

Effect of microstructure and biochar additive content on the rheological properties of grease

Wpływ mikrostruktury i zawartości dodatku biowęglowego na właściwości reologiczne smaru plastycznego



DOI: 10.15199/62.2025.10.4

Biochars obtained from wheat straw (BP) or corn straw (BK), differing in sp. surface area of 181.8 and 18.3 m²/g, resp., were used as an additive to paraffin-based Li grease in amts. of 1, 3, and 5% by mass. The effect of microstructure and biochar content on the rheological properties of the lubricant compositions, i.e., the surface area of the hysteresis loop of the flow curve in the range of 0–300 1/s, was analyzed. The more developed sp. surface area of BP biochar favors thixotropy of the grease. Therefore, BK biochar was preferred in commercial applications.

Prezentowano wyniki badania właściwości użytkowych smarów plastycznych, zawierających dodatki biowęglowe otrzymane z biomasy lignocelulozowej: słomy pszenicznej i kukurydzianej. Wytworzone w procesie pirolizy dodatki różniły się mikrostrukturą, a w szczególności rozwinięciem powierzchni. Powierzchnia właściwa biowęgla ze słomy pszenicznej wynosiła 181,8 m²/g, a biowęgla ze słomy kukurydzianej 18,3 m²/g. Przedmiotem badań były litowe smary plastyczne na bazie parafinowej o różnej zawartości biowęgla (1, 3 i 5% mas.). Analizowano wpływ mikrostruktury i zawartości biowęgla na charakterystyki reologiczne kompozycji smarowych, czyli na pole pętli histerezy krzywej płynięcia w zakresie 0–300 1/s. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że większe rozwinięcie powierzchni dodatku biowęglowego ze słomy pszenicznej bardziej sprzyja tiksotropii smaru plastycznego. Z tego powodu do zastosowań komercyjnych korzystniejsze jest stosowanie biowęgla ze słomy kukurydzianej.

Keywords: biochar, biomass, plastic grease, rheological properties

Słowa kluczowe: biowęgiel, biomasa, smar plastyczny, właściwości reologiczne

Poprawa niezawodności maszyn jest jednym z ogromnych wyzwań współczesnego świata, wynikających nie tylko z troski o środowisko naturalne, ale także z ponoszenia wysokich kosztów następstw tarcia i zużycia ich ruchomych elementów. Szacuje się, że koszty te kształtują się na poziomie ok. 250 mld euro¹⁾. W ciągu kilku najbliższych lat, dzięki wykorzystaniu nowych osiągnięć nauki i techniki, możliwe

jest zmniejszenie strat energii nawet o kilkadziesiąt procent, m.in. dzięki zastosowaniu odpowiednich kompozycji smarów, zapewniających najkorzystniejsze charakterystyki tribologiczne i reologiczne oraz zmniejszony wpływ na środowisko^{1–3)}. Jako baza tradycyjnie stosowane są oleje mineralne, których właściwości użytkowe, w zależności od finalnego przeznaczenia produktu, są modyfikowane dodat-



Dr hab. inż. Jarosław MOLENDĄ (ORCID: 0000-0003-3477-4971) w roku 2000 uzyskał stopień doktora na Wydziale Fizyki i Chemii Uniwersytetu Łódzkiego, a stopień doktora habilitowanego w 2017 r. w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych w Warszawie. Pracuje w Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytucie Technologii Eksploatacji w Radomiu. Specjalność – inżynieria chemiczna i inżynieria mechaniczna.



Dr inż. Karolina DZIOSA (ORCID: 0000-0002-9759-3193) w roku 2023 uzyskała stopień doktora nauk technicznych na Wydziale Inżynierii Materiałów, Budownictwa i Środowiska Uniwersytetu Bielsko-Bialskiego. Obecnie jest starszym specjalistą w Centrum Biogospodarki i Ekoinnowacji Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytucie Technologii Eksploatacji. Specjalność – inżynieria chemiczna i inżynieria materiałowa.

* Adres do korespondencji:

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, tel.: (48) 364-93-05, e-mail: jaroslaw.molenda@itee.lukasiewicz.gov.pl

kami uszlachetniającymi. Jednym z najbardziej obiecujących sposobów zwiększania ich efektywności jest wykorzystanie dodatków węglowych, w tym grafitu i nanostruktur węglowych⁴⁻⁶).

Nanostruktury węglowe są często traktowane jako biokompatybilne i nietoksyczne dla środowiska, ze względu na podobieństwo ich budowy do nieszkodliwych trójwymiarowych alotropów węgla, takich jak grafit i diament⁷. Jednak przez brak wystarczających dowodów naukowych eksperci wciąż nie są zgodni w tej kwestii⁸. Wywołuje to kontrowersje związane z potencjalnym uwalnianiem nanocząstek do otoczenia podczas ich produkcji, transportu, użytkowania i utylizacji, a tym samym możliwością dalszego przenikania przez bariery fizjologiczne i struktury komórkowe organizmów. Stawia to więc pod znakiem zapytania obecne komercyjne wykorzystanie nanostruktur węglowych jako dodatków do środków smarowych. Tych wad pozbawione są natomiast dodatki grafitowe do smarów, wykazujące ponadto wysoką efektywność przeciwzużyciową⁹⁻¹¹.

