structure was made with two elements of VESTAS 66 blades. The elements were cut out of the middle section of the blades. They were 11.3 m long and their total weight was 2 t. The structure has been floating on water for one year now (Fig. 8). The draught without cargo was 0.45 m. The use of elements cut out of blades close to the hub can increase displacement by 30%. Platforms can be used to build floating solar farms, recreation swimming platforms, floating bridges or houses on water. The deck can be made of wood or composite material.

8. OBSERVATION TOWER

An observation tower is made of two complete blades. In this case, the blade material is used 100%. The observation tower concept also uses steel, wood and recycled composite (composite planks). Towers can be built using smaller and larger blades with any number of them. That concept has not as yet been implemented (Fig. 9).

9. COMPOSITE CHIPBOARD PANEL

The panel is made from ground composite that comes from shredded blades, other composite structures, wood chip and synthetic resins. The board can contain from 5 to 60% of fragmented composite. Other ingredients include wood chip and synthetic glues commonly used to produce chipboards. Since the manufacturing technology is the same for standard chipboards, composite chipboards can be made in the existing facilities with little intervention in the production process. The grinding of composite can be done in many countries, as the machinery is widely accessible.

Anmet was awarded for its composite chipboard in the competition "Composite Innovation of 2022" during a meeting of members and followers of Polish Cluster of Composite Technologies that took place on 1 December, 2022. The invented chipboard is characterized with the fact that it contains between 5 and 60 wt.% of fragmented glass-epoxy, glass-polyester or

kładach przy niewielkiej ingerencji w proces produkcyjny. Mielenie kompozytu jest skutecznie prowadzone w wielu krajach, a maszyny do procesu są ogólnie dostępne.

Firma Anmet za płytę wiórową z zawartością kompozytów otrzymała wyróżnienie w konkursie „Innowacja branży kompozytowej 2022" podczas spotkania Członków i Sympatyków Polskiego Klastra Technologii Kompozytowych, które odbyło się 1 grudnia 2022 r. Płyta wiórowa tej firmy charakteryzuje się tym, że zawiera 5–60% mas. rozdrobnionego kompozytu szklano-epoksydowego, szklano-poliestrowego lub innego kompozytu zbrojonego włóknami oraz 0–90% mas. cząstek organicznych. Rozdrobniony kompozyt pochodzi z recyklingu łopat elektrowni wiatrowych, jachtów lub innych konstrukcji i wyrobów kompozytowych lub też stanowi mieszaninę kompozytów [29].

Fig. 10. Chipboard panels made from recycled end-of-life composites
Rys. 10. Płyta kompozytowo-wiórowa

Fig. 11. Carbon fibers obtained in pyrolysis process which were cut out of the central strap in wind turbine blade
Rys. 11. Włókna węglowe otrzymane w procesie pirolizy, wycięte z pasa centralnego łopaty turbiny wiatrowej

Płyta (rys. 10) powstała we współpracy z Katedrą Leśnictwa i Technologii Drewna Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu oraz ośrodkiem badań fizy komechanicznych materiałów drzewnych Politechniki Koszalińskiej [30]. Płyta jest zgłoszona do europejskiego patentu [31].

Na świecie rocznie produkuje się ok. 300 mln m^3 płyt wiórowych, z czego w Chinach ok. 200 mln m^3. Do 2021 r. włącznie w elektrowniach wiatrowych na świecie użyto 2,5 mln t kompozytów. Przy produkcji płyt wiórowych na poziomie 150 mln t/r (ciężar właściwy płyt wiórowych to ok. 0,75 t/m^3) bez trudu całą ilość kompozytów zawartych w łopatach można by użyć do produkcji płyt wiórowych i to w ciągu jednego roku. Płyty takie można wielokrotnie mielić i powtórnie wytwarzać z nich ten sam produkt. Dodatkowe zalety użycia mielonego kompozytu w przemyśle wytwórczym płyt to oprócz oszczędności drewna zmniejszenie zużycia wody, energii, zmniejszenie emisji lotnych substancji organicznych (VOC), zwiększenie trwałości płyt, odporności na ogień i wodę. Zastosowanie kompozytu nie pogarsza przydatności płyty do obróbki.

