



INŻYNIERIA MATERIAŁOWA

2

M A T E R I A L S E N G I N E E R I N G

• M A T E R I A Ł Y I T E C H N O L O G I E •

PL ISSN 0208-6247 e-ISSN 2449-9889

Indeks 36156

cena 85,00 zł (w tym 8% VAT)





SPOTKANIE POLONIJNYCH I POLSKICH INŻYNIERÓW VI ŚWIATOWY ZJAZD INŻYNIERÓW POLSKICH XXVIII KONGRES TECHNIKÓW POLSKICH



POZNAŃ,
9-11 CZERWCA 2025

TECHNIKA DLA ZDROWIA I BEZPIECZEŃSTWA

Patronat honorowy



MARSZAŁEK SENATU
RZECZYPOSPOLITEJ POLSKIEJ
Małgorzata Kidawa-Błońska

Zapraszamy na wyjątkowe wydarzenie łączące inżynierów z Polski i świata!
Spotkamy się, by dyskutować o roli techniki w rozwiązywaniu
najważniejszych wyzwań współczesności.

Dlaczego warto wziąć udział?

- Unikalna okazja do nawiązania współpracy między polskimi inżynierami z całego świata.
- Inspirujące prezentacje i dyskusje na temat zdrowia, cyberbezpieczeństwa, zmian klimatycznych, hydrologii, bezpieczeństwa żywności i militariów.
- Możliwość wymiany doświadczeń z ekspertami reprezentującymi uczelnie, instytuty badawcze i innowacyjne przedsiębiorstwa.

Przyjdź i dołącz do
globalnej społeczności
polskich inżynierów!

Do zobaczenia w Poznaniu!

Więcej informacji

<http://szip.org.pl>

Organizatorzy



Politechnika Warszawska



Projekt dofinansowany ze środków budżetu państwa,
przyznanych przez Ministra Nauki w ramach Programu Doskonała nauka II



Ministerstwo Nauki
i Szkolnictwa Wyższego

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.: +48 663 311 933
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. 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 Anna SKURZEWSKA

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. PUSZYŃSKI, USA

Dr inż. ADAM RYLSKI

Prof. Dr. Ing. JAROSLAV SOJKA, Czechy

Dr TOM TROCZYŃSKI, Kanada

Prof. ATHENA TSETSEKOU, Grecja

Wersja papierowa czasopisma

„Inżynieria Materiałowa” („Materials Engineering”)

jest jego wersją pierwotną.

Dwumiesięcznik indeksowany parametrycznie

w bazach: BazTech, Index Copernicus, ERIHPlus

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.



INŻYNIERIA MATERIAŁOWA 2

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

Adrian K. Antosik, Marcin Bartkowiak

*Thermal stability and mechanical properties of silicone pressure-sensitive
adhesives modified with steatite*

Trwałość termiczna i właściwości mechaniczne silikonowych klejów samoprzylepnych modyfikowanych steatytem 5

Arkadiusz Klimczyk

*Review of the relationship between the course of carbon monoxide
emissions to the atmosphere from metallurgical processes
and its impact on human health and the natural environment*

Przegląd relacji pomiędzy przebiegiem emisji tlenu węgla do atmosfery z procesów hutniczych i jego oddziaływaniem na zdrowie człowieka i środowisko naturalne 11

Adam Barylski

Control of the abrasive grains of cooper slag

Kontrola wymiarowa ziaren ściernych żużla pomiedziowego 15

CO PISZĄ INNI

Przegląd krajowych i zagranicznych czasopism naukowych i naukowo-technicznych 26

ZGŁOSZENIA PATENTOWE

Wybrane zgłoszenia patentowe z dziedziny inżynierii materiałowej wg Biuletynu Urzędu Patentowego nr 7-14 z 2025 r. 30

Zdjęcie na okładce: Chat GPT (Prompt: Anna Skurzevska)

Szanowni Czytelnicy,

dnia 28 marca br. już po raz trzeci w 13 polskich miastach odbył się Ogólnopolski Dzień Inżynierii Materiałowej (ODIM). Pod hasłem „Materiały Inteligentne” na uczestników ODIM czekały wykłady, laboratoria oraz warsztaty dla szkół, a także popołudniowe zajęcia i aktywności dla dużych i małych pasjonatów nauki. Organizatorami tegorocznej edycji było Polskie Towarzystwo Materiałoznawcze oraz 15 uczelni i 6 instytutów. Program obejmował m.in.: poznanie nowoczesnych materiałów i ich zastosowań, zapoznanie się z nowoczesnymi technologiami oraz ustanowienie rekordu Polski w kategorii „Najwięcej osób rozwiązujących krzyżówki jednocześnie”. Warto przypomnieć, że inicjatorami ODIM są dr hab. Izabela Szafraniak-Wiza, prof. Politechniki Poznańskiej, dr inż. Grzegorz Michta z Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie i dr inż. Rafał Wróblewski z Politechniki Warszawskiej, finaliści konkursu Popularyzator Nauki 2024 w kategorii „Zespół”. Od 2022 r. w ramach ODIM naukowcy ci pokazują szerokiemu gronu odbiorców, że inżynieria materiałowa odgrywa kluczową rolę w innowacjach technologicznych, które wpływają na różne branże, takie jak elektronika, budownictwo, energetyka, lotnictwo i medycyna. Ich zdaniem w podstawie programowej szkół podstawowych i średnich brakuje przedmiotów, które ukazałyby inżynierię materiałową jako naukę. Wiedza o materiałach jest dostępna dopiero na studiach inżynierskich, co wpływa na niski poziom zainteresowania tą dziedziną. Dlatego ODIM jest wyjątkową inicjatywą, która pozwala zapoznać dzieci i młodzież z inżynierią materiałową już na etapie szkoły i rozbudzić w nich zainteresowanie materiałami oraz zachęcać do zgłębiania nauk ścisłych. – *Naszym celem jest zwiększenie świadomości społeczeństwa na temat inżynierii materiałowej i roli, którą odgrywa. Zależy nam także na przyciągnięciu młodych talentów, które podejmując studia na kierunkach związanych z inżynierią materiałową, będą miały szansę wkroczyć w fascynujący świat nauki i technologii* – powiedział dr R. Wróblewski w wywiadzie dla serwisu Nauka w Polsce.

Pierwszy artykuł naukowy, który publikujemy w tym numerze, opisuje badania, w których komercyjnie dostępną żywicę silikonową zmodyfikowano steatytem jako wypełniaczem, aby zwiększyć stabilność termiczną klejów samoprzylepnych. Żywicę poddano wielu testom laboratoryjnym, które dowiodły, że nowe materiały klejące charakteryzowały się wysoką stabilnością termiczną i dobrymi właściwościami użytkowymi. Wyniki badań pokazały, że czysta żywica jest wysokiej klasy materiałem do otrzymywania Si-PSA, a jako materiał do modyfikacji pozwala uzyskać bardzo dobre wyniki w teście SAFT (wysoka wytrzymałość termiczna). Dodatek steatytu pozwolił uzyskać taśmy pracujące w temperaturze ok. 250°C, przy jednoczesnym niewielkim pogorszeniu lepkości i skurczu (nadal akceptowalnym), zachowaniu tego samego poziomu spójności w temperaturze pokojowej i wyższej oraz niewielkim zwiększeniu wartości przyczepności. Drugi artykuł dotyczy relacji pomiędzy przebiegiem emisji tlenu węgla do atmosfery z procesów hutniczych i jego oddziaływaniem na zdrowie człowieka i środowisko naturalne. Autor dokonał przeglądu znaczących źródeł emisji tlenu węgla, jego wpływu na organizm człowieka oraz konsekwencji dla środowiska naturalnego. Przeanalizował zagrożenia wynikające z obecności CO w atmosferze, co pozwoliło także wskazać skuteczne możliwe metody minimalizacji jego emisji i ochrony zdrowia publicznego. Poruszył także kwestie możliwości zastosowania sztucznej inteligencji w ograniczeniu emisji CO, która może w przyszłości odegrać kluczową rolę w ograniczeniu emisji gazów szkodliwych poprzez odpowiednią racjonalizację procesów przemysłowych, monitorowanie środowiska oraz wspieranie zrównoważonego rozwoju. W artykule pt. „Kontrola wymiarowa ziaren ściernych żużla pomiedziowego” przedstawiono skomputeryzowaną analizę wielkości ziaren i mikroziaren ściernych. W badaniach ziaren żużla pomiedziowego zastosowano optyczną mikroskopię stereoskopową oraz specjalistyczne oprogramowanie Multi-Scan v 6.08. Autor dowiódł, że zastąpienie na skalę przemysłową tradycyjnej analizy sitowej metodami spektrometrii laserowej należy uznać za kierunek właściwy. Zastosowanie zaś skomputeryzowanego systemu analizy mikroskopowej ułatwia ocenę zmian kształtu ziaren żużla pomiedziowego, przed podjęciem decyzji o ich odpowiednim wykorzystaniu w procesach obróbki strumieniowo-ścierniej.

Przypominamy, że wciąż przyjmujemy zamówienia na prenumeratę „Inżynierii Materiałowej” w 2025 r. Dziękujemy wszystkim Autorom, którzy zgłosili swoje artykuły naukowe do bieżącego numeru i zachęcamy do dalszej współpracy.

Życzymy przyjemnej lektury!

Anna Skurzevska
Sekretarz Redakcji



**OGÓLNOPOLSKI
DZIEŃ INŻYNIERII
MATERIAŁOWEJ**

**MATERIAŁY
INTELIGENTNE**

» Bielsko-Biała » Chorzów » Częstochowa »
» Gdańsk » Gliwice » Katowice »
» Kraków » Łódź » Poznań »
» Rzeszów » Szczecin » Warszawa »

MADE IN POLAND

Materiały w technologii *stealth* dla okrętów wojennych

Badacze z Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej wchodzi w skład międzynarodowego konsorcjum złożonego z wiodących firm stoczniowych i ośrodków naukowych, które zaczęło badania nad nowymi materiałami technologii *stealth* dla okrętów wojennych. Materiały mają być lżejsze i o większej odporności balistycznej, a także gwarantować niski poziom wykrywalności okrętów. Projekt ADMIRABLE, którego budżet wynosi ponad 10 mln zł i jest finansowany z Europejskiego Funduszu Obronnego (EDF), jest pierwszym projektem EDF realizowanym na Politechnice Wrocławskiej. Prace nad nim potrwać 3 lata i są prowadzone wraz z partnerami z Hiszpanii, Włoch, Niemiec, Luksemburga, Cypru i Polski, a całością prac zarządza hiszpańska firma stoczniowa Navantia. Uczestnikiem konsorcjum jest także włoskie przedsiębiorstwo stoczniowe Fincantieri, największe w Europie i czwarte na świecie.

Stealth to angielska nazwa przyjęta na całym świecie na określenie metod, strategii i technologii kamuflowania obiektów wojskowych i strategicznych. Technologie *stealth* zapewniają więc mniejszą wykrywalność m.in. przez radary. Chodzi o pochłanianie lub rozpraszanie (wysyłanego przez radary) promieniowania elektromagnetycznego, zamiast odbijania go. Różne techniki i strategię *stealth* obejmują także m.in. obniżanie promieniowania cieplnego, hałasu czy ograniczania emisji podczerwieni. Wszystko po to, by kamuflaż był maksymalnie skuteczny. – *W naszym projekcie wspólnie zamierzamy opracować nowy materiał na bazie kompozytów, który nie tylko będzie zapewniał skuteczną ochronę przed wykryciem, ale także będzie bardziej wydajny i zapewni co najmniej taką samą odporność balistyczną lub wyższą niż materiały na bazie stali* – powiedział dr hab. inż. Tomasz Kurzynowski, prof. uczelni, kierownik grantu na Politechnice Wrocławskiej. Stosując zaawansowane technologie wytwórcze, w tym druk 3D, badacze zamierzają zmniejszyć masę materiału *stealth* do ok. 160 kg/1 m², czyli o ok. 10% w porównaniu z obecnie stosowanymi. W ramach projektu konsorcjanci postawili na połączenie kilku procesów produkcyjnych, czyli opracowanie materiału, który będzie kompilacją warstw powstałych różnymi metodami wytwarzania. – *Materiał kompozytowy będzie składał się z różnych surowców, np. metali czy polimerów, o różnych mikrostrukturalnych geometriach dla każdej warstwy i różnych cechach, np. mechanicznych, elektrycznych czy chemicznych* – opowiada dr inż. Wojciech Stopyra, lider zespołu ds. wytwarzania przyrostowego w projekcie, i dodaje: *Obecnie żadna technika produkcyjna nie byłaby w stanie połączyć wytwarzania ich razem. Dlatego w ramach naszej współpracy będziemy także dążyć do opracowania połączonego procesu produkcji tego metamateriału kompozytowego, jak nazywamy go w naszej dokumentacji. Na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej powstanie warstwa tego metamateriału, która zostanie wytworzona w technologiach przyrostowych (czyli popularnym drukiem 3D) z polimerów, stopów metalicznych i ceramiki. Wybór tej metody produkcji ma pozwolić na znaczące zmniejszenie masy metamateriału, a kluczowa będzie jego struktura.* – Nazywa

się ją „sandwichową”, czyli kanapkową – tłumaczy dr Stopyra. – *Z zewnątrz pokryje ją powłoka ceramiczna o wysokiej twardości, której zadaniem będzie zmiana trajektorii pocisku uderzającego w ten materiał. Wewnątrz natomiast znajdują się stopy metaliczne w formie kratownic, czyli materiał o kompozycji ażurowej, którego zadaniem będzie pochłanianie energii uderzenia pocisku, czyli zatrzymanie go. Profesor T. Kurzynowski dodaje: A na samym końcu polimerowy tzw. spall liner będzie przechwytywał odłamki, jeśli fragmentujący pocisk jednak przedostałby się tak daleko lub struktura warstwy uległaby ukruszeniu [...] Można to sobie wyobrazić, przypominając, jak rozbija się szyba w samochodzie. Nie rozbryzguje się na drobniutkie kawałki, bo ma w sobie warstwę folii, która trzyma te małe odłamki. Podobnie działa spall liner.*

W badania prowadzone na Politechnice Wrocławskiej będzie zaangażowanych w sumie ok. 20 osób podzielonych na zespoły. Jeden z nich zajmie się wyborem materiałów, projektowaniem struktury materiału i procesie wytwarzania technologiami przyrostowymi. Drugi zespół skupi się m.in. na numerycznym prototypowaniu odporności balistycznej tzw. kanapek i nadzorowaniu testów balistycznych nowo projektowanych układów materiałowych, które będą prowadzone m.in. we włoskim laboratorium balistycznym. Cytowany w komunikacie uczelni prof. K. Jamrozia, były wojskowy i naukowiec z dużym doświadczeniem w realizacji projektów o charakterze militarnym, tłumaczy, że liderem projektu jest stocznia, więc badacze skupiają się na stworzeniu metamateriału, który mógłby zostać wykorzystany na okrętach wojennych lub/i floty cywilnej, np. do ochrony infrastruktury portowej lub budowy masztów radarowych. Opracowywany metamateriał mógłby być także wykorzystany w innych konstrukcjach o przeznaczeniu militarnym, np. w pojazdach opancerzonych czy dronach, a także z przeznaczeniem dla innych służb, takich jak policja, straż graniczna, i agencji związanych z bezpieczeństwem.

Źródło: <https://wroclaw.tech/dla-mediow>
Nauka w Polsce, www.naukawpolsce.pl

Bloczki ścienne z konopi

Doktor inż. Przemysław Brzyski z Politechniki Lubelskiej oraz mgr inż. Tomasz Bujnowski, przedsiębiorca i projektant, wraz z zespołem opracowali bloczki ścienne z paździerzy konopnych do stosowania w budownictwie. Domów wybudowanych z takich bloczków nie trzeba ocieplać, a ponadto pochłaniają też nadmiar wilgoci. Rozwiązanie to zostało opatentowane. Konopie w budownictwie stosowane są od dłuższego czasu, ale do tej pory do budowy ściany ustawiano drewniane deskowanie, w które wsypywano mieszanke wapienno-konopną i odpowiednio ją zagęszczano, a dodanie wody przekładało się na długi czas wysychania ścian. – *Paździerz konopne mają wysoką porowatość. Około 80 proc. ich objętości to powietrze uwięzione w porach. Dzięki temu bloczek ma bardzo dobre właściwości termoizolacyjne. Budynku, który z nich powstaje, nie trzeba dodatkowo ocieplać* – zaznaczył dr inż. P. Brzyski i dodał, że pochłaniają też nadmiar wilgoci z pomieszczenia i oddają ją, gdy powietrze otoczenia staje się zbyt suche. Bloczek o wymiarach

60 × 40 × 24 cm składa się z 3 warstw: 2 zewnętrzne zapewniają wytrzymałość, sztywność i odporność na czynniki zewnętrzne, a środkowa część o grubości 29 cm to lekka mieszanka o bardzo dobrych właściwościach termoizolacyjnych. Z komunikatu uczelni wynika, że istotnym elementem technologii jest połączenie paździerz konopnych ze spoiwem magnezowym, które zastępuje typowe dla takich kompozytów spoiwa wapienne. W ten sposób uzyskuje się lekki bloczek o dobrych parametrach termoizolacyjnych. Bardzo ważny jest także ekologiczny wymiar tego rozwiązania: *Konopie przemysłowe w czasie wzrostu pochłaniają duże ilości dwutlenku węgla. Mamy tutaj do czynienia z ujemnym śladem węglowym. To oznacza, że w cyklu produkcji bloczka, ilość pochłoniętego i zmagazynowanego CO₂ jest większa niż wyemitowanego.* Naukowcy mają nadzieję, że rosnąca świadomość ekologiczna i zmieniające się regulacje prawne mogą przyczynić się do większej popularności tego materiału. Niedaleko Lublina z takich bloczków zbudowano domek modelowy, gdzie prowadzone są badania cieplne i wilgotnościowe.

Źródło: pollub.pl
Nauka w Polsce, www.naukawpolsce.pl

Baterie wysokiej mocy z Politechniki Gdańskiej

Zespół badawczy z Wydziału Chemicznego Politechniki Gdańskiej pod kierunkiem dr hab. Moniki Wilamowskiej-Zawłockiej pracuje nad bateriami wysokiej mocy do zasilania m.in. dronów i samochodów, które mają być wytrzymałe, stabilne podczas ładowania i rozładowywania, wytworzone z ograniczonym użyciem surowców krytycznych, a przez to bardziej przyjazne dla środowiska. – *W naszych bateriach litowo-jonowych nowej generacji wykorzystamy tlenowęgliki krzemu (silicon oxycarbides, SiOCs) jako matryce do nanocząstek tworzących stopy z litem, jak elementarny krzem czy cyna* – powiedziała prof. M. Wilamowska-Zawłocka. Badaczka wyjaśniła, że SiOCs są materiałami ceramicznymi pochodzenia polimerowego, dzięki czemu można stosować metody syntezy gwarantujące dużą jednorodność nanokompozytów łączących metal i ceramikę. – *Tlenowęgliki krzemu zapewniają nie tylko dobrą wytrzymałość mechaniczną i chemiczną, ale są również materiałami aktywnymi elektrochemicznie wobec jonów litu, co pozwoli na uzyskanie materiałów anodowych o znacznie wyższej pojemności elektrycznej niż stosowany komercyjnie „krytyczny” naturalny grafit* – dodała. Podkreśliła, że pierwiastki, które tworzą stopy z litem, oferują znacznie większą pojemność elektryczną niż tradycyjne anody grafitowe, dlatego są główną drogą do zwiększenia pojemności anod w akumulatorach litowo-jonowych nowej generacji. Ich poważną wadę stanowi jednak znaczna zmiana objętości podczas cykli ładowania i rozładowania, co prowadzi do degradacji i utraty wydajności w czasie użytkowania. Zdaniem prof. M. Wilamowskiej-Zawłockiej to sprawia, że komercyjne baterie zawierające krzem są nadal rzadkością, lecz wiele firm pracuje nad opracowaniem tego typu anod. Zadaniem badaczy będzie *umieszczenie nanocząstek krzemu i cyny w odpowiednio zaprojektowanej matrycy SiOC, co zminimalizuje te problemy.* Politechnika Gdańska poinformowała, że prof. M. Wilamowska-Zawłocka została laureatką Szwajcarsko-Polskiego Programu Współpracy (Badania Naukowe i Innowacje, Badania Stosowane) i otrzymała ponad 4,3 mln zł dofinansowania na badania nad materiałami do

akumulatorów (baterii), które nie zawierają surowców krytycznych. Projekt będzie realizowany we współpracy ze szwajcarskim ośrodkiem badawczym Empa – Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology oraz firmą Siloxene AG.

Źródło: Nauka w Polsce, www.naukawpolsce.pl

Konkurs M-ERA.NET 3 Call otwart

Dnia 4 marca br. Narodowe Centrum Nauki we współpracy z siecią M-ERA.NET 3 ogłosiło konkurs na międzynarodowe projekty badawcze dotyczące nauki o materiałach i inżynierii materiałowej oraz niskoemisyjnych technologii energetycznych, a także badań nad materiałami na potrzeby przyszłych technologii produkcji akumulatorów, zgodnie z założeniami Europejskiego Zielonego Ładu. Konkurs M-ERA-NET 3 Call 2025 jest skierowany do konsorcjów międzynarodowych złożonych z co najmniej 3 zespołów badawczych pochodzących z różnych krajów biorących udział w konkursie. Przygotowując wnioski, naukowcy powinni skoncentrować się na nadrzędnych celach programu M-ERA-NET: wspieraniu Europejskiego Zielonego Ładu, dążeniu do realizacji Celów Zrównoważonego Rozwoju ONZ, zwiększania korzyści społeczno-ekologicznych w kontekście odpowiedzialności badań i innowacji, wspieraniu łańcucha innowacji oraz wzmacnianiu interdyscyplinarności badań. Konkurs obejmuje tematy z zakresu nauk o materiałach i inżynierii materiałowej, takie jak: (i) *sustainable materials for energy applications*, (ii) *innovative surfaces, coatings and interfaces*, (iii) *advanced composites and lightweight materials*, (iv) *functional materials*, (v) *materials addressing environmental challenges* oraz (vi) *next generation materials for electronics*.

W konkursie po polskiej stronie biorą udział Narodowe Centrum Nauki oraz Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Naukowcy pracujący w jednostkach naukowych w kraju mogą ubiegać się o finansowanie w jednej z tych agencji, w zależności od zakresu planowanych badań. NCN finansuje projekty obejmujące badania podstawowe (Technology Readiness Level 1–4), bez udziału partnera przemysłowego. NCBI&R umożliwia realizację projektów, które zaczynają się od TRL 3–6, a kończą na TRL 5–8; udział partnera przemysłowego jest konieczny.