Rosnący nacisk na względy środowiskowe zwiększył zapotrzebowanie na smary o określonych właściwościach reologicznych/tiksotropowych, bardziej odpornych na wycieki, a jednocześnie wykazujących zdolność utrzymywania cząstek dodatków w postaci zawieszonej^{2, 12}. Przy produkcji nowych dodatków uszlachetniających do smarów ważne są ich walory ekologiczne, takie jak dostępność surowców, możliwość uniezależniania od źródeł ropy naftowej lub innych paliw kopalnych, zmniejszenie śladu CO₂ oraz inne specyficzne wymagania dotyczące ich charakterystyk użytkowych, determinowanych przeznaczeniem. Perspektywiczną alternatywą dla klasycznych dodatków węglowych mogą okazać się produkty pirolizy biomasy, czyli biowęgle^{13, 14}. Pod pojęciem biowęgla, wg International Biochar Initiative¹⁵, należy rozumieć drobnoziarnisty karbonizat otrzymywany z odpadów biodegradowalnych i biomasy, takich jak odpady kukurydziane i ryżowe, słoma zbóż, drewno, szyszki i łodygi słonecznika.

Wykorzystanie biowęgla jako dodatków uszlachetniających do smarów, wpisujące się w zasady tzw. zielonej tribologii oraz gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ), mogłoby rozwiązać przynajmniej część problemów środowiskowych¹⁶⁻²¹. Biowęgiel na bazie odpadów roślinnych mógłby stać się substytutem grafitu naturalnego, który od lat jest klasyfikowany przez UE jako strategiczny surowiec krytyczny CRM (*critical raw materials*), obciążony wysokim

ryzykiem wystąpienia problemów z dostępnością²². Ponadto wartością dodaną byłoby ekologiczne zagospodarowanie nadmiaru biomasy, co ma ogromne znaczenie dla środowiska naturalnego.

Wstępnie przeprowadzone badania z wykorzystaniem spektroskopii Ramana i XPS wykazały przeciwzużyciową efektywność biowęgla jako dodatków uszlachetniających do smarów, o powtarzalnych cechach strukturalnych²³. Nie dotyczyły one jednak charakterystyk reologicznych, które są kluczowe dla procesu efektywnego smarowania powierzchni tarcia. Biowęglowy smar plastyczny jest przedmiotem najnowszego zgłoszenia patentowego²⁴.

Celem pracy było pogłębienie wiedzy o charakterystykach użytkowych nowych smarów biowęglowych oraz zbadanie wpływu mikrostruktury i stężenia biowęgla na właściwości reologiczne smaru plastycznego, które decydują o konsystencji smaru i o jego odpowiedzi na działanie sił ścinających, a w konsekwencji o możliwościach aplikacji w konkretnych urządzeniach technicznych.

Część doświadczalna

Materiały

Obiektami badań były dodatki biowęglowe do smarów plastycznych, wytworzone z 2 rodzajów odpadowej biomasy roślinnej, czyli słomy pszenicznej (oznaczony symbolem BS) oraz słomy kukurydzianej (oznaczony symbolem BK).

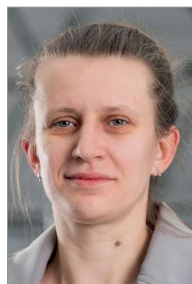
Jako smar bazowy, traktowany jako próbka wyjściowa, stosowano kompozycję olejów parafinowych, zagęszczoną stearynianem litu i uszlachetnioną komercyjnym pakietem dodatków wielofunkcyjnych (disiarcezek molibdenu oraz antyutleniacze fenolowe i aminowe).

Metodyka badań

Proces pirolizy obydwu rodzajów biomasy prowadzono z wykorzystaniem pieca FCF-V12RM z regulatorem PID MRT-4 firmy Czylok, w warunkach 3-stopniowego ogrzewania kaskadowego w atmosferze azotu (5,0 dm³/min) do temperatury końcowej (500±10°C) w ciągu 105 min. Próbkę utrzymywano w temperaturze maksymalnej przez 15 min, a następnie, po wyłączeniu ogrzewania, pozostawiano w piecu do samoistnego wystudzenia do temperatury pokojowej (25±2°C). Otrzymane biowęgle poddawano mechanicznemu rozdrobnieniu za pomocą młynka laboratoryjnego przez 60 s, a następnie przesiewano na sitach



Dr inż. Monika MAKOWSKA (ORCID: 0000-0003-1802-1582) w roku 1990 uzyskała stopień doktora nauk chemicznych na Wydziale Fizyki i Chemii Uniwersytetu Łódzkiego. Obecnie jest starszym specjalistą w Centrum Biogospodarki i Ekoinnowacji Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytutu Technologii Eksploatacji. Specjalność – inżynieria chemiczna i inżynieria mechaniczna.