10. ODZYSK WŁÓKIEN WĘGLOWYCH W PROCESIE PIROLIZY

Wytworzenie 1 t włókien węglowych wiąże się z emisją ponad 20 t CO_2, a odzysk włókien z kompozytu w procesie pirolizy powoduje emisję 1 t CO_2. Włókna węglowe w łopatach ułożone są równolegle do siebie i biegną na całej długości łopaty. Najczęściej włókna są umiejscowione na krawędzi zejścia, natarcia i w części środkowej po obu stronach łopaty. W pasach środkowych o szerokości ok. 500 mm i grubości od 50 mm blisko piasty do 10 mm przy końcu łopaty znajduje się ok. 80% włókien węglowych, pozostała ilość jest umiejscowiona na krawędzi natarcia i zejścia łopaty. W jednej łopacie długości 50 m znajduje

another composite and from 0 to 90 wt.% of organic particles. Fragmented composite comes from recycled blades, yachts or other composite structures. It can also be a mixture of all the above [29].

The panel (Fig. 10) has been done in collaboration with the Forestry and Wood Technology department at the University of Life Sciences (Poznań, Poland) and the wood materials physical and mechanical testing center at Koszalin University of Technology (Poland) [30]. The board's European patent is pending EP 22166241 [31].

Approximately 300 mln m^3 of chipboard panels are produced in the world annually, including about 200 mln m^3 in China. 2.5 Mt of composites have been used globally in wind turbines until 2021. Given the production of chipboard at the level of 150 Mt/year and its specific gravity of about 0.75 t/m^3, the total composite material present in blades can be used up to produce chipboard panels in one year only. Panels can be ground and reused many times to manufacture the same product. Other advan-tages of this technology include: saving wood, reduction of water and energy consumption, reduced emissions of VOCs, improved durability of the product, improved resistance to fire and water. Panels with composite material can still be processed just like standard material.

10. RECOVERY OF CARBON FIBER IN PYROLYSIS

The production of 1 t of carbon fiber involves the emis-sion of over 20 t of CO_2. However, the recovery of carbon fiber in pyrolysis leads to the emissions of 1 t of CO_2 [32]. Carbon fibers in a blade are placed in parallel and run along the whole length of the element. Fibers are usually placed at the trailing and leading edges and in the middle part of the blade. The middle part (approxima-

się średnio 5 t włókien węglowych. W celu ich odzyskania pasy kompozytu zawierające włókna należy wyciąć z łopaty.

Takie pasy należy pociąć na długości odpowiednie do wielkości komory pirolitycznej. Warstwy z włóknem węglowym dodatkowo są jeszcze pokryte ok. 10-milimetrową warstwą kompozytu szklanego, który przez rozwarstwianie należy oddzielić od kompozytu węglowego. Proces pirolizy odbywa się wg dostępnych technik w temp. 500–550°C. W wyniku pirolizy trwającej ok. 60 min otrzymuje się sztywne bloki włókien węglowych z 10-proc. zawartością zwęglonej żywicy.

Wiązki włókien oddziela się, poddając bloki obróbce przez odpowiednie prasowanie, a następnie włókna tnie się na odpowiednie powtarzalne odcinki. W zależności od potrzeby włókna są wygrzewane w temp. 500°C do całkowitego usunięcia zwęglonej żywicy. Na oczyszczenie 1 kg włókien potrzeba 10 kW mocy i przetrzymywania ich przez 30 min w temp. 500°C. W wyniku prowadzonej pirolizy w firmie Anmet uzyskano włókna węglowe w wiązkach o długości 1500 mm ułożone równolegle obok siebie (rys. 11). Tak otrzymane włókna węglowe pocięto i poddano badaniom wytrzymałościowym w Politechnice Warszawskiej na Wydziale Inżynierii Materiałowej Badania potwierdziły wysoką wytrzymałość włókien popirolitycznych, na poziomie 80–90% wytrzymałości włókien nowych. Kolejnym etapem prac nad włóknami było wykonywanie z nich włóknin. Pierwsze testy przeprowadzono w Wytwórni Włóknin Technicznych. W wyniku przeprowadzonej próby wytworzono ok. 100 m^2 włókniny wykonanej z włókien węglowych popirolitycznych i odpadowych włókien polipropylenowych. Włóknina zawiera 50% włókien węglowych, reszta to włókna PP z recyklingu.