Projekty konkursowe mogą być planowane na 24 lub 36 miesięcy. Kierownik polskiego zespołu musi mieć co najmniej stopień doktora. Budżet może obejmować środki na wynagrodzenia, zakup lub wytworzenie aparatury naukowo-badawczej, urządzeń i oprogramowania, usługi obce, wyjazdy, konsultacje i inne niezbędne do realizacji projektu wydatki.

Zespoły chcące ubiegać się o finansowanie w konkursie M-ERA-NET 3 Call 2025 powinny najpierw przygotować we współpracy z partnerami zagranicznymi wnioski wstępne (tzw. *pre-proposals*) i złożyć je do 13 maja 2025 r. do godziny 12:00 za pośrednictwem międzynarodowego systemu M-ERA.NET Submission System. Wnioski będą oceniane przez międzynarodowy zespół ekspertów, a wybrane konsorcja międzynarodowe zostaną zaproszone do złożenia wniosku pełnego (tzw. *full proposal*). Ogłoszenie wyników zaplanowano na luty 2026 r.

Źródło: Narodowe Centrum Nauki, www.ncn.gov.pl,
4 marca 2025 r.

Przygotowała mgr Anna Skurzewska

Thermal stability and mechanical properties of silicone pressure-sensitive adhesives modified with steatite

Trwałość termiczna i właściwości mechaniczne silikonowych klejów samoprzylepnych modyfikowanych steatytem

ADRIAN K. ANTOSIK*
MARCIN BARTKOWIAK

ORCID: 0000-0002-3954-6612
ORCID: 0000-0002-4764-5485

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

*e-mail: adriankrzysztofantosik@gmail.com

A commercially available silicone resin SH-922 was modified with steatite as a filler, to enhance the thermal stability of silicone pressure-sensitive adhesives. The resin, crosslinked with 2,4-dichlorobenzoyl peroxide (DCIBPO) and modified with various amounts of the filler, coated onto a carrier, was then subjected to many laboratory tests. The new adhesive materials were characterized by high thermal stability and good utility properties. The research results showed that pure resin is a high-class material for obtaining Si-PSAs, and as a material for modification, it allowed to get very high results in the SAFT test (high thermal resistance). The addition of steatite allowed to obtain tapes operating at about 250°C, while slightly worsening the tackiness and shrinkage (still acceptable), maintaining the same level of cohesion at room and higher temperature, and slightly increasing the adhesion value.

Keywords: silicone pressure-sensitive adhesives, Si-PSA, thermal stability, thermo-mechanical properties, steatite, adhesion, cohesion, shrinkage

Zmodyfikowano komercyjnie dostępną żywicę silikonową SH-922 steatytem jako wypełniaczem, aby zwiększyć stabilność termiczną silikonowych klejów samoprzylepnych. Żywica usieciowana nadtlaniem 2,4-dichlorobenzoylu (DCIBPO) i modyfikowana różnymi ilościami wypełniacza, pokryta nośnikiem, została następnie poddana wielu testom laboratoryjnym. Nowe materiały klejące charakteryzowały się wysoką stabilnością termiczną i dobrymi właściwościami użytkowymi. Wyniki badań pokazały, że czysta żywica jest wysokiej klasy materiałem do otrzymywania Si-PSA, a jako materiał do modyfikacji pozwala uzyskać bardzo wysokie wyniki w teście SAFT (wysoka wytrzymałość termiczna). Dodatek steatytu pozwolił uzyskać taśmy pracujące w temperaturze ok. 250°C, przy jednoczesnym niewielkim pogorszeniu lepkości i skurczu (nadal akceptowalnym), zachowaniu tego samego poziomu spójności w temperaturze pokojowej i wyższej oraz niewielkim zwiększeniu wartości przyczepności.

Słowa kluczowe: kleje silikonowe wrażliwe na nacisk, Si-PSA, stabilność termiczna, właściwości termo-mechaniczne, steatyt, przyczepność, spójność, skurcz

1. INTRODUCTION

Silicone pressure-sensitive adhesives are a specialized and quite unique part of the pressure-sensitive adhesive family, extremely widely used in numerous industries. Most often, Si-PSA are substituted polysiloxanes with the addition of silicone resins, dissolved in toluene or similar organic solvents. With high viscosity, can be easily coated onto various carriers and crosslinked to form adhesive layers with unique properties. Silicone pressure-sensitive adhesives (Si-PSA) are usually obtained from solid or liquid silicone resin compositions thermally crosslinked using peroxides during a radical reaction. Premixed as working mixtures with the crosslinking agent, they should be used (coated) within 1–2 days. This is because peroxide quickly loses its activity in the solvent. Excellent dispersion of peroxide in the adhesive during

the mixing process is a prerequisite for ensuring the consistency of the finished product [1, 2].

Silicone pressure-sensitive adhesives (Si-PSAs) have become increasingly popular among PSAs in the last twenty years. They are characterized by high chemical resistance and environmental conditions resistance such as solar radiation or humidity; and they have excellent performance properties (adhesion, cohesion, and tack), especially for materials with low surface energy. Additionally, they have great thermal resistance properties and fire retardancy, with good stability and low smoke generation in fire [3]. Their properties result from a unique chemical structure; typical Si-PSA consist of large proportions of silane-functional silicone polymers and silicone resins such as MQ resins, have high flexibility of their Si-O-Si connections while lacking functional groups [4]. It is common knowledge that these are high-class materials for special applications, often more expensive and more

exclusive than materials based on carbon PSA. An increasingly wider range of applications of these materials (silicone adhesives are used in various areas, including electronics, electrical engineering, machine construction, the production of decorative objects and toys in construction, interior decoration, automotive industry, etc.) it only limits the profitability of their use [2, 5].

Steatite (also called soapstone) is a component of the Earth's crust. As a metamorphic rock, it was created as a result of a mineral reaction that occurred at very high temperatures and pressure. It creates foreign formations in the Earth's crust because its components come from rock materials located in a layer below the Earth's crust (from the Earth's mantle). It is characterized by the fact that it can be easily processed, due to its high talc content, it is resistant to temperature, and has the ability to store heat. Apart from talc, the main mineral components of most typical steatite are mica, chlorite, amphibole, pyroxene and serpentinite. Steatite is used for carving souvenirs and artistic products. In the electrical industry, it is used to make fuse insert bodies [6, 7].

This work aimed to test new silicone resin SH-922, obtained from Hubei Longsheng Sihai New Materials corporation (China), as a basis for the production of new Si-PSAs. Determine its properties and potentially modify it with steatite to develop new adhesive tapes with increased thermal resistance based on silicone pressure-sensitive adhesives and to check the compatibility of steatite additive with silicone resin. For this purpose, the selected silicone resin was crosslinked with variable amounts of 2,4-dichlorobenzoyl peroxide and then the composition showing the best adhesive properties was subjected to another modification, where different filler amounts were introduced to it. The functional properties of obtained PSA samples, such as adhesion, cohesion, and viscosity, were examined, and the effect of steatite additive on the thermal stability of silicone pressure-sensitive adhesives in the SAFT test was assessed.

2. EXPERIMENTAL

2.1. MATERIALS

In the research, the following materials were used: (i) silicone resin SH-922 was purchased from Hubei Longsheng Sihai New Materials Co. Ltd. (Hubei, China); (ii) crosslinking agent – 2,4-dichlorobenzoyl peroxide (DCIBPO) was a product of Novichem Ltd. (Chorzów, Poland); (iii) filler – steatite in mineral form (Fig. 1) was purchased from FHUP "M.K. CAPAR" Kamil Capar (Poland).

2.2. METHODS

2.2.1. FILLER PREPARATION

Using a laboratory grinder with a capacity of up to 350 g, from ChemLand (Stargard, Poland), the mineral was ground at a maximum speed of 28,000 RPM, introducing 50 g of pre-crushed steatite into the grinder and grinding it for 10 minutes with one 5-minute break. The obtained fraction of 70–300 mesh was sieved, and the largest fraction was separated. The filler prepared in this way was subjected to further tests.



Fig. 1. Steatite
Rys. 1. Steatyt

2.2.2. PREPARATION OF ONE-SIDE SELF-ADHESIVE TAPE

To prepare one-side self-adhesive tape silicone resin was mixed with filler powder (0.1, 0.5, 1, and 3% by mass (based on dry polymer) and a crosslinker (0.5–3.0% by mass 2-4-dichlorobenzoyl peroxide) until a homogeneous consistency was obtained. The composition prepared was then coated (45 g/m²) onto a polyester film (50 g/m²) using a semi-automatic coater. After this, the adhesive film was placed in a drying duct for 10 min at 110°C for crosslinking. The obtained adhesive film was secured with a second layer of silicone fluorinated polyester film and cut into strips for further tests.

2.2.3. POT-LIFE

The pot-life (also called shelf life) is the maximum time after preparing the final composition so that can be coated on a carrier. Practically, it refers to the time required to increase the viscosity (twice or four times) compared to the initial viscosity of the mixture. The test is carried out at room temperature and starts immediately after preparing the composition. Viscosity measurements were performed with the rotational viscometer IKA Rotavisc me-vi (IKA-Werke GmbH & Co. KG, Staufen im Breisgau, Germany).

2.2.4. FUNCTIONAL PROPERTIES

The functional properties of the obtained self-adhesive tapes based on the modified composition of silicone pressure-sensitive adhesives have been determined using the international standards [8, 9]: (i) peel adhesion – Fédération Internationale des Fabricants et Transformateurs d'adhesifs et thermocollants sur papiers et autres support (FINAT) FTM 1 *Peel adhesion (180°) a 300 mm/minute*; peel adhesion is described as a force required to peel off the PSA sample from a standardized plate with defined speed and angle; tests are carried out with a standard tensile testing machine and presented in N/25 mm (width of the PSA sample); (ii) cohesion – FINAT FTM 8 *Resistance of shear from a standard surface*; the measurement was carried out at the room and elevated temperature (70°C); in this method, a strip of PSA-coated sample is applied to the steel plate with a contact area of 25 mm²; the free end of the strip is loaded with a weight of 1 kg and hung in the thermostatic chamber; as a final result, the time of separation between sample and plate is noted; (iii) tack – FINAT FTM 9 *Loop tack measurement*; Tack is defined as initial tackiness of the adhesive and is measured using a standard tensile testing machine; a PSA strip formed in the loop is removed from a steel plate after a short contact and the force is measured for this operation;

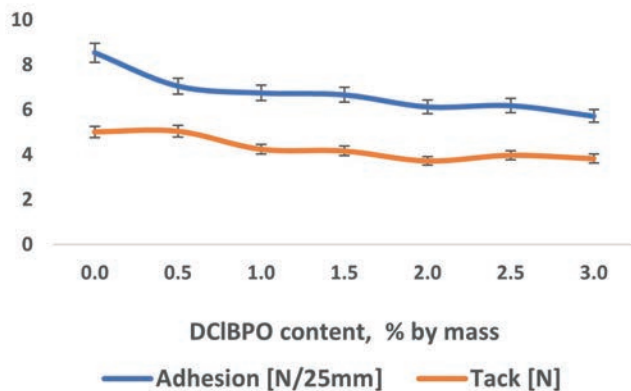


Fig. 2. Effect of crosslinking agent content on the peel adhesion and tack of silicone pressure-sensitive adhesive

Rys. 2. Wpływ zawartości środka sieciującego na przyczepność i odrywanie kleju silikonowego samoprzylepnego

the contact area between a sample and the plate is 25mm²; (iv) thermal resistance – Association des Fabricants Europeens de Rubans Auto-Adhesifs AFERA 5013 (Global Tape Forum (GTF) 6001) *Shear adhesion failure temperature (SAFT) of adhesive tapes*; this method is similar to cohesion tests, with the same procedure of preparing the samples; the difference is that the thermostatic chamber is working with the programmed temperature increase at a heating rate of 1°C/min; as a result of the test, the joint damage temperature is noted; (v) shrinkage – FINAT FTM 14 *Dimensional stability*; self-adhesive samples in the form of 10 × 10 cm films, are attached to aluminum plates and conditioned for 72 h; after that, the cross-shaped 8 cm incisions are made on the samples; the samples are then placed in the thermostatic chamber for a defined time; the contractions are measured then using the appropriate tool.

2.3. RESULTS AND DISCUSSION

To determine the best performance properties, the HS-922 silicone resin was selected, which was subjected to chemical modification by crosslinking it with 2-4-dichlorobenzoyl peroxide.

In Figure 2 the adhesion and tack results for the self-adhesive tapes produced based on pure Si-PSAs modified with different amounts of cross-linking agent (DCIBPO) added were shown. During the tests, it was found that the cross-linked adhesive film showed lower adhesion and tack values, decreasing with increasing amounts of 2,4-dichlorobenzoyl peroxide. The resin used showed a slight decrease in both values (larger for the adhesion value). The decrease in adhesion and tack values is characteristic for PSAs, which is confirmed by other studies in the literature [10–12].

In Table 1 the results of cohesion at room temperature, elevated temperature, and the results of the SAFT test for compositions modified with the addition of a crosslinking compound were shown. Only the non-crosslinked adhesive at elevated temperature showed a cohesive crack after 5 h, for the remaining cases the time was obtained above 72 h (research limit), thus demonstrating excellent cohesion of the adhesive. Only the thermal resistance tested on the basis of

Table 1. Cohesion and thermal resistance of the prepared silicon SH-922 compositions with various crosslinking agent content

Tabela 1. Kohezja i odporność cieplna przygotowanych silikonowych kompozycji SH-922 o różnej zawartości środka sieciującego

Crosslinking agent content, % by mass	Cohesion at 23°C, h	Cohesion at 70°C, h	SAFT, °C
0.0	> 72	5.0	175
0.5	> 72	> 72	197
1.0	> 72	> 72	216
1.5	> 72	> 72	220
2.0	> 72	> 72	214
2.0	> 72	> 72	200
3.0	> 72	> 72	188

Table 2. Shrinkage of silicone pressure-sensitive adhesives with various crosslinking agent content
Tabela 2. Skurcz silikonowych klejów samoprzylepnych o różnej zawartości środka sieciującego

Filler content, % by mass	Shrinkage, %											
	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	0.10	0.11	0.12	0.12	0.12	0.13	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15
0.5	0.08	0.09	0.10	0.11	0.11	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.15	0.15
1.0	0.08	0.09	0.11	0.13	0.15	0.18	0.20	0.23	0.25	0.30	0.30	0.30
1.5	0.10	0.12	0.13	0.15	0.17	0.18	0.20	0.23	0.24	0.25	0.25	0.25
2.0	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.18	0.20	0.25	0.27	0.27	0.27
2.5	0.08	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12	0.12	0.12	0.13	0.14	0.16	0.16
3.0	0.08	0.09	0.10	0.11	0.11	0.12	0.13	0.13	0.13	0.14	0.15	0.15

the SAFT test showed differentiation in crosslinked samples, showing a maximum temperature of use around 220°C for the composition crosslinked with 1.5% by mass 2,4-dichlorobenzoyl peroxide. The degree of thermal resistance of pure PSAs for the tested resin SH-922 is very high.

In Table 2 the shrinkage results of the tested materials crosslinked with the addition of 2,4-dichlorobenzoyl peroxide were shown. All values obtained for different compositions were below 0.5%. The highest shrinkage value was obtained for samples cross-linked from 1.0 to 2.0% by mass, which allows us to assume that these compositions after cross-linking may show a "looser" structure compared to other cross-linking degrees. It is worth noting that the shrinkage is significantly lower for the SH-922 adhesive compared to the Si-PSA adhesives previously tested [13, 14] which means that the tested composition has good properties already in the cross-linked form.

Among the tested silicone adhesives without a filler, the sample containing 1.5% by mass 2-4-dichlorobenzoyl peroxide showed the best balance of performance properties and was selected for further modification with steatite.

In Table 3 the changes in viscosity of the modified pressure-sensitive adhesive containing 3% by mass of steatite were shown. After 24 h, the addition of filler caused a very high increase in the viscosity of the adhesive composition. The adhesive composition showed the highest viscosity values on day 3 after receipt (gelled, not suitable for coating). The literature shows that the viscosity of the pressure-sensitive adhesive increases with the amount of filler, therefore the tests were carried out for the largest amount of steatite [15, 16]. Si-PSAs compositions with steatite are characterized by a very fudge pot life and cannot be stored for a long time; in industry, they have to be produced as needed, on an ongoing basis.

The effect of the addition of steatite on the adhesion and tack values was shown in Figure 3. The addition of filler cau-

Table 3. The viscosity changes of the composition containing 3% by mass of steatite
Tabela 3. Zmiany lepkości kompozycji zawierającej 3% mas. steatytu

Viscosity, Pa·s				
1 day	2 days	3 days	5 days	7 days
67.3	85.2	gel	gel	gel

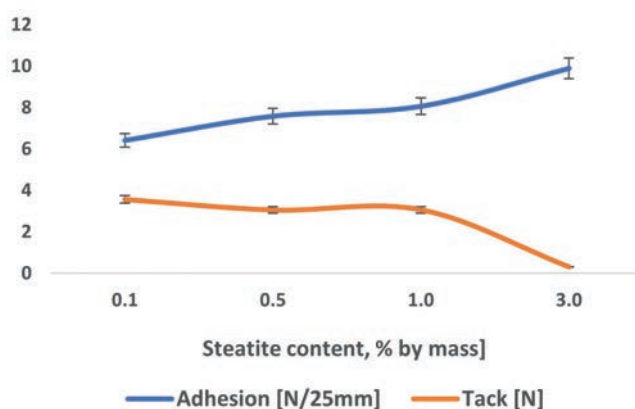


Fig. 3. Effect of steatite content on the peel adhesion and tack of silicone pressure-sensitive adhesive

Rys. 3. Wpływ zawartości steatytu na przyczepność i lepkość silikonowego kleju samoprzylepnego

sed an increase in the adhesion value from about 6 N/25 mm to about 10 N/25 mm for the highest degree of filling, which may be due to the appearance of a large number of spatial hindrances in the cross-linked resin, due to which the material becomes more compact and systematized, which translates into the adhesion values [17]. However, the tack values decre-

Table 4. Cohesion and thermal resistance of the prepared Si-PSA compositions with various steatite content
Tabela 4. Kohezja i odporność cieplna przygotowanych kompozycji Si-PSA o różnej zawartości steatytu

Crosslinking agent content, % by mass	Cohesion at 23°C, h	Cohesion at 70°C, h	SAFT, °C
0.0	> 72	> 72	220
0.1	> 72	> 72	251
0.5	> 72	> 72	226
1.0	> 72	> 72	190
3.0	> 72	> 72	178

Table 5. Shrinkage of silicone pressure-sensitive adhesives with various steatite content
Tabela 5. Skurcz silikonowych klejów samoprzylepnych o różnej zawartości steatytu

Shrinkage, %												
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	0.10	0.12	0.13	0.15	0.17	0.18	0.20	0.23	0.24	0.25	0.25	0.25
0.1	0.08	0.09	0.10	0.14	0.19	0.24	0.26	0.31	0.34	0.39	0.41	0.41
0.5	0.07	0.08	0.09	0.10	0.18	0.21	0.25	0.30	0.32	0.34	0.38	0.40
1.0	0.07	0.08	0.09	0.10	0.15	0.19	0.22	0.29	0.31	0.34	0.39	0.39
3.0	0.04	0.06	0.09	0.10	0.11	0.13	0.15	0.16	0.18	0.18	0.18	0.18

ased (reaching a value below 1 N for 3% by mass of steatite addition, which is a common phenomenon described in the literature [18, 19].

In Table 4 the continuation of the thermal resistance tests, where the selected adhesive composition is additionally modified with the addition of a filler (steatite) was shown. The cohesion results at room and elevated temperatures were maintained at a level above 72 h, while the SAFT test results showed that a small addition of filler increases the thermal resistance of the tape to about 250°C, which is 30° more than for the unmodified composition. Then this value decreases with the increase in the amount of filler in the compositions, obtaining a value similar to the non-crosslinked adhesive for the highest degree of filler addition. The observed behavior may be due to the fact that a small addition of filler stimulates the crosslinked composition, creating a more compact structure of the adhesive film, and increasing shear resistance. Higher amounts of the filler are likely to agglomerate in testing conditions, thus weakening the structure of the microcomposite material.

Additionally, the studies have shown that the addition of steatite also has a negative effect on the shrinkage values (Table 5) only the composition containing 3% by mass, achieved shrinkage below the reference sample value, and even this was not the lowest value obtained during the studies. This is certa-

inly related to the structure of cross-linked Si-PSAs and may be caused by a certain form of incompatibility of the introduced material and the initial good properties of the base resin [19].

3. CONCLUSIONS

The use of steatite filler with the novel SH-922 resin allowed us to obtain new self-adhesive materials based on silicone pressure-sensitive adhesives. The new materials were characterized by high thermal stability and good utility properties.

The research results show that pure resin is a high-class material for obtaining Si-PSAs, and as a material for modification, it allowed us to obtain very high results in the SAFT test (high thermal resistance). The addition of steatite allowed us to obtain tapes operating at about 250°C, while slightly worsening the tackiness and shrinkage (mixable in the norm), maintaining the same level of cohesion at room and above temperature, and slightly increasing the adhesion value. Although the use of steatite did not bring the effects we had anticipated, based on previous experience, it did allow us to obtain some of the best thermal resistance values for modified Si-PSA. And the new resin is an excellent base for further valuable modifications.

The best tapes obtained with increased thermal resistance can be used in heavy industry to connect elements operating

at elevated temperatures. In addition, they can be used for the production of masking tapes, joints, and electroplating tapes.