Dr inż. Monika ŁOŻYŃSKA (ORCID: 0000-0002-3789-7531) w roku 2019 uzyskała stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska na Wydziale Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej. Obecnie jest starszym specjalistą w Centrum Biogospodarki i Ekoinnowacji Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytutu Technologii Eksploatacji. Specjalność – inżynieria chemiczna oraz inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

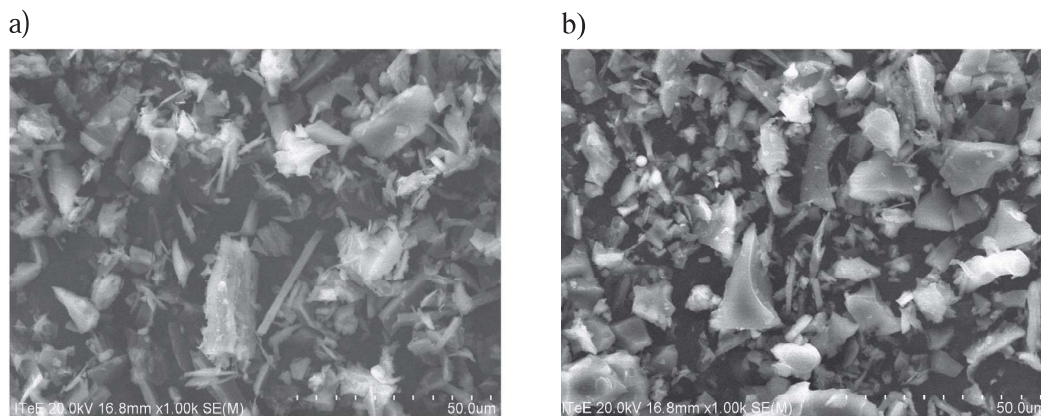


Fig. 1. SEM images (magnification $\times 1000$) of biochars based on: a) wheat straw, b) corn straw

Rys. 1. Zdjęcia SEM (powiększenie $\times 1000$) biowęgla na bazie słomy: a) pszenicznej, b) kukurydzianej

wibracyjnych przez 15 min, separując frakcję o rozmiarach ziaren $< 150 \mu\text{m}$. Poglądowe obrazy otrzymanych proszków biowęglowych uzyskane z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) Hitachi SU-70 (10^{-8} Pa, 15 kV, 30°) przedstawiono na rys. 1.

Przygotowano 6 próbek badawczych poprzez wprowadzenie odpowiednio: 1, 3, 5% mas. dodatku biowęgla, wytworzonego ze słomy pszenicznej i analogicznie ze słomy kukurydzianej, do smaru bazowego. Proszek węglowy był dyspergowany w postaci stałej podczas powolnego mieszania za pomocą homogenizatora planetarnego (15 min). Wszystkie próbki smarów (przed i po dodaniu biowęgla) miały klasę konsystencji NLGI 2, mierzoną z wykorzystaniem penetrometru laserowego.

Izotermi adsorpcji i desorpcji azotu na powierzchni proszków biowęglowych w temp. 77 K rejestrowano za pomocą analizatora Quantachrome AUTOSORB IQ. Każdorazowo przed przeprowadzeniem badania próbkę poddawano odgazowaniu w próżni 10^{-7} bar, w temp. 300°C , przez 12 h. Na podstawie uzyskanych izoterm adsorpcji wielowarstwowej BET (Brunauera, Emmetta i Teller) wyznaczono wartości powierzchni właściwych badanych biowęgla.

Badania równomierności zdyspergowania dodatków biowęglowych w smarze plastycznym przeprowadzono za pomocą tomografu komputerowego Nanotom z lampą typu *nanofocus* 180 kV (zastosowano wiązkę stożkową promieniowania rentgenowskiego). Analizę prowadzono w następujących warunkach: napięcie 60 kV, natężenie 230 mA, czas naświetlania 500 ms, liczba ekspozycji 1440, wielkość woksela 3,25 mm, powiększenie 15,39. Próbkę smaru (smaru

bazowego i smaru zawierającego 3% mas. BK) umieszczano w cylindrycznym pojemniku o średnicy 6 mm i wysokości 150 mm. Rekonstrukcję obiektu oraz przetwarzanie obrazu przeprowadzono za pomocą oprogramowania Datas Reconstruction oraz VGStudio Max.

Test pętli histerezy, polegający na wyznaczeniu naprężenia ścinającego przy stopniowo rosnącej, a następnie malejącej szybkości ścina-

nia, przeprowadzono za pomocą aparatu Anton Paar MCR 101, stosując układ pomiarowy płytka-stożek o średnicy 50 mm, kącie pochylenia stożka 1° i szczelinie $104 \mu\text{m}$, w temp. 20°C , w zakresie szybkości ścinania 0–300 1/s. Pole powierzchni ograniczonej krzywymi, wyznaczone za pomocą oprogramowania komputerowego Rheoplus jest uważane za miarę tiksotropii badanej kompozycji. Ma ona wymiar energii odniesionej do jednostki objętości próbki testowej poddanej ścinaniu (w przybliżeniu jest to iloczyn naprężenia ścinającego i szybkości ścinania). Stąd też przyjmuje się, że jednostką, w której wyraża się pole histerezy jest Pa/s. Wielkość powierzchni pętli histerezy jest wartością umożliwiającą jedynie porównanie właściwości tiksotropowych smarów, ponieważ dla tych samych próbek jest ona zależna od warunków prowadzenia pomiaru. Przeprowadzono także ocenę statystyczną korelacji pomiędzy polem powierzchni pętli histerezy a zawartością biowęgla w smarze plastycznym, z wykorzystaniem współczynnika dopasowania R^2 wyznaczonego w arkuszu kalkulacyjnym Excel.