Włókniny charakteryzują się dobrą wytrzymałością i nadają się do wykorzystania w procesie produkcyjnym do wytwarzania kompozytów termoplastycznych węglowych. Testy dowiodły, że włókninę węglową w mieszance z włóknami termoplastycznymi bez trudu można produkować na uniwersalnych liniach produkcyjnych przeznaczonych do produkcji włóknin igłowanych.

tely 500 mm wide and 50 mm thick close to the hub) contains about 80% of carbon fibers. The rest can be found in trailing and leading edges of the blade. One 50 m long blade usually contains 5 t of carbon fiber. To recover carbon fiber, some straps of the composite need to be cut out of the blade.

Such straps should be cut to the length equivalent to the pyrolysis chamber. Layers made of carbon fiber are additionally covered with a 10 mm layer of glass composite and these two should be separated. Pyrolysis according to the known techniques occurs between 500 and 550°C. Following pyrolysis lasting for about 60 min, we obtain demi-stiff block of carbon fiber, with 10% content of charred resin.

Through special pressing, we can separate strands of fibers which are later cut repeatedly to the desired length. The heat treatment at 500°C continues until all charred resin is removed. To clean 1 kg of fiber, you need 10 kW and 30 min at 500°C. Owing to pyrolysis technique applied by Anmet, carbon fibers that were 1500 mm long and parallel were obtained (Fig. 11). This carbon fiber was later cut and tested at Warsaw University of Technology at the Faculty of Materials Engineering.

The tests confirmed high strength of post pyrolysis fibers at the level of 80–90% of strength of virgin product. The successive step was to made a non-woven fabric from the fibers. The first tests were conducted at Wytwórnia Włóknin Technicznych. Approximately 100 m^2 of fabric was manufactured from post pyrolysis carbon fiber and from recycled polypropylene fiber. The fabric contained 50% of carbon fiber and the rest was recycled PP.

The fabric shows a good strength and can be used to make carbon thermoplastic composites. The tests showed that the carbon fabric mixed with thermoplastic fiber can be easily produced on universal production lines normally used to manufacture geotextiles.

LITERATURA / *REFERENCES*

[1] https://www.compositesworld.com/articles/recycling-end-of-life-com-posite-parts-new-methods-markets, access 20.03.2023.
[2] https://www.compositesworld.com/news/continuum-targets-facility-capacity-transforms-composite-materials-to-advance-wind-blade-recycling, access 20.03.2023.
[3] https://www.compositesworld.com/news/partnership-integrates-recycled-turbine-blade-materials-into-energy-storage-system, access 20.03.2023.
[4] https://www.compositesworld.com/news/re-wind-network-constructs-experimental-pedestrian-bridge-using-wind-turbine-blades-, access 20.03.2023.
[5] T. Siwowski, M. Rajchel, M. Kulpa, A. Adamcio, Materiały Budowlane 2021, 9, 48.
[6] https://www.anmet.com.pl/about-us/?lang=en, access 20.03.2023.
[7] https://wings-for-living.com, access 20.03.2023.
[8] https://gp-renewables.energy, access 20.03.2023.
[9] https://gp-renewables.energy/gp-reblade, access 20.03.2023.
[10] https://ahk.pl/medien/aktuelles/news-details/upcycling-startup-anmet-gewinnt-deutsch-polnischen-wirtschaftspreis-2021, access 20.03.2023.
[11] https://northsearegion.eu/media/22651/three-circularity-concepts-for-wind-turbine-blades-v.pdf, access 20.03.2023.
[12] https://windeurope.org/annual2022, access 20.03.2023.
[13] https://www.expo2020dubai.com, access 20.03.2023.
[14] https://mpromotion.com.pl/2022/01/wystawa-wojewodztwa-lubuskiego-expo-dubaj-2020, access 20.03.2023.
[15] https://www.4dd.pl/2023/pl, access 20.03.2023.
[16] https://lubuskie.pl/wiadomosci/19412/oto-najbardziej-innowacyjne--lubuskie-firmy, access 20.03.2023.
[17] Pat. pol. PL 430403 (2019).
[18] Pat. DK PA 20207042 (2020).
[19] Pat. NL 1043707 (2022).
[20] Pat. DE 2020062508595000DE (2020).
[21] Pat. UKP2545/KPP/D-GB (2020).
[22] https://www.theverge.com/2022/2/11/22929059/recycled-wind-turbine-blade-bridges-world-first, access 20.03.2023.
[23] T. Siwowski, M. Rajchel, M. Kulpa, A. Adamcio, Mosty 2022, 1, 24.
[24] https://borynam.wixsite.com/zwiedzamyszprotawe/k%C5%82adka-pierwsza-na-%C5%9Bwiecie, access 20.03.2023.
[25] https://zagan.naszemiasto.pl/w-szprotawie-powstala-pierwsza-w-polsce-kladka-ze-smigla/ar/c15-8531383, access 20.03.2023.
[26] Pat. pol. P.435138 (2022).
[27] Pat. DE 10 2021 120 413 A1 (2022).
[28] Pat. USA 2022/0065221 A1 (2022).
[29] https://kompozyty.net/nagrody-w-konkursie-innowacja-branzy-kompozytowej-2022%EF%BF%BC%EF%BF%BC, accessed 6.03.2023.
[30] https://www.compositesworld.com/news/anmet-launches-chipboard-panels-made-from-recycled-composites, access 20.03.2023.
[31] Pat. EP 22166241 (2022).
[32] https://renewable-carbon.eu/news/natural-fibres-show-outstandingly-low-co2-footprint-compared-to-glass-and-mineral-fibres, access 20.03.2023.