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 want to thank the company 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] Lin S.B., Durfee L.D., Ekeland R.A., McVie J., Schallau G.K.: Recent advances in silicone pressure-sensitive adhesives. *J. Adhes. Sci. Technol.* 21 (2007) 605, doi:10.1163/156856107781192274.
- [2] Lin S.B., Durfee L.D., Knott A.A., Schallau G.K.: Silicone pressure-sensitive adhesives. In *Technology of pressure-sensitive adhesives and products*, Benedek I., Feldstein M.M. (eds.). CRC Press, Taylor & Francis Group (2009).
- [3] Antosik A.K., Grajczyk A., Półka M., Zdanowicz M., Halpin J., Bartkowiak M.: Influence of talc on the properties of silicone pressure-sensitive adhesives. *Materials (Basel)* 17 (2024), doi:10.3390/ma17030708.
- [4] Sun F., Hu Y., Du H.H.-G.: Synthesis and characterization of MQ silicone resins. *J. Appl. Polym. Sci.* 125 (2012) 3532, doi:10.1002/app.35194.
- [5] Antosik A.K., Czech Z.: Pressure-sensitive adhesives (PSA) based on silicone. In *Advanced materials interfaces*. Wiley (2016) 249.
- [6] Werr U.: Material re-visited: Steatite may be old, but still up-to-date! *Ceramic APPLICATIONS* 10 (2022) 29.
- [7] Rodrigues M.L.M., Lima R.M.F.: Cleaner production of soapstone in the Ouro Preto Region of Brazil: A case study. *J. Clean. Prod.* 32 (2012) 149, doi:10.1016/J.JCLEPRO.2012.03.028.
- [8] FINAT: *Technical Handbook Test Methods*, 10th ed. Fédération Internationale des Fabricants et Transformateurs d'Adhésifs et Thermocollants sur Papiers et Autres Support: The Hague, The Netherlands (2019).
- [9] <http://www.afera.com/technical-centre/afera-test-methods>, accessed Nov 10, 2021.
- [10] Lee J.H., Lee T.H., Shim K.S., Park J.W., Kim H.J., Kim Y., Jung S.: Effect of crosslinking density on adhesion performance and flexibility properties of acrylic Pressure sensitive adhesives for flexible display applications. *Int. J. Adhes. Adhes.* 74 (2017) 137, doi:10.1016/j.ijadhadh.2017.01.005.
- [11] Czech Z.: Synthesis of new solvent-borne acrylic pressure-sensitive adhesives with low shrinkage. *Polimery/Polymers* 50 (2005) 831.
- [12] Czech Z., Kowalczyk A., Kabat J., Shao L., Bai Y., Świdorska J.: UV-initiated crosslinking of photoreactive acrylic pressure-sensitive adhesives using excimer-laser. *Polym. Bull.* 70 (2013) 479, doi:10.1007/s00289-012-0818-7.
- [13] Antosik A.K., Bartoszewski A., Półka M., Wilpiszewska K., Bartkowiak M.: Effect of Vermiculite on the fire retarding properties of silicone pressure-sensitive adhesives. *Int. J. Adhes. Adhes.* 132 (2024), doi:10.1016/j.ijadhadh.2024.103733.
- [14] Antosik A.K., Mozelewska K.: Influence of nanoclay on the thermo-mechanical properties of silicone pressure-sensitive adhesives. *Materials (Basel)* 15 (2022) 7460, doi:10.3390/ma15217460.
- [15] Barnes H.A.: A review of the rheology of filled viscoelastic systems. *Rheol. Rev.* 2003 (2003) 1.
- [16] Poh B.T., Ahmad L.: Effect of silica filler on viscosity and adhesion properties of natural rubber based adhesive. *J. Rubber Res.* 19 (2016) 19.
- [17] Songtipya L., Songtipya P., Sengsuk T., Kalkornsurapranee E., Nakaramontri Y., Johns J.: Improved adhesion properties of natural rubber-based pressure-sensitive adhesives by incorporating particulate fillers. *Compos. Commun.* 27 (2021) 100880, doi:10.1016/j.coco.2021.100880.
- [18] Czech Z., Maciejewski Z., Kondratowicz-Maciejewska K.: Water-borne pressure-sensitive adhesives acrylics modified using amorphous silica nanoparticles. *Polish J. Chem. Technol.* 18 (2016) 124, doi:10.1515/pjct-2016-0081.
- [19] [19] Sanghvi M.R., Tambare O.H., More A.P.: Performance of various fillers in adhesives applications: A review. *Polym. Bull.* 79 (2022) 10491, doi:10.1007/s00289-021-04022-z.



Review of the relationship between the course of carbon monoxide emissions to the atmosphere from metallurgical processes and its impact on human health and the natural environment

Przegląd relacji pomiędzy przebiegiem emisji tlenku węgla do atmosfery z procesów hutniczych i jego oddziaływaniem na zdrowie człowieka i środowisko naturalne

ARKADIUSZ KLIMCZYK***ORCID: 0000-0001-6285-0252**Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej,
AGH w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

*e-mail: Arkadiusz.Klimczyk@agh.edu.pl

A review, with 32 refs., of significant sources of carbon monoxide emissions, its impact on the human body and its consequences for the natural environment. The analysis of The hazards resulting from the presence of CO in the atmosphere were analyzed, that will also allow to indicate effective possible methods of minimizing its emissions and protecting public health. The possibilities of using artificial intelligence (AI) to reduce CO emissions was touched. Artificial intelligence can play a key role in reducing harmful gas emissions in the future by properly rationalizing industrial processes, monitoring the environment and supporting sustainable development.

Keywords: carbon monoxide, industrial processes, artificial intelligence, health care, natural environment

Przegląd znaczących źródeł emisji tlenku węgla, jego wpływu na organizm człowieka oraz konsekwencji dla środowiska naturalnego. Przeanalizowano zagrożenia wynikające z obecności CO w atmosferze, co pozwoliło także wskazać skuteczne możliwe metody minimalizacji jego emisji i ochrony zdrowia publicznego. Poruszono kwestie możliwości zastosowania sztucznej inteligencji (SI) w ograniczeniu emisji CO. Sztuczna inteligencja może w przyszłości odegrać kluczową rolę w ograniczeniu emisji gazów szkodliwych poprzez odpowiednią racjonalizację procesów przemysłowych, monitorowanie środowiska oraz wspieranie zrównoważonego rozwoju.

Słowa kluczowe: tlenek węgla, procesy przemysłowe, sztuczna inteligencja, ochrona zdrowia, środowisko naturalne

1. WSTĘP

Tlenek węgla (CO), nazywany potocznie czadem, jest bezbarwnym i bezwonym gazem, który powstaje w wyniku niepełnego spalania paliw kopalnych, takich jak węgiel, gaz ziemny czy benzyna. Choć najczęściej kojarzony jest z zagrożeniem dla zdrowia ludzkiego w zamkniętych pomieszczeniach, jego obecność w atmosferze ma również istotne konsekwencje dla środowiska naturalnego. Duże stężenia CO w powietrzu przyczyniają się do obniżenia jakości powietrza oraz generują nienaturalne procesy atmosferyczne, takie jak powstawanie smogu czy wzrost poziomu ozonu troposferycznego. Dla ludzi gaz ten jest niezwykle niebezpieczny, ponieważ wiążąc się z hemoglobina, ogranicza zdolność krwi do transportu tlenu, co może prowadzić do poważnych konsekwencji zdrowotnych, a nawet śmierci.

2. ODZIAŁYWANIE TLENKU WĘGLA NA ZDROWIE CZŁOWIEKA I ŚRODOWISKO NATURALNE

Tlenek węgla w atmosferze może powodować poważne konsekwencje dla przyrody: (i) efekt cieplarniany – chociaż CO sam w sobie nie jest silnym gazem cieplarnianym, jego obecność wpływa na poziom innych gazów, takich jak metan czy ozon, przyczyniając się do zmian klimatycznych [1]; (ii) wpływ na organizmy żywe – CO może powodować osłabienie roślin poprzez zaburzenie procesów fotosyntezy oraz wpływać na zwierzęta poprzez ograniczenie ilości tlenu we wdychanym powietrzu [2]; (iii) zakwaszenie ekosystemów – w niektórych warunkach CO może przekształcać się w ditlenek węgla (CO₂), przyczyniając się do zakwaszenia wód i gleb [3]; (iv) wpływ na jakość powietrza – CO jest istotnym wskaźnikiem zanieczyszczenia powietrza, zwłaszcza w obszarach miejskich i przemysłowych [4].

Tlenek węgla jest substancją silnie toksyczną dla ludzi, a jego negatywny wpływ wynika z właściwości wiązania się z hemoglobina. CO wiąże się z hemoglobina, tworząc karboksyhemoglobina, która ogranicza zdolność krwi do transportu tlenu. Może to prowadzić do zawrotów głowy, bólów głowy, a w skrajnych przypadkach do utraty przytomności i śmierci [5]. Długotrwała ekspozycja na małe stężenia CO może powodować zaburzenia pamięci, koncentracji i koordynacji ruchowej [1]. Osoby z chorobami układu krążenia są szczególnie narażone na negatywne skutki CO, ponieważ jego obecność w krwiobiegu prowadzi do niedotlenienia serca [5]. Tlenek węgla może również przenikać przez łożysko, powodując niedotlenienie płodu, co zwiększa ryzyko wad wrodzonych i powikłań ciążowych [2]. Zjawisko wiązania się tlenu węgla z hemoglobina opisuje równanie Haldane'a (1) [6–8]:

$$\frac{[\text{HbCO}]}{[\text{HbO}_2]} = M \cdot \frac{p_{\text{CO}}}{p_{\text{O}_2}} \quad (1)$$

w którym $[\text{HbCO}]$ oznacza stężenie karboksyhemoglobiny, $[\text{HbO}_2]$ stężenie oksyhemoglobiny, p_{CO} ciśnienie cząstkowe tlenu węgla, p_{O_2} ciśnienie cząstkowe tlenu, a M współczynnik Haldane'a, który wynosi 200–250.

Równanie to pokazuje, że tlenek węgla wiąże się z hemoglobina 200–250 razy silniej niż tlen, co oznacza, że nawet niewielkie ilości CO w powietrzu mogą prowadzić do znacznego wzrostu poziomu karboksyhemoglobiny, powodując niedotlenienie organizmu i poważne konsekwencje zdrowotne [9]. W tabeli przedstawiono zależność zawartości karboksyhemoglobiny (HbCO) we krwi od objawów zatrucia.

Objawy zatrucia CO zależą od stężenia HbCO we krwi. Przy stężeniach poniżej 20% objawy, takie jak bóle i zawroty głowy, nudności czy osłabienie, mogą być niecharakterystyczne i łatwe do przeoczenia. W miarę wzrostu stężenia HbCO pojawiają się poważniejsze symptomy, takie jak dezorientacja, utrata przytomności, a przy wartościach powyżej 50% istnieje duże ryzyko zgonu z powodu niedotlenienia mózgu i serca [6–8].

3. EMISJA CO Z PROCESÓW METALURGICZNYCH

Tlenek węgla jest istotnym produktem ubocznym procesów hutniczych i metalurgicznych, zwłaszcza w tradycyjnych technologiach wielkopiecowych. Wielkie piece hutnicze, w których redukcja żelazonośnych materiałów wsadowych odbywa się przy użyciu koksu, generują znaczne ilości CO jako efekt uboczny reakcji chemicznych zachodzących podczas produkcji żelaza. Proces ten polega na redukcji tlenków żelaza za pomocą węgla zawartego w koksie, co prowadzi do powstania CO. Znacząca emisja CO występuje również w procesach spawalniczych [10].

W kontekście globalnym największymi emitentami CO w hutnictwie są kraje o dużym przemyśle stalowym, takie jak Chiny, Indie, Stany

Table. Relationship between the HbCO content in the blood and the symptoms of CO poisoning

Tabela. Zależność pomiędzy zawartością HbCO we krwi a objawami zatrucia CO

Zawartość HbCO we krwi, %	Objawy zatrucia
0–5	Brak zauważalnych objawów
5–10	Lekki ból głowy, zawroty głowy
10–20	Silniejszy ból głowy, osłabienie, duszność przy wysiłku
20–30	Silne bóle głowy, nudności, zawroty głowy
30–40	Spłątanie, dezorientacja, osłabienie mięśni
40–50	Utrata przytomności, zapaść
> 50	Śmierć w wyniku niedotlenienia mózgu i serca

Zjednoczone oraz kraje Unii Europejskiej. W Europie hutnictwo i metalurgia odpowiadają za ok. 30% emisji CO związanych z przemysłem ciężkim [11]. Najwięksi emitenci w Europie to Niemcy, Francja, Włochy oraz Polska, gdzie działa wiele dużych zakładów stalowych i metalurgicznych, chociaż w ostatnich latach następują duże zmiany. Jest to szczególnie związane z zamykaniem zakładów przemysłowych. W procesach spawania również dochodzi do emisji CO, przy czym poziom emisji zależy od stosowanej metody. Badania wykazały, że największa emisja CO występuje podczas lutowania, natomiast metoda CMT (*cold metal transfer*) charakteryzuje się mniejszymi emisjami tlenków azotu [12].

Szczegółowe zestawienie emisji CO w Polsce i jego zmiany w poszczególnych latach przedstawia najnowszy raport Ministerstwa Klimatu i Środowiska, opracowany przez Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami opublikowany w 2024 r. Na rys. 1 przedstawiono udział poszczególnych sektorów w emisji CO w 2022 r. Można zauważyć, że obecnie przemysł nie jest jednym z największych emitentów CO do atmosfery [13].

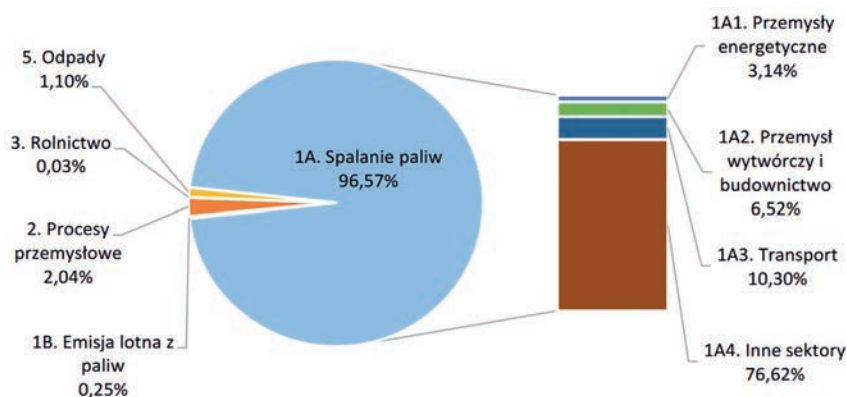


Fig. 1. Share of specific sectors in CO emissions in 2022 [13]

Rys. 1. Udział poszczególnych sektorów w emisji CO w roku 2022 [13]

4. REGULACJE I STRATEGIE ZMNIEJSZANIA EMISJI CO W EUROPIE

Aby ograniczyć emisję CO, Unia Europejska wdraża wiele regulacji i inicjatyw. Europejski Zielony Ład (*EU Green Deal*) stanowi kluczowy program, którego celem jest osiągnięcie neutralności klimatycznej do 2050 r. Zakłada on stopniowe ograniczanie emisji gazów cieplarnianych, w tym CO, oraz wdrażanie nowoczesnych technologii produkcji stali o mniejszym śladzie węglowym [14]. Kolejnym istotnym mechanizmem jest System Handlu Uprawnieniami do Emisji (EU ETS), obejmujący również huty. System ten zmusza przedsiębiorstwa do ograniczania emisji poprzez handel uprawnieniami do emisji, co stanowi bodziec ekonomiczny do inwestowania w technologie niskoemisyjne [15].

Ponadto Unia Europejska finansuje i wspiera liczne programy dekarbonizacji hutnictwa, takie jak projekt H2 Green Steel w Szwecji, który ma na celu produkcję stali przy użyciu wodoru zamiast koksu. Projekty te stanowią kluczowy krok w kierunku znaczącego zmniejszenia emisji CO i CO₂ [16]. W ostatnich latach obserwuje się także wzrost znaczenia technologii wychwytywania i składowania ditlenku węgla (CCS) oraz ponownego wykorzystania gazów hutniczych, co dodatkowo wpływa na zmniejszenie emisji CO w sektorze metalurgicznym.

5. NOWOCZESNE TECHNOLOGIE ZMNIEJSZANIA EMISJI CO

Alternatywne metody produkcji stali, takie jak elektryczne piece łukowe (EAF), są coraz bardziej popularne w Europie [17]. Pozwalają one na produkcję stali z wykorzystaniem złomu zamiast surowej rudy żelaza, co znacząco zmniejsza emisję CO. Kraje, takie jak Szwecja, Austria czy Niemcy inwestują w nowoczesne technologie, aby zmniejszyć emisję CO (np. projekt HYBRIT, realizowany przez szwedzkie firmy SSAB, LKAB i Vattenfall, wykorzystuje wodór do redukcji rudy żelaza, co pozwala całkowicie wyeliminować emisję CO [18]).

Wielkie piece i spiekalnie pozostają jednak głównymi źródłami emisji CO. Proces wielkopiecowy, w którym koks jest używany jako reduktor, generuje duże ilości CO. W celu ograniczenia emisji stosuje się różne technologie, takie jak wychwytywanie i ponowne wykorzystanie CO (np. do produkcji energii) [19, 20]. Ponadto wprowadza się systemy monitorowania procesów spalania oraz automatyzacji sterowania, które pomagają zoptymalizować zużycie paliw i zmniejszyć emisję [21]. Proces spiekania rudy, polegający na przekształcaniu drobnziarnistej rudy żelaza w większe grudki nadające się do wielkiego pieca, również przyczynia się do emisji CO. Wprowadzenie technologii filtracji oraz stosowanie paliw alternatywnych w spiekalniach może znacznie ograniczyć emisję CO [22]. Przykładem są nowoczesne systemy rekuperacji gazów procesowych, które pozwalają na odzysk ciepła i ponowne jego wykorzystanie w produkcji, co zwiększa efektywność energetyczną i zmniejsza ilość emitowanego CO [23]. Dodatkowo rozwój technologii opartych na wodorze i biogazie może odegrać kluczową rolę w ograniczaniu emisji CO [24].

Badania nad zastąpieniem koksu biomasą lub wodorem są coraz bardziej zaawansowane i mogą przyczynić się do dekarbonizacji przemysłu metalurgicznego w najbliższych dekadach. W połączeniu z zaawansowanymi systemami monitorowania i analizy procesów, możliwe jest osiągnięcie znaczącego zmniejszenia negatywnego wpływu tego sektora na środowisko [25].

6. ZASTOSOWANIE SZTUCZNEJ INTELIGENCJI W OGRANICZENIU EMISJI CO [26–32]

Sztuczna inteligencja (SI) odgrywa coraz większą rolę w zmniejszaniu emisji CO w przemyśle metalurgicznym. Wdrażanie nowoczesnych algorytmów SI pozwala na racjonalizację procesów produkcyjnych, minimalizację strat energetycznych oraz automatyzację sterowania parametrami operacyjnymi w czasie rzeczywistym. Zaawansowane modele predykcyjne analizują ogromne ilości danych, wskazując wzorce prowadzące do nadmiernej emisji CO i sugerując działania pozwalające na jej zmniejszenie. Systemy uczenia maszynowego umożliwiają samodzielne dostosowywanie parametrów pracy urządzeń w sposób pozwalający na ograniczenie zużycia paliw kopalnych i zmniejszenie ilości powstającego CO. Ważnym aspektem jest monitorowanie i kontrola emisji, które dzięki zastosowaniu sensorów IoT (*Internet of Things*) oraz algorytmów SI stają się bardziej efektywne. Nowoczesne systemy pozwalają na bieżące śledzenie poziomów emisji gazów hutniczych i ich automatyczną korektę w przypadku przekroczenia dopuszczalnych norm. Dzięki analizie predykcyjnej możliwe jest także przewidywanie przyszłych poziomów emisji oraz identyfikacja obszarów wymagających modyfikacji. Algorytmy SI umożliwiają również analizę historycznych i bieżących danych, co pozwala na dokładne prognozowanie zużycia paliw i emisji CO w różnych scenariuszach produkcyjnych. Wczesne wykrywanie trendów i zależności umożliwia podejmowanie strategicznych decyzji, które skutkują zmniejszeniem emisji oraz bardziej efektywnym wykorzystaniem zasobów.

SI znajduje także zastosowanie w automatyzacji procesów hutniczych i metalurgicznych. Inteligentne roboty oraz systemy sterowania mogą zastępować tradycyjne metody produkcji, zmniejszając straty surowcowe i zużycie energii. Automatyczne dostosowywanie intensywności procesów produkcyjnych do aktualnych warunków operacyjnych pozwala na zwiększenie efektywności i ograniczenie wpływu na środowisko. W praktyce rozwiązania te są już wdrażane przez największych producentów stali, takich jak Thyssenkrupp, który stosuje algorytmy SI do optymalizacji procesów wielkopiecowych, co skutkuje mniejszym zużyciem koksu i paliw kopalnych. Podobnie ArcelorMittal inwestuje w systemy analizy danych, które umożliwiają precyzyjne monitorowanie emisji oraz dynamiczne dostosowywanie parametrów operacyjnych w czasie rzeczywistym.

Zastosowanie SI w redukcji emisji CO wiąże się z licznymi korzyściami, takimi jak zmniejszenie zużycia paliw kopalnych, poprawa efektywności energetycznej, lepsza kontrola nad procesami produkcyjnymi oraz optymalne wykorzystanie surowców. Warto jednak zaznaczyć, że wdrożenie tych technologii wymaga

znaczących inwestycji, dostępu do zaawansowanej infrastruktury IT oraz odpowiedniego przeszkolenia personelu. Pomimo tych wyzwań, rozwój sztucznej inteligencji stanowi jedno z kluczowych narzędzi umożliwiających osiągnięcie celów dekarbonizacji przemysłu metalurgicznego i hutniczego. Dzięki nowoczesnym rozwiązaniom technologicznym możliwe jest znaczące ograniczenie emisji CO, co przynosi korzyści zarówno dla środowiska, jak i dla samego przemysłu.

7. PODSUMOWANIE

Tlenek węgla pozostaje istotnym produktem ubocznym hutnictwa i metalurgii, ale dzięki nowoczesnym technologiom oraz ścisłym regulacjom możliwe jest ograniczenie jego emisji. Inicjatywy Unii Europejskiej, takie jak Europejski Zielony Ład czy system EU ETS, skutecznie wspierają transformację sektora w kierunku niskoemisyjnych technologii. Kluczową rolę w zmniejszaniu emisji odgrywają również alternatywne metody produkcji stali, elektryczne piece łukowe oraz wykorzystanie wodoru jako reduktora.

Dodatkowo rozwój sztucznej inteligencji oraz zaawansowanych systemów monitorowania i zarządzania emisjami pozwala na coraz bardziej precyzyjne kontrolowanie procesów produkcyjnych. Wdrażanie technologii wychwytywania i ponownego wykorzystania CO daje możliwość nie tylko zmniejszania emisji, ale także ponownego jego wykorzystania w produkcji paliw syntetycznych i chemikaliów.

Należy również podkreślić, że zmniejszanie emisji CO w przemyśle hutniczym ma istotne znaczenie dla zdrowia człowieka. Długotrwałe narażenie na wysokie stężenia CO może prowadzić do poważnych problemów zdrowotnych, takich jak niedotlenienie organizmu, uszkodzenia układu nerwowego i układu krążenia. Ograniczenie emisji CO przyczynia się do poprawy jakości powietrza, co przekłada się na lepsze warunki życia i zmniejszenie ryzyka chorób związanych z zanieczyszczeniami atmosferycznymi.