Wyniki badań i ich omówienie

Izotermi adsorpcji azotu, na podstawie których wyznaczono powierzchnie właściwe biowęgla przedstawiono na rys. 2. Zgodnie z klasyfikacją IUPAC przebieg zarejestrowanych krzywych wskazuje na izotermi typu II, charakterystyczne dla materiałów niskoporowatych lub wręcz nieporowatych. Ich kształt jest wynikiem nieograniczonej adsorpcji mono- i wielowarstwowej do wysokiej wartości ilorazu ciśnień p/p_0 . Na podstawie uzyskanych izoterm adsorpcji wielowarstwowej BET wyznaczono wartości powierzchni właściwych



Mgr inż. Rafał KOZDRACH (ORCID: 0000-0001-7308-5496) w roku 2003 ukończył studia magisterskie na Wydziale Materiałoznawstwa i Technologii Obuwia Politechniki Radomskiej (obecnie Uniwersytet Radomski). Obecnie jest specjalistą w Centrum Biogospodarki i Ekoinnowacji Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytutu Technologii Eksploatacji. Specjalność – inżynieria chemiczna i inżynieria mechaniczna.



Mgr inż. Paweł RADULSKI (ORCID: 0009-0006-1803-8770) w roku 2020 ukończył studia magisterskie na Wydziale Nauk o Żywności i Biotechnologii Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie. Obecnie jest młodszym specjalistą w Centrum Biogospodarki i Ekoinnowacji Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytutu Technologii Eksploatacji. Specjalność – inżynieria chemiczna i inżynieria mechaniczna.

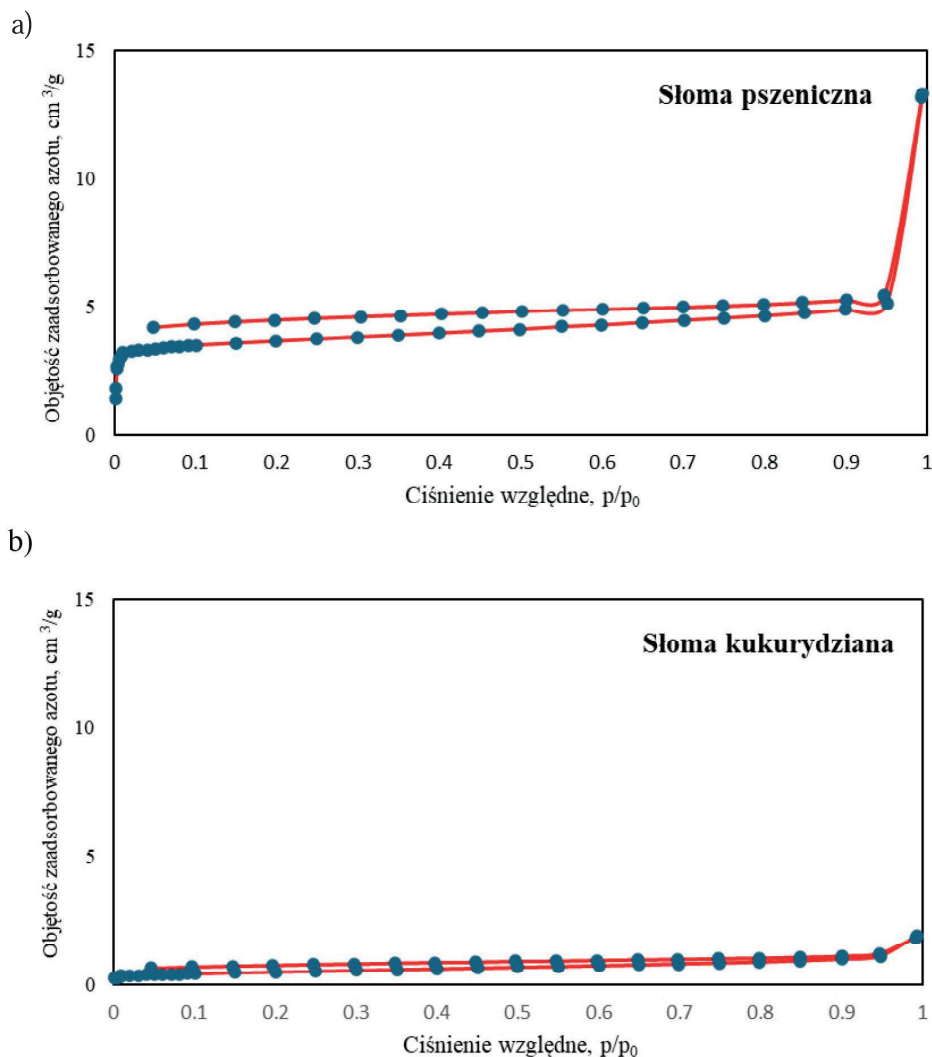


Fig. 2. Nitrogen adsorption isotherms on biochar based on: a) wheat straw, b) corn straw