110 lat działalności Instytutu Chemii Przemysłowej

Instytut Chemii Przemysłowej – wchodzący obecnie w Sieć Badawczą Łukasiewicz – obchodził 18 czerwca 2026 r. jubileusz 110-lecia działalności. Galę odbywającą się na Kampusie Mościckiego otworzyła dyrektor Instytutu dr inż. Ewa Śmigiera, która przywitała gości m.in. Marcina Kulaska Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego. W swoim wystąpieniu dyr. E. Śmigiera przypomniała historię Instytutu i teraźniejszość współpracy z przemysłem, który *od instytutu badawczego oczekuje się dziś nie tylko dostarczenia wyników badań, lecz także ich pogłębionej interpretacji, osadzenia w szerszym kontekście oraz przedstawienia rekomendacji, które mogą wspierać decyzje biznesowe i strategiczne*.

Fot. 1. Dr inż. Ewa Śmigiera otwiera Galę i wita gości (Foto: Red. „Przemysł Chemiczny")

Fot. 2. Minister Marcin Kulasek zabiera głos na Gali (Foto: Ł-IChP)

Marcin Kulasek w swoim wystąpieniu zauważył, że *inwestycje w nowoczesną infrastrukturę badawczą są niezbędne dla rozwoju i konkurencyjności polskiej gospodarki, dlatego tak istotne jest ich konsekwentne wzmacnianie. Kampus Mościcki rozwija krajowe możliwości w zakresie produkcji substancji czynnych do leków, rozwoju farmacji oraz technologii niskoemisyjnych. Dzięki temu możliwe jest prowadzenie prac od badań po wdrożenie w przemyśle, co odpowiada na potrzeby bezpieczeństwa lekowego i transformacji gospodarki*.

Jubileusz okazał się też znakomitą okazją do zainaugurowania działalności dwóch nowych centrów w Kampusie Mościcki: Centrum Rozwoju Produktów Farmaceutycznych i Pokrewnych (CeProFarm) oraz Centrum Rozwoju Technologii Niskoemisyjnych (CeTeN), które wraz z uruchomionym wcześniej Centrum Technologii Wytwarzania API (CeTeAPI) tworzą Kampus Mościcki. CeTeAPI koncentruje się na rozwoju i wytwarzaniu substancji czynnych do leków (API), CeProFarm rozwija kompetencje w opracowywaniu produktów farmaceutycznych i pokrewnych, a CeTeN prowadzi prace nad technologiami wspierającymi transformację przemysłu w kierunku gospodarki niskoemisyjnej. Razem obejmują one pełen przekrój: od cząsteczki, przez gotowy produkt, po proces, który da się wdrożyć z najmniejszym obciążeniem dla środowiska. Nakłady inwestycyjne na Kampus wyniosły ok. 240 mln zł, z czego ok. 160 mln zł pochodziło z Krajowego Planu Odbudowy i Zwiększania Odporności. Kampus stanowi zintegrowane środowisko badawczo-rozwojowe zaprojektowane tak, by każda technologia mogła przejść w nim całą drogę: od badań laboratoryjnych, przez skalowanie, aż po wdrożenie u partnera przemysłowego.