LITERATURA

- [1] Raub J.A., Mathieu-Nolf M., Hampson N.B., Thom S.R.: Carbon monoxide poisoning – a public health perspective. *Toxicology* 145 (1) (2000) 1.
- [2] World Health Organization (WHO): Guidelines for Indoor Air Quality. Selected Pollutants (2010).
- [3] Penney D.G.: Carbon monoxide toxicity. CRC Press (2000).
- [4] Lelieveld J., Evans J.S., Fnais M., Giannadaki D., Pozzer A.: The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature* 525 (7569) (2015) 367.
- [5] Goldstein M.: Carbon monoxide poisoning. *J. Emerg. Med.* 34 (4) (2008) 435.
- [6] Ciechański K., Tkaczyk J., Brożyna K., Wojciechowska A.: Uszkodzenie mięśnia sercowego w przebiegu zatrucia tlenkiem węgla – opis przypadku w odniesieniu do sytuacji epidemiologicznej regionu (2018). <https://www.naukowcy.org.pl/wp-content/uploads/2018/04/3.-Uszkodzenie-mi%C4%99%C5%9Bnia-sercowego-w-przebiegu-zatrucia-tlenkiem-w%C4%99gla-opis-przypadku-w-odniesieniu-do-sytuacji-epidemiologicznej-regionu.pdf>.
- [7] Szozda R.: Toksyczne właściwości tlenku węgla. *Chemik* 10 (1995) 299.
- [8] Zakrzewski S.F.: Podstawy toksykologii środowiska, wyd. II uzupełnione. PWN, Warszawa (1997) 109.
- [9] <https://www.senat.gov.pl/download/gfx/senat/pl/senatkomisje-posiedzenia/482/pos/019z.htm>.
- [10] Smith J.: Carbon monoxide emissions in metallurgy. Springer (2019).
- [11] Brown P.: European steel industry and emissions. Elsevier (2021).
- [12] Wang T.: Welding emissions and CO impact. *J. Ind. Ecol.* 3 (24) (2020) 215.
- [13] Krajowy bilans emisji SO₂, NO_x, CO, NH₃, NMLZO, pyłów, metali ciężkich i TZO za lata 1990–2022. Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Warszawa (2024). https://www.kobize.pl/uploads/materialy/materialy_do_pobrania/krajowa_inwentaryzacja_emisji/Bilans_emisji_raport_syntetyczny_2022.pdf.
- [14] European Commission. The European Green Deal. Official Report (2020).
- [15] European Environment Agency. EU ETS Mechanisms and Their Effectiveness (2021).
- [16] Johnson R.: Decarbonization strategies in heavy industry. Oxford University Press (2022).
- [17] Schmidt L.: Electric arc furnaces and CO reduction. *Metall. Rev.* (2019) 89.
- [18] HYBRIT Project. Hydrogen-Based Ironmaking. Technical report (2021).
- [19] European Commission: Integrated Pollution Prevention and Control (JPPC). Jan 1999, t. 2, cz. 7.
- [20] Müller G.: Blast furnace gas recovery technologies. *Steel Res. Int.* (2020) 135.
- [21] Petrova M.: Automation in smelting process for emission control. *AIChE J.* (66) (2021) 477.
- [22] European Steel Association: Sintering Process Innovations. Technical Report (2022).
- [23] Martin Ch.: Waste heat recovery in steel plants. *Renew. Energy* (2021) 245.
- [24] Nakamura Y.: Biomass and hydrogen in steelmaking. *J. Clean. Prod.* (2023) 312.
- [25] International Energy Agency: Future Trends in CO Reduction for Industry. IEA Report (2023).
- [26] Sztuczna Inteligencja w obronie środowiska (2022). <https://eko-etos.pl/sztuczna-inteligencja-w-obronie-srodowiska/>.
- [27] Raport: Sztuczna inteligencja w walce ze zmianami klimatu. Capgemini Polska (2021). <https://capgeminipolska.prowly.com-/118469-raport-sztuczna-inteligencja-w-walce-ze-zmianami-klimatu>.
- [28] Ślad węglowy AI – jak popularność sztucznej inteligencji wpływa na klimat. PlanBe Eco (2023). <https://planbe.eco/blog/sladoweglowy-ai-jak-popularnosc-sztucznej-inteligencji-wplywa-na-klimat/>.
- [29] Sztuczna inteligencja może pomóc w walce ze zmianami klimatu. *Gazeta Prawna* 16 lipca 2023. <https://cyfrowa-gospodarka.gazetaprawna.pl/biznes/8492966%2CSztuczna-inteligencja-zmiany-klimatu-emisja-CO2-Boston-Consulting-Group.html>.
- [30] Zhang Z. et al.: Near real-time CO₂ emissions based on carbon satellite and artificial intelligence. *arXiv* (2022). <https://arxiv.org/abs/2210.09850>.
- [31] Wen J. et al.: Generative AI for low-carbon artificial intelligence of things. *arXiv* (2024). <https://arxiv.org/abs/2404.18077>.
- [32] Agand P. et al.: Deep reinforcement learning-based intelligent traffic signal controls with optimized CO₂ emissions. *arXiv* (2023). <https://arxiv.org/abs/2310.13129>.

*Control of the abrasive grains of cooper slag***Kontrola wymiarowa ziaren ściernych żużła pomiedziowego****ADAM BARYLSKI*****ORCID: 0000-0003-1672-8445**

Instytut Technologii Maszyn i Materiałów, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa,
Politechnika Gdańska, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
*e-mail: abarylsk@pg.edu.pl

Automated analysis of both size of abrasive micrograins and grain was presented. In research on grains of cooper slag stereoscopic optical microscopy and specialized software MultiScan v 6.08 were applied.

Keywords: cooper slag, abrasive grains, size, measurements

W artykule przedstawiono skomputeryzowaną analizę wielkości ziaren i mikroziaren ściernych. W badaniach ziaren żużła pomiedziowego zastosowano optyczną mikroskopię stereoskopową oraz specjalistyczne oprogramowanie MultiScan v 6.08.

Słowa kluczowe: żużel pomiedziowy, ziarna ścierne, wielkość, pomiary

1. WSTĘP

Śruty żużłowe, oprócz ścierniwi metalowych, syntetycznych, mineralnych i wielu innych [1, 2], są wykorzystywane w obróbce strumieniowo-ścierniej. Wśród żużli metalurgicznych największym zainteresowaniem cieszy się żużel pomiedziowy, rzadziej wielkopiecowy i konwerterowy, ponikłowy, żelazowo-chromowy, czy popłatynowy. W przypadku określania charakterystyki żużła pomiedziowego obowiązuje norma PN-EN ISO 11126-3. Ma on też i inne zastosowania w praktyce [3]. Permanentnie prowadzi się również badania nad rozwojem technologii strumieniowych [4–9].

Celem przeprowadzonych i opisanych w artykule badań była kontrola rozmiarów ziaren żużła pomiedziowego przy użyciu automatycznej analizy obrazu mikroskopowego. Analizowano maksymalne wartości średnic Fereta (długość i szerokość) oraz pole powierzchni obrazów mikroskopowych ziaren żużła w płaszczyźnie równoległej do powierzchni obserwacji. Opis wyników badań poprzedziła charakterystyka żużła pomiedziowego i opis metodyki pomiarów wielkości ziaren do zastosowań w obróbce strumieniowo-ścierniej.

2. ŻUŻEL POMIEDZIOWY JAKO ŚCIERNIWO

Żużel pomiedziowy jest efektem ubocznym procesu pirometalurgicznego przerobu koncentratów miedzi [10], ma znacznie mniejszą gęstość niż kamień miedziowy i gromadzi się w górnej części odstojnika. Żużel zawierający poniżej 0,4% miedzi jest przy użyciu kadziowozów wylewany na hałdę i swobodnie zastyga [11].

W przypadku obecnie stosowanych pieców zawieszinowych żużel po odmiedziowaniu (zawierający ok. 0,3% Cu oraz SiO_2 , CaO, Al_2O_3 i MgO), jako produkt uboczny, jest dostarczany do granulacji.

Ogólnie ścierniwo żużłowe jako medium przeznaczone do obróbki strumieniowo-ścierniej występuje w postaci ziaren i może być otrzymywane przez przeróbkę kęsów swobodnie zestalającego się żużła, przez grudkowanie (paletyzację) lub granulację [12]. Procesy granulacji ciekłego żużła można prowadzić zarówno na mokro, jak i na sucho. Do podstawowych parametrów tego procesu należą: masa żużła granulowanego w jednostce czasu, temperatura żużła oraz ciśnienie, temperatura i wydatek wody, kąt nachylenia rynien granulacyjnych i ich odległość od rynien spustowych, a także kształt i liczba otworów w głowicy roboczej [13].

Ważnym problemem procesu wodnej granulacji żużła pomiedziowego jest uzyskanie ziaren o odpowiednim kształcie. Duże różnice składu chemicznego żużła dotyczą głównie FeO, Al_2O_3 i CaO, mniejsze w przypadku SiO_2 . Zależnie od producenta skład chemiczny (w % mas.) żużła pomiedziowego (krzemianu żelazowego) wynosi: 32–46 SiO_2 , 4,5–6,0 FeO, 8,0–12,5 MgO, 10,0–14,5 Al_2O_3 i 18,5–29,0 CaO (PolGrit [14]) oraz 25–35 SiO_2 , 45–55 FeO, 2–5 MgO, 2–9 Al_2O_3 i 2–9 CaO (IRGRT [15]) lub 27–30 SiO_2 , 40–50 FeO, 0,2–1,5 MgO, do 4,5 Al_2O_3 i do 2,5 CaO (JBlast Supa [16]). W przypadku wytwarzanego ścierniwa PolGrit głównymi składnikami są bezpostaciowe związki tlenkowe typowych składników szklotwórczych. Główną fazę stanowi CaMgSiO_2 oraz $\text{Al}_2\text{O}_3\text{SiO}_2$ i CaOSiO_2 , przy czym krzemionka jest w stanie związanym. Ścierniwo to może zawierać śladowe ilości Cu, Ni i Zn. Średnia gęstość wynosi 3,0 g/cm³ (gęstość nasypowa 1,7 g/cm³), twardość ok.

6° w skali Mosha, a maksymalna wilgotność 0,5%. Kształt ziaren o rozmiarze 0,2–2,8 mm jest nieregularny, o ostrych krawędziach i wielu narożach [17, 18].

Uziarnienie śrutu jest jednym z podstawowych parametrów mających wpływ na efekty obróbki strumieniowo-ścierniej. Zgodnie z PN-EN ISO 11126-2 przydatne są do tego celu ścierniwa żużlowe o wielkości ziaren 0,2–2,8 mm (podzielonych na 9 granulacji). W przypadku ścierniw żużlowych, które są ścierniwami jednorazowego użytku, ich trwałość jest znacznie mniejsza niż trwałość m.in. elektrokorundu. W pracy [19] podano, że stosunek przyjętego wskaźnika zużycia ścierniwa żużla pomiedziowego do elektrokorundu wynosi 1,83. Ważne z praktycznego punktu widzenia jest też określenie kształtu ziaren (w tym obecność ziaren iglastych), gęstości nasypowej, twardości oraz wytrzymałości mechanicznej (ściskającej siły niszczącej ziarno [20]). Im drobniejsze ziarna, tym nieznacznie mniejsza ich „izometryczność”. Stąd ważna jest ich selekcja (przez przesiewanie lub mielenie), aby wyeliminować ziarna iglaste o wydłużonym kształcie. Istotnym problemem jest również obróbka cieplna ścierniwa żużla pomiedziowego.

Podstawowym kryterium przydatności ścierniwa żużlowego do obróbki strumieniowo-ścierniej jest wydajność procesu oraz zużycie ścierniwa. Efekty użytkowe (powierzchniowe i umacniające) obróbki strumieniowej zależą nie tylko od parametrów procesu i charakterystyki głowicy roboczej, ale i rozkładu wielkości ziaren oraz wskaźnika ich okrągłości i sferyczności [21]. Istotne znaczenie ma też owalizacja kształtu ziaren.

3. OWALIZACJA ZIAREN ŚCIERNYCH

Jednym ze sposobów owalizacji i wygładzania ziaren ścierniwa jest obróbka kulami stalowymi w młynach typu strumieniowego, w których są one wprawiane w ruch wirowy za pomocą sprężonego powietrza. Innym sposobem owalizacji ziaren jest mieszanie na mokro z mikroziarnami ściernymi w wygładzarkach typu bębnowego, wibracyjnego lub planetarnego. Skuteczniejszym sposobem wygładzania i owalizacji ziaren ściernych jest też obróbka w wygładzarkach w obecności spiralnie skręconych wiórów metalowych (i/lub polimerowych) o długości 2–100 mm i szerokości 0,5–15 mm z dodatkiem wody, po czym następuje oddzielenie ziaren ściernych od wody i wiórów i oczyszczenie od zanieczyszczeń pyłowych [22].

4. SPOSOBY OCENY WIELKOŚCI I Kształtu ZIAREN ŚCIERNYCH

W praktyce stosowanych jest wiele metod oceny wielkości i kształtu ziaren i mikroziaren, głównie sedymentacyjne, mikroskopowe i laserowe [23–27]. Segregacja wielkości może być wykonywana poprzez strumień wirującego czy zmieniającego kierunku powietrza, rozdzielanie w wyniku wymywania wodą, przez sedymentację grawitacyjną lub odśrodkową. Możliwe jest wykorzystanie absorpcji światła w fotosedymentatorach lub pomiary oporności elektrolitu przez licznik Coultera [28]. Do analizy stopnia zużycia ziaren można wykorzystać mikroskopię optyczną

i skaningową oraz analizę rentgenowską. W przypadku wielkości mikroziaren ściernych bardzo przydatne są też analizatory optyczno-elektroniczne (np. 2DiSA firmy Kamika [29]) lub laserowe (np. Analysette 22 NanoTec firmy Fritsch [30]). W omawianych poniżej badaniach wykorzystano skomputeryzowaną mikroskopię stereoskopową [22, 31]. Ponieważ przy oznaczaniu wymiarów ziarna stosuje się różne metody, należy zawsze podać jaką metodę wykorzystywano. Wyniki mogą bowiem różnić się między sobą w zależności od przyjętej metody.

Często do analizy kształtu ziaren wykorzystywana jest klasyfikacja Zingga [32], która wyróżnia 4 zasadnicze formy: dyski ($b/a > 2/3$), kule, klingi ($b/a < 2/3$ i $c/b < 2/3$) oraz walce ($b/a < 2/3$ i $c/b > 2/3$), gdzie występujące w przestrzeni wymiary ziaren to: a – długość, b – szerokość, c – wysokość (wymiarzy skorelowane w układzie 3 osi głównych, tzw. długiej, średniej i krótkiej). Według standardu FEPA 42-D-1984 (Federation of European Producers of Abrasives) [33] można się też posługiwać średnim wymiarem ziaren.

4.1. LASEROWA METODA POMIARU UZIARNIENIA

W przypadku pomiarów wielkości ziaren ściernych bardzo dobre parametry użytkowe posiada analizator laserowy. Spektrometryczna technika laserowo-dyfrakcyjna, stosowana w diagnostyce stereometrii ziaren i mikroziaren, rozwijana jest obecnie przez wiele specjalistycznych firm [18, 29, 30, 34–38]. Przykładowo firma LECO produkuje serię analizatorów wielkości cząstek LECOTRAC™, wykorzystujących zjawisko statycznego lub dynamicznego rozpraszania światła (rys. 1). W zależności od zastosowanego układu optycznego (system potrójnych lub pojedynczych laserów) oraz rodzaju analizowanej próbki (proszek lub zawiesina) możliwy jest pomiar wielkości ziaren w zakresie 0,003–2000 µm. W pomiarach cząstek większych niż 0,7 µm wykorzystywane jest zjawisko statycznego rozpraszania światła (typ LTS-150 i LTL-200). W tym przypadku wiązka światła z pojedynczego lasera jest kierowana do obszaru pomiarowego, gdzie następuje jej ugięcie, a następnie rozproszenie przez badane ziarna. Kąt rozproszenia jest odwrotnie proporcjonalny do wielkości cząstek (ziaren ściernych). Rozproszone światło trafia poprzez układ optyczny na tablice fotodetektorów (o charakterystyce logarytmicznej), po czym już jako sygnał elektryczny przeliczane jest na wynik końcowy (za pomocą odpowiedniego algorytmu). Dla cząstek mniejszych (LT-100) układ pojedynczego lasera zastąpiono zespołem 3 laserów, w celu umożliwienia detekcji promieniowania świetlnego o bardzo dużym kącie rozproszenia. W przypadku bardzo małych ziaren, poniżej 0,02 µm, do pomiarów wykorzystano zjawisko dynamicznego rozproszenia światła (LTU-150 i LTU-251).

Bardzo drobne cząsteczki zawieszone w cieczy poruszają się ruchami Browna z prędkościami odwrotnie proporcjonalnymi do ich rozmiarów. Ze względu na odbicie światła od ruchomych cząstek, odbity i powracający do detektora promień jest opisany przez efekt Dopplera (obowiązuje zasada proporcjonalności do prędkości cząstek). Ponadto część światła ulega odbiciu



Typ	Zakres pomiarowy, μm	Rodzaj próbki	Układ optyczny	Układ detekcji	Wymiary, cm
LT-100	0,02–704	proszek lub zawiesina	3 lasery	dwie tablice fotodetektorów	30×33×56
LTS-150	0,69–704	proszek lub zawiesina	1 laser	tablica fotodetektorów	30×33×56
LTL-200¹⁾	3,2–2000	proszek	1 laser	tablica fotodetektorów	30×33×56
LTU-150 LTU-251²⁾	0,003–6,54	proszek	1 laser	falowód z fotodetektorem	15×10×38

¹⁾ Można przystosować do analiz zawiesiny, w zakresie ziaren 3,2–1000 μm

²⁾ Możliwa współpraca z podajnikiem automatycznym

Fig. 1. Laser particle sizers (LECO) [35]

Rys. 1. Analizatory laserowe ziaren (LECO) [35]

od granicy ośrodków filtr optyczny–medium robocze, po czym powraca do detektora jako wiązka odniesienia (referencyjna). Tak otrzymany sygnał optyczny jest przetwarzany przez tablice fotodetektorów na sygnał elektryczny, który jest następnie wzmacniany, filtrowany i poddany końcowej obróbce. Analizatory LT-100 i LTS-150 współpracują z systemem recyrkulacji medium roboczego (automatycznym lub półautomatycznym). Niezależnie od typu użytego recyrkulatora, analizatory LT-100 i LTS-150 mogą współpracować dodatkowo z układem automatycznego podawania próbek [34]. Widok ogólny i zasadę działania przykładowego analizatora laserowego firmy Horiba Ltd. przedstawiono na rys. 2.

Modułową budowę podobnego urządzenia zastosowała firma Sympatec GmbH, wykorzystując czujnik dyfrakcji laserowej HELOS, który jest pierwszym systemem wykorzystania zjawiska Fraunhofera w całym zakresie pomiarowym 0,1–8750 μm . Możliwa jest analiza wielkości cząstek na sucho i na mokro, zarówno

pyłów, zawiesin, emulsji czy aerozoli. System zbudowany jest z części pomiarowej, dyspergującej i obliczeniowej. Modułowa konstrukcja zapewnia wymiennność wszystkich układów (rys. 3). Dyfraktometr laserowy HELOS/F jest przyrządem wykorzystującym spójne światło lasera. Dla materiałów suchych sposób podawania badanych ziaren (dawka od kilku do 100 g) opiera się na ich rozpraszaniu w strumieniu powietrza (RODOS i RODOS M). Zestaw może być uzupełniony o przystawkę ASPIROS do analizy substancji toksycznych. Do pomiarów cząstek swobodnie opadających stosuje się system dyspersji grawitacyjnej GRADIS. Dla zawiesin lub emulsji proponowane są układy dyspersji w zakresie pomiarowym 0,1–3500 μm (QUIXEL, SUCCELL i CUVETTE). Pomiar wielkości cząstek w aerozolach jest możliwy dzięki systemowi SPRAYER (cząstki wprowadzane do przestrzeni pomiarowej