Rys. 2. Izotermy adsorpcji azotu na biowęglu otrzymanym ze słomy: a) pszenicznej, b) kukurydzianej

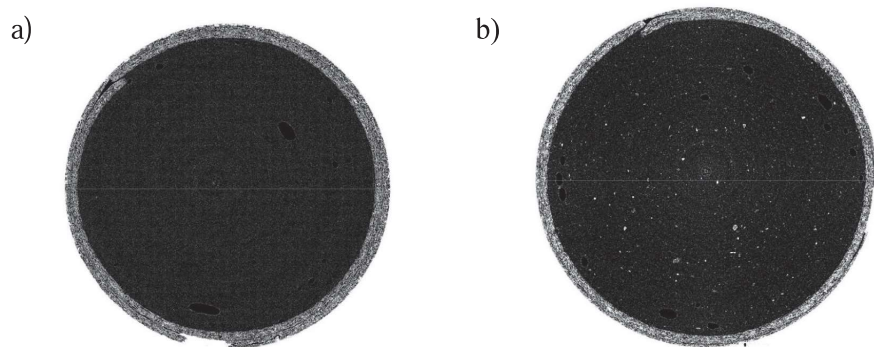


Fig. 3. CT images of the greases: a) without biochar, b) with 3% by mass of BS additive

Rys. 3. Obrazy TK smaru: a) bez dodatku biowęgla, b) z 3% mas. dodatku BS

badanych biowęgla (S_{BET}): dla BK wynosiła ona 18,3 m²/g, a dla BS 181,8 m²/g.

W badaniach wykorzystywano dwa rodzaje proszków biowęglowych: jeden o bardzo małym rozwinięciu powierzchni, uzyskany ze słomy kukurydzianej, oraz drugi ze słomy pszenicznej o 10-krotnie większej powierzchni właściwej. Zastosowanie otrzymanych materiałów jako dodatków do smarów plastycznych pozwoliło na ocenę wpływu rozwinięcia powierzchni na właściwości reologiczne kompozycji.

Wytworzone dodatki biowęglowe wprowadzono do matrycy bazowego smaru plastycznego i poddano homogenizacji mechanicznej. Efektywność zdyspergowania dodatków w smarze bazowym oceniano na podstawie obrazów zarejestrowanych z wykorzystaniem tomografii komputerowej (TK). Na rys. 3 zestawiono obraz bazowego smaru plastycznego (rys. 3a) oraz przykładowy obraz TK smaru z dodatkiem 3% mas. biowęgla ze słomy kukurydzianej (rys. 3b).

Dodatki biowęglowe charakteryzowały się większą gęstością niż matryca smaru plastycznego, co obserwowano na zarejestrowanych obrazach jako jasne punkty. Występujące nieliczne czarne obszary stanowiły przestrzeń powietrzną, powstałą podczas umieszczania badanej próbki w naczyniu pomiarowym. Analiza obrazów wskazuje na równomierne zdyspergowanie dodatku biowęglowego w matrycy smaru plastycznego, co potwierdza, że zastosowana metoda wprowadzania dodatku do smaru pozwala na skuteczne rozprowadzenie w całej objętości smaru. W związku z tym właściwości reologiczne kompozycji smarów biowęglowych zależą wyłącznie od zawartości biowęgla w próbce oraz od rozwinięcia jego powierzchni.

Krzywe płynięcia (czyli zależności naprężenia ścinającego od szybkości



Mgr inż. Tomasz HODNICZEK w roku 2012 ukończył studia na Wydziale Mechniczno-Technologicznym Politechniki Śląskiej. Obecnie jest menedżerem produktu w Fuchs Oil Corp. (PL). Specjalność – smary plastyczne i specjalne środki smarowe.



Mgr inż. Filip MUSIOŁ w roku 2012 ukończył studia na Wydziale Chemicznym Politechniki Śląskiej. Obecnie jest starszym specjalistą ds. badań i rozwoju w Fuchs Oil Corp. (PL). Specjalność – smary plastyczne i specjalne środki smarowe.

ścínania) zarejestrowane dla smaru wyjściowego i smarów biowęglowych w warunkach wzrastającej i malejącej szybkości ścínania przedstawiono na rys. 4–7.

Przebieg wszystkich krzywych płynięcia wskazuje, że badane smary wykazywały cechy cieczy nienewtonowskiej, a pomiary naprężenia ścínającego przy wzrastającej i malejącej szybkości ścínania pozwoliły na zarejestrowanie pętli histerez, które były miarą efektu rozrzedzenia próbki, czyli tiksotropii. Występowanie efektu tiksotropowego było związane z czasowym zniszczeniem struktur przestrzennych występujących w kompozycji smarowej. W tabeli przedstawiono wartości pól powierzchni histerezy pomiędzy krzywymi płynięcia badanych smarów plastycznych a zawartością dodatków biowęglowych. Podano średnie wyniki z 3 pomiarów wraz z wartościami odchylenia standardowego od wartości oczekiwanej, określonej za pomocą średniej arytmetycznej. Obydwie badane próbki zawierały taką samą bazę olejową oraz zagęszczacz i pakiet komercyjnych dodatków, różniły się jedynie rodzajem dodatku biowęglowego, o odmiennej wartości S_{BET} . Rozwinięcie powierzchni biowęglu ze słomy pszenicznej było 10-krotnie większe niż biowęglu ze słomy kukurydzianej.