źródło: „Przemysł Chemiczny" 7/2026

Fot. 3. Osoby wyróżnione statuetkami w kategorii współpracownicy (Foto: Ł-IChP)

Stowarzyszenie Absolwentów Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej

Każdy wydział uczelni kształcąc studentów w obszarze swojej dyscypliny naukowej, tworzy w swoim otoczeniu środowisko absolwentów. Kontakty towarzyskie z okresu studiów przekształcają się często w kontakty zawodowe. Powstanie zintegrowanego środowiska inżynierów pracujących w różnych sektorach gospodarki, związanych z macierzystym wydziałem, ma ogromne znaczenie dla uczelni. Pozwala jej w sposób naturalny rozwijać współpracę z otoczeniem społeczno-gospodarczym, zarówno w aspekcie transferu wiedzy do gospodarki, jak i organizacji oraz wspomagania procesu kształcenia studentów. Równie ważne jest utrzymanie relacji absolwentów z uczelnią, które może wydatnie pomóc w dalszym rozwoju zawodowym.

Na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej integracja środowiska jest silnie wspomagana przez samych absolwentów. Z ich inicjatywy, ale przy ścisłej współpracy z uczelnią, w 2000 roku powołano Stowarzyszenie Absolwentów Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej.

Idea powołania stowarzyszenia powstała w czasie II Zjazdu Absolwentów zorganizowanego przez WIM w 1998 roku. Organizacja zjazdów jest od 2000 r. stałym zadaniem SAIM PW. W 2026 roku odbył się już IX Zjazd Absolwentów. Od początku istnienia Stowarzyszenie funduje Nagrodę Absolwentów dla studenta, który w zakończonym roku akademickim uzyskał najwyższą średnią wszystkich ocen. Nagroda wręczana jest zawsze przez prezesa SAIM w czasie uroczystej inauguracji roku akademickiego, a imię i nazwisko laureata jest zapisywane w gablocie wiszącej obok dziekanatu. Stowarzyszenie wydaje Biuletyn zawierający informacje z życia Wydziału. Interesującą inicjatywą Stowarzyszenia była organizacja spotkań absolwentów po 10 latach od ukończenia studiów. Spotkania takie dostarczają bezcennej wiedzy o losach absolwentów, rynku pracy oraz o zmianach w zakresie kompetencji wymaganych od inżyniera materiałowego w różnych jednostkach gospodarki. Wydział Inżynierii Materiałowej PW często wykorzystuje wiedzę i doświadczenie absolwentów w doskonaleniu procesu dydaktycznego. Absolwenci uczestniczą w corocznym seminarium nauka-przemysł, spotykają się ze studentami w ramach przedmiotu „Planowanie kariery zawodowej", zapraszają studentów na wizyty studyjne do „swoich" firm, pomagają w organizowaniu atrakcyjnych praktyk studenckich, a także uczestniczą w realizacji prac dyplomowych. Wydział dla absolwentów pracujących w obszarze inżynierii materiałowej jest źródłem wiedzy na temat np. możliwości wykonania zaawansowanych badań, czy też ułatwia dotarcie do odpowiednich ekspertów. Te wszystkie kontakty ułatwia Stowarzyszenie Absolwentów.

Ponad 25 lat działalności SAIM PW dowiodło, że ten sposób współpracy Wydziału i jego absolwentów przynosi duże korzyści obu stronom.

Uczestnicy IX Zjazdu Absolwentów Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej (źródło: SAIM PW)

INFORMACJE DLA AUTORÓW

Redakcja przyjmuje do publikacji tylko prace oryginalne, niepublikowane wcześniej w innych czasopismach ani materiałach z konferencji (kongresów, sympozjów), chyba że publikacja jest zamawiana przez Redakcję. Artykuł przekazany do Redakcji nie może być ani opublikowany w całości lub części, ani równocześnie przekazany do opublikowania w innym czasopiśmie. Fakt nadesłania pracy do Redakcji uważa się za jednoznaczny z oświadczeniem Autora, że warunek ten jest spełniony. Z chwilą otrzymania artykułu przez Redakcję następuje przeniesienie praw autorskich na Wydawcę (Redakcję), która ma odtąd wyłączne prawo do korzystania z utworu, rozporządzania nim i zwielokrotniania dowolną techniką, w tym elektroniczną oraz rozpowszechniania. Bez zgody Wydawcy (Redakcji) artykuł nie może być reprodukowany w żadnej postaci ani tłumaczony. Za publikację prac naukowo-badawczych Wydawca nie płaci honorarium autorskiego. Druk publikacji naukowej związany jest z pewnymi kosztami, których ok. 50% musi ponieść instytucja Autora, bowiem przychody redakcji z tytułu prenumeraty i reklam drukowanych w naszym czasopiśmie pokrywają tylko ok. 50% kosztów. Koszt jednej strony w druku wynosi 300,00 zł netto. W uzasadnionych przypadkach Redakcja może dopuścić do nieodpłatnej publikacji artykułu. Warunkiem koniecznym jest oświadczenie o braku środków na pokrycie kosztów druku i/lub pozytywna ocena merytoryczna artykułu, potwierdzająca znaczenie przeprowadzonych badań i analiz oraz oryginalność materiału. Artykuły są drukowane zależnie od sytuacji ekonomicznej Redakcji.