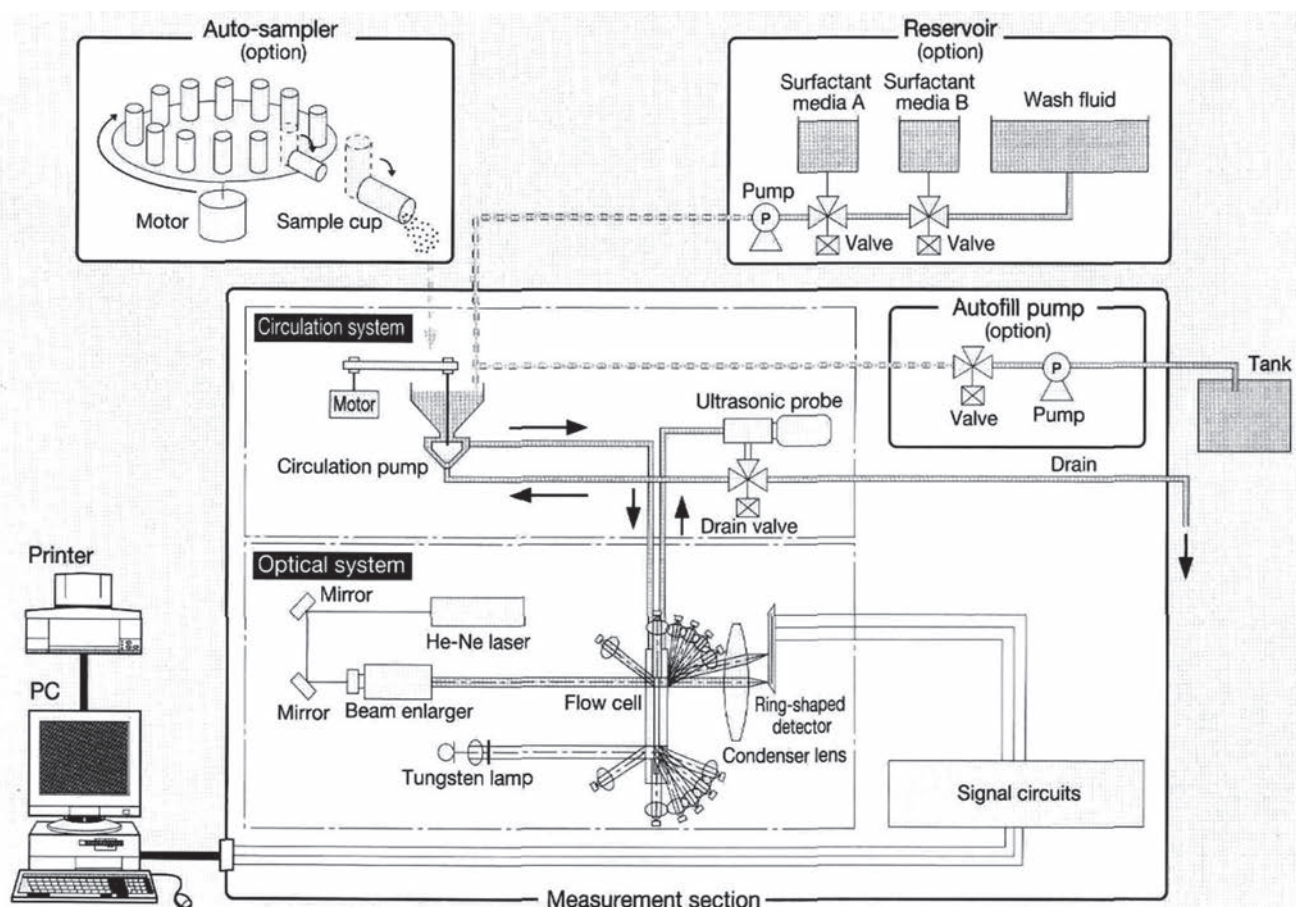
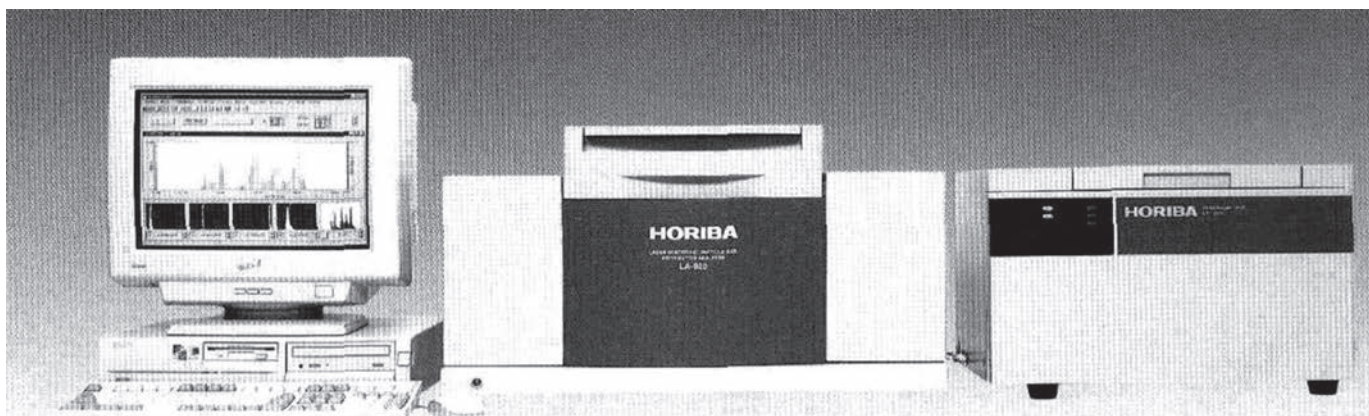


Fig. 2. Particle sizer LA-920 (HORIBA) [34]

Rys. 2. Analizator ziaren LA-920 (HORIBA) [34]

przy pomocy urządzenia INHALER). Fotonowy miernik wielkości cząstek NANOPHOX umożliwia analizę w zakresie nanometrycznym (od 1 nm do 10 μm) zarówno emulsji, jak i zawiesin (pojemność komory 4 mL). Analizator QICPIC bada zarówno rozkład uziarnienia, jak i kształt cząstek (w zakresie pomiarowym od 1 μm do 10 mm) [38].

Konstrukcje analizatorów laserowych rozwijane są również przez firmę Fritsch GmbH. Zakres pomiarowy wytwarzanego systemu Analysette 22 wynosi 0,01–1000 μm (rys. 4). Miernik Nano Tec posiada zakres pomiarowy 0,01–1000 μm w analizie na

mokro oraz 0,1–1000 μm w analizie na sucho (rys. 4a). Analizator Micro Tec mierzy ziarna wielkości 0,1–600 μm zarówno na mokro, jak i na sucho (rys. 4b). W przypadku analizatora COMPACT (mierzy ziarna o wielkości 0,3–300 μm na mokro i na sucho) objętość próbki może wynosić 0,1–2 cm^3 na mokro oraz 5–50 cm^3 przy pomiarach na sucho (czas pomiaru 10 s) [30]. Do analizy wykorzystywane jest oprogramowanie opracowane na podstawie Visual Design Guides (w środowisku Windows™, Microsoft). Menu główne programu Analysette 22 (32 bit) przedstawiono na rys. 5.

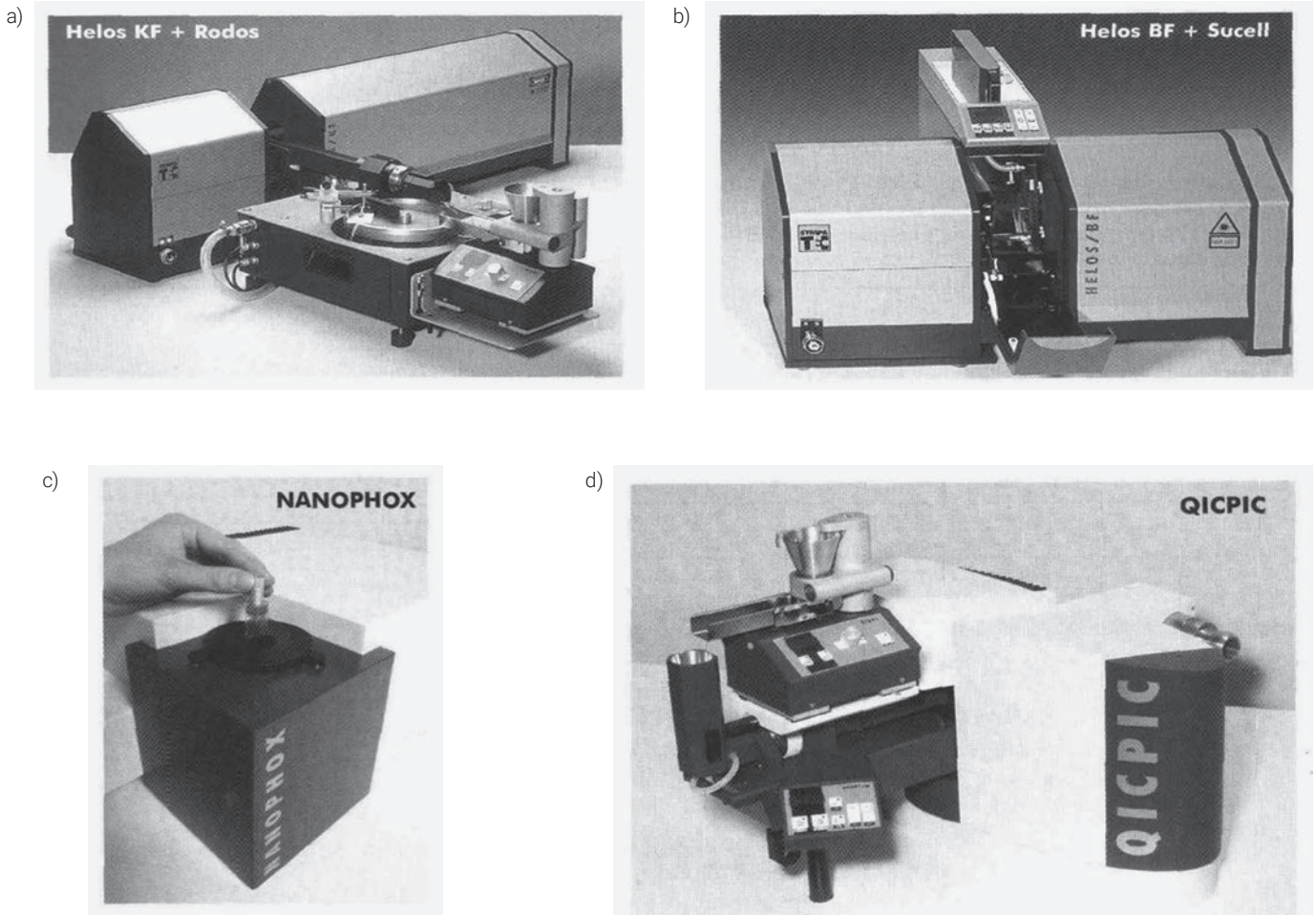


Fig. 3. Particle sizer (SYMPATEC): a) HELOS KF + RODOS, b) HELOS BF + SUCELL, c) NANOPHOX, d) QICPIC [38]

Rys. 3. Analizator ziaren (SYMPATEC): a) HELOS KF + RODOS, b) HELOS BF + SUCELL, c) NANOPHOX, d) QICPIC [38]

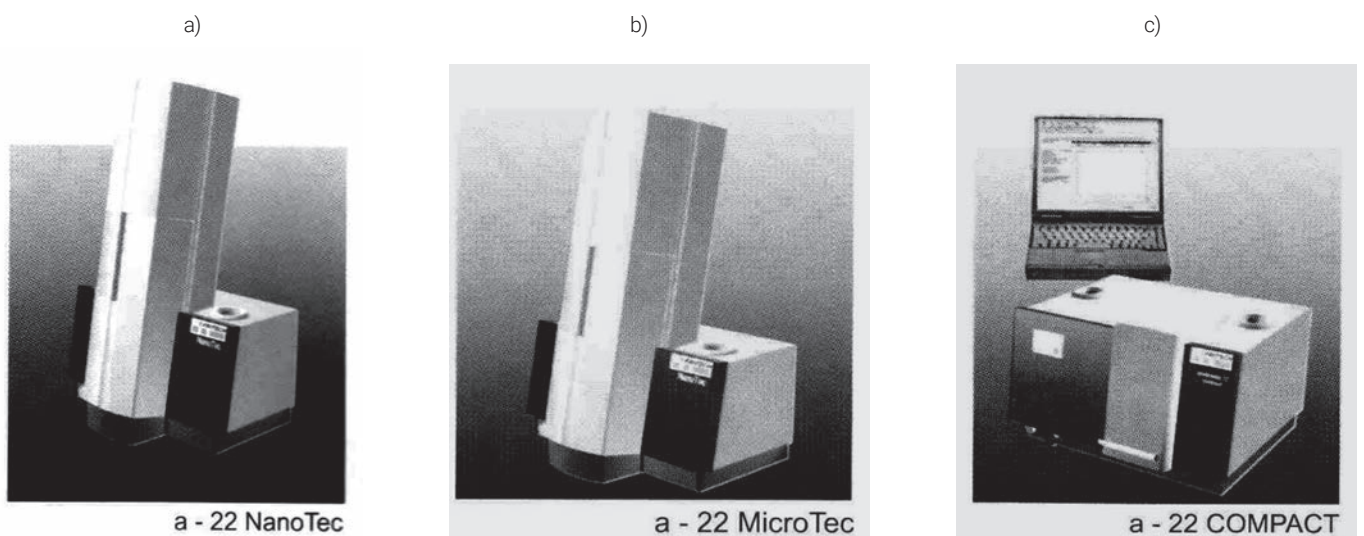


Fig. 4. Particle sizer Analysette 22 (Fritsch): a) Nano Tec (0,01–1000 μm), b) Micro Tec (0,1–600 μm), c) COMPACT (0,3–300 μm) [30]

Rys. 4. Analizator ziaren Analysette 22 (Fritsch): a) Nano Tec (0,01–1000 μm), b) Micro Tec (0,1–600 μm), c) COMPACT (0,3–300 μm) [30]

4.2. DYNAMICZNA ANALIZA OBRAZU CZĄSTEK

Obecnie, m.in. przez firmę Microtrac [37], do badań wielkości i kształtu ziaren oraz mikroziaren (cząstek) intensywnie rozwijane są analizatory wizyjne wykorzystujące dynamiczną analizę obrazu (DIA), zgodnie z normą ISO 13322-2 (w pomiarach m.in. materiałów ściernych czy proszków metali stosowanych do druku 3D). Strumień badanych ziaren (będących w ruchu) jest fotografowany i analizowany za pomocą systemu kamer. Najczęściej strumień ten jest oświetlany z jednej strony za pomocą źródła światła, a cień cząstek (projekcja) jest rejestrowany przez kamery umieszczone z drugiej strony. Jednoczesne użycie dwóch kamer znacząco poszerza zakres pomiarowy. Kamery zastosowane w analizatorach z serii CAMSIZER (np. CAMSIZER 3D, zakres pomiarowy od 20 μm do 30 mm) [38], pracujące jednocześnie, to: kamera ZOOM o wysokiej rozdzielczości (9 Mpx) do dokładnych pomiarów drobnych cząstek oraz kamera BASIC (5 Mpx) posiadająca szerokie pole obserwacji i analizująca większe cząstki (zakres pomiarowy, a więc stosunek między górną i dolną granicą badanego przedziału wymiarów cząstek może wynosić nawet 10 000, bez regulacji i zmiany obiektywów). Dolna granica zakresu pomiarowego w dynamicznej analizie obrazu wynosi 0,8 μm , zaś górna nawet 135 mm.

Można badać rozkłady wielkości cząstek, takie jak szerokość, długość i średnicę zastępczą, a więc wymiary cięciwy, długości Fereta lub średnice Martina. W przypadku dynamicznej analizy obrazu można określić również kształt cząstek (kołowość, proporcje wymiarów, symetrię i inne parametry charakterystyczne).

Cząstki mogą swobodnie opadać, jak i przepływać w cieczy lub rozpędzonym strumieniu powietrza. Umożliwia to ich prawidłową dyspersję i rozbicie ewentualnych aglomeratów. Wymaga to częstego próbkowania (60–320 klatek/s) i krótkich czasów ekspozycji. Czas pomiaru wynosi średnio 1–5 min (możliwa detekcja nawet kilka milionów cząstek). Metodę wyróżnia duża dokładność i powtarzalność oraz przepustowość.

Dynamiczna analiza obrazu skutecznie zastępuje analizę sitową ziaren. W wielu przypadkach może być zintegrowana bezpośrednio z procesem produkcyjnym jako pomiary online (m.in. w wytwarzaniu nawozów sztucznych). Dynamiczna analiza obrazu bardzo dobrze sprawdza się w przypadku pomiarów cząstek większych niż 1 μm . W przypadku potrzeby pomiaru cząstek mniejszych można zastosować dyfrakcję laserową, nie uzyska się jednak informacji o kształcie badanych cząstek. Z tego też powodu firma Microtrac opracowała urządzenie SYNC, które połączyło dyfrakcję laserową i dynamiczną analizę obrazu [37].

4.3. AUTOMATYCZNA ANALIZA MIKROSKOPOWA ZIAREN ŚCIERNYCH

Ocenę wielkości i kształtu ziaren ściernych można wykonać także na skomputeryzowanym stanowisku pomiarowym, wyposażonym w mikroskop stereoskopowy Nikon SMZ-2T, kamerę CCD, dwuramienny oświetlacz halogenowy i oprogramowanie MultiScan v 6.08 (rys. 6 i 7) [31]. Program ten służy do przetwarzania obrazu, jego aktywnego projektowania oraz umożliwia pomiary planistyczne i stereometryczne. Wymaga użycia kompu-

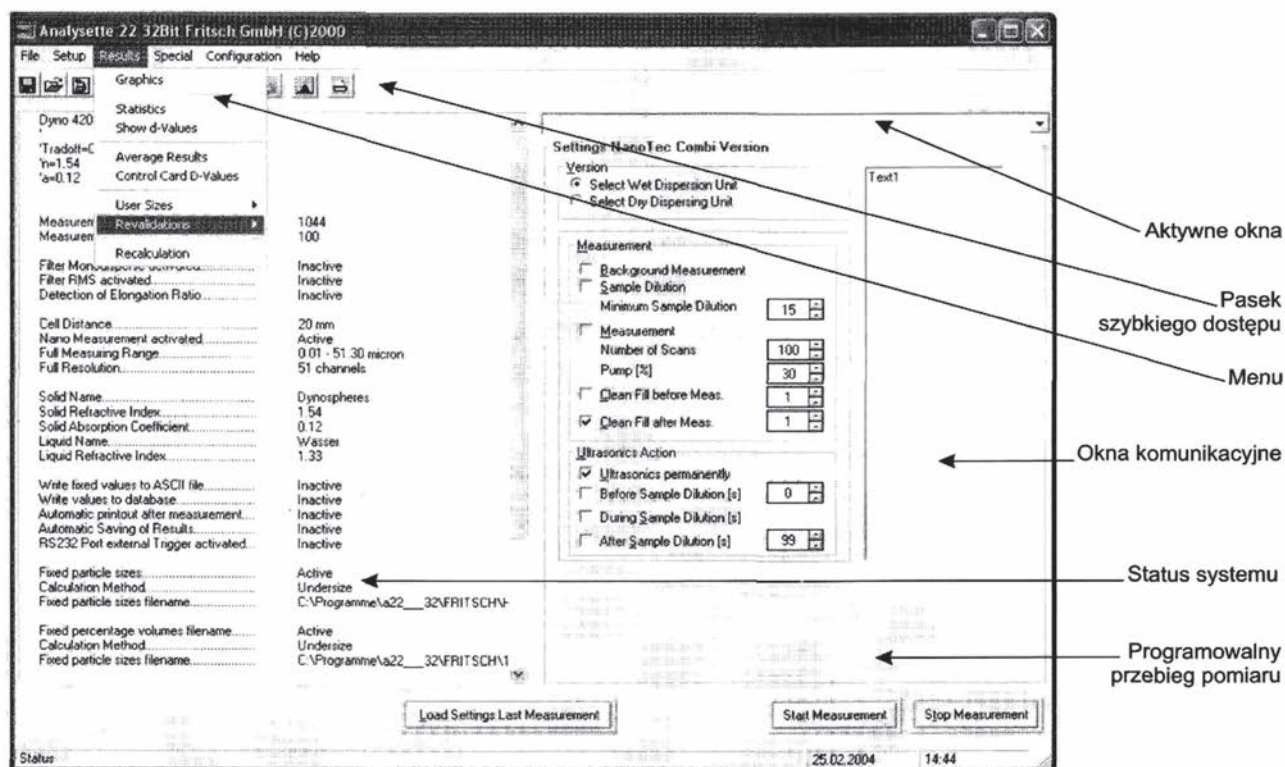


Fig. 5. Software Analysette 22, 32 Bit, Fritsch GmbH (C) 2000 [30]
Rys. 5. Program Analysette 22, 32 Bit, Fritsch GmbH (C) 2000 [30]

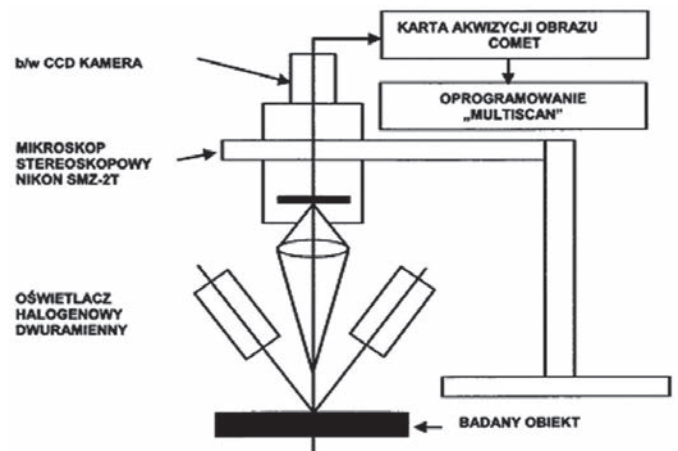
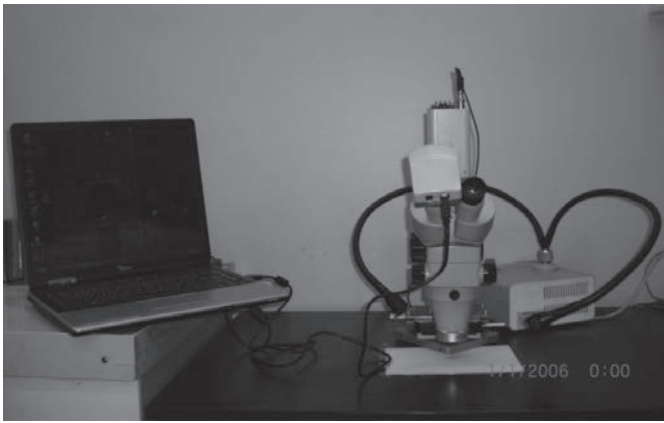


Fig. 6. Measuring position
Rys. 6. Stanowisko pomiarowe

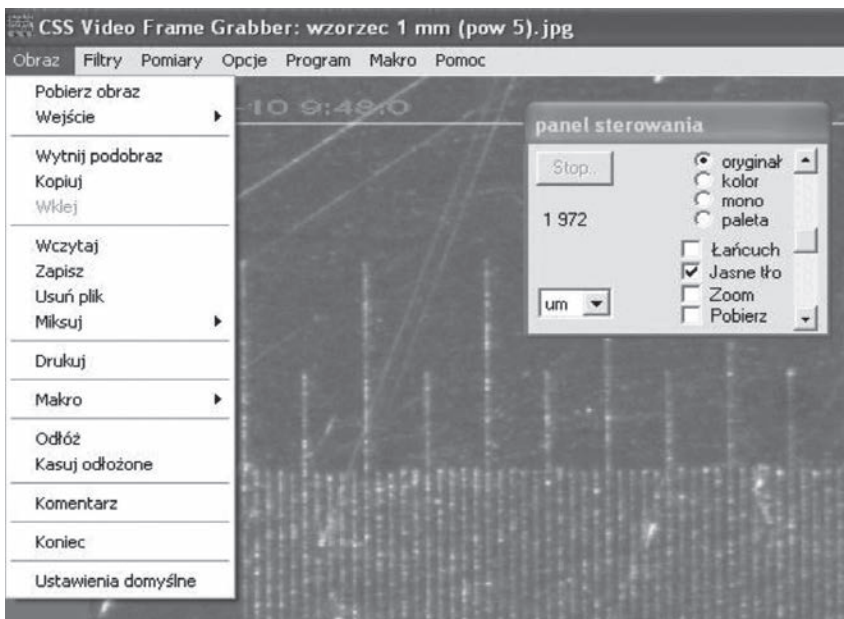


Fig. 7. Special software MultiScan v 6.08
Rys. 7. Specjalistyczny program MultiScan v 6.08

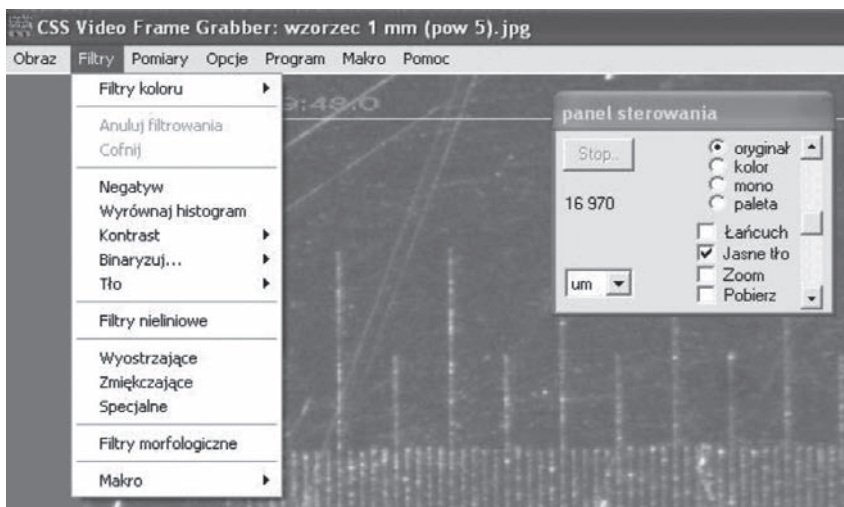


Fig. 8. Special software MultiScan v 6.08 (filters)
Rys. 8. Specjalistyczny program MultiScan v 6.08 (filtry)

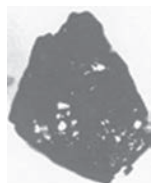
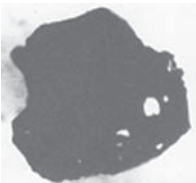
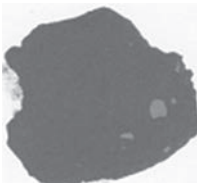
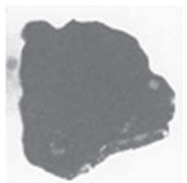
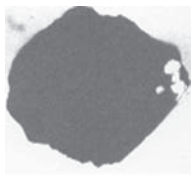
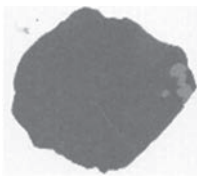
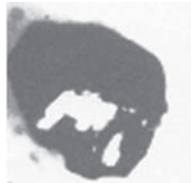
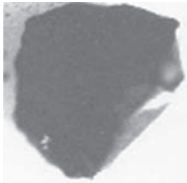
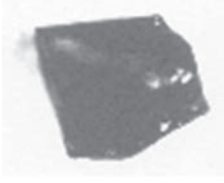
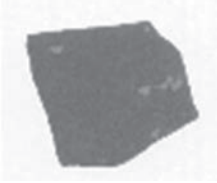
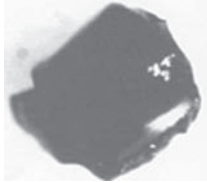
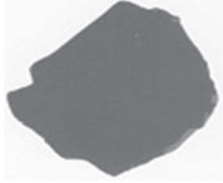
tera z min. 8 MB pamięci RAM. Przed pomiarami należy dokonać odpowiedniego wzorcowania powiększenia i wykorzystać funkcje filtrujące (rys. 8). Swym zakresem program MultiScan obejmuje również analizę obrazów makroskopowych, obrazów ultrasonograficznych, na ekranach elektroluminescencyjnych, zdjęć lotniczych (analiza filmów wideo), na obiektach przestrzennych w terenie oraz innych obrazów generowanych przez urządzenia pracujące w standardzie wideo. Podstawowym narzędziem umożliwiającym sterowanie programem jest mysz. Dodatkowe funkcje myszy w programie MultiScan to: podwójne kliknięcie lewego klawisza zastępuje w niektórych sytuacjach przyciśnięcie klawisza „ok” lub „akceptuj”, kończy pomiar, zastępując przyciśnięcie klawisza „oblicz”, domyka obrys za pomocą powierzchni;

podwójne kliknięcie prawego klawisza przełącza zoom – $\times 1$, $\times 2$, ... $\times 8$; „ciągnięcie” z przyciśniętym prawym klawiszem umożliwia przesunięcie „scroll” obrazu, gdy nie jest on widoczny w oknie w całości. Źródłem sygnału wejściowego dla programu MultiScan zwykle jest kamera wideo CCD.

W pierwszym etapie filtrowania otrzymuje się obraz, w którym ziarna przyjmują barwę czarną na białym tle, jednak na poszczególnych badanych obiektach widoczne są też białe pola, będące pozostałościami refleksów świetlnych pochodzących z pierwotnego obrazu mikroskopowego. Usunięcie tych refleksów następuje przez tzw. zalewnie otworów, użyciu opcji negatywu i binaryzacji (tabela 1). Kalibrację mikroskopu stereoskopowego (wzorec odcinka 1 mm podzielony był na 100 działek) można przepro-

Table 1. Images of cooper slag (before and after filtration)

Tabela 1. Obrazy żużla pomiedziowego (przed i po binaryzacji)

Przed modyfikacją obrazu	Po binaryzacji	Przed modyfikacją obrazu	Po binaryzacji
			
			
			
			
			
			

wadzić przy 6-krotnym powiększeniu, identycznym jak podczas pomiarów poszczególnych ziaren. Automatyczną analizę obrazu mikroskopowego przy użyciu programu MultiScan wykorzystano w opisanych w artykule badaniach ziaren żużla pomiedziowego.

5. WYNIKI BADAŃ WIELKOŚCI ZIAREN ŻUŻLA POMIEDZIOWEGO

Obrazy analizowanych ziaren żużla pomiedziowego zamieszczono na rys. 9. Minimalną wielkość badanej partii $n = z_a^2 \sigma^2 / e^2$ wyznaczono dla przedziału ufności $1 - \alpha = 0,9$, przy wielokrotności standardowego błędu średniej dla $z_a = 1,96$ i założonym błędzie maksymalnym $e = 0,1$. Odchylenie standardowe σ wyznaczano w próbie wstępnej. Określano rozmiary maksymalne obrazów ziaren ściernych w płaszczyźnie obserwacji, mierząc ich długość l i szerokość s oraz pole powierzchni A .

Minimalną liczbę prób wyznaczono w badaniach wstępnych, stosując test t-Studenta [39]. Do opracowania wyników pomiarów użyto programu Microsoft Excel.

Do wyznaczenia liczby k przedziałów klasowych wykorzystano zależność (1):

$$k = 1 + 3,322 \log n \quad (1)$$

w której n jest liczbą wykonanych pomiarów.

Rozpiętość d przedziałów klasowych określono z równania (2):

$$d = R / (k - 1) \quad (2)$$

w którym R jest rozstępem, a dolna granica pierwszego przedziału wynosi (3):

$$x_{01} = x_{min} - 0,5d \quad (3)$$

przy minimalnej wartości pomiaru x_{min} . Każda kolejna granica przedziału jest większa od poprzedniej o rozpiętość d .

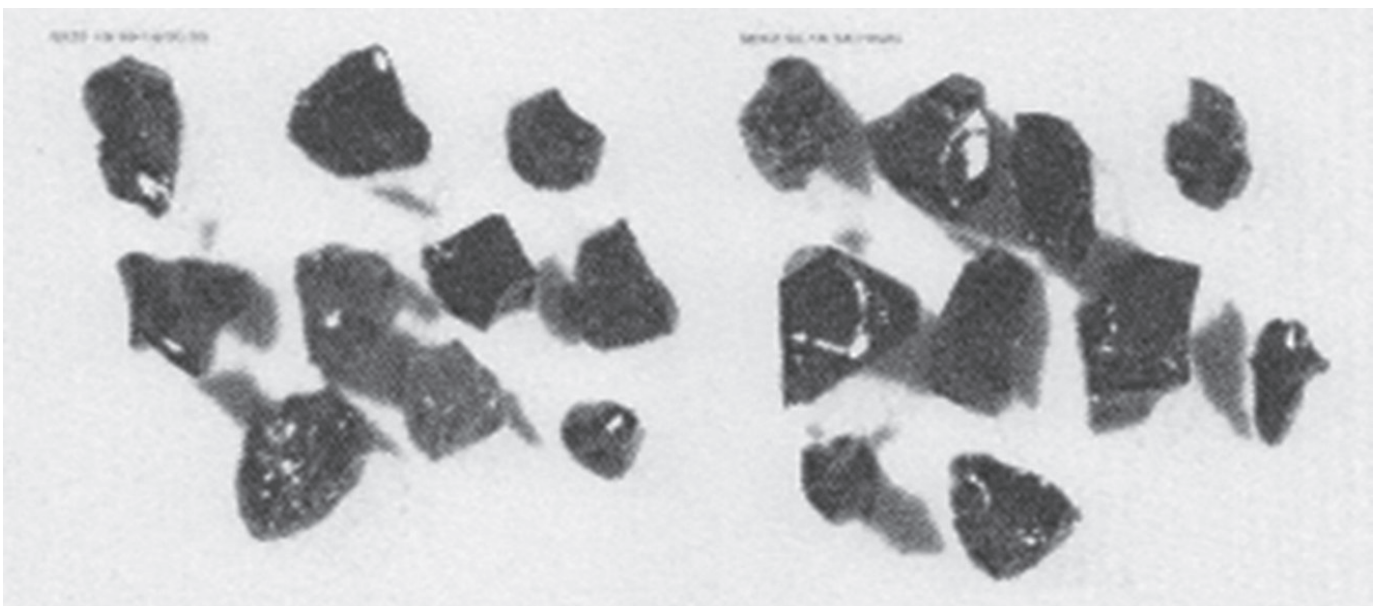
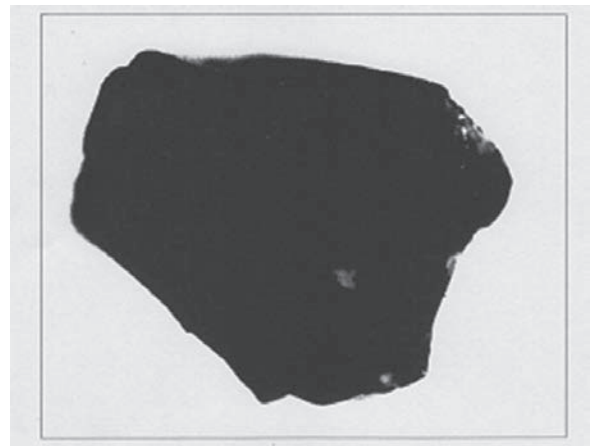
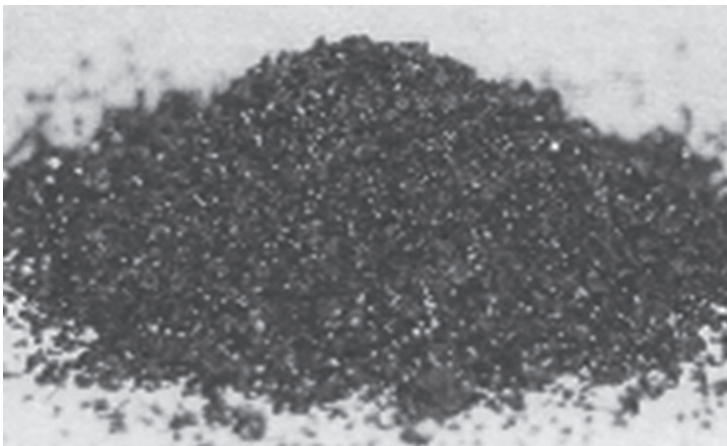


Fig. 9. View on grains of cooper slag
Rys. 9. Widok ziaren żużla pomiedziowego

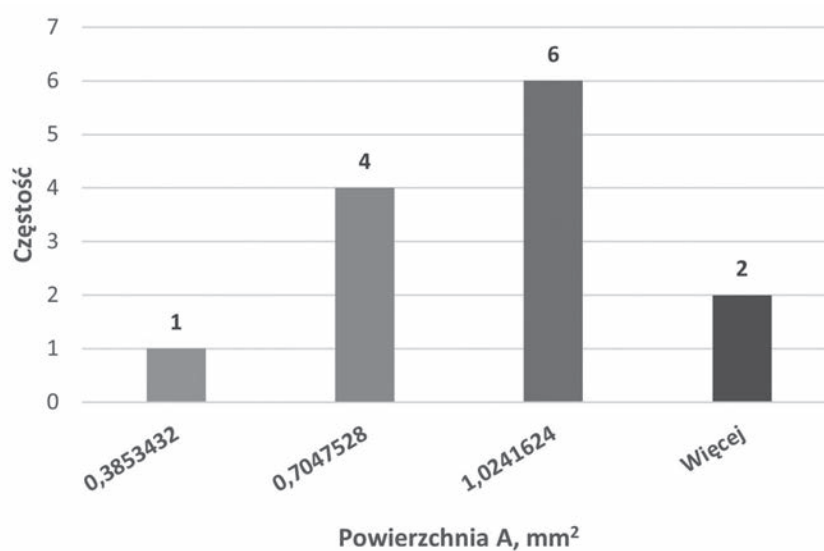
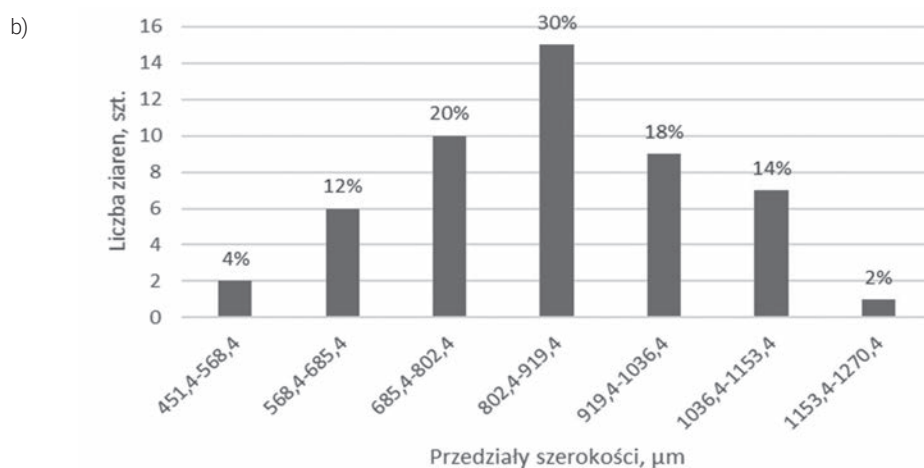
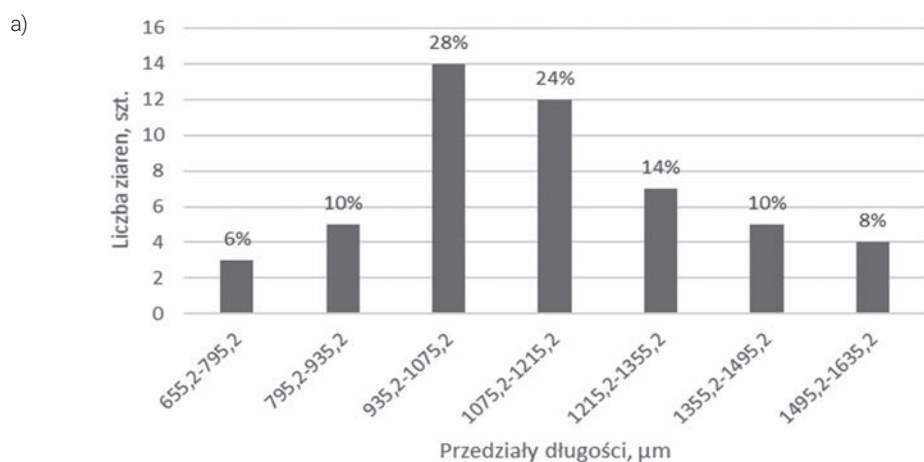


Fig.10. Measurements of cooper slag: a) distribution of length, b) distribution of width [40]

Rys. 10. Pomiary żużla pomiedziowego: a) rozkład długości, b) rozkład szerokości [40]

Fig.11. Measurements of cooper slag (distribution of area A) [41]

Rys. 11. Pomiary żużla pomiedziowego (rozkład pola powierzchni A) [41]

Na rys. 10 zamieszczono otrzymane histogramy długości i szerokości ziaren badanego żużla pomiedziowego. Wyniki pomiarów pola powierzchni obrazów mikroskopowych ziaren

w płaszczyźnie obserwacji przedstawiono na rys. 11, zaś charakterystykę tego rozkładu w tabeli 2.

Table 2. Characteristics of distributions of area A , mm^2 [41]
Tabela 2. Charakterystyka rozkładu pola powierzchni A , mm^2 [41]

Średnia arytmetyczna	0,78357
Błąd standardowy	0,08308
Mediana	0,74887
Rozstęp	0,95823
Odchylenie standardowe	0,29956
Wariancja	0,08973
Kurtoza	-0,53423
Skośność	0,48409

6. PODSUMOWANIE

W każdej metodzie pomiarowej wielkości i kształtu ziaren konieczne jest przestrzeganie zasady, aby sam proces analizy nie spowodował rozdrobnienia ziaren (pękanie) lub ich powiększenia (zrosty). W praktyce wybrany sposób oceny zależy głównie od rodzaju i rozmiarów ziaren, zaś czasochłonność i dokładność poszczególnych metod jest bardzo zróżnicowana.

Zastąpienie na skalę przemysłową tradycyjnej analizy sitowej metodami spektrometrii laserowej należy uznać za kierunek właściwy. Zastosowanie zaś skomputeryzowanego systemu analizy mikroskopowej ułatwia ocenę zmian kształtu ziaren żużla pomiedziowego, przed podjęciem decyzji o ich odpowiednim wykorzystaniu w procesach obróbki strumieniowo-ścierniej.

Prowadząc pomiary mikroskopowe wymiarów ziaren ściernych należy zwrócić szczególną uwagę, aby: (i) ziarna ściernie nie były zawilgocone lub posklejane, (ii) oświetlenie zewnętrzne nie powodowało pojawienia się licznych cieni badanych obiektów, (iii) w przypadku wystąpienia refleksów świetlnych ziaren, które nie usunięto na etapie filtrowania obrazu, należy je pominąć w analizie, (iv) rozłożenie ziaren na białym podłożu było dostatecznie rozproszone, (v) nie stosować świetlnej mikroskopii stereoskopowej do ziaren bardzo drobnych.

Mimo tych ograniczeń, wykorzystanie skomputeryzowanej metody mikroskopowej w ocenie wielkości i kształtu ziaren ścierniwa żużla pomiedziowego może być technologicznie skuteczne i ekonomicznie uzasadnione

LITERATURA

- [1] Momber A.W.: Blast cleaning technology. Springer Verlag, Berlin (2008).
- [2] Woźniak K.: Obróbka strumieniowo-ścierna. T.1. Materiały ściernie. PWN, Warszawa (2019).
- [3] Łowińska-Kluge A.: Żużel pomiedziowy jako składnik kompozytów cementowych o zwiększonej trwałości. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Rozprawy 419 (2008).
- [4] Fu X., Zou B., Liu Y., Huang Ch., Yao P.: Edge micro-creation of Ti(C,N) cermet inserts by micro-abrasive blasting process and its tool performance. Mach. Sci. Technol. 23 (2019) 951.
- [5] Hoogstrate A.M., Karpuschewski B., van Luttervelt C.A., Kals H.J.J.: Modeling of high velocity, loose abrasive machining processes. Annals CIRP 51 (2002) 263.

- [6] Karpuschewski B., Hoogstrate A.M., Achtsnick M.: Simulation and improvement of the micro abrasive blasting process. Annals CIRP 53 (2004) 251.
- [7] Mikova K., Guagliano M., Trsko L., Bokuvka O., Zorawski W., Novy F.: Application of shot peening and sand blasting at increasing of structural steels fatigue resistance. IWAEM (2012).
- [8] Piekarski R., Zawora J.: Optymalizacja wielokryterialna własności użytkowych warstwy wierzchniej w procesie kulowania żelaza armko jako materiału modelowego. Mechanik 12 (2016) 45.
- [9] Zhang S., Zou B., Liu Y., Wang Y., Huang Ch., Liu Z.: Edge passivation and quality of carbide cutting inserts treated by wet micro-abrasive blasting. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 96 (2018) 2307.
- [10] Kucharski M.: Pirometalurgia miedzi. Wydawnictwo AGH, Kraków (2003).
- [11] Woźniak K.: Badania nad swobodnie zestalającym się żużlem pomiedziowym w aspekcie jego wykorzystania jako materiał ścierny. Arch. Nauki Mater. 1 (1987) 41.
- [12] <https://ipcc.moc.gov.pl>
- [13] Chamer R., Darkowicz R., Orski J., Szyrle W.: Praktyczne aspekty stosowania żużli pomiedziowych w obróbce strumieniowo-ścierniej. Powłoki Ochronne 3 (1988) 20.
- [14] www.polgrit.com.pl
- [15] www.irangrit.com
- [16] www.sfeg.com.uk
- [17] Materiały informacyjne firmy ALMA, Głogów.
- [18] Materiały informacyjne firmy KOS – materiały narzędziowe, Koło.
- [19] Szyrle W., Kuszcak A.: Zastosowanie żużla pomiedziowego zamiast elektrokorundu w obróbce strumieniowo-ścierniej. Powłoki Ochronne 2 (1981) 48.
- [20] Woźniak K., Herman D.: Żużel pomiedziowy jako materiał ścierny. Szkło Ceramika 1 (1985) 29.
- [21] Powers M.C.: A new roundness scale for sedimentary particles. J. Sediment. Petrol. 1 (1953) 28.
- [22] Barylski A.: Badania efektów mechanicznej owalizacji ziaren elektrokorundu szlachetnego w wygładzarce bębnowej. Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie. T.4. Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji, Gdańsk (2014) 309.
- [23] ISO 14887:2000. Sample Preparation. Dispersing procedures for powder in liquids.
- [24] Kamiński S., Kamińska D.: Automatyczna analiza wielkości i kształtu ziaren 3D z zastosowaniem analizatorów optyczno-elektronicznych. 11th Baltic Sea Geotechnical Conference (2008).
- [25] Krawczykowski D., Trybalski K.: Przydatność laserowych analiz uziarnienia do bilansowania produktów klasyfikacji w hydrocyklonie. Górnictwo Geoinżynieria 4 (2009) 153.
- [26] Krawczykowski D.: Zastosowanie dyfrakcyjnej analizy laserowej do kontroli uziarnienia produktów przeróbki rud metali. Inż. Miner. (2017) 233.
- [27] Lehner J.: Quantifying from characteristics of abrasive slurry. Worcester Polytechnic Institute 4 (2013).
- [28] Materiały informacyjne firmy Beckman Coulter, Indianapolis.
- [29] Materiały informacyjne firmy Kamika, Warszawa.
- [30] Materiały informacyjne firmy Fritsch GmbH, Idar-Oberstein. <https://www.fritsch-international.com>.
- [31] Materiały informacyjne firmy Computer Scanning Systems Sp. z o.o., Warszawa.
- [32] ISO 13320:2009. Particle size analysis. Laser diffraction methods.
- [33] Materiały informacyjne firmy Andre, Koło.
- [34] Materiały informacyjne firmy Horiba Ltd., Kyoto. <https://horiba.com>.
- [35] Materiały informacyjne firmy LECO Polska sp. z o.o., Katowice <https://www.leco.com>.
- [36] Materiały informacyjne firmy Malvern Instruments Ltd., Malvern.
- [37] Materiały informacyjne firmy Microtrac, Osaka.
- [38] Materiały informacyjne firmy Sympatec GmbH, Clausthal-Zellerfeld. <https://sympatec.com>.
- [39] Greń J.: Statystyka matematyczna. Modele i zadania. PWN, Warszawa (1978).
- [40] Soliwoda D.: Projekt systemu oceny jakości ziaren i mikroziaren ściernych. Praca dyplomowa. Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Gdańsk (2013).
- [41] Kleinsmidt N.: Badania wielkości i kształtu mikroziaren ściernych w operacjach docierania powierzchni płaskich. Praca dyplomowa. Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Gdańsk (2016).