Po przeanalizowaniu uzyskanych wyników stwierdzono większą wartość pola histerezy pomiędzy krzywymi płynięcia dla smarów zawierających dodatek BS o większym rozwinięciu powierzchni właściwej niż smarów z dodatkiem BK, dla wszystkich zawartości biowęglu w smarze. Największa różnica występowała w przypadku próbek zawierających 5% mas. dodatku. Dla smaru zawierającego dodatek BK był to ok. 27-proc. wzrost pola histerezy

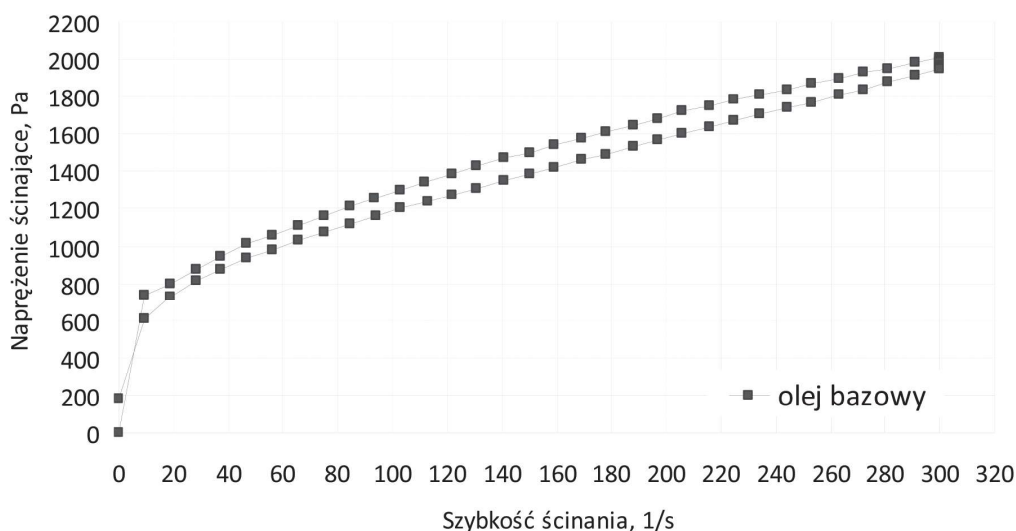


Fig. 4. Hysteresis loop recorded during testing of a grease without biochar addition

Rys. 4. Pętla histerezy zarejestrowana podczas badania smaru bez dodatku biowęglu

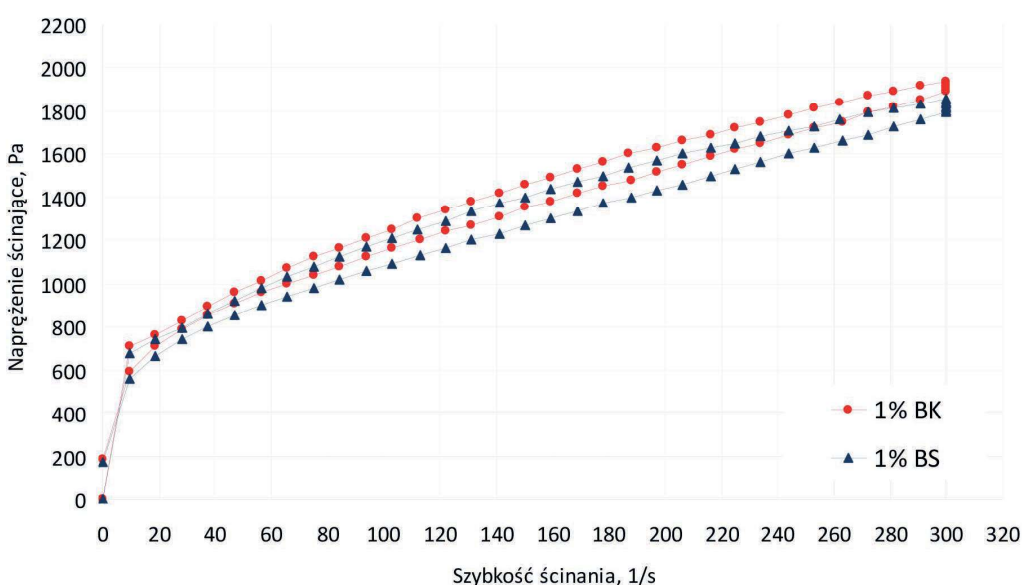


Fig. 5. Hysteresis loops recorded during testing of greases containing 1% by mass of the additive (● – BK, ▲ – BS)

Rys. 5. Pętle histerezy zarejestrowane podczas badania smarów zawierających 1% mas. dodatku (● – BK, ▲ – BS)

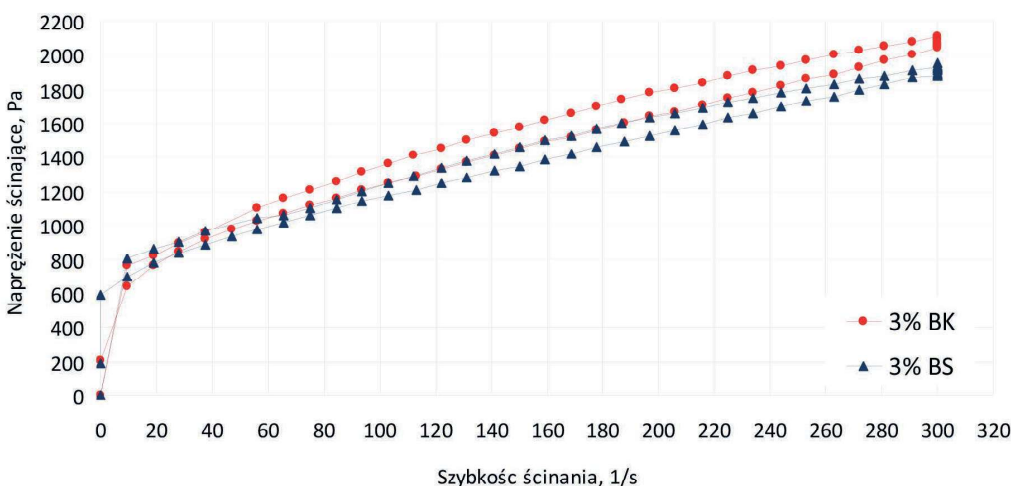


Fig. 6. Hysteresis loops recorded during testing of greases containing 3% by mass of the additive (● – BK, ▲ – BS)

Rys. 6. Pętle histerezy zarejestrowane podczas badania smarów zawierających 3% mas. dodatku (● – BK, ▲ – BS)

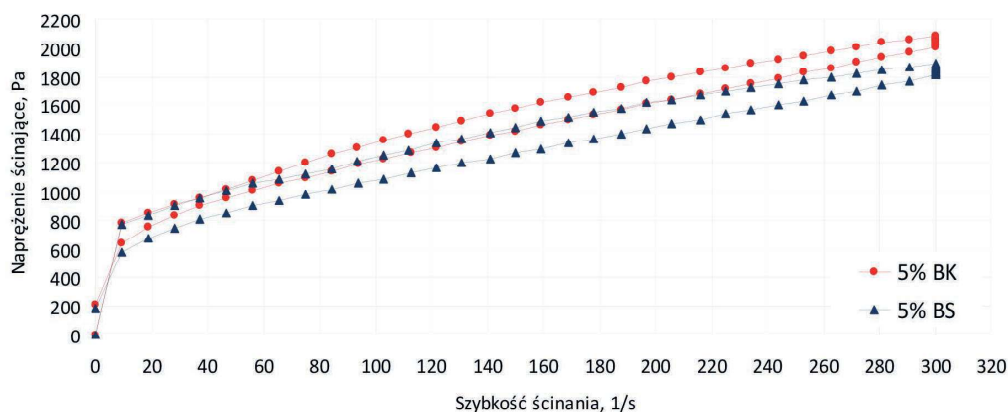


Fig. 7. Hysteresis loops recorded during testing of greases containing 5% by mass of the additive (● – BK, ▲ – BS)

Rys. 7. Pętle histerezy zarejestrowane podczas badania smarów zawierających 5% mas. dodatku (● – BK, ▲ – BS)

Table. Hysteresis loop areas between the flow curves of the tested biochar greases

Tabela. Pole powierzchni histerezy pomiędzy krzywymi płynięcia badanych smarów biowęglowych

Zawartość biowęgla w smarze, % mas.	Pole powierzchni histerezy	
	dodatek BS	dodatek BK
0	27948,59±707,68	27948,59±707,68
1	31199,44±536,58	25301,75±245,12
3	33984,30±956,36	27977,49±552,85
5	46477,97±778,46	35529,76±218,20

w porównaniu ze smarem bazowym, natomiast dla dodatku BS ok. 66-proc. wzrost. Uzyskane wyniki wskazują, że biowęgiel o mniejszym rozwinięciu powierzchni właściwej w mniejszym stopniu wpływał na zmianę właściwości reologicznych. Oznacza to, że z punktu widzenia właściwości użytkowych finalnego produktu korzystniejsza jest aplikacja dodatku biowęglowego na bazie słomy kukurydzianej, ponieważ w zakresie stężeń 1–5% mas. nie wpływa on znacząco na rozrzedzenie smaru pod wpływem sił ścinających. Znajduje to także potwierdzenie w korzystniejszych charakterystykach przeciwzatarciowych smaru zawierającego biowęgiel BK, zarejestrowanych podczas realizacji projektu FENG przez autorów tego artykułu. Przykładowo obciążenie zespawania (P_z) smaru z biowęglem BK wynosi 4905 N, z BS 3090 N, a obciążenie zacierające (P) wynosi: 1467 N (dla BK) i 1400 N (dla BS).