Artykuł w języku polskim lub angielskim powinien być dostarczony do Redakcji w formie elektronicznej, jako załącznik do e-maila. Należy oczekiwać potwierdzenia jego otrzymania przez Redakcję (z podaniem numeru ewidencyjnego zarejestrowanego artykułu). W przypadku nie otrzymania przez Autora takiego potwierdzenia należy najpóźniej po 2 tygodniach skontaktować się z Redakcją w sprawie zgłaszanego artykułu. Wydruk artykułu w formacie A4 powinien mieć znormalizowaną liczbę wierszy i znaków w wierszu (32 wiersze po ok. 80 znaków w wierszu). Między wierszami należy zachować 1 interlinię, wielkość czcionki Times New Roman 13 punktów. Objętość artykułów naukowo-badawczych nie powinna przekraczać 12 tak znormalizowanych stron maszynopisu, a artykułów przeglądowych 20 stron włącznie z tabelami, rysunkami, wzorami i spisem literatury. Możliwy jest druk dłuższych publikacji, ale ich Autorzy muszą mieć świadomość, że oznaczać to będzie wyższe koszty druku. W tekście można zaznaczyć te elementy lub fragmenty, które należy szczególnie wyróżnić (kursywą, pogrubieniem lub kolorem). Przypisy uzupełniające i wyjaśniające tekst podstawowy powinny być napisane na dole strony, na której występują. Zaleca się umiar w stosowaniu przypisów. Tytuł artykułu należy podać w języku angielskim i polskim. Praca powinna zawierać streszczenie w języku angielskim i polskim. Streszczenie powinno być krótkim, trój- lub czterozdaniowym wyrażeniem najważniejszych myśli artykułu i podsumowaniem wyników pracy, napisanym w formie bezosobowej.

Wzory powinny być pisane bardzo czytelnie. Litery greckie należy opisać na marginesach (np. β – beta). Wyraźnie należy zróżnicować liczbę „0" i dużą literę „O". Szczególnie czytelny powinien być zapis potęg i indeksów. Wzory i równania (chemiczne, matematyczne, fizyczne) należy przygotować specjalnym edytorami (np. ChemWin, ISIS Draw 2.2) i zapisać w powszechnie używanym formacie graficznym (np. tiff, gif, jpg). We wzorach i w tekście należy stosować jednostki Międzynarodowego Układu Jednostek SI. Jednostki w tabelach i w opisach rysunków należy podać po przecinku, a nie w nawiasach.

Tytuł i śródtytuły powinny być możliwie krótkie, lapidarnie ujmujące treść artykułu lub rozdziału. Śródtytuły należy numerować, można też oznaczyć ich rodzaj na marginesie (np. I rzędu, II rzędu, III rzędu).

Tabele, podpisy pod rysunkami i rysunki, ilustracje (w wymienionej kolejności) po-winny znajdować się poza tekstem, a na marginesie wydruku tekstu lub w jego treści powinny być zaznaczone proponowane miejsca ich wlamania. Zaleca się zestawianie wyników pomiarów lub różnych właściwości w formie tabelarycznej. Tabele powinny być ponumerowane cyframi arabskimi. Tytuł tabeli w języku angielskim i polskim po-winien znajdować się nad tabelą. Nie stosuje się skrótu „tab." ani w tytule, ani w tekście artykułu (jeśli w artykule jest tylko jedna tabela, to nie wpisuje się „1"). Tabele nie po-winny być zbyt rozbudowane. Pożądane jest, aby mieściły się w szerokości szpalty lub kolumny druku (podstawa 8,5 cm lub 17,5 cm). W tabelach powinny być zaznaczone te rubryki, które należy wyróżnić za pomocą koloru.