Mechanical properties of hemp fiber-reinforced polypropylene composites for drone propeller guard application

W. Singsang, T. Khamsin, C. Prachumchon, A. Rodbumrung, B. Netiworaruksa, N. Prasoesopha, I.-O. Sittitanadol

Mech. Adv. Compos. Struct. 2025, **2**, nr 12, 271, doi: 10.22075/macs.2024.33806.1647

A propeller guard is an instrument that helps to avoid unmanned aerial vehicles (UAVs) or drone damage. Commercially, they are made from an engineering plastic such as acrylonitrile butadiene styrene (ABS). This work aims to introduce the hemp fiber-reinforced polypropylene composites as a new competitive material for propeller guards. In this study, polypropylene was thermally mixed with different ratios of hemp fibers by internal mixing at 190°C. Tensile and impact testing were carried out according to ASTM D638 and ASTM D256, respectively. The results showed that the high contents of hemp fibers can enhance the modulus of their composites. Polypropylene composite with 45% by mass of hemp fibers obtained the highest modulus at 1169.4 MPa. Also, the impact resistances of these composites were higher while the fiber contents were increased. Furthermore, application in drone propeller guard was executed by SIMCENTER 3D software for proving their propeller protection performance of as-prepared composites. The results indicated that polypropylene and its hemp fibers-reinforced composites could be the materials for this drone propeller guard.

Performance evolution of the nano boron nitride enhanced bone cement composites

H. Wang, K. Zhang, W. Niu, S. Min, F. Lu, S. Zhang, W. Gao, H. Han, Y. Xia

J. Orthop. Surg. Res. 2025, **1**, nr 20, 245, doi: 10.1186/s13018-025-05626-1

Bone cement is a research hotspot and has been partially applied in the field of bone repair thanks to the good mechanical, physical and antibacterial properties. However, the easy wear and high temperature during curing characteristics would cause surrounding tissue necrosis, which seriously limits the wider application to some extent. In this work, the hexagonal boron nitride (h-BN) nano flakes were optimized

to enhance the bone cement matrix (PMMA) via mechanical doping. The doping of h-BN into PMMA results in an improved mechanical (bending stress increased by 26%), thermal-conductivity (increased by 175% with the loading of 20% by mass), wear-resistance properties, in addition, the h-BN has no significant impact on cell activity. What's more, the co-modification of PMMA with h-BN and Vancomycin (Va) endows the bone cement composites with more persistent drug release characteristics. This comprehensive performance evolution evaluation provides a reference for the innovative application of modified bone cement.

Effective elimination of Pb(II) cations from waste water and polluted water using siderite magnetic biochar

S. Gitipour, M. Sanaei, R. Lak, A. Karbassi

Sci. Rep. 2025, **1**, nr 15, 7912, doi: 10.1038/s41598-025-92073-x

Magnetic biochar composites were created by pyrolyzing siderite and sawdust in nitrogen gas (N₂). adsorption was done in a variety of pH and temperature ranges on magnetic biochar. A magnet was used to extract the MB-liquid from each other following 24-hour shaking period. At Iran's Geological Survey, Pb(II) concentration was measured using an ICP (inductively coupled plasma). The adsorption-desorption process was carried out five times in order to evaluate the magnetic biochar's reusability. The pyrolysis of siderite in order to gain the MB changes its chemical composition and turns into a mixture of hematite, magnetite and maghemite, which imparts magnetism to the biochar and enriches its surface functional groups. The characterizations showed a higher specific surface area and porous structures in the magnetic biochar. An external magnetic field (magnet) was used to easily separate the magnetic biochar suspension because XRD investigation revealed that the primary component of the siderite magnetic biochar absorbent is magnetite, a ferrimagnetic mineral with substantial magnetic characteristics. The magnetic biochar composites' strong adsorption capabilities toward Pb(II) ions were demonstrated by the batch adsorption tests. At pH 5.0 and T = 45°C, Pb had its highest adsorption capability on magnetic biochar 96.92%. The mesoporous structure of magnetic biochar was indicated by the type IV isotherm. It has been demonstrated that adsorption most closely matches Langmuir's model. Therefore, it can be said

that monolayer adsorption has occurred. Biochar's active sites were probably responsible for the fast adsorption process. Kinetics of lead adsorption with MB have been harmonized with pseudo-second order, indicating that the predominant mechanism for Pb adsorption onto magnetic biochar is chemisorption/surface complexation. In summary, magnetic biochar serves as a dual-functional material, adsorbing Pb(II) species and reducing them to less harmful forms, with the added advantage of easy recovery and reuse due to its magnetic properties. This makes it a promising material for the remediation of lead-contaminated environments.

Ultrahigh capacitive energy storage of BiFeO₃-based ceramics through multi-oriented nanodomain construction

Z. Zhou, W. Bai, N. Liu, W. Zhang, S. Chen, P. Wang, J. Liu, J. Zhai, J. Guo, G. Du, Y. Wu, Z. Hong, W. Li, Z. Pan

Nat. Commun. 2025, **1**, nr 16, 2075, doi: 10.1038/s41467-025-57228-4

Lead-free BiFeO₃-based (BF) materials with colossal spontaneous polarization and high Curie temperatures exhibit considerable potential for groundbreaking developments in dielectric capacitors. However, their inherent limitations, such as restricted breakdown strength (E_b) and pronounced remanent polarization, critically restrict advancements in energy storage capabilities. Herein, we achieve an exceptional recoverable energy density of 12.2 J cm⁻³ with an impressive efficiency of 90.1% via the strategic design of a dipolar region with high resilience to electric fields within BiFeO₃-based ceramics. Guided by phase-field simulations and validated through atomic-scale observations, the superior energy storage performance is attributed to the incorporation of aliovalent ions, which disrupt the long-range ordered single-phase distribution, thus enhancing the disorder of polarization vectors and drastically reducing polarization hysteresis. Simultaneously, the refinement of the microstructural scale, coupled with the introduction of high-bandgap ions, synergistically improves the breakdown durability. This study provides a feasible blueprint for leveraging high-performance BiFeO₃-based ceramics, which further facilitates the progress of lead-free capacitors for next-generation energy storage systems.

Optimal material selection for high temperature tribological application. An integrated multi criteria decision study

Y.F. Takele, A.D. Woldeyohannes

Discov. Mater. 2025, **1**, nr 5, 33, doi: 10.1007/s43939-025-00209-7

High temperature tribological automotive components are crucial parts of automotive to perform the required function. Aluminum alloys are known for their high strength-to-weight ratio, wear resistance, and corrosion resistance. These alloys have proved their worth in automotive application. Owing to the incorporation of different reinforcements in aluminum alloys, it allows to develop novel composites with desirable properties. However, the selection of suitable aluminum alloy for high temperature tribological application is crucial. This research article focused on selecting the most optimal material for usage in high temperature tribological applications. This study employed advanced multi-criteria decision making methodologies,

specifically weights of criteria are calculated using entropy method and ranking of aluminum alloys have been done using technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) and combined compromise solution (CoCoSo) method to investigate the complex process of material selection. By taking into account key criteria such as thermal degradation (TD), hardness (H), ultimate tensile strength (UTS), density (D), thermal conductivity (TC), melting point (MP), wear rate (WR), and corrosion resistance (CR), and three alternatives. The research aims to address the fundamental problems associated with material selection in the production of high temperature tribological automotive component. The study's findings highlight that among the three variants of 6xxx aluminum alloys (AA6061, AA6082, and AA6005) under examination, AA6082 emerges as the most optimal choice. The alternatives rank determined by the TOPSIS and CoCoSo methods, are identical when weighted using the entropy method. These findings provide valuable insights to manufacturers, equipping them with the knowledge needed to make informed decisions geared towards enhancing the performance and reliability of their high temperature tribological application of components.

3D-printed resins used in occlusal splints modified with graphene nanoplatelets

C.R. Adami, I.C. Rodrigues, L.C. Rodrigues, R. Frassini, M.R. Ely, L.V.R. Beltrami, D. Piazza, L.K. Lazzari, H.L.O. Júnior, A.J. Zattera, T.O. Gamba

Discov. Mater. 2025, **1**, nr 5, 38, doi: 10.1007/s43939-025-00217-7

This research focused on incorporate nanoparticles through sonification of the liquid 3D printing resin used in occlusal splints in the CAD-CAM process. It was evaluated the mechanical characteristics and cytotoxic effects of polymethylmethacrylate (PMMA) resin enhanced with graphene nanoplatelets (GNP at 0.125%, 0.250%, and 0.500% w/w) utilizing the methylthiazolyldiphenyl-tetrazolium bromide (MTT) assay. The flexural strength and modulus did not significantly change with GNP incorporation with exception of 0.500% composite, in which a reduction of ~ 50% for both properties was observed. The impact resistance showed the same trend but with a reduction of ~ 75% for 0.500% composite. In tensile strength, the unmodified PMMA sample exhibited superior resistance, which diminished progressively with higher GNP concentrations until a maximum of 20% reduction with high GNP concentration. The Shore D hardness test revealed a notable reduction at 0.125%, whereas higher concentrations (0.250% and 0.500%) led to the same results of the neat resin. All samples demonstrated favorable wettability with water. Composites with GNP concentrations of 0.125% and 0.500% were found to be cytotoxic, resulting in cell viability below 70%. Furthermore, the incorporation of graphene enhanced the hydrophilicity of the material, creating a surface barrier that inhibited bacterial proliferation. Finally, despite the promising prospects of graphene in dentistry, several challenges remain that must be overcome before these materials can achieve full commercialization for other applications as bone tissue engineering, coatings for dental implants, antibacterial functionalities, and collagen membranes.

3D printed porous magnesium metal scaffolds with bioactive coating for bone defect repair. Enhancing angiogenesis and osteogenesis

J. Ye, B. Miao, Y. Xiong et al.

J. Nanobiotechnol. 2025, **1**, nr 23, 160, doi: 10.1186/s12951-025-03222-3

In orthopedics, the effective treatment of bone defects remains a major challenge. Magnesium (Mg) metals, with their excellent biocompatibility and favorable osteoconductivity, osteoinductivity, and osseointegration properties, hold great promise for addressing this issue. However, the rapid degradation rate of magnesium restricts its clinical application. In this study, a triply periodic minimal surface (TPMS)-structured porous magnesium alloy (Mg-Nd-Zn-Zr, JDBM) was fabricated using the laser powder bed fusion (LPBF) process. Strontium-doped octacalcium phosphate (SrOCP) and strontium hydrogen phosphate biphasic composite coatings were applied to the surface of the scaffolds. The results showed that the TPMS structure exhibited porous biomimetic characteristics that resemble cancellous bone, promoting vascular ingrowth and new bone formation. Additionally, the SrOCP coating significantly increased the surface roughness and hydrophilicity of the scaffold, which enhanced cell adhesion and osteogenic differentiation. The SrOCP coating also markedly reduced the degradation rate of the JDBM scaffolds while ensuring the sustained release of bioactive ions (Mg^{2+} , Zn^{2+} , Sr^{2+} , and Ca^{2+}), thus maintaining the scaffolds' biofunctional activity. Compared to JDBM scaffolds, JDBM/SrOCP scaffolds exhibited better biocompatibility and stronger vascularization and bone regeneration capabilities both in vitro and in vivo. Overall, this study presents a novel strategy for the repair of bone defects using magnesium-based biomaterials, providing new insights for future clinical applications.

Enhancing thermal protection in lithium batteries with power bank-inspired multi-network aerogel and thermally induced flexible composite phase change material

Z. Li, F. Cao, Y. Zhang, S. Zhang, B. Tang

Nanomicro Lett. 2025, **1**, nr 17, 166, doi: 10.1007/s40820-024-01593-0

Thermal runaway (TR) is considered a significant safety hazard for lithium batteries, and thermal protection materials are crucial in mitigating this risk. However, current thermal protection materials generally suffer from poor mechanical properties, flammability, leakage, and rigid crystallization, and they struggle to continuously block excess heat transfer and propagation once thermal saturation occurs. This study proposes a novel type of thermal protection material: an aerogel coupled composite phase change material (CPCM). The composite material consists of gelatin/sodium alginate (Ge/SA) composite biomass aerogel as an insulating component and a thermally induced flexible CPCM made from thermoplastic polyester elastomer as a heat-absorbing component. Inspired by power bank, we coupled the aerogel with CPCM through the binder, so that CPCM can continue to 'charge and store energy' for the aerogel, effectively absorbing heat, delaying the heat saturation phenomenon, and maximizing the

duration of thermal insulation. The results demonstrate that the Ge/SA aerogel exhibits excellent thermal insulation (with a temperature difference of approximately 120°C across a 1 cm thickness) and flame retardancy (achieving a V-0 flame retardant rating). The CPCM exhibits high heat storage density (811.9 J g^{-1}), good thermally induced flexibility (bendable above 40°C), and thermal stability. Furthermore, the Ge/SA-CPCM coupled composite material shows even more outstanding thermal insulation performance, with the top surface temperature remaining at 89°C after 100 min of exposure to a high temperature of 230°C. This study provides a new direction for the development of TR protection materials for lithium batteries. The prepared Ge/SA biomass aerogel with multiple crosslinked networks have excellent flame retardancy and thermal insulation properties. The prepared SAT/TPEE/EG composite phase change material (CPCM) has a thermal storage density as high as 811.9 J g^{-1} and good flame retardancy. In the composite material of CPCM coupled with aerogel, the CPCM continuously absorbs heat for the aerogel, thus maximizing heat transfer and spreading.

Preparation of high-performance Ag_2Se NWs/PEDOT:PSS composite films and influence of PEDOT:PSS content on thermoelectric properties

R. Wang, R. Sun, Y. Ren, Y. Ma, L. Ma

J. Mater. Sci.: Mater. Eng. 2025, **1**, nr 20, 31, doi: 10.1186/s40712-025-00235-6

There is still limited research on the influence of polymer content in inorganic/organic materials on thermoelectric properties. In this study, we systematically investigated the influence of the content of poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS) in the Ag_2Se nanowires/PEDOT:PSS (Ag_2Se NWs/PEDOT:PSS) composite films on the thermoelectric properties. When the content of PEDOT:PSS is 1.54% by mass, the composite film achieved the highest power factor (PF) of $\sim 2074.0 \mu\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-2}$ at room temperature. The maximum output power (P_{max}) of the single-leg thermoelectric device based on the composite film is approximately 49.42 nW, and the maximum power density (PD_{max}) is 4.28 W m^{-2} at a temperature difference of 25 K. Furthermore, the film exhibits superior flexibility with 94.3% of the original performance retention after 2000 bending cycles around a rod with a diameter of 5 mm. This work provides valuable guidance for the design and fabrication of high-performance flexible inorganic/organic composite thermoelectric materials.

Advancements in cold spraying for polymer matrix composites. Enhanced LSP and EMI shielding performance – review and future directions

B. Karahan, I. Ozdemir, T. Grund, N. Hanisch, T. Lampke

J. Mater. Sci.: Mater. Eng. 2025, **1**, nr 20, 13, doi: 10.1186/s40712-025-00223-w

Polymer matrix composites (PMCs) have emerged as critical materials in lightweight engineering applications due to their excellent mechanical properties and design versatility. However, their inherent

limitations in electrical and thermal conductivity necessitate metallization, particularly for applications such as lightning strike protection (LSP) and electromagnetic interference (EMI) shielding. Cold spraying, a low-temperature metallization technique, addresses the shortcomings of conventional methods by enabling the deposition of dense, oxide-free, and highly conductive coatings with minimal damage to the composite substrate. This review provides a comprehensive overview of advancements in metallization techniques, with a focus on cold spraying, to enhance the electrical and thermal performance of PMCs for LSP and EMI shielding. The combination of PMCs with conductive materials presents an innovative approach to achieving lightweight, corrosion-resistant, and efficient LSP and EMI shielding solutions, offering significant advancements in surface functionalization. Future research directions include the exploration of hybrid metallization strategies and the integration of cold spraying with additive manufacturing, highlighting their potential to create multifunctional and high-performance PMC-based systems. Additionally, emerging trends such as novel or smart materials, optimization of cold spray processes through advanced modeling, and the translation of these innovations into industrial applications are discussed.

Effects of residual stress on the flexural strength and microstructure of Al_2O_3 - ZrO_2 composites fabricated by different methods

H.-Y. Li, L. Zhang, X.-G. Liu, D. Wan, Y. Bao

J. Mater. Sci.: Mater. Eng. 2025, **1**, nr 20, 33, doi: 10.1186/s40712-025-00216-9

Due to the mismatch of coefficients of thermal expansion between ZrO_2 and Al_2O_3 , thermal residual stress would be induced to the Al_2O_3 - ZrO_2 composites during the cooling process. However, Al_2O_3 - ZrO_2 composites fabricated by different methods have various stress distribution and stress states, which result in different mechanical properties. In this work, the prestressed coating reinforcement method and the particle enhancement method have been carried out to fabricate Al_2O_3 -reinforced ZrO_2 composites (the corresponding specimens marked as AcZs pre-stressed ceramics and Al_2O_3 /P/ ZrO_2 composites), respectively. The effects of residual stress on flexural strength and microstructure were investigated. Results show that, in the AcZs pre-stressed ceramics, the residual compressive stress exists in the coating, while the tensile stress exists in the substrate. However, the residual stress in Al_2O_3 /P/ ZrO_2 composites is hydrostatic stress because of the isostatic presses on Al_2O_3 particle in all directions. Furthermore, owing to the residual compressive stress in the surface layer could prevent crack propagation, the flexural strength of AcZs pre-stressed ceramics is higher than that of Al_2O_3 /P/ ZrO_2 composites with different content of Al_2O_3 particle additions. Generally, the prestressed coating reinforcement method is an effective and low-cost way to improve the mechanical strength of brittle materials, which is more suitable for the preparation of ZrO_2 based ceramics with high strength in this work.

Przygotowała prof. dr hab. inż. Agnieszka Sobczak-Kupiec

re • respect
energy

CERTYFIKAT

Ten certyfikat potwierdza
zakup energii pochodzącej w
100% z odnawialnych źródeł
przez

**WYDAWNICTWO CZASOPISM I
KSIĄŻEK TECHNICZNYCH SIGMA-NOT
SPÓŁKA Z OGRANICZONĄ
ODPOWIEDZIALNOŚCIĄ**

Dzięki temu WYDAWNICTWO CZASOPISM I
KSIĄŻEK TECHNICZNYCH SIGMA-NOT SPÓŁKA Z
OGRANICZONĄ ODPOWIEDZIALNOŚCIĄ redukuje
emisję do
206248 kg CO₂ rocznie

respect.energy

PRACUJEMY NA ZIELONEJ ENERGII

WYDAWNICTWO SIGMA-NOT

WYBRANE ZGŁOSZENIA PATENTOWE z dziedziny inżynierii materiałowej wg BIULETYNU URZĘDU PATENTOWEGO nr 7–14 z 2025 r.

Zgł. nr 445821; B01J 13/00

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA
W KRAKOWIE, Kraków**

Luty-Błocho M., Skawińska K., Szot A., Wojnicki M., Żabiński P.

Sposób zatężania roztworów koloidalnych metali szlachetnych

(3 zastrzeżenia)

Przedmiotem wynalazku jest sposób zatężania roztworów koloidalnych metali szlachetnych, charakteryzujący się tym, że obejmuje dodawanie do roztworu koloidalnego metalu szlachetnego związku na bazie polimeru usieciowanego o strukturze 3D w postaci hydrożelu.

(4 zastrzeżenia)

Zgł. nr 445828; C08L 67/04

UNIWERSYTET IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU, Poznań

Sztorch B., Przekop R., Głowacka J., Kustosz M., Kubiak N.

Kompozyt polilaktydu z opoką wapnistą jako napelniaczem, sposób jego wytwarzania oraz zastosowanie do produkcji wyrobów z tworzyw sztucznych

Przedmiotem wynalazku jest kompozyt polilaktydu z opoką wapnistą jako napelniaczem na osnowie polilaktydu PLA, z dodatkiem wosku pszczelego lub wosku syntetycznego jako kompatybilizatorów, sposób jego wytwarzania oraz zastosowanie do produkcji wyrobów z tworzyw sztucznych. Kompozyt polilaktydu z opoką wapnistą jako napelniaczem na osnowie polilaktydu PLA składa się z 70–96,25% mas. polilaktydu PLA i 30–3,75% mas. opoki i/lub zawierających 1% mas. w przeliczeniu na masę PLA/opoka wosku pszczelego lub wosku syntetycznego jako kompatybilizatorów. Sposób wytwarzania kompozytu w postaci koncentratu polega na tym, że 70% mas. polilaktydu PLA podgrzewa się powyżej temperatury mięknienia do uzyskania polimeru w stanie uplastycznionym, dalej dodaje się 30% mas. opoki wapnistej i/lub 1% mas. wosku pszczelego w przeliczeniu na masę kompozytu PLA/opoka i/lub 1% mas. wosku syntetycznego w przeliczeniu na masę kompozytu PLA/opoka. Następnie polimer wraz z napelniaczem miesza się do uzyskania jednorodnej masy, dalej studzi się, granuluje i suszy w podwyższonej temperaturze. Zastosowanie kompozytu polilaktydu z opoką wapnistą do druku 3D w postaci

żyłki (filamentu), uzyskanego przez dodanie do koncentratów czystego polimeru polilaktydu PLA w odpowiednich stosunkach mas. do rozcieńczenia układów do stężeń 3,75% mas. opoki, 7,5% mas. opoki, 15% mas. opoki lub poprzez wytlóczenie koncentratu zawierającego 30% mas. opoki.

Zgł. nr 447586; C04B 28/02

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA IM. JAROSŁAWA DĄBROWSKIEGO, Warszawa

Nasiłowska B., Paciejewski M., Bogdanowicz Z., Kopczyński K., Mierczyk Z., Siwiński J.

Sposób wykonania fugi na bazie kwasu podchlorawego

Przedmiotem zgłoszenia jest sposób wykonania fugi na bazie kwasu podchlorawego, gdzie w pierwszym etapie miesza się zaprawę fugową z kwasem podchlorawym o stężeniu 100–2000 ppm w stosunku 4–4,5:1, mieszając z prędkością 20–200 rpm przez 2–60 min, a w drugim etapie dokonuje się suszenia wykonanej fugi w temp. 4–35°C przez ponad 4 h.

(1 zastrzeżenie)

Zgł. nr 445921; C08L 77/02

THERMOPLAST TECHNOLOGY PROSTA SPÓŁKA AKCYJNA, Libiąż

Oleksiewicz M., Dyba P.

Mieszanina do wytwarzania materiału kompozytowego i materiał kompozytowy

Zgłoszenie dotyczy mieszaniny do wytwarzania materiału kompozytowego zawierającej poliamidowy materiał matrycowy i wypełnienie w postaci włókien bazaltowych, materiału kompozytowego uzyskanego z tej mieszaniny. Mieszanina służy do wytwarzania kompozytowych elementów konstrukcyjnych, takich jak profile techniczne, w tym profile przeznaczone do wykorzystania w stolarni otworowej.

(8 zastrzeżeń)

Zgł. nr 446148; C21D 9/00

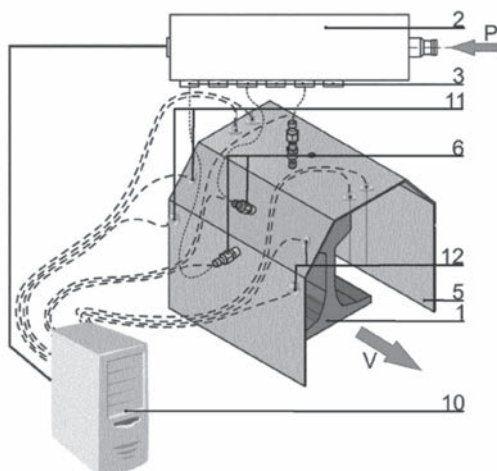
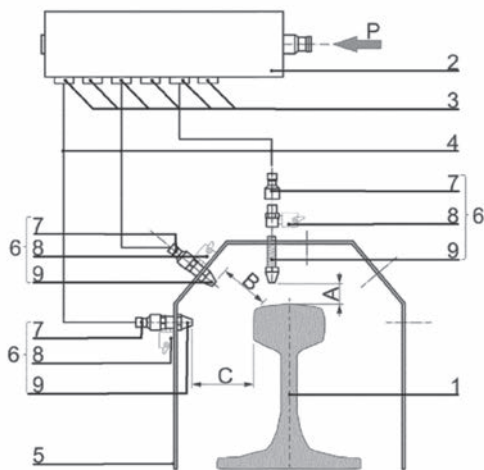
POLITECHNIKA WROCŁAWSKA, Wrocław

Kaczyński P., Gronostajski Z., Lewandowski F., Jabłońska M.

Stanowisko do ciągłej obróbki cieplnej odkuwek wydłużonych wysokich

Przedmiotem wynalazku jest stanowisko do ciągłej obróbki cieplnej odkuwek wydłużonych wysokich (1), charakteryzujące się tym, że powietrze o ciśnieniu P zasila rozdzielacz centralny (2) wyposażony w elementy ograniczające przepływ (3), do których podłączone są przewody hydrauliczne (4) zakończone przymocowanymi do obudowy (5) ruchomymi elementami chłodzącymi (6) składającymi się z przyłącza (7), aktuatora (8) i dysz wylotowych (9), których odległość (A, B, C) od powierzchni odkuwki wydłużonej wysokiej (1) jest regulowana w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego za pomocą centralnej jednostki sterującej (10), na podstawie danych z czujników temperatury wejścia (11) odkuwki na wejściu do stanowiska i czujników temperatury wyjścia (12) odkuwki na wyjściu ze stanowiska.

(6 zastrzeżeń)



Zgł. nr 446050; C01B 32/172

POLITECHNIKA ŚLĄSKA, Gliwice

Dzienia A., Janas D., Taborowska P., Just D.

Sposób selektywnej izolacji półprzewodnikowych, jednościennych nanorurek węglowych

Przedmiotem zgłoszenia jest sposób selektywnej izolacji półprzewodnikowych, jednościennych nanorurek węglowych, który polega na tym, że na każde 1,5 mg naważonych nanorurek węglowych dodaje się 4,5–15 mg selektywnego polimeru przewodzącego albo mieszaniny polimerów przewodzących selektywnego i nieselektywnego, albo selektywnego polimeru i oligomeru, albo polimeru i małocząsteczkowego organicznego związku dyspergującego, przy czym co najmniej jeden polimer jest selektywny względem chiralności, a sumaryczny stosunek masowy polimerów do nanorurek węglowych wynosi 4:1–8:1. Następnie do mieszaniny procesowej dodaje się 3–50 mg małocząsteczkowego dyspersanta, całość rozpuszcza w 2–5 mL rozpuszczalnika organicznego lub mieszaniny rozpuszczalników organicznych na każdy 1 mg nanorurek węglowych, korzystnie 2,65 mL na 1 mg nanorurek węglowych poddaje wstępnej sonikacji, przy czym proces prowadzi się w temp. 0–60°C w łaźni ultradźwiękowej o mocy 200–1000 W, w czasie od 5 min do 24 h, otrzymaną zawiesinę homogenizuje się homogenizatorem ultradźwiękowym z sonotrodą o mocy 2,5–4 W na każdy mililitr zawiesiny, w temp. 0–60°C, w czasie 5–30 min, odwirowuje co najmniej 6000 x g, korzystnie 15314 x g, w czasie 2–30 min, pozostały osad ponownie zalewa się świeżą porcją rozpuszczalnika organicznego lub mieszaniny rozpuszczalników organicznych i powtarza się analogicznie proces sonikacji, odwirowania i rozdziału do utraty selektywności i/lub wydajności ekstrakcji.

(6 zastrzeżeń)

Zgł. nr 446047; C21D 9/50

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA, Wrocław

Zemlik M., Konat Ł., Pyka D., Jamroziak K.

Sposób spawania i obróbki cieplnej połączeń spawanych stali martenzytycznej z borem

Przedmiotem zgłoszenia jest sposób spawania i obróbki cieplnej stali martenzytycznej z borem w kontekście zapewnienia odporności balistycznej przeciwko amunicji pośredniej 7,62 x 39 mm nb. wz. 43 z poc. PS. Sposób polega na tym, że w celu wytworzenia złącza spawanego blachę ze stali martenzytycznej o grubości 10 mm i wyrażonym w procencie mas. składzie chemicznym: C 0,17–0,23, Si 0,19–0,32, Mn 1,00–1,10, P maks. 0,025, S maks. 0,010, Cr 0,20–0,37, Ni maks. 0,10, Mo 0,05–0,15, B maks. 0,002, o równoważniku węgla CEV ≤ 52 , spawa się metodą SAW (121) drutem elektrodowym $S_3Ni_{2,5}CrMo$ wraz z topnikiem $MgO + CaF_2 + Al_2O_3 + SiO_2$, stosując parametry spawania: prędkość spawania $v \approx 60$ cm/min, znamionowy prąd łuku elektrycz-

nego $I = 530\text{--}630\text{ A}$, napięcie łuku elektrycznego $U = 31\text{--}33\text{ V}$, energia liniowa $Q \leq 2,0\text{ kJ/mm}$, temperatura międzywarstwowa $T_i < 250^\circ\text{C}$, który charakteryzuje się tym, że po spawaniu blachę ścienia się do grubości 4–5 mm, a otrzymane złącze poddaje się normalizowaniu poprzez austenitizowanie w temp. $880\text{--}900^\circ\text{C}$ przez 60 min i chłodzenie na powietrzu, dalej hartowaniu poprzez austenitizowanie w temp. $930\text{--}950^\circ\text{C}$ przez 15–20 min i chłodzenie w wodzie o temp. $\leq 30^\circ\text{C}$, oraz odpuszczaniu w temp. 100°C przez 5 h, po którym złącze chłodzi się na powietrzu.

(1 zastrzeżenie)

Zgł. nr 450039; C08G 63/91

UNIWERSYTET MARII CURIE-SKŁODOWSKIEJ, Lublin

Gawdzik B., Pączkowski P.

Sposób otrzymywania usieciowanych żywic poliestrowych o właściwościach antybakteryjnych

Przedmiotem zgłoszenia jest sposób otrzymywania usieciowanych żywic poliestrowych, takich jak maleinowo-ftalowe żywice poliestrowe, nienasycone żywice maleinowo-izoftalowe, żywice tereftalowe otrzymywane z recyklatu PET oraz żywice winylowo-estrowe, mający na celu nadanie im właściwości antybakteryjnych, co jest istotne z punktu widzenia ich zastosowania w produkcji przedmiotów codziennego użytku, urządzeń, konstrukcji, kompozytów czy opakowań z tworzyw sztucznych. Wynalazek rozwiązuje problem techniczny w postaci opracowania nowego sposobu otrzymywania usieciowanych żywic o właściwościach antybakteryjnych, bez stosowania toksycznych soli metali ciężkich, głównie nanosrebra. Klatrochelat żelaza(II) użyty w postaci roztworu w polarnym niearomatycznym rozpuszczalniku organicznym dobrze mieszającym się żywicą, w odpowiedniej ilości w stosunku do reagentów, jest skutecznym modyfikatorem żywic poliestrowych, nadającym im właściwości antybakteryjne.

(4 zastrzeżenia)

Zgł. nr 447327; C09H 1/04

INSTYTUT MASZYN PRZEPŁYWOWYCH IM. ROBERTA SZEWAŁSKIEGO POLSKIEJ AKADEMII NAUK, Gdańsk

Cenian A., Kuligowski K., Świerczek L., Konkol I., Tylino R., Mania S.

Kompozytowe biospoiwo na bazie surowców garbarskich oraz sposób wytwarzania kompozytowego biospoiwa na bazie surowców garbarskich

Przedmiotem zgłoszenia jest sposób obróbki surowców garbarskich, mizdry chromowej i niechromowej, gdzie poddawana jest ona procesowi hydrolizy, korzystnie poprzez obróbkę termiczną, w tym autoklawowanie surowca zawieszonego w 0,5–1 M kwasie solnym, w stosunku obj. surowca do roztworu wynoszącym

1:6–1:10, w temp. 121°C i ciśnieniu 2,1 bar przez 20 min, a następnie hydrolizat o zawartości suchej masy na poziomie 7–12% poddawany jest 2-godzinnej obróbce 0,5% kwasem siarkowym(VI) w temp. 85°C w stosunku obj. surowca do roztworu wynoszącym 1:6,5 i neutralizacji za pomocą stężonego roztworu NaOH do pH optymalnego dla działania utwardzacza, uzyskana siła klejenia w zakresie 2–13 MPa.

(4 zastrzeżenia)

Zgł. nr 446259; C22F 1/05

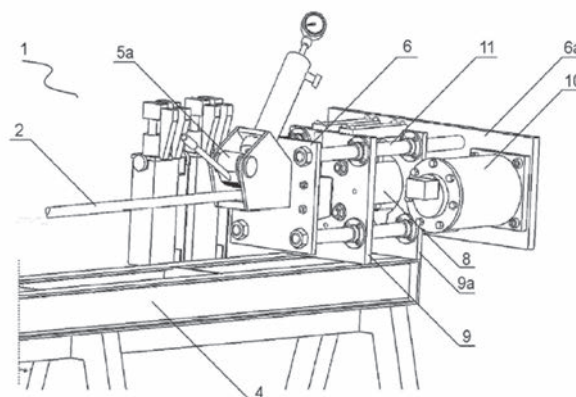
AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE, Kraków

Leśniak D., Libura W., Zasadziński J., Bogusz M., Madura J.

Sposób obróbki cieplno-plastycznej kształtowników wyciskanych ze stopów aluminium oraz urządzenie do rozciągania kształtowników w trakcie obróbki cieplno-plastycznej

Przedmiotem zgłoszenia jest sposób obróbki cieplno-plastycznej kształtowników wyciskanych ze stopów aluminium, zwłaszcza ze stopu AlMgSi(Cu), polegający na tym, że natychmiast po wyjściu z prasy do wyciskania kształtownik przesyca się z temperatury wyciskania przez nagłe chłodzenie, a następnie chłodzi się go w na wybiegu prasy do wyciskania, po czym rozciąga się go do uzyskania odkształcenia trwałego, zaś po rozciąganiu kształtownik poddaje się procesowi sztucznego starzenia w podwyższonej temperaturze. Sposób charakteryzuje się tym, że rozciąganie kształtownika przeprowadza się, najpierw przykładając do niego *quasi*-statycznie siłę rozciągającą, nadając mu naciąg wstępny w zakresie odkształceń sprężystych, po czym zachowując naciąg wstępny, kontynuuje się rozciąganie w sposób dynamiczny. Przedmiotem zgłoszenia jest również przedstawiona na rysunku konstrukcja urządzenia do rozciągania kształtowników.

(8 zastrzeżeń)



Zgł. nr 446222; C08L 23/16

SIEĆ BADAWCZA ŁUKASIEWICZ – INSTYTUT INŻYNIERII MATERIAŁÓW POLIMEROWYCH I BARWNIKÓW, Toruń**Pawłowska U., Kowalczyk D., Dębek C., Stokłuska S., Cieśliński H., Dąbrowski K.***Kompozycja kauczukowa do wytwarzania wyrobów gumowych*

Przedmiotem zgłoszenia jest kompozycja kauczukowa do wytwarzania wyrobów gumowych, która polega na tym, że na 100 cz. mas. kauczuku zawiera 0,5–15 cz. mas., korzystnie 0,5–10 cz. mas., przynajmniej jeden roślinny olejek eteryczny wybrany z grupy obejmującej roślinne olejki eteryczne, którym jest olejek tymiankowy lub olejek cytrynowy albo olejek goździkowy. Roślinne olejki eteryczne są wymieszane z napętniaczem, jakim jest krzemionka aktywna lub sadza aktywna w proporcji 1:1–3:1.

(3 zastrzeżenia)

Zgł. nr 447326; C22F 1/16

INSTYTUT MASZYN PRZEPŁYWOWYCH IM. ROBERTA SZEWAŁSKIEGO POLSKIEJ AKADEMII NAUK, Gdańsk**Cenian A., Sawczak M., Zhurba V., UA, Mats O., UA***Sposób niskoenergetycznej obróbki stopów tytanu*

Przedmiotem zgłoszenia jest sposób obróbki płyt ze stopu Ti-6Al-4V wytworzonych w procesie gorącego walcowania, o twardości 32–34 HRC, w celu zwiększenia wytrzymałości na oddziaływania balistyczne, gdzie poddawana jest ona procesowi walcowania na zimno w temperaturze do $T < 0,2 T_t$ (~ 300 K), dla zgniotu do 60%, przy czym twardość wzrasta do 48 HRC.

(3 zastrzeżenia)

Zgł. nr 446310; C07D 493/10

SIEĆ BADAWCZA ŁUKASIEWICZ PORT POLSKI OŚRODEK ROZWOJU TECHNOLOGII, Wrocław**Pawłowski J., Wilk-Kozubek M., Cybińska J.***Kompozycja termochromowa oraz sposób jej wytwarzania*

Przedmiotem zgłoszenia jest kompozycja termochromowa zawierająca leukobarwnik z grupy fluoranów i kwas 4-alkilbenzoesowy, charakteryzująca się tym, że zawiera leukobarwnik i kwas 4-alkilbenzoesowy w stosunku molowym 1:1–1:9 oraz sposób jej wytwarzania.

(13 zastrzeżeń)

Zgł. nr 446306; C08L 23/08

POLITECHNIKA ŁÓDZKA, Łódź**Masek A., Latos-Brózio M., Tomicka N., Busiak R.***Kompozycja elastomerowa o podwyższonej odporności na utlenianie oraz fotostarzenie*

Przedmiotem zgłoszenia jest kompozycja elastomerowa przeznaczona na wyroby polimerowe o podwyższonej odporności na utlenianie oraz fotostarzenie, zawierająca kopolimer etylenowo-norbornenowy oraz naturalny przeciwutleniacz w postaci opadłych liści klonu pospolitego, zmielonych na proszek i wysuszonych, w ilości 10–30 cz. mas. na 100 cz. mas. kopolimeru, lub opadłe liście klonu pospolitego, zmielone na proszek, następnie zmodyfikowane bezwodnikiem maleinowym lub 3-metakryloksypropylotrimetoksylanem i wysuszone, w ilości 10 cz. mas. na 100 cz. mas. kopolimeru.

(1 zastrzeżenie)

Przygotowała mgr Anna Skurzeńska



CZYTAJ

Inżynierię Materiałową
na www.sigma-not.pl

INFORMACJE DLA AUTORÓW

Redakcja przyjmuje do publikacji tylko prace oryginalne, niepublikowane wcześniej w innych czasopiśmie 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 wielokrotniania 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 różnicować liczbę „0” i dużą literę „O”. Szczególnie czytelny powinien być zapis potęg i indeksów. Wzory i równania (chemiczne, matematyczne, fizyczne) należy przygotować specjalnym edytorem (np. ChemWin, ISIS Draw 2.2) i zapisywać 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) powinny znajdować się poza tekstem, a na marginesie wydruku tekstu lub w jego treści powinny być zaznaczone proponowane miejsca ich wstawienia. Zaleca się zestawianie wyników pomiarów lub różnych właściwości w formie tabelarycznej. Tabele powinny być ponumerowane cyframi arabskimi. Tytuł tabeli w języku angielskim i polskim powinien 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 powinny 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 dopus-

zczalne 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 ramach.

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.U. 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.

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. Niezwroćenie 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:
+48 663-311-933, i.materialowa@sigma-not.pl**

38.

MIĘDZYNARODOWE ENERGETYCZNE TARGI BIELSKIE

BIELSKO-BIAŁA INTERNATIONAL
POWER INDUSTRY FAIR



ENERGETAB®

16-18.09.2025



www.energetab.pl

 **Targi**
z rekomendacją
Polskiej Izby Przemysłu Targowego

PRENUMERATA 2025

**Prenumerata drukowana i cyfrowa
– rzetelna wiedza na wyciągnięcie ręki**

Prenumeruj, w wygodnej dla siebie wersji!

Cena 1 egzemplarza: 85 zł

PRENUMERATA CYFROWA

Cena: 402 zł brutto

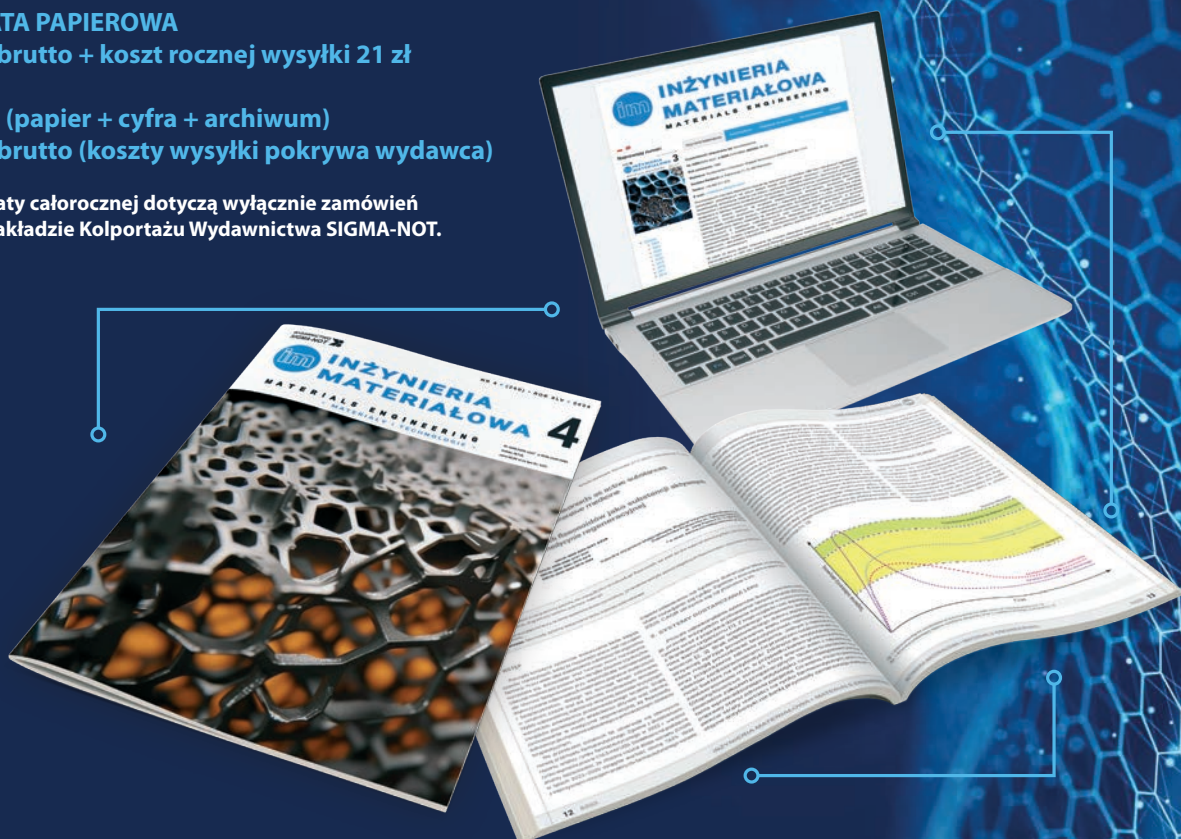
PRENUMERATA PAPIEROWA

Cena: 492 zł brutto + koszt rocznej wysyłki 21 zł

PAKIET PLUS (papier + cyfra + archiwum)

Cena: 600 zł brutto (koszty wysyłki pokrywa wydawca)

Ceny prenumeraty całorocznej dotyczą wyłącznie zamówień składanych w Zakładzie Kolportażu Wydawnictwa SIGMA-NOT.



ZAMÓWIENIA:

☎ 22 840 35 89 lub 22 840 30 86

@ prenumerata@sigma-not.pl

🌐 www.sigma-not.pl



WYDAWNICTWO SIGMA-NOT