Podsumowanie

Przeprowadzone prace eksperymentalne pozwoliły na rozszerzenie wiedzy dotyczącej właściwości eksploatacyjnych nowej grupy smarów plastycznych, czyli takich, w których zastosowano dodatki biowęglowe jako substytut standardowego grafitu. Uzyskane wyniki wskazują, że materiały biowęglowe o mniejszym rozwinięciu powierzchni nie wpływają istotnie na zmianę właściwości tiksotropowych smarów plastycznych. Stwierdzono także, że przy takich samych stężeniach dodatku w smarze obserwuje się dla smarów zawierających dodatek biowęgla ze słomy pszenicznej wyższe wartości pola histerezy niż dla smarów z dodatkiem słomy kukurydzianej. Wnioski te

wymagają dalszych prac pozwalających na szczegółową ocenę zaobserwowanych prawidłowości dla większej populacji próbek biowęglowych, różniących się rozwinięciem powierzchni właściwej, co pozwoli na wyjaśnienie mechanizmu obserwowanych zjawisk. Niemniej zaprezentowane wyniki prac wskazują na możliwość wykorzystania biowęgla wytworzonych z odpadów kukurydzianych jako dodatków funkcjonalnych do smarów pla-

stycznych, które nie wpłyną znacząco na rozrzedzenie smaru pod wpływem sił ścinających.

Praca powstała w ramach projektu badawczego. Projekt „Wykorzystanie karbonizatu z odpadowej biomasy lignocelulozowej, jako substytutu surowców nieodnawialnych, do wytwarzania innowacyjnych smarów biowęglowych” jest realizowany w ramach działania Proof of Concept Fundacji na rzecz Nauki Polskiej współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków 2. Priorytetu Programu Fundusze Europejskie dla Nowoczesnej Gospodarki 2021–2027 (FENG).

Otrzymano: 25-08-2025

Zrecenzowano: 08-09-2025

Zaakceptowano: 12-09-2025

Opublikowano: 20-09-2025

LITERATURA

- [1] K. Holmberg, A. Erdemir, *Friction* 2017, **5**, nr 3, 263.
- [2] N. Kumar, V. Saini, J. Bijwe, *Tribol. Lett.* 2020, **68**, 124.
- [3] A. Mura, F. Cura, F. Adamo, *Tribol. Int.* 2018, **117**, 162.
- [4] E. Larsson, R. Westbroek, J. Leckner, S. Jacobson, A.K. Rudolph, *Wear* 2021, **486–487**, 204107.
- [5] N. Nyholm, N. Espallargas, *Carbon* 2023, **201**, 1200.
- [6] Z. Li, Q. He, S. Du, Y. Zhang, *Lubr. Sci.* 2020, **32**, 333.
- [7] R. Arvidsson, M. Boholm, M. Johansson, M.L. Montoya, *Nanoethics* 2018, **12**, 199.
- [8] O. Cebadero-Domínguez, B. Ferrández-Gómez, S. Sánchez-Ballester, J. Moreno, A. Jos, A.M. Camaño, *Toxicol. Rep.* 2022, **9**, 1130.
- [9] P. Nagarem, H. Kudalb, *Procedia Manuf.* 2018, **20**, 487.
- [10] J. Molenda, Z. Pawelec, *Przem. Chem.* 2021, **100**, nr 4, 350.
- [11] J. Molenda, Z. Pawelec, E. Pawelec, B. Kaźmierczak, *Tribologia* 2020, **2**, 47.
- [12] X. Fan, Y. Xia, L. Wang, W. Li, *Tribol. Lett.* 2014, **55**, 455.
- [13] S.K. Tiwari, M. Bystrzejewski, A. Adhikari, A. Huczko, N. Wang, *Prog. Energy Combust. Sci.* 2022, **92**, 94.
- [14] L. Singh, V.Ch. Kalra (eds.), *Waste biomass management – A holistic approach*, Springer, 2017, 392.
- [15] <https://biochar-international.org/>, dostęp 18 sierpnia 2025 r.
- [16] Y. Zhou, S. Qin, S. Verma, T. Sar, S. Sarsaiya, B. Ravindran, T. Liu, R. Sindhu, A.K. Patel, P. Binod, S. Varjani, R.R. Singhania, Z. Zhang, M.K. Awasthi, *Bioresour. Technol.* 2021, **337**, 125451.
- [17] M. Nosonovsky, B. Bhushan (eds.), *Green tribology. Biomimetics, energy conservation and sustainability*, Springer, 2012, 630.
- [18] F.R. Oliveira, A.K. Patel, D.P. Jaisi, S. Adhikari, H. Lu, S.K. Khanal, *Bioresour. Technol.* 2017, **246**, 110.
- [19] P. González-García, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, **82**, 1393.
- [20] Y. Zhang, Z. Ding, M. S. Hossain, R. Maurya, Y. Yang, V. Singh, D. Kumar, E.S. Salama, X. Sun, R. Sindhu, P. Binod, Z. Zhang, M.K. Awasthi, *Bioresour. Technol.* 2023, **367**, 128281.
- [21] M.A. Yahya, Z. Al-Qodah, C.W.Z. Ngah, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015, **46**, 218.
- [22] Critical Raw Materials: ensuring secure and sustainable supply chains for EU's green and digital future, European Commission, 16 marca 2023 r.