Podpisy umieszczamy pod rysunkami. Wszystkie wykresy, rysunki i fotografie nazywa się rysunkami i numeruje kolejno (jeśli jest tylko 1 rysunek nie wpisuje się „1"), podając na każdym nazwisko Autora. Po skrócie Rys. należy wpisać numer rysunku lub fotografii, tytuł, a następnie stosowane na ilustracji oznaczenia. Jeśli oznaczenia zostały objaśnione w tekście, należy wpisać sformułowanie „oznaczenia objaśniono w tekście".

Rysunki powinny być optymalnie szczegółowe. W rysunkach należy unikać słów obcojęzycznych, zastępując je polskimi odpowiednikami. Opisy rysunków podawane przy osiach x, y powinny być wielką literą, a jednostka po przecinku (bez nawiasu kwadratowego), np. Masa, g.

Elementy rysunków powinny być opisane symbolami (wersaliki), a rozwinięcie oznaczeń symboli przeniesione do podpisu. Opisywanie rysunku pełnym tekstem jest dopuszczalne tylko wtedy, gdy ma to ważne uzasadnienie merytoryczne. Jest to uwarunkowane dążeniem redakcji, aby rysunek zmieścił się na jednej szpalcie lub w szerokości jednej kolumny (podstawa 8,5 cm lub 17,5 cm). Pożądane typy rysunków to: wykresy liniowe, słupkowe, blokowe. Rysunki powinny być dostarczone jako osobne pliki graficzne o wysokiej rozdzielczości w powszechnie akceptowanych formatach (np. tiff, gif, jpg, bmp). Nie powinny znajdować się w ramkach.

Przed LITERATURĄ można umieścić podziękowania, informacje o grantach, projektach lub stypendiach, w ramach których wykonano pracę, informacje o finansowaniu.

Literatura cytowana powinna być umieszczana na końcu artykułu, uporządkowana w kolejności cytowania w tekście i kolejno ponumerowana, numery cytowanych w spisie pozycji powinny znajdować się w nawiasie kwadratowym. W tekście numerację odnośników należy wpisywać także w nawiasach kwadratowych. Nie należy stosować tzw. automatycznego spisu literatury cytowanej. Literatura powinna zawierać podstawowe elementy opisu bibliograficznego wg podanych przykładów (1. książka, 2. czasopismo, 3. materiały konferencyjne, 4. praca doktorska, 5. materiały reklamowe firmy, 6. patent, 7. norma, 8. Dziennik Ustaw, 9. rozporządzenie, 10. dyrektywa, 11. adres internetowy):

[1] Luximon A.: Handbook of footwear design and manufacture. Woodhead Publishing, Cambridge (2013).
[2] Aizenshtein E.M.: Polyester fibres continue to dominate on the world textile raw materials balance sheet. Fibre Chemistry 41 (1) (2009) 1–8.
[3] Sajek A.K., Sajek A.: A title of an article published in conference proceedings. A Title of the Conference, locality, June 20th–24th (2004) 101–105.
[4] Brzozowski R.: Badanie selektywności kształtu w reakcjach syntezy diizopropylonaftalenów prowadzonych w obecności katalizatorów glinokrzemianowych. Praca doktorska. Instytut Chemii Przemysłowej, Warszawa (2001).
[5] GRYFSKAN Sp. z o.o., Hajnówka, Prospekt firmowy.
[6] Zgł. pat. pol. P-344 539 (2000).
[7] PN-EN ISO 20344:2012. Personal protective equipment. Test methods for footwear.
[8] Dz.U. 2004, nr 19, poz. 177.
[9] Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 czerwca 2008 r. w sprawie wykonywania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu. Dz.U. 2008, nr 119, poz. 765.
[10] Dyrektywa 2004/18/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 31 marca 2004 r. w sprawie koordynacji procedur udzielania zamówień publicznych na roboty budowlane, dostawy i usługi. Dz.Urz. UE L 134, 114.
[11] http://www.spirulina.pl, dostęp 15 marca 2013 r. DOI: 10.14314/polimery.2016.031.

Imię i nazwisko Autora lub Autorów (bez tytułów naukowych i zawodowych) należy umieścić na pierwszej stronie, pod tytułem. Gwiazdką (*) powinien być oznaczony Autor do korespondencji, którego e-mail musi znaleźć się pod afiliacjami Autorów. Przy nazwiskach Autorów powinny być umieszczone numery ORCID.

Plik z publikacją wzorcową jest dostępny na stronie internetowej czasopisma i.mat.polsl.pl.

Wszystkie zgłoszone do druku prace naukowo-badawcze i problemowo-przeglądowe (w tym także artykuły sponsorowane) poddawane są recenzji. Opinia Recenzenta jest przekazywana Autorowi do ustosunkowania się w terminie zazwyczaj nie dłuższym niż 1 miesiąc. Jeśli praca wymaga poprawek i/lub uzupełnień, to Autor musi wprowadzić je w czasie nie dłuższym niż 1 miesiąc. Niezwrócenie poprawionej pracy w tym terminie oznaczać będzie druk publikacji w późniejszym terminie. Redakcja zastrzega sobie prawo dokonywania poprawek językowych (stylistycznych) oraz skracania artykułów w przypadku występowania w nich powtórzeń i rozwlekłości.

Notatki informacyjne, recenzje, wywiady, sprawozdania i komentarze przygotowywane są w zasadzie wyłącznie na zamówienie Redakcji lub z inicjatywy Autorów po wstępnym (np. telefonicznym) uzgodnieniu tematyki, zakresu i objętości opracowania. Podobnie jak w przypadku artykułów naukowo-badawczych i problemowo-przeglądowych, prawa autorskie do publikacji zostają przeniesione na Wydawcę (Redakcję) po przekazaniu pracy do druku. Na każdy przedruk tych publikacji wymagana jest pisemna zgoda Redakcji.

W momencie dostarczenia artykułu do redakcji Autor (Autorzy) powinien dołączyć formularz zgłoszenia publikacji dostępny na stronie internetowej, w którym podane będą:

- imię i nazwisko, tytuł zawodowy i naukowy,
- nazwę i adres instytucji, w której praca została wykonana,
- numery telefonów i faksu, służbowy, komórka,
- adres poczty elektronicznej,
- adres do korespondencji,
- dane instytucji Autora do wystawienia faktury (oficjalna nazwa, oficjalny adres, numer NIP), w przypadku uczelni wyższej jest to zwykle adres jej rektoratu.

We wszystkich sprawach budzących wątpliwości prosimy o telefoniczny lub mailowy kontakt z naszą Redakcją: +48 22 818 09 18, i.materialowa@sigma-not.pl

MIĘDZYNARODOWE TARGI BHP 2027

2–3 MARCA 2027 | **MCK KATOWICE**

ZOSTAŃ WYSTAWCĄ

NAJWAŻNIEJSZE SPOTKANIE BRANŻY BHP I PPOŻ
W SERCU GÓRNEGO ŚLĄSKA!

- PONAD **6000** ZWIEDZAJĄCYCH
- BLISKO **130** WYSTAWCÓW Z POLSKI I EUROPY
- DOŁĄCZ DO **LIDERÓW** BRANŻY BHP I PPOŻ

Rdza czy złoto?

Konkurs Polskiego Stowarzyszenia Korozyjnego

na najlepszą pracę dyplomową w dziedzinie korozji

Do 10 października 2026 r. czekamy na zgłoszenia prac dyplomowych [doktorskich, magisterskich, inżynierskich i licencjackich] obronionych od 11.10.2025 r. do 10.10.2026 r. i wpisujących się w tematykę szeroko rozumianej ochrony przed korozją powierzchni metalowych, betonowych, polimerowych i drewnianych. Prace mogą dotyczyć m. in. materiałów odpornych na korozję, powłok ochronnych, ochrony elektrochemicznej i inhibitorowej, badań korozyjnych, zagadnień projektowych, legislacyjnych, organizacyjnych, ochrony środowiska itp.

Do wygrania nagrody pieniężne w wysokości: 3 000 zł, 2 500 zł i 2 000 zł.
Więcej informacji na stronie www.psk.org.pl

POLSKIE STOWARZYSZENIE KOROZYJNE

Polskie Stowarzyszenie Korozyjne
ul. Tarcice 11, 80-718 Gdańsk
sekretarz@psk.org.pl | www.psk.org.pl

Znajdź nas na: