

**Czasopismo Naukowo-Techniczne
Wydziału Inżynierii Mechanicznej UTP w Bydgoszczy**

Scientific-Technical Journal of
Mechanical Engineering Faculty of UT&LS Bydgoszcz



POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ

DEVELOPMENTS
IN MECHANICAL
ENGINEERING

4(2)
2014

Wydawnictwa Uczelniane
Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
w Bydgoszczy



ZESPÓŁ REDAKCYJNY
EDITORIAL BOARD

Przewodniczący (redaktor naczelny) – Editor-in-chief – Stanisław MROZIŃSKI

Redaktorzy Działowi – Branch editors:

<i>Eksploatacja Maszyn</i> <i>Machine Operating and Maintenance</i>	Bogdan LANDOWSKI
<i>Inżynieria Biomedyczna</i> <i>Biomedical Engineering</i>	Adam MAZURKIEWICZ
<i>Inżynieria Produkcji</i> <i>Production Engineering</i>	Marek SZCZUTKOWSKI
<i>Mechanika i Konstrukcja Maszyn</i> <i>Mechanics and Machinery Design</i>	Janusz ZACHWIEJA
<i>Technika Rolnicza i Leśna</i> <i>Agriculture and Woodland Engineering</i>	Marcin ZASTEMPOWSKI
<i>Transport – Transport</i>	Marcin ŁUKASIEWICZ
Sekretarz Zespołu – Executive secretary	Sylwester WAWRZYNIAK

MIĘDZYNARODOWA RADA PROGRAMOWA
INTERNATIONAL PROGRAMME COMMITTEE

Bogdan ŻÓŁTOWSKI – **przewodniczący – chairman** (PL – UTP)

Maria ČZARNOGURSKÁ (SK)	Edmund DULCET (PL – UTP)
Jurek DUSZCZYK (NL)	Friedrich FRANEK (A)
Andrzej GOŁĄBCZAK (PL – PŁ)	Henryk HOLKA (PL – UTP)
Lidia ILIEVA-MITUTSOVA (BG)	Marian JANCZAREK (PL – PL)
Tomasz KICZKOWIAK (PL – PKo.)	Tomasz LIPIŃSKI (PL – UWM)
Ivan OBORSKI (Uk)	Dariusz OZIMINA (PL – PŚw.)
Manfred PAHL (D)	Kazimierz PESZYŃSKI (PL – UTP)
Jindřich PETRUŠKA (CZ)	Raj B.K.N. RAO (GB)
Yurij SHALAPKO (Uk)	Vasily S. SHEVCHENKO (BL)
Marian SZCZEREK (PL – ITE PIB)	Zdeněk TRÁVNÍČEK (CZ)

Opracowanie redakcyjne i techniczne – mgr Michał Górecki, mgr inż. Tomasz Szałajda

Projekt okładki – mgr inż. Daniel Morzyński

© Copyright

Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
Bydgoszcz 2014

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych, kopiujących, nagrywających i innych bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich.

ISSN 2300-3383

Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
Redaktor Naczelny: prof. dr hab. inż. Józef Flizikowski
ul. ks. A. Kordeckiego 20, 85-225 Bydgoszcz, tel. 52 3749482, 52 3749426
e-mail: wydawucz@utp.edu.pl <http://www.wu.utp.edu.pl>
Wyd. I. Nakład 80 egz. Ark. aut. 3,2. Ark. druk. 4.
Zakład Małej Poligrafii UTP Bydgoszcz, ul. ks. A. Kordeckiego 20

SPIS TREŚCI

CONTENTS

Krzysztof Lewandowski, Kazimierz Piszczek, Marcin Kaczmarek Reologiczne własności kompozytów polimerowo-drzewnych..... 5 Rheological properties of wood polymer composites	5
Łukasz Pejkowski, Dariusz Skibicki Kryterium zmęczenia dla złożonych obciążeń sinusoidalnych z przesunięciem fazowym..... 13 Fatigue criterion for out-of-phase loads	13
Roksana Rama Rozwiązania konstrukcyjne i koncepcja badań aplikatorów w maszynach zbierających zielonki..... 23 Construction and concept solutions research applicators in harvesting machines of silage	23
Radosław Skocki, Stanisław Mroziński Badanie wpływu temperatur podwyższonych na właściwości cykliczne stali P91 33 The influence of elevated temperatures on the cyclic properties of P91 steel	33
Tomasz Tomaszewski, Janusz Sempruch Wykorzystanie minipróbek do wyznaczania trwałości i wytrzymałości zmęczeniowej materiałów konstrukcyjnych 45 Use of mini specimens for determining the fatigue strength and fatigue life of structural materials	45
Mateusz Wirwicki, Tomasz Topoliński Ocena trwałości i wytrzymałości połączenia zęb – dwutlenek cyrkonu 55 Evaluation of durability and strength glued connection tooth – zirconium dioxide	55
Lista recenzentów prac opublikowanych w numerach 3(2) 2014 oraz 4(2) 2014 65 Reviewers list publication published in issues 3(2) 2014 and 4(2) 2014	65

Krzysztof LEWANDOWSKI, Kazimierz PISZCZEK, Marcin KACZMAREK

REOLOGICZNE WŁASNOŚCI KOMPOZYTÓW POLIMEROWO-DRZEWNYCH

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań reologicznych kompozytów polipropylenu (PP) z mączką drzewną (WF) o określonej wielkości cząstek. Udział WF w kompozycie wynosił 10%, 30%, 50%. Dla otrzymanych kompozytów wyznaczono krzywe lepkości skorygowanej, krzywe płynięcia oraz wyznaczono wykładniki płynięcia. Dokonano oceny wpływu stężenia oraz wielkości cząstek napelnacza drzewnego na lepkość oraz własności pseudoplastyczne kompozytów polimerowo-drzewnych.

Słowa kluczowe: WPC, reologia, kompozyty polimerowo-drzewne

1. WSTĘP

1.1. Kompozyty polimerowo drzewne (WPC)

Poszukiwania nowych materiałów o szczególnych właściwościach, jakich nie uzyskują tradycyjne materiały konstrukcyjne, przyczyniły się do dużego zainteresowania materiałami kompozytowymi [3]. Kompozyt definiuje się jako tworzywo złożone z co najmniej dwóch składników (osnowy i wzmocnienia) tak dobranych, aby każdy, zachowując swoje właściwości, nadawał kompozytowi jako całości właściwości lepsze i/lub nowe (dodatkowe) [13].

Powyższa definicja ujmuje główny cel tworzenia nowych kompozytów; określa możliwość projektowania i wpływania na właściwości ostatecznego produktu, które zdeterminowane są przez rodzaj i zawartość poszczególnych składników kompozytu [3, 12]. Wytwarzanie kompozytów zalicza się do fizycznej modyfikacji polimerów, pozwalającej na poprawę właściwości mechanicznych, przetwórczych, odporności cieplnej lub chemicznej z jednoczesnym obniżeniem ceny [12]. Jedną z metod modyfikacji tworzyw termoplastycznych jest użycie jako napelnacza drewna. Otrzymane kompozyty polimerowo-drzewne, w literaturze światowej nazywane są WPC (*wood-polymer composites*), jak wynika to z definicji kompozytu, mają cechy powodujące ich przewagę nad drewnem i tworzywem termoplastycznym. Zalety drewna to mała gęstość, niskie własno-

dr hab. Kazimierz PISZCZEK prof. nadzw. UTP, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy,
Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, ul. Seminaryjna 3, 85-326 Bydgoszcz,
e-mail: Kazimierz.Piszczek@utp.edu.pl

mgr inż. Krzysztof LEWANDOWSKI, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział
Technologii i Inżynierii Chemicznej, ul. Seminaryjna 3, 85-326 Bydgoszcz,
e-mail: krzysztof.lewandowski@utp.edu.pl

inż. Marcin KACZMAREK, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

ści cierne, relatywnie niski koszt oraz zdolność do biodegradacji, zaś jego wady kompensowane są przez osnowę polimerową. Wytwory z WPC można stosować jako zamiennik drewna w warunkach, gdy wyrób narażony jest na częsty lub stały kontakt z wodą np. pomosty, tarasy, baseny, ławki, a także w budownictwie, przemyśle motoryzacyjnym, architekturze ogrodowej [10, 15].

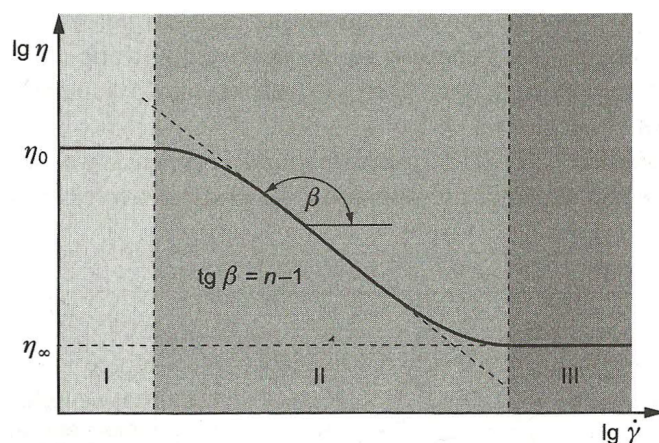
Połączenie naturalnego biodegradowalnego drewna z tworzywem polimerowym sprawia, że WPC uważane są za produkty ekologiczne, a aspekt ten tym bardziej jest wyraźny, gdy oba surowce pochodzą z recyklingu. Dodatkową zaletą kompozytów jest możliwość ich wielokrotnego przetwarzania [1, 4, 10].

Wprowadzając do osnowy polimerowej bardzo duże ilości napelnacza (nawet 70% wag.), można spodziewać się zdecydowanej zmiany własności przetwórczych nowego materiału. Poznanie charakterystyki reologicznej (zdolności do płynięcia w stanie uplastycznionym), jest czynnikiem determinującym wdrożenie do produkcji przemysłowej określonego tworzywa polimerowego, daje dodatkowo możliwość późniejszej kontroli procesu przetwórstwa oraz znacząco ułatwia proces projektowania i wykonywania narzędzi przetwórczych [2, 5].

1.2. Reologia tworzyw polimerowych

Oznaczanie własności przetwórczych w głównej mierze polega na wyznaczeniu lepkości, czyli oporów stawianych przez uplastycznione tworzywa podczas płynięcia.

Tworzywa polimerowe w stanie uplastycznionym wykazują cechy płynów nienewtonowskich rozrzedzanych ścinaniem, co oznacza, że lepkość polimerów zależy od szybkości ścinania i maleje wraz z jej wzrostem (rys. 1).



Rys. 1. Charakterystyczna krzywa lepkości polimerów, I – pierwszy zakres newtonowski płynięcia, II – zakres nienewtonowskiego płynięcia, III – drugi zakres newtonowskiego płynięcia, n – wykładnik (płynięcia) prawa potęgowego, η_0 – lepkość zerowa, η_∞ – lepkość dla szybkości ścinania dążącej do nieskończoności [14]

Fig. 1. Viscosity curve of polymers; I – first range of Newtonian flow, II – range of non-Newtonian flow, III – second range of Newtonian flow, η_0 – zero shear viscosity, n – power law index, η_∞ – viscosity at infinite shear rate [14]

Do wyznaczania własności reologicznych powszechnie stosuje się reometrię kapilarną. Pomiar przy ich użyciu polega na przetłoczeniu tworzywa przez kapilarę o określonym promieniu R_k i długości L_k przy określonym objętościowym natężeniu przepływu Q oraz pomiarze spadku ciśnienia Δp wywołanym tarciem wewnętrznym materiału, na długości kapilary pomiarowej.

Lepkość skorygowana (η_w) stopionego polimeru w warunkach pomiaru wyznacza się z zależności:

$$\eta_w = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_w} \quad (1)$$

gdzie naprężenie styczne (τ_w) na ścianie kapilary definiowane jest jako:

$$\tau_w = \frac{\Delta p}{2L_k} R_k \quad (2)$$

zaś skorygowana szybkość ($\dot{\gamma}_w$) ścinania opisana jest wzorem:

$$\dot{\gamma}_w = \dot{\gamma}_a \left(\frac{3n+1}{4n} \right) \quad (3)$$

gdzie nieskorygowana szybkość ścinania ($\dot{\gamma}_a$) określona jest zależnością:

$$\dot{\gamma}_a = \frac{4Q}{\pi R_k^3} \quad (4)$$

Wykładnik płynięcia n z równania 3 wyznacza się z prawa potęgowego Ostwalda:

$$\tau_w = k \dot{\gamma}^n \quad (5)$$

które po przekształceniu można przedstawić jako funkcję:

$$\log(\tau_w) = f(\log(\dot{\gamma}_a)) \quad (6)$$

W przypadku kompozytów WPC i nienapełnionej osnowy polimerowej, w badanym zakresie szybkości ścinania powinna być prostą a n jest wówczas współczynnikiem kierunkowym tej prostej.

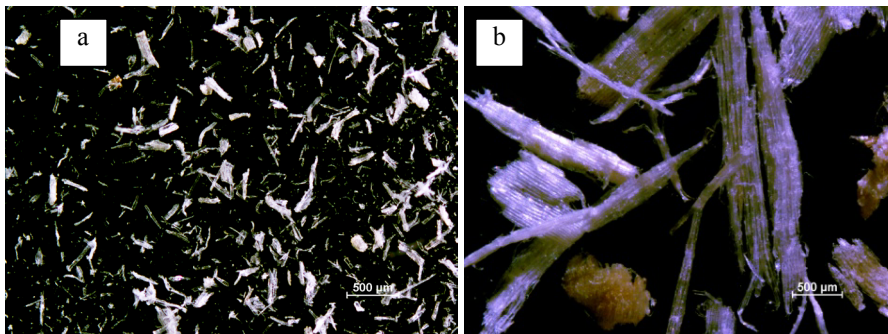
Dokonując pomiarów Δp przy kilku różnych wartościach Q (zależnych od szybkości przesuwu tłoka), można wyznaczyć krzywą lepkości $\eta = f(\dot{\gamma})$.

Obliczenie rzeczywistej wartości lepkości tworzyw polimerowych wymaga dodatkowych poprawek uwzględniających odstępstwa od warunków modelowych. Metody ich określenia i wpływ na wyznaczane wartości opisano w pracach [6-9].

2. METODYKA BADAŃ

Jako osnowę kompozytów wykorzystano polipropylen (PP) Moplen HP 400R produkcji Basell Orlen o gęstości $d = 0,9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ i masowym wskaźniku szybkości płynięcia (MFR) ($190^\circ\text{C}/2,16 \text{ kg}$) = $25 \text{ g}\cdot 10 \text{ min}^{-1}$. Napelnicz stanowiły frakcje sitowe (cząstki wielkości 0,08-0,1 mm i 0,4-0,8 mm) wydzielone z mączki drzewnej (WF) produkcji J. Rettenmaier & Söhne GmbH + Co. KG (rys. 2).

Tworzywo polimerowe uplastyczniano w komorze gniotownika (ZAMAK Mercator) w temperaturze 190°C przez 5 min przy prędkości obrotowej głównego rotora 30 min^{-1} , następnie dodawano mączkę drzewną w ilości 10%, 30% lub 50% łącznej masy otrzymywanego kompozytu i mieszano przez kolejne 3 min. Otrzymany jednorodny kompozyt studzono, a następnie rozdrabniano za pomocą młynka laboratoryjnego z frezem ślimakowym. Przemiały o zróżnicowanym składzie poddano analizie reologicznej za pomocą reometru kapilarnego Dynisco LCR 7001. Temperatura pomiaru wynosiła 190°C . Zastosowano dysze o średnicy kanału $D = 2 \text{ mm}$ i długości $L = 80 \text{ mm}$. Wyznaczono ciśnienie uplastycznionej kompozycji polimerowej przed wejściem do dyszy pomiarowej przy określonym objętościowym natężeniu przepływu z zakresu odpowiadającemu od 15 s^{-1} do 912 s^{-1} nieskorygowanej szybkości ścinania. Na tej podstawie, dla badanych układów, za pomocą procedury opisanej wzorami (1)-(6) wyznaczono krzywe lepkości oraz wykładniki płynięcia n .



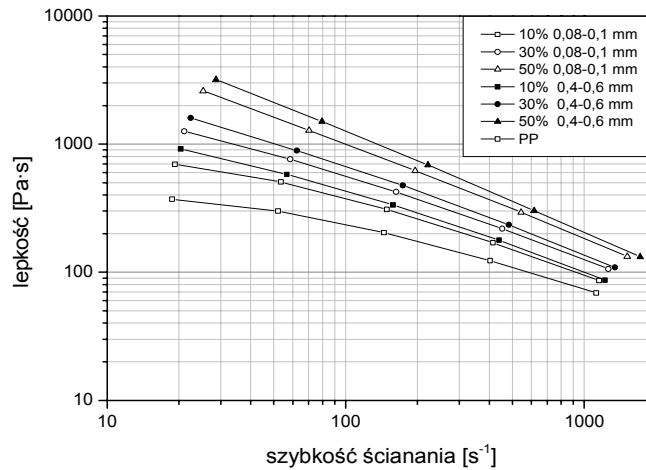
Rys. 2. Obrazy mączki drzewnej: a – frakcja 0,08-0,1 mm, b – frakcja 0,4-0,6 mm

Fig. 2. Images of wood flour : a – fraction 0,08-0,1 mm, b – fraction 0,4-0,6 mm

3. OMÓWIENIE WYNIKÓW

Na rysunku 3 przedstawiono krzywe lepkości skorygowanej wyznaczone dla WPC z różnym udziałem mączki drzewnej. Wraz ze zwiększeniem udziału napelnicza obserwuje się nawet 9-krotny wzrost wartości lepkości uplastycznionego kompozytu (przy wartości 30 s^{-1}) w stosunku do polipropylenu. Przy większych wartościach skorygowanej szybkości ścinania (1000 s^{-1}) wyznaczona lepkość materiału, zawierającego 50% mączki drzewnej, jest tylko 2,5-krotnie wyższa od tworzywa polimerowego stanowiącego osnowę badanych materiałów.

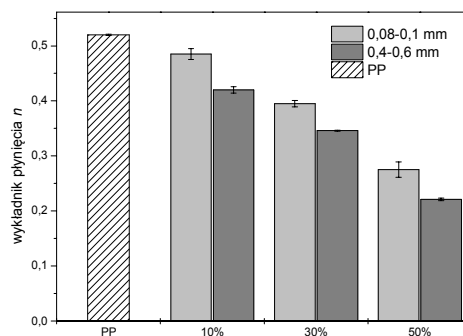
Zaobserwowano niższą wartość lepkości kompozytów zawierających mniejszą frakcję mączki drzewnej. Różnica ta jest najbardziej znacząca dla kompozytów z największym analizowanym udziałem mączki drzewnej i wynosi 30% w niskich wartościach szybkości ścinania. Ulega ona zmniejszeniu do ok. 12% wraz ze wzrostem wartości szybkości ścinania do 1000 s^{-1} .



Rys. 3. Krzywe lepkości PP i kompozytów PP z różnym udziałem mączki drzewnej z podziałem na frakcje

Fig. 3. Viscosity curve of PP and PP composites with different content and particle size of wood flour

Analizę przebiegu krzywych lepkości uzupełniono o wyznaczenie wykładnika płynięcia n , który odzwierciedla pseudoplastyczne własności badanego tworzywa polimerowego. Wyznaczone średnie wartości n wraz z odchyleniem standardowym z pięciu prób dla analizowanych kompozytów z uwzględnieniem osnowy PP przedstawiono na rysunku 4.

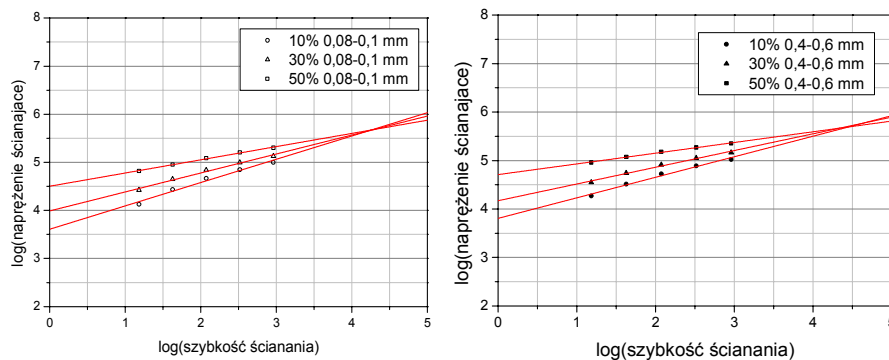


Rys. 4. Zestawienie wartości wykładnika płynięcia PP i kompozytów PP z różnym udziałem mączki drzewnej z podziałem na frakcje

Fig. 4. The value of power law index for PP and PP composites with different content and particle size of wood flour

Zaobserwowano wyraźne zmniejszenie się wartości n wraz ze wzrostem udziału mączki drzewnej w kompozycie oraz ze zwiększeniem się wielkości cząstek napelnacza w kompozycie zawierającym tę samą ilość WF. Oznacza to, że zgodnie z prawem potęgowym Ostwalda (równanie 5) zwiększenie się szybkości przepływu będzie w mniejszym stopniu wpływało na wzrost wartości naprężenia stycznego, w związku z tym obserwować można większy wpływ szybkości ścinania na rozrzedzanie kompozytów o większym udziale mączki drzewnej. W takim przypadku przy wzroście szybkości ścinania różnica lepkości kompozytów o różnej zawartości WF zmniejsza się, a w określonych warunkach przepływu powinna osiągnąć tę samą wartość.

Zestawiając krzywe płynięcia (rys. 5), określone jako proste zgodnie z zależnością 3, a następnie ekstrapolując je do wyższych wartości szybkości ścinania zaobserwować można, że w określonych warunkach przepływu proste przecinają się w niewielkim zakresie naprężenia ścinającego i szybkości ścinania. Po odczytaniu wartości oszacować można warunki, w których wzrost stężenia mączki drzewnej w rozpatrywanym zakresie jej udziału nie będzie wpływał na zmianę własności przetwórczych WPC.



Rys. 5. Zależność wartości logarytmu z naprężenia ścinającego od wartości logarytmu z szybkości ścinania wyznaczone dla kompozytów PP z różnym udziałem mączki drzewnej; frakcja mączki drzewnej 0,08-0,1 mm po lewej, frakcja mączki drzewnej 0,4-0,6 mm po prawej

Fig. 5. Logarithm of the shear stress versus logarithm of the shear rate for PP composites with different content and particle size of wood flour (on the left – 0,08-0,1 mm, on the right 0,4-0,6 mm)

W przypadku kompozytu zawierającego większe cząstki napelnacza krzywe płynięcia przecinają się w zakresie 516400 (± 38200) Pa dla 30800 (± 2800) s⁻¹, odpowiednio dla drugiego badanego napelnacza 466200 (± 13800) Pa dla 17900 (± 1300) s⁻¹. Punkt taki można interpretować jako warunki krytyczne, w których przepływ tworzywa kompozytowego wpływa na całkowitą orientację cząstek napelnacza wewnątrz kanału pomiarowego, zaś przy ścianie kapilary następuje tylko ruch poszczególnych lamelarnych warstw tworzywa.

Należy dodać, iż są to dane szacunkowe i dokładne ich określenie wymaga przeprowadzenia dalszych badań celem poznania natury przepływu WPC w stanie uplastycznionym przy tak wysokich wartościach szybkości ścinania. Ze względu na duże wymiary cząstek niemożliwe jest poszerzenie zakresu pomiarowego poprzez zastosowanie dyszy pomiarowej o mniejszej średnicy, możliwość taką powinno dać natomiast zastosowanie urządzeń pomiarowych o specjalnej konstrukcji np. przedstawionych w publikacji [11].

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania potwierdzają słuszność stosowania podstawowych praw opisujących przepływ tworzyw polimerowych w stanie uplastycznionym do analizy kompozytów polimerowo-drzewnych. Zaobserwowano wyraźny wpływ wzrostu stężenia mączki drzewnej na zwiększenie się wartości lepkości kompozytów oraz zmniejszenie się wartości wykładnika płynięcia, co jest jednoznaczne ze zmniejszeniem się różnicy w omawianych własnościach przetwórczych wraz ze wzrostem szybkości ścinania. Na podstawie badań możliwe jest oszacowanie punktu krytycznego, w którym przy określonej szybkości ścinania nie powinno już obserwować się wyraźnej różnicy w lepkości badanych WPC.

LITERATURA

- [1] ASHORI A.: Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries! *Bioresource Technology* 99, 2008, 4661-4667.
- [2] HRISTOV V.: *Composite Interfaces* 16, 2009, 731-750.
- [3] HYLA I., ŚLEZIONA J.: *Kompozyty – elementy mechaniki i projektowania*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2004.
- [4] JIANG H., KAMDEM D.P.: Development of Poly(vinyl chloride)/Wood Composites. A Literature Review. *Jurnal of Vinyl&Additive Technology* 10, 2004, 59-69.
- [5] KŁOZIŃSKI A., KRUSZELNICKA I., STERZYŃSKI T.: Pomiary właściwości reologicznych „in line” w linii wytłaczarskiej. Postęp w przetwórstwie materiałów polimerowych, praca zbiorowa pod red. J. Koszkuła. Wyd. Politechniki Częstochowskiej, 2002.
- [6] KŁOZIŃSKI A., STERZYŃSKI T. Ocena poprawki Bagleya na podstawie pomiarów w linii wytłaczarskiej. *Polimery* 50(6), 2005, 455-462.
- [7] KŁOZIŃSKI A., STERZYŃSKI T.: Ocena poprawek w pomiarach reometrycznych polietylenu. Cz. I. Poślizg przy ścianie kanał. *Polimery* 52(7-8), 2007, 583-590.
- [8] KŁOZIŃSKI A., STERZYŃSKI T.: Ocena poprawek w pomiarach reometrycznych polietylenu. Cz. II. Wykładnik płynięcia, poprawka Rabinowitscha. *Polimery* 52(11-12), 2007, 855-862.
- [9] KŁOZIŃSKI A., STERZYŃSKI T., SAMUJŁO B.: The impact of flow induced changes of polymers density on rheological measurements. *Polimery* 54(1), 2009, 57-61.
- [10] KLYOSOV A. *Wood – Plastic Composites*. Wiley – Interscience. Hoboken, 2007.
- [11] MIROWSKI J., TOMASZEWSKA J., LEWANDOWSKI K., ZAJCHOWSKI S.: *Narzędzie przetwórcze do wyznaczania charakterystyki reologicznej tworzyw polimerowych, zgłoszenie na wzór użytkowy*, PL 120708, 2012.
- [12] OWSIAK Z.: *Materiały kompozytowe wybrane zagadnienia*. Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 2006.
- [13] www.encyklopedia.pwn.pl.

- [14] WILCZYŃSKI K.: Reologia w przetwórstwie tworzyw sztucznych. WNT, Warszawa, 2001.
- [15] ZAJCHOWSKI S., TOMASZEWSKA J., RYSZKOWSKA J., STERZYŃSKI T.: Zjawiska reologiczne podczas przetwórstwa WPC. Przetwórstwo materiałów polimerowych. Red. J. Koszkuł, E. Bociąga, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2008.

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF WOOD POLYMER COMPOSITES

Summary: The paper presents the results of rheological properties of composites of polypropylene (PP) with wood flour (WF) with a specified particle size. WF participation in the composite was 10%, 30%, 50%. Viscosity corrected curves, flow curves and power law index n had been determined for the composites. The influence of the concentration and particle size of the filler on the viscosity and pseudoplastic properties of wood-polymer composites had been described too.

Key words: WPC, Wood-polymer composites, rheology

Łukasz PEJKOWSKI, Dariusz SKIBICKI

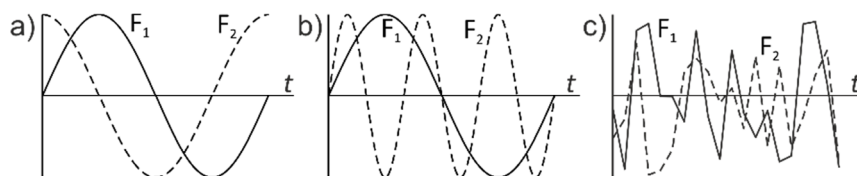
KRYTERIUM ZMĘCZENIOWE DLA ZŁOŻONYCH OBCIĄŻEŃ SINUSOIDALNYCH Z PRZESUNIĘCIEM FAZOWYM

Streszczenie: W pracy przedstawiono propozycję nowego kryterium zmęczeniowego dla obciążeń nieproporcjonalnych, uwzględniającego wpływ wartości kąta przesunięcia fazowego δ i stosunku amplitud naprężenia stycznego i normalnego λ na trwałość zmęczeniową.

Słowa kluczowe: zmęczenie materiałów, zmęczenie wieloosiowe, trwałość zmęczeniowa, obciążenia nieproporcjonalne, kryterium zmęczeniowe

1. WSTĘP

Dla znacznej liczby materiałów zauważyć można negatywny wpływ nieproporcjonalnych przebiegów czasowych składowych stanu naprężenia na trwałość zmęczeniową [2, 5]. Może zostać wywołana np. przez okresowe przebiegi obciążenia przesunięte w fazie (rys. 1a), asynchroniczne przebiegi okresowe (rys. 1b) oraz przebiegi losowe (rys. 1c). W przypadku obciążeń z przesunięciem fazowym najbardziej niszczące dla materiału, niezależnie od jego rodzaju, jest przesunięcie fazowe o wartości kąta $\delta = 90^\circ$, co wynika z kształtu przebiegu. O stopniu nieproporcjonalności stanu naprężenia decyduje także stosunek amplitud przebiegów naprężenia stycznego i normalnego λ , co zazwyczaj jest pomijane w pracach analizujących obciążenia nieproporcjonalne.



Rys. 1. Przykładowe przebiegi obciążeń wywołujące nieproporcjonalny stan naprężenia
Fig. 1. Examples of loads signals causing non-proportional condition of stress

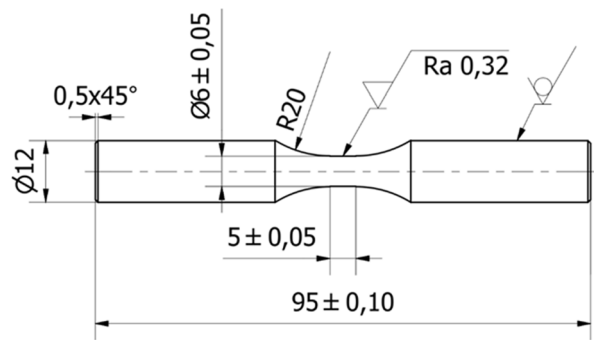
W pracy przedstawiono propozycję nowego kryterium zmęczeniowego dla obciążeń z przesunięciem fazowym, uwzględniającego wpływ zarówno kąta przesunięcia fazowego, jak i stosunku amplitud na trwałość zmęczeniową.

2. BADANIA WPŁYWU STOSUNKU AMPLITUDY NAPRĘŻENIA STYCZNEGO DO NORMALNEGO NA TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWĄ

2.1. Warunki badań

Do zbadania wpływu stosunku amplitudy naprężenia stycznego do normalnego λ na trwałość zmęczeniową wybrane zostały dwa materiały potencjalnie wrażliwe na obciążenia nieproporcjonalne [1]: miedź Cu-ETP oraz nierdzewna stal austenityczna X2CrNiMo17-12-2.

Próbki wykonano obróbką skrawaniem z materiału w stanie dostawy. Wymiary próbki podano na rysunku 2.



Rys. 2. Geometria próbek badawczych
Fig. 2. Geometry of tested specimens

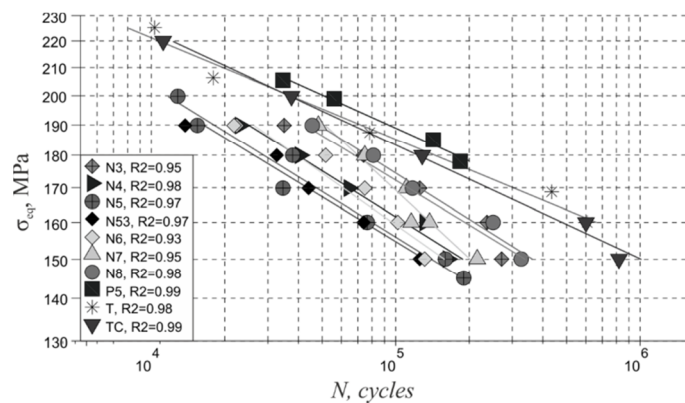
Wszystkie próby zmęczeniowe zostały przeprowadzone z zastosowaniem sinusoidalnego cyklu wahadłowego ($R = -1$) o stałej amplitudzie, ze sterowaniem naprężeniem. W przypadku obciążeń złożonych zastosowano przebiegi synchroniczne. Próbki poddane zostały rozciąganiu-ściskaniu, skręcaniu, obciążeniu proporcjonalnemu ($\lambda = 0,5$) oraz obciążeniom nieproporcjonalnym ($0,3 < \lambda < 0,8$; $\delta = 90^\circ$). Wartości amplitud składowych obciążenia zostały tak dobrane, aby uzyskać tę samą wartość amplitudy pierwiastka kwadratowego z drugiego niezmiennika dewiatora, $\sqrt{J_{2,a}}$ [8], pomnożonego przez stosunek krzywych zmęczeniowych w układzie naprężeń nominalnych dla skręcania i rozciągania-ściskania, λ_m , dla różnych rodzajów obciążeń na danym poziomie obciążenia:

$$\lambda_m \sqrt{J_{2,a}} = \text{const} \quad (1)$$

Wielkość ta jest naprężeniem ekwiwalentnym wg hipotezy Hubera-Misesa z uwzględnieniem rzeczywistego stosunku krzywych zmęczeniowych λ_m , w miejsce stałej wartości $\sqrt{3}$. Jej wartość dla miedzi Cu-ETP jest równa ok. 0,53, a dla stali X2CrNiMo17-12-2 ok. 0,8.

2.2. Wyniki badań

Wyniki badań w postaci wykresów zmęzeniowych dla różnych rodzajów obciążeń przedstawione zostały na rysunku 3 dla miedzi Cu-ETP oraz na rysunku 4 dla stali X2CrNiMo17-12-2. Sporządzone zostały także wykresy przedstawiające zależność trwałości od wartości stosunku λ dla obciążeń nieproporcjonalnych (N) na tle trwałości dla rozciągania-ściskania (TC) (rys. 5 i 6).

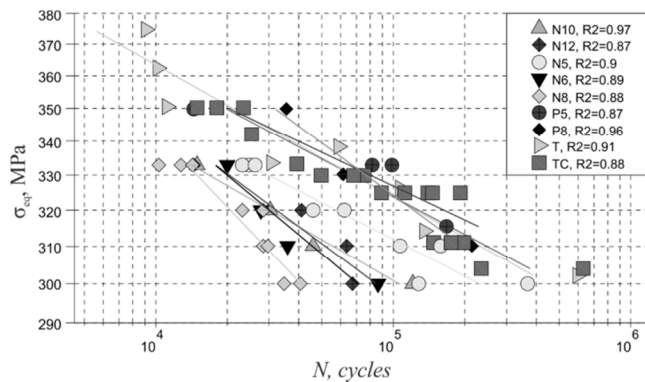


Rys. 3. Wykresy Wöhlera uzyskane dla miedzi Cu-ETP, dla różnych rodzajów obciążeń:

TC – rozciągania-ściskania, T – skręcania, P – obciążenia proporcjonalnego, N – obciążenia nieproporcjonalnego; liczba obok litery oznaczającej rodzaj obciążenia wyraża wartość stosunku amplitud λ pomnożoną przez 10

Fig. 3. Wöhler's curves obtained for Cu-ETP copper for various load types:

TC – tension-compression, T – torsion, P – proportional load, N – non-proportional load; number next to letter representing load type is a value of amplitudes ratio λ times 10

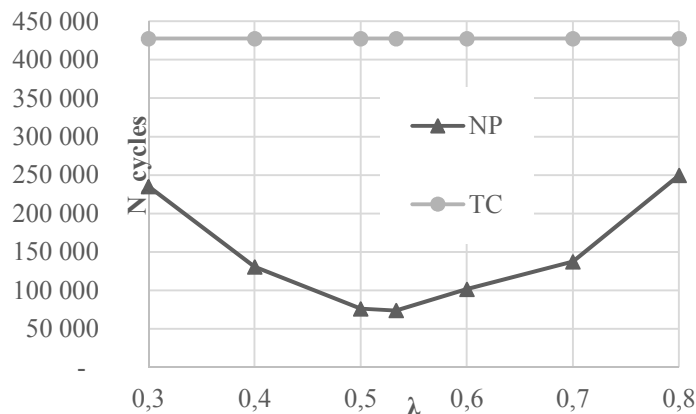


Rys. 4. Krzywe Wöhlera uzyskane dla stali X2CrNiMo17-12-2, dla różnych rodzajów obciążeń:

TC – rozciągania-ściskania, T – skręcania, P – obciążenia proporcjonalnego, N – obciążenia nieproporcjonalnego; liczba obok litery oznaczającej rodzaj obciążenia wyraża wartość stosunku amplitud λ pomnożoną przez 10

Fig. 4. Wöhler's curves obtained for X2CrNiMo17-12-2 steel for various load types:

TC – tension-compression, T – torsion, P – proportional load, N – non-proportional load; number next to letter representing load type is a value of amplitudes ratio λ times 10



Rys. 5. Zależność trwałości zmęczeniowej od λ dla Cu-ETP, na poziomie $\sigma_{eq} = 160$ MPa
 Fig. 5. Dependency of fatigue life on λ for Cu-ETP, at the level of $\sigma_{eq} = 160$ MPa

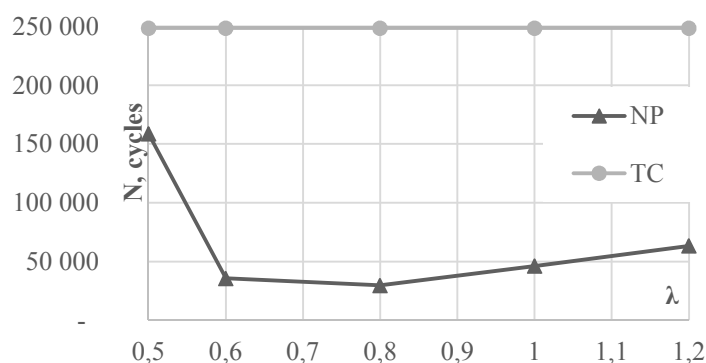


Fig. 6. Zależność trwałości zmęczeniowej od λ dla stali X2CrNiMo17-12-2, na poziomie $\sigma_{eq} = 310$ MPa
 Fig. 6. Dependency of fatigue life on λ for X2CrNiMo17-12-2 steel, at the level of $\sigma_{eq} = 310$ MPa

Na podstawie analizy wykresów można stwierdzić, iż badane materiały wykazały wrażliwość na nieproporcjonalność obciążenia, ponieważ w przypadku obciążenia z przesunięciem fazowym widoczne jest obniżenie trwałości zmęczeniowej w stosunku do obciążeń proporcjonalnych. Obniżenie to jest wyraźnie zależne od wartości stosunku λ . Największe obniżenie trwałości w przypadku obu badanych materiałów miało miejsce dla stosunku λ równemu w przybliżeniu wartości λ_m , co ma istotne znaczenie.

3. PROPOZYCJA NOWEGO KRYTERIUM

Tensor stanu naprężenia σ :

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

można rozłożyć na aksjator σ_A , czyli tensor średnich naprężeń normalnych (naprężenie hydrostatyczne):

$$\sigma^H = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}); \sigma^A = \begin{bmatrix} \sigma_0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

i dewiator [5]:

$$\sigma^D = \sigma_{ij} - \sigma^A \quad (3)$$

Wielkością fizyczną szczególnie istotną podczas określania poziomu i rodzaju obciążenia jest drugi niezmiennik dewiatora J_2 oraz jego pierwiastek kwadratowy $\sqrt{J_2}$. Wartość $\sqrt{J_2}$ obliczyć można macierzowo ze wzoru:

$$\sqrt{J_2} = \sqrt{\frac{1}{2} S:S} \quad (4)$$

gdzie symbol: oznacza iloczyn Frobeniusa [6]:

$$A:B = \sum_{ij} A_{ij}B_{ij} \quad (5)$$

Stosując transformację zaproponowaną przez Papadopoulosa [8]:

$$s_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma^D_{11}, s_2 = \frac{1}{2}(\sigma^D_{22} - \sigma^D_{33}), s_3 = s^D_{12} \quad (6)$$

$$s_4 = s^D_{13}, s_5 = s^D_{23}$$

dewiator można przedstawić jako wektor s w pięciowymiarowej przestrzeni euklidesowej. Po transformacji zapisać można:

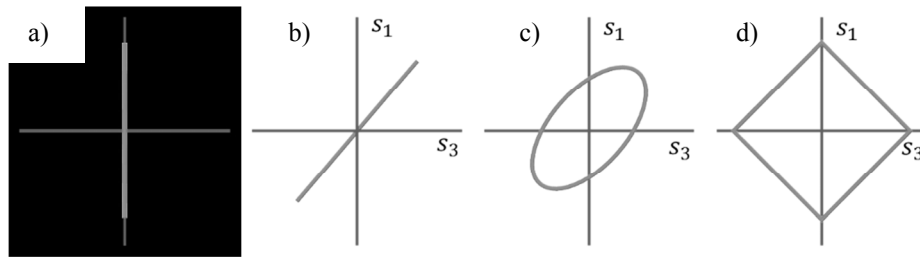
$$\sqrt{J_2} = \sqrt{s:s} = \sqrt{s \cdot s} \quad (7)$$

Z tego powodu wartość $\sqrt{J_2}$ zinterpretować można jako moduł wektora s w pięciowymiarowej przestrzeni euklidesowej.

W przypadku gdy stan naprężenia ma tylko dwie składowe (np. rozciąganie-ściskanie ze skręcaniem), składowe s_2, s_4 i s_5 przyjmują wartość równą zero i wektor s ma dwie niezerowe współrzędne. Przyjmują one następujące wartości:

$$s_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}\sigma_{11}, s_3 = \sigma_{12} \quad (8)$$

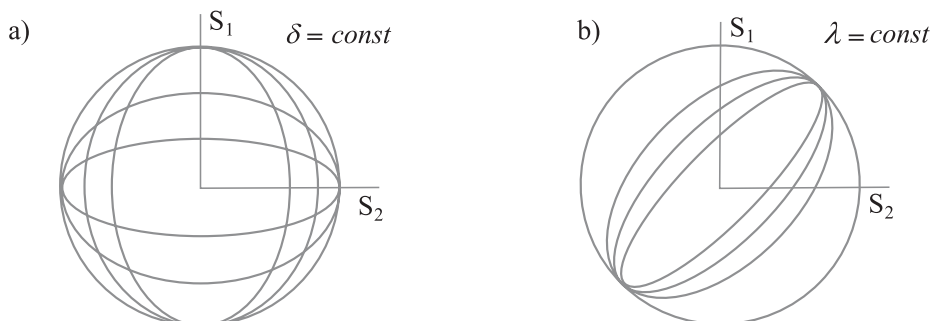
Dzięki temu, że wektor s ma dwie współrzędne, zmiany jego modułu i położenia w czasie cyklu obciążenia zmęczeniowego przedstawić można graficznie jako tzw. ścieżkę obciążenia. Na rysunku 7 przedstawiono przykładowe ścieżki obciążenia w układzie osi s_1 i s_3 : a) dla obciążenia jednoosiowego, b) dla obciążenia proporcjonalnego, c) dla sinusoidalnego obciążenia nieproporcjonalnego i d) dla obciążenia nieproporcjonalnego o przebiegu innym niż sinusoidalny.



Rys. 7. Przykładowe ścieżki obciążenia dla różnych rodzajów obciążeń zmęczeniowych
Fig. 7. Sample load paths for various types of fatigue loads

Klasyczne podejścia [4, 6, 8] wiążą trwałość zmęczeniową z amplitudą (zakresem) drugiego niezmiennika dewiatora $\sqrt{J_{2,a}}$. W przypadku obciążeń proporcjonalnych o różnych, ale stałych wartościach składowych, dla których wartość $\sqrt{J_{2,a}}$ jest taka sama, ścieżka obciążenia jest zawsze odcinkiem. Wraz ze zmianą składowych zmienia się jedynie jego kąt nachylenia do osi układu, a długość pozostaje bez zmian. W przypadku obciążeń nieproporcjonalnych, w trakcie cyklu obciążenia zmęczeniowego, zmienia się nie tylko moduł $\sqrt{J_2}$, ale także stosunek jego składowych, przez co ścieżka obciążenia przyjmuje kształt różny od prostej.

Na rysunku 8 przedstawione zostały ścieżki dla obciążeń o przebiegach sinusoidalnych z przesunięciem fazowym, dających tę samą wartość $\sqrt{J_{2,a}}$, o różnych wartościach amplitud składowych i różnych wartościach kąta przesunięcia fazowego δ . Dzięki takiej graficznej interpretacji zauważyć można, iż mimo takiego samego zakresu ścieżek $\sqrt{J_2}$, jego wartość średnia dla okresu cyklu jest różna.

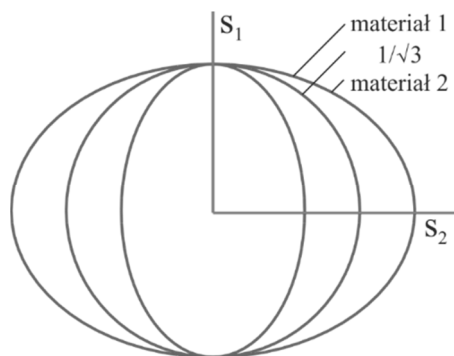


Rys. 8. Ścieżki $\sqrt{J_2}$ dla obciążeń o przebiegach sinusoidalnych z przesunięciem fazowym, dających tę samą wartość $\sqrt{J_{2,a}}$: a) o różnych wartościach amplitud składowych i b) o różnych wartościach kąta przesunięcia fazowego δ

Fig. 8. $\sqrt{J_2}$ paths for out-of-phase sine loads, giving the same value of $\sqrt{J_{2,a}}$: a) with various values of component amplitudes and b) with various values of phase shift angle δ

Proponowane kryterium oparte jest na hipotezie zakładającej, że trwałość zmęczeniową powiązać należy nie tylko z amplitudą (zakresem zmienności) drugiego niezmiennika dewiatora stanu naprężenia, $\sqrt{J_{2,a}}$, ale także z jego wartością średnią w czasie cyklu obciążenia zmęczeniowego $\sqrt{J_{2,m(t)}}$.

Kolejnym elementem modelu jest zastąpienie stałej wielkości $1/\sqrt{3}$, występującej we wzorze na składową s_1 , rzeczywistym stosunkiem charakterystyk dla skręcania i rozciągania-ściskania (lub stosunkiem granic zmęczenia), λ_m [9]. Skutkiem tego, ścieżki obciążenia o takim samym stosunku składowych, dla różnych materiałów będą miały różny kształt, a w konsekwencji różne wartości $\sqrt{J_{2,a}}$ i $\sqrt{J_{2,m(t)}}$ (rys. 9).



Rys. 9. Ścieżki $\sqrt{J_2}$ o równym stosunku amplitud składowych, po uwzględnieniu rzeczywistego stosunku charakterystyk zmęczeniowych dla skręcania i rozciągania-ściskania λ_m

Fig. 9. $\sqrt{J_2}$ paths with equal components amplitude ratio, after taking into account the value of torsion to tension-compression fatigue curves ratio λ_m

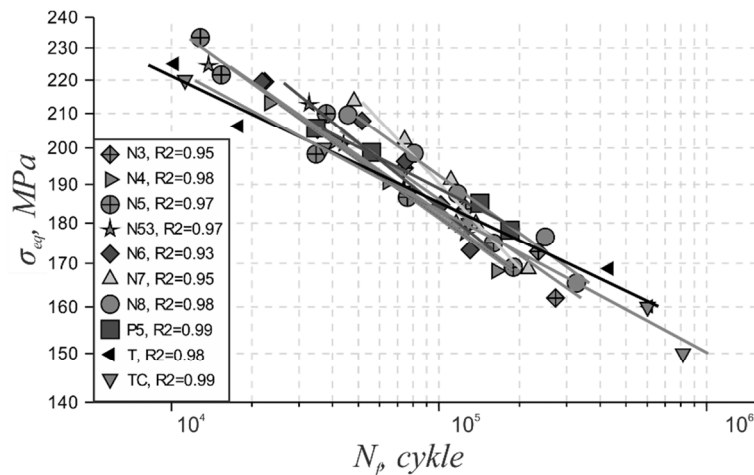
Po uwzględnieniu powyższych założeń, zaproponowany został następujący wzór na naprężenie ekwiwalentne:

$$\sigma_{eq} = \frac{Z_{rc}}{Z_{so}} \left(\sqrt{J_{2,a}}^* + \frac{\sqrt{J_2}^* m(t) - \frac{2\sqrt{J_{2,a}}^*}{\pi}}{2} \right) \quad (9)$$

W powyższym zapisie symbol $\sqrt{J_2}^*$ oznacza wartość drugiego niezmiennika dewiatora zmodyfikowaną o rzeczywisty stosunek charakterystyk zmęzeniowych λ_m , a $\sqrt{J_{2,m(t)}}^*$ jego średnią wartość w cyklu obciążenia.

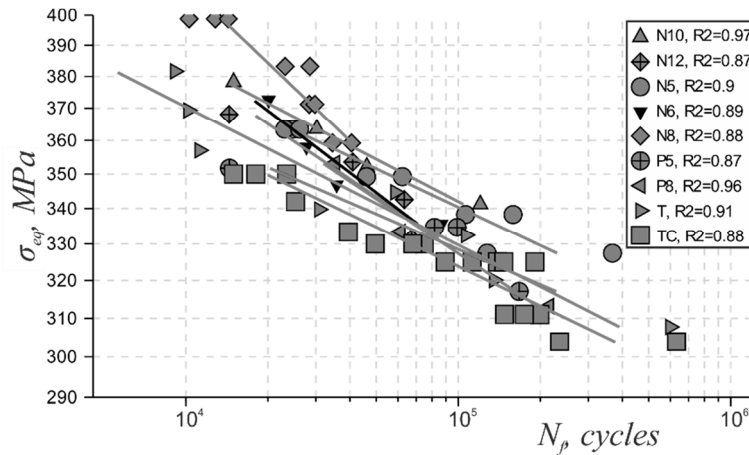
4. WERYFIKACJA EKSPERYMENTALNA ZAPROPONOWANEGO KRYTERIUM

Zaproponowane kryterium zostało zweryfikowane na podstawie wyników badań eksperymentalnych opisanych w punkcie 2. Na rysunkach 10 i 11 przedstawione zostały wykresy zmęczeniowe sporządzone dla naprężeń ekwiwalentnych obliczonych wg kryterium dla miedzi Cu-ETP oraz stali X2CrNiMo17-12-2.



Rys. 10. Wykresy zmęczeniowe dla różnych rodzajów obciążeń uzyskane dla miedzi Cu-ETP w układzie naprężeń ekwiwalentnych obliczonych wg zaproponowanego kryterium

Fig. 10. Fatigue curves for various types of loads obtained for Cu-ETP copper in equivalent stresses, according to proposed criterion, coordinates system



Rys. 11. Wykresy zmęczenia dla różnych rodzajów obciążeń uzyskane dla X2CrNiMo17-12-2 w układzie naprężeń ekwiwalentnych obliczonych wg zaproponowanego kryterium
Fig. 11. Fatigue curves for various types of loads obtained for X2CrNiMo17-12-2 steel in equivalent stresses, according to proposed criterion, coordinates system

W przypadku miedzi Cu-ETP wykresy zmęczenia dla wszystkich rodzajów obciążeń w znacznym stopniu pokrywają się, co świadczy o poprawnym oszacowaniu naprężenia ekwiwalentnego. W przypadku stali X2CrNiMo17-12-2 wykres dla obciążenia najbardziej nieproporcjonalnego leży nieco powyżej wykresów dla obciążeń proporcjonalnych. Oznacza to, że naprężenie ekwiwalentne zostało przeszacowane. Z tego powodu trwałości szacowane na jego podstawie są zawyżone, co oznacza wynik konserwatywny. Rozrzut wyników może być częściowo spowodowany znacznym udziałem odkształceń plastycznych, ponieważ jest on większy dla niższych trwałości.

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wykazały duży wpływ wartości współczynnika λ na trwałość zmęzeniową w przypadku obciążeń nieproporcjonalnych.

Zaproponowano metodę oceny nieproporcjonalności obciążenia zmęczeniowego, wykorzystującą wartość średnią $\sqrt{J_2}^*$ w cyklu obciążenia nieproporcjonalnego.

Przedstawiona metoda szacowania trwałości zmęczeniowej pozwala na uzyskanie wyników konserwatywnych (bezpiecznych) dla badanych materiałów, wrażliwych na nieproporcjonalność obciążenia.

Dodać także należy, że w porównaniu z innymi modelami obliczenia oparte na niezmiennikach stanu naprężenia trwają o wiele krócej. Mogą być z tego powodu łatwiej implementowane w różnego rodzaju narzędziach do obliczeń inżynierskich.

LITERATURA

- [1] BORODII M.V., SHUKAEV S.M.: Additional cyclic strain hardening and its relation to material structure, mechanical characteristics, and lifetime. *International Journal of Fatigue* 29, 2007, 1184-1191.
- [2] ELLYIN F., GOLOS K., XIA Z.: In-phase and out-of-phase multiaxial fatigue. *Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the Asme* 113, 1991, 112-118.
- [3] GAWĘCKI A.: *Mechanika materiałów i konstrukcji prętowych*. Wyd. Politechniki Poznańskiej, 1998.
- [4] LI B., REIS L., de FREITAS M.: Comparative study of multiaxial fatigue damage models for ductile structural steels and brittle materials. *International Journal of Fatigue* 31, 2009, 1895-1906.
- [5] McDIARMID D.L.: Fatigue under out-of-phase bending and torsion. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 9, 1986, 457-475.
- [6] MEGGIOLARO M.A., de CASTRO J.T.P.: An improved multiaxial rainflow algorithm for non-proportional stress or strain histories - Part I: Enclosing surface methods. *International Journal of Fatigue* 42, 2012, 217-226.
- [7] MEYER C.D.: *Matrix Analysis and Applied Linear Algebra*. SIAM 2000.
- [8] PAPADOPOULOS I.V., DAVOLI P., GORLA C., FILIPPINI M., BERNASCONI A.: A comparative study of multiaxial high-cycle fatigue criteria for metals. *International Journal of Fatigue* 19, 1997, 219-235.
- [9] ZENNER H., SIMBURGER A., LIU J.: On the fatigue limit of ductile metals under complex multiaxial loading. *International Journal of Fatigue* 22, 2000, 137-145.

FATIGUE CRITERION FOR OUT-OF-PHASE LOADS

Summary: In hereby work a proposal of new fatigue criterion for non-proportional loads, which includes influence of value of phase shift angle δ and shear to normal stress ratio λ , onto fatigue life.

Key words: fatigue of materials, multiaxial fatigue, fatigue life, non-proportional loads, fatigue criterion

Roksana RAMA

ROZWIĄZANIA KONSTRUKCYJNE I KONCEPCJA BADAŃ APLIKATORÓW W MASZYNACH ZBIERAJĄCYCH ZIELONKI

Streszczenie: W pracy przedstawiono dostępne na rynku systemy kontroli przepływu masy w maszynach zbierających. Opisano zbudowany sterownik. Przeprowadzono wstępne badania laboratoryjne mające na celu określenie minimalnej dawki preparatu mikrobiologicznego i jej wpływu na stabilność tlenową kiszonek. Przeanalizowano dane z czujników i dopasowano model istotny statystycznie, a zależność danych empirycznych była zgodna z modelem równania regresji.

Słowa kluczowe: zbiór zielonki, sterowanie aplikatorami, zakiszanie biomasy

1. WSTĘP

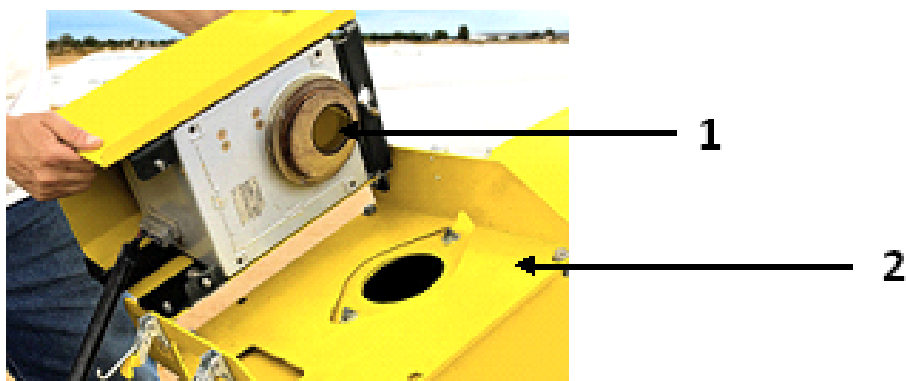
Zbiór zielonek oraz ich zakiszanie jest procesem znanym i odbywającym się już od wielu lat. Niezmienne są zasady ich przygotowania, natomiast zmieniają się technologie kiszenia oraz wartości pokarmowe i energetyczne użytego materiału. Podczas dokonywania zbioru plonów bardzo ważne jest, aby utrzymać wysoką jakość kiszonek, gdyż błędy popełnione w tej fazie mogą skutkować stratami i uzyskaniem produktu o niskiej jakości w przyszłości. Powszechną metodą konserwacji zielonek przeznaczonych do produkcji paszy, a także tych przeznaczonych na substraty do biogazowni jest fermentacja mlekowa, którą powodują bakterie kwasu mlekowego [5].

W przypadku kiszonek przeznaczonych na cele paszowe, stosowanie dobrze przygotowanych pasz w żywieniu zwierząt podnosi ich produktywność oraz polepsza zdrowotność i dobrostan. Kiszonki przeznaczone jako substraty dla biogazowni rolniczych powinny być bogate w substancje, z których powstaje biometan, który jest głównym składnikiem biogazu i odpowiada za jego wartość opałową [9]. Ich dobra jakość jest ściśle związana z zastosowaniem odpowiednich dodatków, których skuteczność działania zależy od prawidłowego ich rozmieszczenia w masie roślinnej. Złe rozmieszczenie preparatu mikrobiologicznego, może spowodować powstanie ognisk o aktywnej działalności szkodliwych bakterii [1]. Procesy życiowe bakterii powodują zagrzewanie się kiszonek, obniżając jednocześnie ich wartość energetyczną.

2. PRZEGLĄD DOSTĘPNYCH ROZWIĄZAŃ

Obecnie na rynku dostępnych jest wiele maszyn do zbioru zielonek dysponujących szeregiem rozwiązań ułatwiających pracę. Systemy te, oparte są na technologii GPS, dzięki pozyskanym informacjom umożliwiają regulację chwilowej wydajności aplikatora konserwantów.

Firma John Deere dysponuje między innymi systemem, który odpowiada za automatyczną regulację długości cięcia oraz satelitarne pozycjonowanie maszyny dzięki odbiornikowi StarFire. Systemem, który w pełni umożliwia regulację ilości dodatków kiszonkarskich jest HarvestLab (rys. 1), który w połączeniu z Harvest Monitor i HarvestDoc tworzą ipakiet.



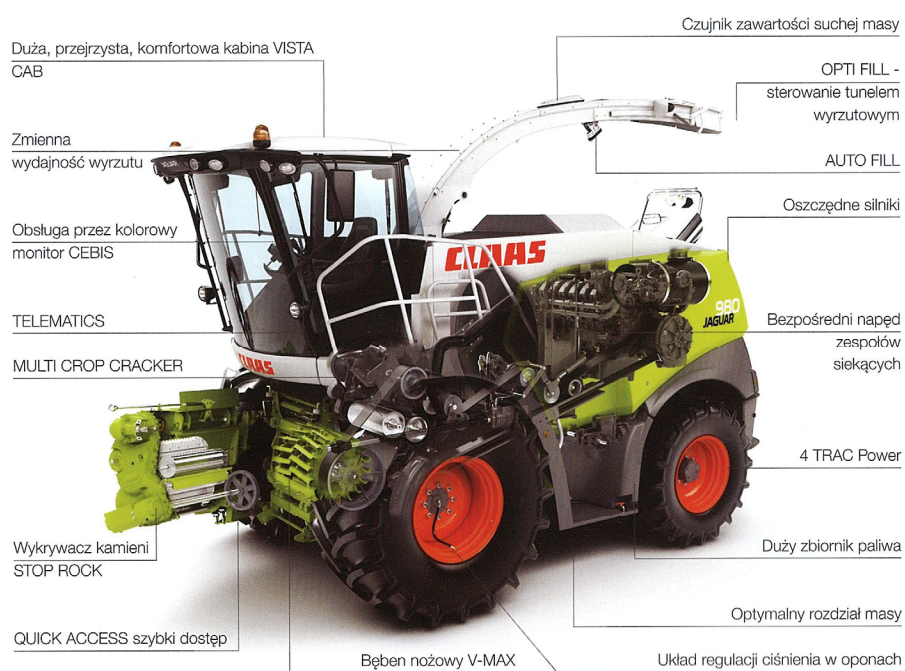
Rys. 1. System HarvestLab: 1 – sensor, 2 – kanał wyrzutowy [3]
Fig. 1. HarvestLab system: 1 – sensor, 2 – ejection channel [3]

System HarvestLab w czasie rzeczywistym, co kilka sekund mierzy zawartość suchej masy oraz składników pokarmowych w plonie. Dzięki otrzymanym informacjom, operator może szybko reagować, aby uzyskać optymalne zagęszczenie i dobrą jakość zielonki. Gdy w sieczkarni zainstalowany jest odpowiedni aplikator regulujący dawki w trybie on-line, możliwe jest przekazywanie sygnałów, które umożliwią zmianę jego wydajności. W odpowiednim momencie dodaje odpowiednią ilość konserwantu, dzięki analizie zawartości białka, cukrów, skrobi oraz włókna surowego za pomocą czujnika NIR, który podczas analizy, wykorzystuje spektrum o długości fal od 950 do 1530 nanometrów. Zarejestrowane spektrum porównywane jest z wykresami kalibracji, aby określić zawartość składników pokarmowych. Czujnik ten ze względu na układ elektroniczny, nie może być niestety zamontowany na starszych sieczkarniach. Do jego stacjonarnego użycia potrzebny jest laptop oraz umieszczony na rurze wyrzutnika – specjalny adapter [3].

HarvestDoc to system, który zapisuje wszystkie dane wejściowe, tj. wielkość plonu, zawartość suchej masy, długość cięcia, zużycie paliwa, wydajność, zawarte składniki pokarmowe oraz ilość aplikowanego dodatku. Dane te mogą

być później wykorzystane do różnych analiz oraz odwzorowania charakterystyk otrzymanych plonów.

Firma Claas w swoich sieczkarniach JAGUAR oferuje trzy pakiety. Pakiet AUTO FILL (rys. 2) automatycznie steruje tunelem wyrzutowym. Za pomocą cyfrowej analizy obrazu 3-D pojazdu jadącego obok jest w stanie ustalić krawędzie zewnętrzne, a także ilość napełnienia pojazdu. Tunel wyrzutowy sterowany jest wzdłużnie i poprzecznie, dlatego optymalnie napełnia pojazd. Pakiet BIOGAZ wyposażony jest w aplikator ACTISILER 20, który dozuje dokładną ilość skoncentrowanego roztworu bakterii kwasu mlekowego, a pokładowy terminal CEBIS steruje dawką i nadzoruje układ.



Rys. 2. Sieczkarnia JAGUAR firmy CLAAS [2]
Fig. 2. Forage harvester JAGUAR made by CLAAS [2]

W pakiecie BUSINESS znajdziemy system pomiaru wydajności, czyli QUANTIMETER, a także czujnik TM, umożliwiający ciągły pomiar wilgotności [2].

Sieczkarnie firmy New Holland dysponują systemem Intellifill, który monitoruje jej napełnianie za pomocą kamery 3D oraz automatycznie wykrywa krawędzie przyczepy. Pozwala załadować pełną przyczepę praktycznie bez strat, a operator w tym czasie może skupić się na przepływie masy roślinnej i zbiorze plonu z pola. New Holland oferuje szereg komponentów systemów automatyzacji obsługi np. odbiornik NH 162, służący do mapowania pól i określania wydajności zbioru. Jest zintegrowany z technologią Autopilot. Oprogramowanie

PLM (ang. *Product Lifecycle Management*), dzięki zastosowanej technologii pomiaru wilgotności pozwala na dokładne dozowanie preparatów chemicznych oraz wszelkiego rodzaju dodatków w czasie rzeczywistym podczas zbioru paszy, belowania lub pracy kombajnu oraz na dokładne obliczenia kosztów suszenia zebranych plonów [7].

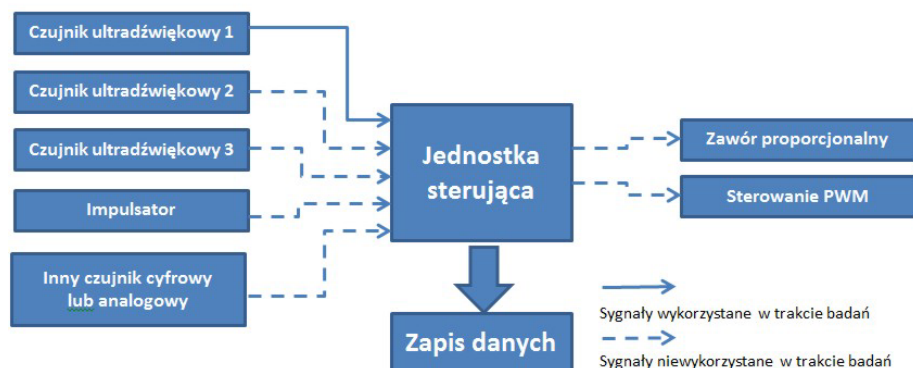
Firma Krone swoje sieczkarnie BigX 800K wyposażyla w system, który pozwala obliczyć świeżą i suchą masę, czyli Crop Control. Gromadzi on informacje o plonach i ustala objętość zbioru za pośrednictwem wielkości szczelin dwóch ostatnich walców wstępnego zginiatania. Dane czerpie z czujników wilgotności umieszczonych na grzbiecie kanału wyrzutowego. W ofercie firmy dostępny jest również czujnik AutoScan z możliwością regulowania na podstawie długości sieczki. Bada on dojrzałość zielonej kukurydzy na podstawie barwy na przyrządzie koszącym EasyCollect i pośrednio określa wilgotność zbieranych roślin. W zależności od stopnia dojrzałości roślin czujnik AutoScan zmienia długość sieczki [6].

W pracy przedstawiono mobilny system sterowania procesem aplikacji dodatków do pasz oraz biomasy. Sterowanie odbywać się będzie poprzez kontrolę strumienia masy lub objętości zbieranej paszy, w czasie rzeczywistym. System ma zapewniać także możliwość stosowania go w różnych typach maszyn zbierających.

3. BADANIA

Prowadzone badania dotyczą wpływu zastosowania systemu sterowania wielkością dawki preparatu konserwującego na jakość uzyskiwanych kiszzonek stosowanych przy produkcji biomasy przeznaczonej na cele energetyczne oraz paszowe. Warunkiem prawidłowego działania takich preparatów jest ich dobre wymieszanie ze zbieranym materiałem roślinnym oraz aplikacja odpowiedniej dawki.

W Zakładzie Maszyn Roboczych Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy zbudowano sterownik, składający się z jednostki centralnej wyposażonej w dotykowy wyświetlacz umożliwiający zmianę nastawienia. Sterowanie aplikatorem możliwe jest poprzez zastosowany zawór proporcjonalny dla materiałów ciekłych lub sygnał PWM dla aplikatorów materiałów stałych. Informacje wejściowe pozyskiwane z czujników (ultradźwiękowych) oraz impulsatora umieszczonego na kole jezdny maszyny zbierającej (rys. 3).



Rys. 3. Schemat blokowy sterownika aplikatora
Fig. 3. Block diagram of the driver of the applicator

Sterownik ma być stosowany w maszynach w małych i średnich gospodarstwach. Obecne rozwiązania dedykowane są wyłącznie maszynom o dużej wydajności, czyli sieczkarniom przeznaczonym na duże obszary. Opracowywany sterownik ma być tani, łatwy w obsłudze, ale przede wszystkim mobilny z możliwością zamontowania go na prasach zwijających oraz przyczepach zbierających w polskich gospodarstwach rolniczych.

Do pozyskania wiedzy, która pomoże dopracować metodę aplikacji oraz określić minimalną dawkę preparatu mikrobiologicznego przeprowadzono doświadczenie wstępne na minisilosach.

4. BADANIA LABORATORYJNE

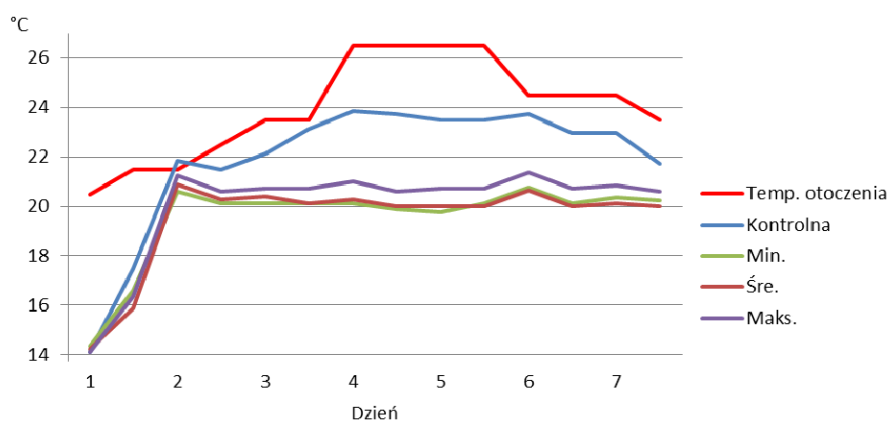
Do przeprowadzenia doświadczenia użyto 18 kg zielonki z lucerny w fazie początku kwitnienia, o wilgotności względnej 45%. Zebraną kiszonkę rozdrabniano za pomocą sieczkarni laboratoryjnej. Teoretyczna długość cięcia uzyskiwana na sieczkarni wynosiła 8 mm. Przygotowano 16 minisilosów wykonanych z PVC o średnicy 15 cm i wysokości 49 cm. Tak przygotowaną zielonkę zakiszono w minisilosach (rys. 4). Dodatek mikrobiologiczny użyty w doświadczeniu zawierał bakterie: *Lactobacillus buchneri*. W doświadczeniu zaplanowano 4 grupy doświadczalne. W pierwszej dodano średnią dawkę (75%) preparatu mikrobiologicznego. W grupie drugiej – minimalną dawkę (50%), grupie trzeciej – maksymalną dawkę (100%). Grupa czwarta stanowiła grupę kontrolną (K), którą zakiszono nie używając żadnego dodatku. Napelnione zbiorniki dokładnie ugnieciono i zamknięto gumowymi korkami. W celu odprowadzenia gazów fermentacyjnych w każdym korku umieszczono plastikową rurkę. Po to, aby zabezpieczyć zbiorniki przed dostępem powietrza, rurki wypełniono wodą. Silosy zważono przed i po napełnieniu lucerną. Czas zakiszania w trakcie trwania doświadczenia to 100 dni. Po tym okresie otworzono minisilosy i kiszonkę, przełożono do styropianowych pojemników w celu zbadania jej

stabilności tlenowej. W pojemnikach umieszczono czujniki temperatury, którą badano dwukrotnie w ciągu doby przez 7 dni.



Rys. 4. Minisilosy – grupa ze średnią dawką
Fig. 4. Minisiloses – the standard dose group

Na rysunku 5 przedstawiono średnie dobowe temperatury w kiszonkach poddanych ekspozycji tlenowej. Gdy temperatura kiszonek podczas testu przekroczy o 3°C ciepłość otoczenia, wówczas kiszonki tracą stabilność [8]. W przeprowadzonych badaniach nie odnotowano wzrostu temperatury powyżej tej wartości.



Rys. 5. Stabilność kiszonek podczas ekspozycji tlenowej
Fig. 5. The stability of silage during oxygen exposure

Wszystkie eksponowane kiszonki były stabilne. Dodatek mikrobiologiczny nie wpłynął na polepszenie ich tlenowej trwałości w porównaniu z kiszonką bez dodatku (K). Jednak temperatura kiszonki kontrolnej (K) podczas trwania testu, była wyższa niż w kiszonkach z dodatkiem mikrobiologicznym.

Jako model zależności stabilności kiszonek podczas ekspozycji tlenowej proponuje się zależność

$$T = a / t + b / t^2 + c \quad (1)$$

gdzie:

T – temperatura kiszonki,

t – bieżący czas kiszenia,

a, b, c – współczynniki zależności (1), które wyznaczono w pracy metodami regresji wieloczynnikowej.

Zależność (1) jest nieliniowa i wybór tego równania był podyktowany analizą danych empirycznych.

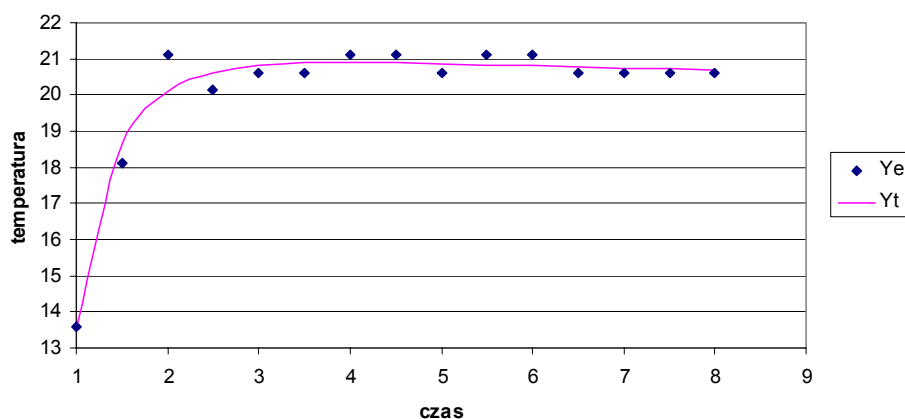
Oblicza się współczynnik korelacji Pearsona R, współczynnik determinacji R^2 , poziom istotności testu. Wysoka wartość współczynnika determinacji R^2 potwierdza hipotezę, że model jest istotny. Jednak w niektórych przypadkach należy dodatkowo wykonać test adekwatności modelu. Zaproponowany w pracy [4] test adekwatności wymaga powtórzeń pomiarów zmiennej niezależnej przy ustalonych wartościach zmiennych niezależnych. W przypadku braku powtórzeń w pracy [4] zaleca się stosowanie kryterium Wetzla. Zgodnie z tym kryterium stwierdza się brak podstaw do odrzucenia hipotezy o adekwatności badanego modelu, jeśli obliczona wartość statystyki F – Snedecora jest przynajmniej czterokrotnie większa od wartości odczytanej z tablic statystycznych. Dla analizowanych danych odczytana przy poziomie istotności $p = 0,05$, z tablic $F_{tab} = 3,885$.

W tabeli 1 dla każdego silosu podaje się wartość współczynnika korelacji R, współczynnik determinacji R^2 , poziom istotności testu istotności modelu p – value i wartość stosunku statystyki F – Snedecora obliczonej na podstawie danych empirycznych do wartości odczytanej z tablic $F_{tab} = 3,885$. Jeśli stosunek ten jest większy od 4, to brak jest podstaw do odrzucenia hipotezy o adekwatności modelu.

Analiza wyników obliczeń zawartych w tabeli 1 prowadzi do wniosku, że wszystkie z 16 analizowanych serii danych reprezentują model istotny statystycznie. Najmniejszy poziom istotności uzyskano dla silosu 16, $p\text{-value} = 0,0146 < 0,05$. Jednak analiza adekwatności modelu pokazuje, że model dla danych z silosu -15 ma stosunek $F_{obl}/F_{tab} = 1,6 < 4$, co pozwala na odrzucenie hipotezy o adekwatności. Pozostałe silosy mają wartość tego stosunku większą od 4 co pozwala na stwierdzenie, że brak jest podstaw do odrzucenia hipotezy o adekwatności modeli. Przykładowy wykres funkcji regresji o równaniu (1) i punktów pomiarowych dla silosu 16 przedstawiono na rysunku 6.

Tabela 1. Wartości podstawowych statystyk dla 16 realizacji modelu
 Table 1. The values of basic statistics for the 16 model implementation

	R	R2	F	p-value	Fobl/Ftab
silos-1	0,90	0,81	26,41	4,03E-05	6,8
silos-2	0,90	0,81	25,75	4,55E-05	6,6
silos-3	0,92	0,85	33,00	1,32E-05	8,5
silos-4	0,92	0,85	35,04	9,76E-06	9,0
silos-5	0,93	0,86	35,80	8,75E-06	9,2
silos-6	0,94	0,88	42,41	3,62E-06	10,9
silos-7	0,94	0,88	44,59	2,78E-06	11,5
silos-8	0,96	0,91	63,66	4,08E-07	16,4
silos-9	0,92	0,84	31,22	1,75E-05	8,0
silos-10	0,96	0,91	64,52	3,79E-07	16,6
silos-11	0,94	0,88	40,43	4,65E-06	10,4
silos-12	0,93	0,87	40,87	4,4E-06	10,5
silos-13	0,93	0,87	40,44	4,65E-06	10,4
silos-14	0,98	0,95	123,73	9,79E-09	31,8
silos-15	0,71	0,51	6,13	0,014633	1,6
silos-16	0,98	0,96	147,33	3,59E-09	37,9



Rys. 6. Zależność empiryczna i realizacja równania regresji
 Fig. 6. Empirical dependence and implementation of the regression equation

5. PODSUMOWANIE

Analiza źródeł literaturowych wykazuje, że odpowiednio dobrane preparaty konserwujące zielonkę pozwalają na zmniejszenie start energii w trakcie przechowywania oraz zwiększenie uzysku biogazu.

Przeprowadzone badania dowodzą, że dodatek mikrobiologiczny pozytywnie wpłynął na kiszonkę, gdyż w kiszonce bez dodatku odnotowano temperaturę wyższą niż w kiszonkach z dodatkiem mikrobiologicznym. Równanie regresji dane wzorem (1) jest dobrym modelem dla opisu stabilności kiszonek podczas ekspozycji tlenowej.

Potrzeba opracowania sterownika uniwersalnego z możliwością automatycznej zmiany dawki w trakcie zbioru dla innych maszyn zbierających, takich jak przyczepy i prasy zbierające jest zasadny, gdyż dostępne na rynku aplikatory są zbyt drogie i przeznaczone tylko dla sieczkarni zbierających.

Sterownik powinien być tani i dostępny dla istniejących już i powszechnie stosowanych konstrukcji w małych i średnich polskich gospodarstwach rolniczych.

LITERATURA

- [1] BOROWSKI S., DOROSZEWSKI P., KASZKOWIAK J., DULCET E., MIKOŁAJCZAK J.: Application of the additives which increase the biogas production in the context of improvement of the biogas production process. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering* 58(2), 2013, 21-24.
- [2] CLAAS. Siekanie się opłaca JAGUAR Claas
<http://www.claas.pl/blueprint/servlet/blob/189370/0cc3397bcc90811cded84c79e92bff9e/172794-dataRaw.pdf> 11.12.2013.
- [3] DEERE J.: Poznaj inteligentną jakość kisonki Sieczkarnie samojezdne serii 7080 John Deere.
http://www.deere.pl/pl_PL/docs/product/equipment/self_propelled_forage_harvester/brochure/brochure.html, 11.12.2013.
- [4] DRAPER N.R. and SMITH H.: *Applied Regression Analysis*. John Wiley and Sons, 1998.
- [5] DULCET E., KASZKOWIAK J., BOROWSKI S., MIKOŁAJCZAK J.: Effects of Microbiological Additive on Baled Wet Hay. *Biosystems Engineering* 95(3), 2006, 379-384.
- [6] KRONE
<http://landmaschinen.krone.de/english/products/ican/ican/the-krone-ican-guide/> 11.12.2013.
- [7] NEW HOLLAND
http://agriculture.newholland.com/poland/pl/PLM/Pages/PLM_Overview.aspx 11.12.2013.
- [8] PAHLOW G., WEISSBACH F.: New aspects of evaluation and application of silage additives. Contributions of grassland and forage research to the development of systems of sustainable land use. FAL Braunschweig, Landbauforsch. Völkenrode SH 206, 1999, 141-158.
- [9] WĘGLARZY K., PODKÓWKA W.: *Agrobiogazownia: opracowanie zbiorowe* Grodziec Śląski: Zakład Doświadczalny Instytutu Zootechniki PIB; Balice k. Krakowa: Instytut Zootechniki – Państwowy Instytut Badawczy, 2010, 156.

CONSTRUCTION AND CONCEPT SOLUTIONS RESEARCH APPLICATORS IN HARVESTING MACHINES OF SILAGE

Summary: At the research work presents a commercially available mass flow control systems in harvesting machine. Described constructed driver. Preliminary laboratory tests to determine the minimum dose of microbiological preparation and its impact on aerobic stability of silage. Analyzed data from the sensors and matched model statistically significant and consistent empirical data dependency model equation.

Key words: collection of fodder, control applicators, ensiling biomass

Radosław SKOCKI, Stanisław MROZIŃSKI

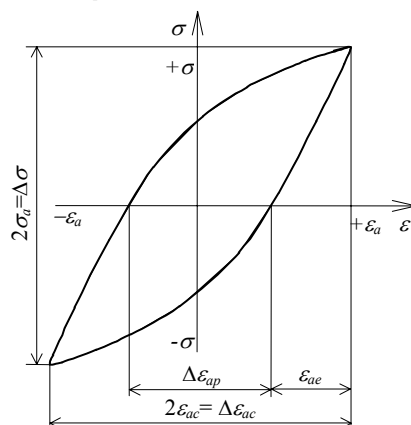
BADANIE WPŁYWU TEMPERATUR PODWYŻSZONYCH NA WŁAŚCIWOŚCI CYKLICZNE STALI P91

Streszczenie: W pracy przedstawiono wybrane wyniki niskocyklowych badań zmęczenia stali P91 w warunkach obciążeń stałoamplitudowych w temperaturze otoczenia oraz w temperaturze podwyższonej. Na podstawie uzyskanych wyników dokonano analizy porównawczej podstawowych parametrów pętli histerezy uzyskanych w różnych temperaturach w funkcji liczby cykli.

Słowa kluczowe: wytrzymałość zmęczeniowa, zmęczenie niskocyklowe, właściwości cykliczne stali

1. WPROWADZENIE

Cykliczne odkształcenia plastyczne wywołują w metalach i stopach metali złożony splot zjawisk zależnych od wielu czynników. Nazywamy je ogólnie zmianami zmęczeniowymi. Do ich opisu można przyjmować różne wielkości fizyczne. Niektóre wielkości podczas badań zmęczeniowych podlegają pomiarom lub obliczeniom. Do najważniejszych można zaliczyć np. parametry pętli histerezy, takie jak ε_{ac} , ε_{ap} , ε_{ae} , σ_a (rys. 1).

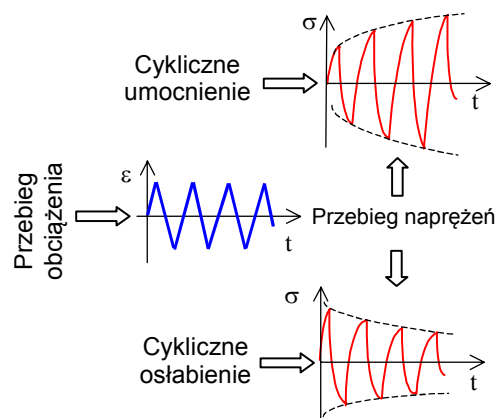


Rys. 1. Pętla histerezy oraz jej podstawowe parametry
Fig. 1. Hysteresis loop and its basic parameters

dr hab. inż. Stanisław MROZIŃSKI, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy,
Wydział Inżynierii Mechanicznej, al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz,
e-mail: Stanislaw.Mrozinski@utp.edu.pl

Radosław SKOCKI, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii
Mechanicznej, al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz

Parametry pętli histerezy mogą być traktowane jako wielkości kryterialne w stosowanych obecnie opisach zmęczenia (odkształceniowy, naprężeniowy, energetyczny) [2]. Występujące w różnych okresach trwałości związki pomiędzy wielkościami kryterialnymi a liczbą cykli obciążenia n nazywa się ogólnie właściwościami cyklicznymi, które podczas badań mogą się zmieniać lub być stałe. W przypadku zmian właściwości można mówić o cyklicznym umocnieniu lub osłabieniu, a w przypadku braku zmian o stabilizacji. Przebieg umocnienia i osłabienia schematycznie przedstawiono na rysunku 2.



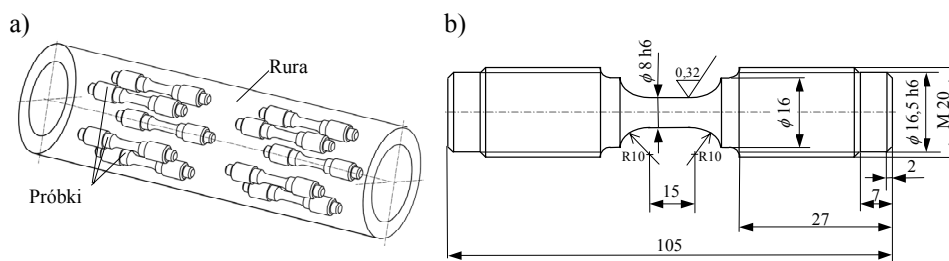
Rys. 2. Schemat cyklicznego umocnienia i osłabienia materiału
Fig. 2. Cyclic hardening and softening of material

Problemem badawczym podejmowanym przez wielu badaczy jest zarówno analityczny opis przebiegu zmian właściwości cyklicznych w temperaturach podwyższonych, jak również możliwość przewidywania jego przebiegu. W przypadku temperatur podwyższonych opis właściwości cyklicznych ulega skomplikowaniu, gdyż zmiany właściwości cyklicznych są wynikiem wzajemnych interakcji przebiegu obciążenia jak i temperatury.

Celem podstawowym pracy jest analiza porównawcza właściwości cyklicznych stali P91 w temperaturze otoczenia oraz temperaturze podwyższonej. Celem dodatkowym jest określenie wpływu temperatury podwyższonej na trwałość oraz zmiany właściwości cyklicznych opisywanych z wykorzystaniem podstawowych parametrów pętli histerezy.

2. OPIS BADAŃ

Próbki do badań wykonano ze stali P91 stosowanej na instalacje ciepłownicze. Sposób pobrania próbek z rury oraz jej ostateczne wymiary przedstawione na rysunku 3. Skład chemiczny stali P91 zestawiono w tabeli 1.



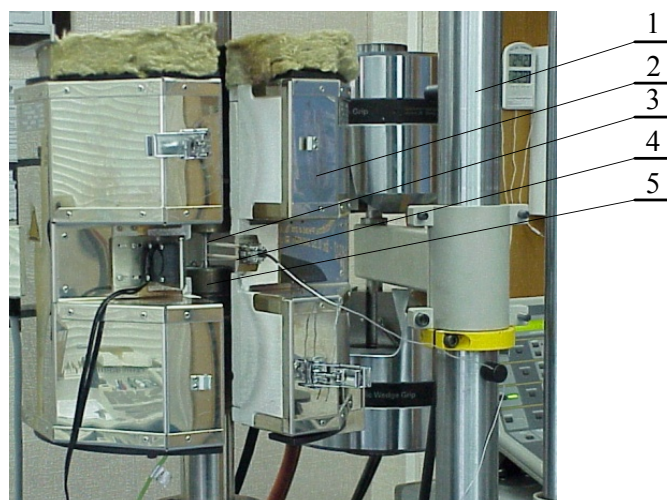
Rys. 3. Kształt (a) i wymiary (b) próbek wykorzystywanych podczas badań
Fig. 3. Shape (a) and dimensions(b) of specimens used in tests

Tabela 1. Skład chemiczny stali P91

Table 1. Chemical composition of P91 steel

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
0,197	0,442	0,489	0,017	0,005	8,82	0,971	0,307	0,012	0,017	0,036	0,074	0,004	0,201	0,02

Badania zmęczeniowe przeprowadzono na hydraulicznej maszynie wytrzymałościowej Instron 8502 wyposażonej w komorę grzewczą o mocy 3,5 kW. Do pomiaru odkształceń próbki zastosowano ekstensometr o bazie pomiarowej 12,5 mm. Na rysunku 4 pokazano widok stanowiska badawczego.



Rys. 4. Stanowisko do badań zmęczeniowych w podwyższonych temperaturach: 1 – rama maszyny wytrzymałościowej, 2 – komora grzewcza, 3 – próbka, 4 – ekstensometr, 5 – uchwyt

Fig. 4. Laboratory test bench for fatigue tests at elevated temperatures: 1 – tensile strength machine frame, 2 – heating chamber, 3 – specimen, 4 – extensometer, 5 – holder

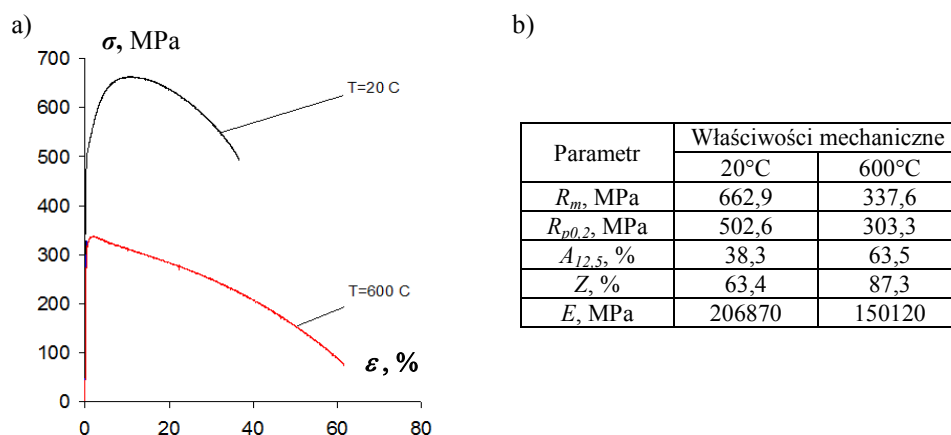
Badania zmęczeniowe zostały poprzedzone próbami statycznego rozciągania. Po analizie prób statycznego rozciągania do prób zmęczeniowych przyjęto pięć poziomów odkształcenia całkowitego: $\epsilon_{ac} = 0,25\%$; $0,3\%$; $0,35\%$; $0,5\%$; $0,6\%$. Próby statycznego rozciągania jak również próby zmęczeniowe

przeprowadzono w dwóch temperaturach $T_1 = 20^\circ\text{C}$, $T_2 = 600^\circ\text{C}$. Częstotliwość obciążenia f wynosiła podczas badań 0,2 Hz. Przyjęta w trakcie badań częstość próbkowania sygnału siły i odkształcenia pozwalała opisywać rejestrowane cykle obciążenia 200 punktami.

3. WYNIKI BADAŃ

3.1. Próby statyczne

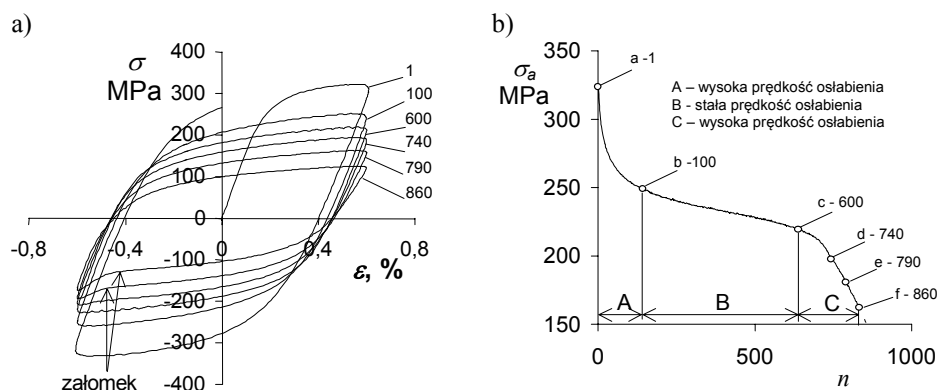
Wyniki prób statycznego rozciągania stali P91 w dwóch temperaturach ($T_1 = 20^\circ\text{C}$, $T_2 = 600^\circ\text{C}$) przedstawiono na rysunku 5a w formie wykresów rozciągania w układzie współrzędnych wydłużenie próbki ε – naprężenie σ . Naprężenia w próbce podczas prób statycznych oraz zmęczeniowych obliczano, dzieląc zarejestrowane podczas próby chwilowe wartości siły obciążającej przez pole przekroju początkowego próbki. Podstawowe właściwości mechaniczne badanej stali zestawiono w tabeli na rysunku 5b.



Rys. 5. Wyniki prób statycznych: a) wykresy rozciągania, b) właściwości mechaniczne
Fig. 5. Static tests results: a) tensile test diagrams, b) mechanical properties

3.2. Próby zmęczeniowe

Jako kryterium końca prób zmęczeniowych przyjęto wystąpienie deformacji ramienia pętli histerezy (powstanie załomka) w półcyklu ściskania. W celu wyjaśnienia przyjętego kryterium końca próby zmęczeniowej na rysunku 6 przedstawiono pętle histerezy zarejestrowane w różnych okresach trwałości zmęczeniowej na poziomie odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ i temperaturze $T_2 = 600^\circ\text{C}$.

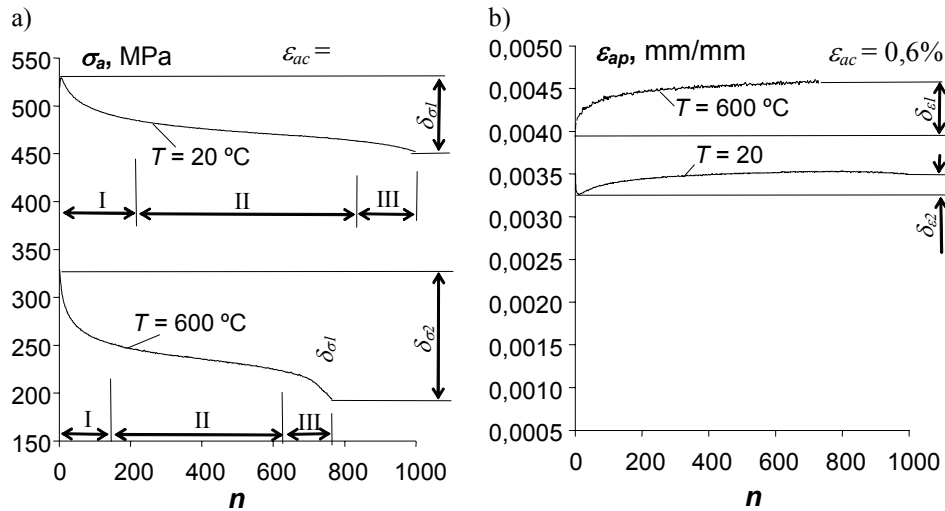


Rys. 6. Pętle histerezy na poziomie $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ i $T_2 = 600^\circ\text{C}$: a) pętle, b) zmiany σ_a
 Fig. 6. Hysteresis loops at the level of $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ and $T_2 = 600^\circ\text{C}$: a) loops, b) changes of σ_a

Na rysunku zaznaczono numery cykli obciążenia, którym odpowiadają poszczególne pętle. Na podstawie analizy rysunku 6a można stwierdzić, że podczas obciążenia stałoaamplitudowego zmianie ulegają zarówno kształt oraz parametry pętli histerezy (ε_{ap} i σ_a).

Analizę właściwości cyklicznych próbek ze stali P91 prowadzono z wykorzystywaniem parametrów pętli histerezy mających bezpośredni wpływ na dane materiałowe wykorzystywane podczas obliczeń [5]. Zaliczono do nich parametry pętli ε_{ap} i σ_a . Na rysunku 6b pokazano przykładowy wykres naprężenia σ_a obliczonego dla pętli histerezy pokazanych na rysunku 6a. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że od pierwszego cyklu obciążenia występuje ciągłe (w kolejnych cyklach obciążenia) obniżanie analizowanego parametru. Charakter zmian naprężenia σ_a świadczy o cyklicznym osłabieniu stali P91. Osłabienie obserwowano na wszystkich poziomach odkształcenia ε_{ac} w temperaturze otoczenia ($T_1 = 20^\circ\text{C}$) oraz w temperaturze podwyższonej ($T_2 = 600^\circ\text{C}$).

Miarą obserwowanych zmian tego parametru może być np. różnica pomiędzy naprężeniem σ_a na początku i na końcu próby oznaczona na rysunku 7a jako $\delta_{\sigma 1}$ oraz $\delta_{\sigma 2}$. W przypadku temperatury 600°C różnica $\delta_{\sigma 2}$ jest zdecydowanie większa od różnicy $\delta_{\sigma 1}$ uzyskanej w temperaturze otoczenia. Podobny charakter zmian obserwowano w przypadku odkształcenia plastycznego ε_{ap} (rys. 7b), gdzie w temperaturze 600°C różnica odkształceń plastycznych $\delta_{\varepsilon 1}$ jest większa od różnicy $\delta_{\varepsilon 2}$ uzyskanej w temperaturze otoczenia.



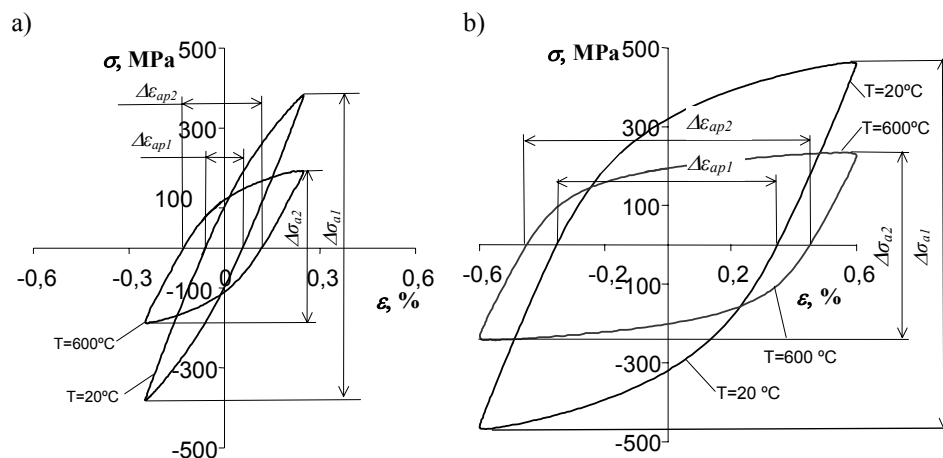
Rys. 7. Wpływ temperatury na parametry pętli histerezy ($\varepsilon_{ac} = 0,6\%$): a) $\sigma_a = f(n)$, b) $\varepsilon_{ap} = f(n)$
 Fig. 7. Influence of temperature on hysteresis loop parameters ($\varepsilon_{ac} = 0,6\%$): a) $\sigma_a = f(n)$, b) $\varepsilon_{ap} = f(n)$

Ze względu na ograniczoną objętość poniższej pracy i występujące podobieństwo wykresów podstawowych parametrów pętli histerezy dla wszystkich poziomów odkształcenia uzyskane wyniki omówiono na przykładzie tylko jednego poziomu odkształcenia ($\varepsilon_{ac} = 0,6\%$) realizowanego w dwóch temperaturach. Na podstawie analizy wykresów (rys. 7) można stwierdzić, że w przebiegach zmian parametrów pętli histerezy w temperaturze otoczenia i temperaturze podwyższonej można wyróżnić trzy charakterystyczne etapy:

- etap I – stal ulega wyraźnemu osłabieniu. Cechą tego etapu jest wysoka prędkość osłabienia, która maleje wraz ze wzrostem liczby cykli obciążenia. Długość etapu zależy od poziomu odkształcenia i wynosi od 5% wszystkich cykli do pęknięcia N_f na poziomie $\varepsilon_{ac} = 0,25\%$ do około 25% wszystkich cykli na poziomie $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$;
- etap II – parametry pętli histerezy podlegają tylko niewielkim zmianom. Prędkość osłabienia jest stała. Długość tego etapu obejmuje od około 50% wszystkich cykli do pęknięcia N_f na poziomie $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ do około 90% wszystkich cykli na poziomie odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 0,25\%$;
- etap III – stal podlega dalszemu silnemu osłabieniu. Na tym etapie zostaje zainicjowane pęknięcie, które się rozwija, aż do całkowitego pęknięcia próbki. Długość etapu zależy od poziomu odkształcenia i wynosi od kilku procent wszystkich cykli do pęknięcia na najwyższym poziomie odkształcenia do kilkunastu procent wszystkich cykli do pęknięcia na poziomie odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 0,25\%$.

Niezależnie od poziomu odkształcenia i temperatury najdłuższym etapem jest zawsze etap II. Dla tego etapu podjęto próby analitycznego opisu zmian parametrów pętli w funkcji liczby cykli obciążenia liniami prostymi. Szczegóły zamieszczono między innymi w pracach [3, 4].

W pracy dokonano analizy porównawczej pętli histerezy uzyskanych na tych samych poziomach odkształcenia w dwóch różnych temperaturach. Ze względu na występujące ciągle zmiany właściwości cyklicznych w obydwu temperaturach i brak okresu stabilizacji do porównania przyjęto pętle histerezy z okresu odpowiadającego połowie trwałości zmęczeniowej ($n/N = 0,5$). Na rysunku 8 przedstawiono przykładowe pętle uzyskane w temperaturach 20°C i 600°C na dwóch poziomach odkształcenia ($\varepsilon_{ac} = 0,25\%$, $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$).



Rys. 8. Pętle histerezy w połowie trwałości zmęczeniowej dla temperatur 20°C i 600°C
Fig. 8. Hysteresis loops obtained at half fatigue life at the temperature of 20°C and 600°C

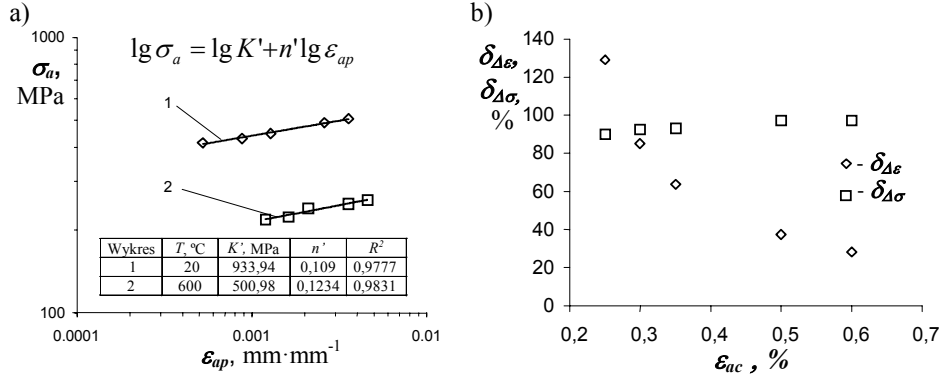
Zgodnie z oczekiwaniami zakres naprężenia $\Delta\sigma_2$ dla pętli uzyskanej w temperaturze podwyższonej jest zdecydowanie mniejszy od zakresu $\Delta\sigma_1$ pętli uzyskanej w temperaturze pokojowej. W przypadku zakresu odkształcenia plastycznego $\Delta\varepsilon_{ap}$ sytuacja jest odwrotna. W temperaturze podwyższonej zakres $\Delta\varepsilon_{ap}$ jest zdecydowanie większy od analogicznego odkształcenia w temperaturze otoczenia. W celu porównania parametrów pętli na wszystkich poziomach odkształcenia i sformułowania wniosków ogólnych dokonano ich analitycznego opisu. Do opisu zależności pomiędzy naprężeniami σ_a a odkształceniami ε_{ap} na pięciu poziomach przyjęto równanie w postaci:

$$\lg \sigma_a = \lg K' + n' \lg \varepsilon_{ap} \quad (1)$$

gdzie:

K' – współczynnik krzywej cyklicznego odkształcenia, MPa,
 n' – wykładnik krzywej cyklicznego odkształcenia.

Wyniki aproksymacji parametrów pętli σ_a i ε_{ap} na pięciu poziomach odkształcenia i dwóch temperaturach zestawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Wpływ temperatury na ε_{ap} oraz σ_a : a) zależność pomiędzy σ_a i ε_{ap} ,
b) zależność pomiędzy $\Delta\varepsilon_{ap}, \Delta\sigma_a$ i ε_{ac}

Fig. 9. Influence of temperature on ε_{ap} and σ_a : a) relation between σ_a and ε_{ap} ,
b) relation between $\Delta\varepsilon_{ap}, \Delta\sigma_a$ and ε_{ac}

Na podstawie wykonanych wykresów można stwierdzić, że wpływ temperatury na zakres odkształcenia plastycznego $\Delta\varepsilon_{ap}$ jest widoczny na wszystkich poziomach odkształcenia i wzrasta wraz z ich obniżaniem. Na rysunku 9b pokazano procentowe zwiększenie zakresu odkształceń plastycznych $\Delta\varepsilon_{ap}$ oraz zakresu naprężeń $\Delta\sigma_a$ na poszczególnych poziomach odkształcenia całkowitego ε_{ac} na skutek zmiany temperatury z poziomu $T = 20^\circ\text{C}$ na poziom $T = 600^\circ\text{C}$. Wzrost zakresu odkształceń plastycznych określono z zależności:

$$\delta_{\Delta\varepsilon} = \frac{\Delta\varepsilon_{ap(600)} - \Delta\varepsilon_{ap(20)}}{\Delta\varepsilon_{ap(20)}} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie:

$\Delta\varepsilon_{ap(600)}$ – zakres odkształcenia plastycznego w temperaturze $T_2 = 600^\circ\text{C}$,

$\Delta\varepsilon_{ap(20)}$ – zakres odkształcenia plastycznego w temperaturze $T_1 = 20^\circ\text{C}$.

Wzrost zakresu naprężeń $\delta_{\Delta\sigma}$ obliczano z analogicznej zależności, w której uwzględniono zakresy naprężeń $\Delta\sigma_a$. Największy wzrost zakresu odkształceń plastycznych w temperaturze 600°C występuje na poziomie $\varepsilon_{ac} = 0,25\%$ i wynosi prawie 130%. Najmniejszy wpływ temperatury na wzrost odkształceń plastycznych występuje na poziomie odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ ($\delta_{\Delta\varepsilon} = 30\%$). Na wszystkich poziomach odkształcenia w temperaturze $T = 600^\circ\text{C}$ zakres naprężenia $\Delta\sigma_a$ uległ obniżeniu o około 90% w stosunku do zakresu naprężenia

obserwowanego na tych samych poziomach odkształcenia w temperaturze otoczenia.

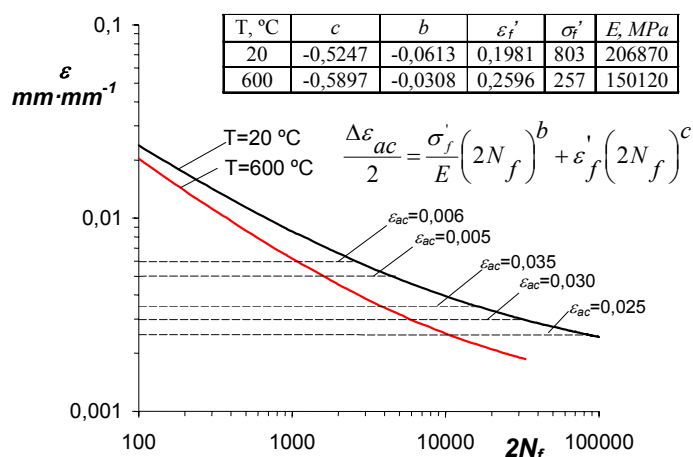
Podczas badań stwierdzono również istotny wpływ temperatury na trwałość zmęczeniową. Zgodnie z [5] wykresy zmęczeniowe w układzie bilogarytmicznym aproksymowano równaniem Mansona-Coffina-Basquina [1] o postaci:

$$\frac{\Delta \varepsilon_{ac}}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_{ae}}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_{ap}}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (3)$$

gdzie:

- b – wykładnik wytrzymałości zmęczeniowej,
- c – wykładnik cyklicznego odkształcenia,
- σ_f' – współczynnik wytrzymałości zmęczeniowej w MPa,
- ε_f' – współczynnik cyklicznego odkształcenia plastycznego,
- E – moduł Younga w MPa.

Ze względu na brak okresu stabilizacji występujące w równaniu (3) współczynniki i wykładniki określono dla parametrów pętli histerezy z połowy trwałości zmęczeniowej ($n/N = 0,5$). Wykresy zmęczeniowe uzyskane w wyniku aproksymacji równaniem (3) rezultatów badań zmęczeniowych prowadzonych w dwóch temperaturach przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Wykresy zmęczeniowe stali P91 w temperaturze 20°C i 600°C
Fig. 10. Fatigue diagrams of P91 steel at the temperature of 20°C and 600°C

Na podstawie przedstawionych wykresów można stwierdzić, że temperatura w sposób istotny wpływa na trwałość zmęczeniową. Jej wpływ zależy od poziomu amplitudy odkształcenia całkowitego. Wpływ ten jest niewielki w obszarze największych odkształceń ($\varepsilon_{ac} = 0,6\%$) i wzrasta w miarę obniżania poziomu odkształcenia. Zdecydowanie większy wpływ temperatury podwyższonej na trwałość zmęczeniową na najniższych poziomach odkształ-

cenia można uzasadnić istotnie większym wzrostem zakresu odkształcenia plastycznego na tych poziomach w temperaturze 600°C w stosunku do wzrostu zakresu odkształceń plastycznych na poziomach najwyższych (rys. 8b).

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że stal P91 jest materiałem, który podczas niskocyklowych badań zmęczeniowych, niezależnie od temperatury, podlega silnemu osłabieniu. Osłabienie stali występuje na wszystkich realizowanych poziomach odkształcenia. W przebiegu osłabienia można wyróżnić trzy charakterystyczne etapy o zróżnicowanej prędkości tego procesu. Niezależnie od poziomu odkształcenia występuje zawsze etap charakteryzujący się stałą prędkością osłabienia.

Temperatura podwyższona ma wpływ na podstawowe parametry pętli histerezy ($\Delta\epsilon_{ap}$, $\Delta\sigma_a$). Zakres odkształcenia $\Delta\epsilon_{ap}$ w temperaturze $T = 600^\circ\text{C}$ jest zawsze większy od zakresu odkształcenia w temperaturze otoczenia. Na wzrost zakresu odkształcenia $\Delta\epsilon_{ap}$ w temperaturze podwyższonej wpływ ma poziom odkształceń całkowitych ϵ_{ac} . Drugi parametr pętli ($\Delta\sigma_a$) w temperaturze podwyższonej jest zawsze mniejszy od jego wartości w temperaturze otoczenia. Wielkość obniżenia $\Delta\sigma_a$ w niewielkim stopniu zależy od poziomu odkształcenia.

Temperatura podwyższona ma wpływ na trwałość zmęczeniową. Wpływ temperatury na trwałość zmęczeniową zależy od poziomu odkształcenia. Jest on niewielki w obszarze bardzo dużych odkształceń ($\epsilon_{ac} = 0,6\%$) i wzrasta wraz z obniżeniem poziomu odkształcenia.

Podczas obciążenia zmiennego próbek ze stali 91 w temperaturze podwyższonej występują znacznie większe zmiany właściwości cyklicznych niż w temperaturze pokojowej. Powoduje to, że wątpliwości budzi prowadzenie obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych eksploatowanych w podwyższonych temperaturach przy wykorzystaniu danych materiałowych określonych np. połowie trwałości zmęczeniowej ($n/N = 0,5$). Dane te odzwierciedlają bowiem, jedynie chwilowe właściwości materiału. Większe zmiany właściwości cyklicznych w temperaturze podwyższonej mogą powodować znacznie większy rozrzut wyników uzyskanych z obliczeń i badań w stosunku rozrzutu wyników uzyskanych w temperaturze otoczenia.

Podczas eksploatacji obiektów technicznych w podwyższonych temperaturach występują interakcje związane z jednoczesnymi zmianami obciążenia oraz temperatury. Przedstawione w pracy badania prowadzone były w warunkach obciążeń stałoamplitudowych izotermicznych ($T = \text{const}$). W celu sformułowania wniosków szczegółowych dotyczących właściwości zmęczeniowych stali P91 dalsze prace powinny uwzględniać występowanie podczas badań zmian obciążenia i temperatury.

LITERATURA

- [1] COFFIN L.F.: A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal, Trans. ASME 76, 1954, 931-950.
- [2] FELTNER C.E., MORROW J.D.: Microplastic strain hysteresis energy as a criterion for fatigue fracture. Journal Basic Engineering ASSME, March, 1961, 15-22.
- [3] MROZIŃSKI S., SKOCKI R.: Softening of martensitic cast steel. CIMAC 6, 2011, 173-181.
- [4] MROZIŃSKI S., SKOCKI R.: The influence of temperature on the course of fatigue damage cumulation of P91 steel. Seventh International Conference on Low Cycle Fatigue LCF7, 2013, 57-62.
- [5] PN-84/H-04334 Badania niskocyklowego zmęczenia metali.

THE INFLUENCE OF ELEVATED TEMPERATURES ON THE CYCLIC PROPERTIES OF P91 STEEL

Summary: This paper deals with the issue of the elevated temperatures influence on cyclic properties of P91 steel. There were shown selected parts of research, namely low cycle tests results of P91 steel under constant amplitude loadings. Basing on these results analysis of the stress and strain amplitude course was carried out as a function of number of cycles.

Key words: fatigue strength, low cycle fatigue, cyclic properties of steel

Tomasz TOMASZEWSKI, Janusz SEMPRUCH

WYKORZYSTANIE MINIPRÓBEK DO WYZNACZANIA TRWAŁOŚCI I WYTRZYMAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH

Streszczenie: W pracy przedstawiono metodykę prowadzenia badań do wyznaczenia własności zmęczeniowych materiału z wykorzystaniem minipróbek. Sformułowano hipotezy badawcze i metodykę badań. Wyniki analizowano w zakresie wpływu efektu skali.

Słowa kluczowe: zmęczenie wysokocyklowe, minipróbka, krzywa σ_a-N

1. WPROWADZENIE

Eksploatowane elementy konstrukcyjne narażone są na zmęczeniowe pękanie powodowane obciążeniami zmiennymi w czasie. Proces jest na tyle złożony, a na jego przebieg wpływa tak wiele czynników, że nie występuje jeden model opisujący zachowanie się materiału poddanego obciążeniom cyklicznym. Proces zmęczenia opisywany jest najczęściej jako fenomenologiczny, w którym brak bezpośredniego odwołania do rzeczywistej struktury materiału i fizycznego opisu zachodzących w nim zmian [6].

Stosowanie nowych technologii produkcji elementów konstrukcyjnych generuje zapotrzebowanie na identyfikację ich własności zmęczeniowych. Z wielu przyczyn (m.in. narzucona geometria próbek) normatywne zalecenia prowadzenia badań ograniczają ich realizację. W pracy przedstawiono metodykę badań wykorzystującą próbkę niestandardową (próbka geometrycznie mniejszą od próbki normatywnej, tzw. minipróbka). Celowość jej wykorzystania wynika z zalet wynikających z jej geometrii.

Wykorzystanie minipróbek rozszerza zakres wyznaczenia własności cyklicznych materiału elementu konstrukcyjnego, którego wymiary ograniczają pobranie próbek do badań [8] (np. profile kształtowe produkowane ze stopu aluminium w procesie wyciskania materiału przez matrycę). W przypadku identyfikacji stopnia uszkodzenia obiektów eksploatowanych, niewielka objętość sprzyja pobraniu wymaganej liczbie próbek do realizacji pełnej próby zmęczeniowej. Minipróbki mogą być badane na niestandardowych maszynach wy-

mgr inż. Tomasz TOMASZEWSKI, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: tomaszewski@utp.edu.pl

prof. dr hab. inż. Janusz SEMPRUCH, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: semjan@utp.edu.pl

trzymałościowych o niewielkim zakresie stosowanych obciążeń. Prowadzi to do wykorzystania uproszczonych układów obciążających zmęczeniowo próbkę, jednocześnie obniżając wysokie koszty realizacji badań.

Ponadto, zastosowanie minipróbek wiąże się z ograniczeniami w zakresie ich kształtowania (typ obróbki, kształt geometrii), obciążeń (brak możliwości stosowania sił ściskających), implementacji wyników (uwzględnienie wrażliwości materiału na zmianę wielkości przekroju, asymetrię cyklu).

1.1. Hipotezy pracy

Zakładając, że w procesie weryfikacji nowych rozwiązań konstrukcyjnych, jak i rozwiązań już istniejących możliwym jest wystąpienie sytuacji braku dostępności materiału na wykonanie próbek normatywnych, celowym jest wówczas sformułowanie poniższych hipotez badawczych:

1. Możliwa jest weryfikacja własności zmęczeniowych materiału na podstawie metodyki badań geometrię próbek o mniejszych wymiarach od normatywnych. Przez metodykę badań rozumie się zdefiniowanie sposobu kształtowania i wykonywania próbki, zakresu możliwych do zastosowania obciążeń. Materiał próbki traktowany będzie jako zmienna niezależna programu badawczego.
2. Badania porównawcze wysokocyklowej trwałości zmęczeniowej, pomiędzy próbką normatywną a minipróbką, przeprowadzone dla wybranych grup materiałów mogą być podstawą określenia zakresów zastosowania dostępnych matematycznych modeli efektu skali.

W zakresie prowadzonych badań sformulowano hipotezę, której nie weryfikowano w pracy:

1. Istnieje grupa materiałów konstrukcyjnych, dla których wskazane wyżej relacje mają postać uproszczoną (niski poziom wrażliwości na efekt skali), a realizacja badań na minipróbkach wykonanych z tych materiałów jest szczególnie celowa z punktu widzenia kosztów badań, w tym sensie także dostępności badań. Celowym wówczas staje się rozszerzenie idei miniprobki również w przypadku dostępności materiału na próbki normatywne.

1.2. Cele pracy

Sprawdzenie przedstawionych hipotez badawczych możliwe będzie poprzez realizację celu głównego pracy:

- opracowanie oraz weryfikacja metodyki badań zmęczeniowych z wykorzystaniem minipróbki dla wybranych materiałów konstrukcyjnych.

Celami pozostałymi są:

- określenie wpływu efektu skali na wytrzymałość zmęczeniową i wytrzymałość na rozciąganie materiału dla danej grupy metali,
- projekt konstrukcji i wykonanie stanowiska do badań zmęczeniowych minipróbki w warunkach zmiennych obciążeń jednoosiowych,
- implementacja wybranych modeli obliczeniowych teorii efektu skali.

2. EFEKT SKALI W BADANIACH ZMĘCZENIOWYCH

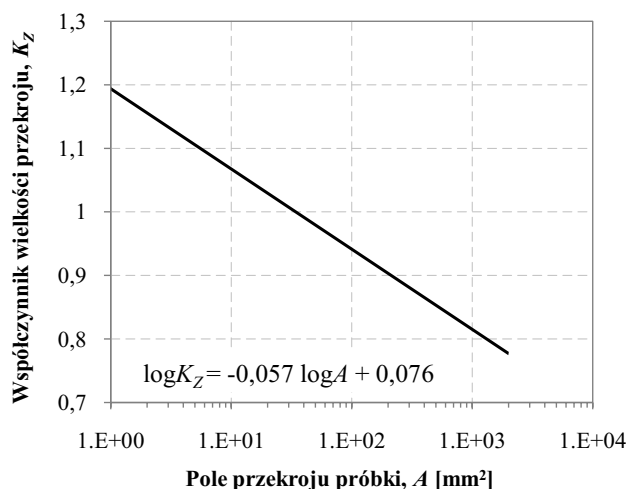
W przypadku metali wpływ na zmiany własności wytrzymałościowych (monotonicznych, cyklicznych) ma wielkość przekroju obiektu. Wielkość tej zmiany uzależniona jest od rodzaju i lokalnych cech (wielkości ziarna, mikro-pęknięć, wtrąceń, nieciągłości, dyslokacji, innych wad) badanego materiału. Przedstawione zjawisko nazywane jest efektem skali. Opisywane jest z wykorzystaniem modeli probabilistycznych. W większej objętości materiału wzrasta prawdopodobieństwo wystąpienia ognisk inicjujących zmęczeniowe pękanie [7]. Efekt można opisać za pomocą zależności:

$$K_Z = \frac{Z}{Z_n}, \quad K_{HC} = \frac{\sigma}{\sigma_n}, \quad K_S = \frac{R_m}{R_{mn}} \quad (1a, b, c)$$

gdzie:

- $Z/\sigma/R_m$ – granica zmęczenia/wytrzymałość zmęczeniową/wytrzymałość na rozciąganie próbki o dowolnym przekroju,
- $Z_n/\sigma_n/R_{mn}$ – granica zmęczenia/wytrzymałość zmęczeniową/wytrzymałość na rozciąganie próbki normatywnej (przekrój 20-80 mm²), przy zachowaniu tego samego materiału.

Efekt skali został udowodniony eksperymentalnie. Przykładem jest prosta opisująca zależność współczynnika wielkości przekroju K_Z od pola przekroju próbki A wyznaczona dla stopów aluminium (rys. 1.)



Rys. 1. Zależność współczynnika wielkości przekroju od pola przekroju dla stopów aluminium na podstawie [14]

Fig. 1. Relation between the coefficient of the cross-sectional size to cross-sectional area for aluminum alloys based on [14]

Uwzględnienie efektu skali ma wyjątkowe znaczenie w przypadku obiektów o dużych gabarytach. Większość badań wytrzymałościowych realizowana jest w warunkach laboratoryjnych na próbkach wykonanych zgodnie z normą.

Istnieje potrzeba ekstrapolacji dostępnych wyników do obiektów o innych wielkościach (obiekty rzeczywiste, próbki niestandardowe). W tym celu zostały zaproponowane matematyczne modele efektu skali.

3. MODELE EFEKTU SKALI

3.1. Teoria najsłabszego ogniwa

Teoria najsłabszego ogniwa została zaproponowana przez Weibulla. Bazuje na rozkładzie prawdopodobieństwa zniszczenia obiektu. Jest stosowana do opisu rozrzutu wyników własności metali w zakresie obciążeń cyklicznych [16]. Jednym z głównych założeń teorii jest statystyczne rozmieszczenie defektów w danej jednostce objętości materiału. Rozkład prawdopodobieństwa zniszczenia w postaci dwu parametrycznej przyjmuje postać:

$$P(N) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\log N}{\log N_0} \right)^m \right] \quad (2)$$

gdzie:

N_0 – referencyjna trwałość zmęczenia dla danego poziomu naprężenia,
 m – parametr kształtu rozkładu.

Dla próbek geometrycznie podobnych o jednakowych rozkładach naprężeń, równych wartościach prawdopodobieństwa zniszczenia i różnych polach przekroju można wprowadzić zależność:

$$\frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (3)$$

gdzie:

N_1 – trwałość zmęczenia dla próbki o znanym polu przekroju A_1 ,
 N_2 – trwałość zmęczenia dla próbki o szukanym polu przekroju A_2 .

3.2. Podejście fraktalne

Wrażliwość materiału na zmianę wielkości przekroju opisywana jest modelem fraktalnym w zakresie wytrzymałości na rozciąganie [2] i wytrzymałości zmęczeniowej [3]. Struktura materiału modelowana jest za pomocą fraktali. Nowe właściwości wytrzymałościowe materiału wyznaczane są z fizycznych wymiarów zależnych od wymiaru fraktalnego (wymiar niecałkowity).

Liniowe skalowanie fraktali opisano podejściem monofraktalnym, w którym wymiar fraktalny traktowany jest jako wartość stała. Jest ono poprawne w wąskim zakresie rozmiarów obiektu. Podejście jest stosowane do opisu efektu skali w zakresie zmęczenia wysokocyklowego. Bazuje na równaniu Basquina wyrażonego równaniem:

$$C = N(\sigma_a)^\beta \quad (4)$$

gdzie:

β – współczynnik kierunkowy nachylenia krzywej σ_a-N ,
 C – parametr stały.

Zakładając równoległe położenie wykresów σ_a-N dla próbek o różnym przekroju i zależności parametru stałej C od pola przekroju A , możliwa jest do wyprowadzenia zależność [3]:

$$C_B = C_A \left(\frac{A_A}{A_B} \right)^{-d \cdot \beta} \quad (5)$$

gdzie:

A_A, A_B – pola przekroju dla próbek geometrycznie podobnych przy założeniu $A_B > A_A$,
 C_A, C_B – parametry stałe krzywej σ_a-N ,
 $d \cdot \beta$ – iloczyn parametru d i współczynnika kierunkowego nachylenia krzywej σ_a-N .

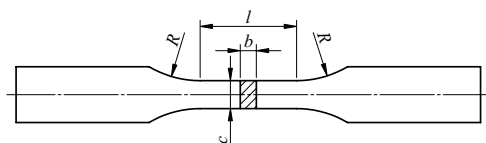
4. USTALENIE GEOMETRII PRÓBK

Realizacja próby zmęczeniowej powinna być wykonywana zgodnie z aktualnie obowiązującą normą, w której określono geometrię próbki, sposób jej pobierania i wykonywania, warunki obciążenia, zakres stosowanych częstotliwości, sprawozdanie wyników. W proponowanej metodyce zakres ingerencji w zmianę normatywnych warunków badań dotyczy wyłącznie geometrii próbek. Pozostałe warunki badań są zgodne z normami.

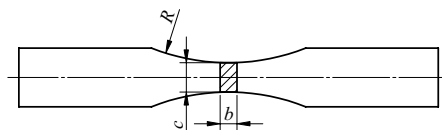
4.1. Normalizacja próbek

Wymiary gabarytowe i kształt próbek do badań zmęczeniowych jest zależny od warunków badań. Na rysunku 2 zamieszczono przykładową geometrię próbki płaskiej o stałym i zmiennym przekroju (według normy PN-74/H-04327 [9]).

a)



b)



b [mm]	c [mm]	l [mm]	$R = 2c$ [mm]
< 3	$10b$	$4b$	$20b$
$3 \div 5$	$5b$		$10b$
5	10		20
$7,5$	15		30
10	20		40

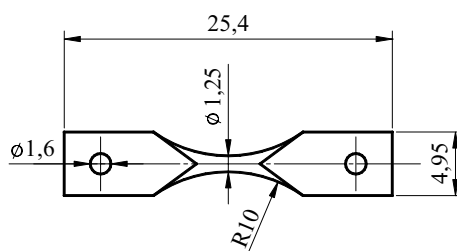
Rys. 2. Geometria próbki płaskiej: a) o stałym przekroju [9], b) o zmiennym przekroju [9]
 Fig. 2. Geometry flat specimens: a) of a fixed cross-section [9], b) of variable cross-section [9]

Normy definiują pole przekroju próbki wynikające z jego wymiarów (szerokość c , grubość b) i promień przejścia R . Określają ponadto sposób ich pobierania (obszar o jednorodnych parametrach struktury materiału i jednakowym ukie-

runkowaniu włókien), stałość parametrów obróbki, tolerancje wykonania, chropowatość powierzchni [10].

4.2. Badania zmęczeniowe z wykorzystaniem minipróbki

Minipróbki znalazły zastosowanie w badaniach eksperymentalnych materiałów konstrukcyjnych. Przykładem są badania pozwalające na wyznaczenie wytrzymałości gigacyklowej na stanowisku wykorzystującym ultradźwięki, gdzie częstotliwość zmiany obciążenia jest na poziomie 20 kHz [4]. Minipróbki są wykorzystywane do określenia wytrzymałości zmęczeniowej m.in. stali ferrytyczno-martenzytycznej, z której produkowane są osłony reaktorów jądrowych. Ich zastosowanie jest zasadne z uwagi na ograniczoną objętość promieniowania neutronowego badanego obiektu [5]. Geometrię próbki wykorzystanej w tych badaniach przedstawiono na rysunku 3. Próbki o małych gabarytach pobierano z połączenia spawanego, gdzie weryfikowano własności wytrzymałościowe poszczególnych stref złącza [1].



Rys. 3. Geometria minipróbki wykorzystanej w badaniach stali napromieniowanej [5]
Fig. 3. Geometry of mini specimen used in the tests for irradiated steel [5]

5. METODYKA BADAŃ WŁASNYCH

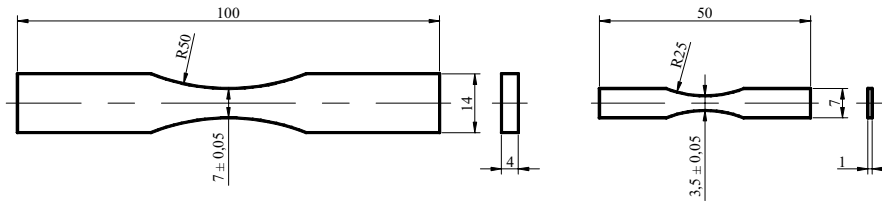
Weryfikacja przyjętych hipotez badawczych wymaga realizacji badań eksperymentalnych według zaproponowanej metodyki. Składa się na nią określenie materiału, geometrii badanych próbek, zakresu stosowanych obciążeń w zakresie wytrzymałości wysokocyklowej i stanowiska badawczego [14].

5.1. Materiał do badań

Badania realizowano, opierając się na materiale reprezentującym daną grupę metali. Wykorzystano stop aluminium EN AW-6063 T6, z którego produkowane są profile kształtowe o wymiarach uniemożliwiających pobranie próbki normatywnej.

5.2. Próbki

W ramach weryfikacji metodyki przeprowadzono badania zmęczeniowe dla geometrii próbki normatywnej i minipróbki. Przykładowe wymiary próbek przedstawiono na rysunku 4 [12].



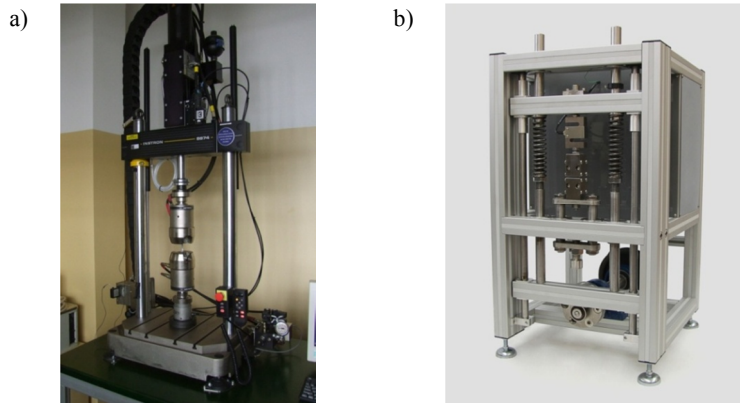
Rys. 4. Geometria próbki do badań zmęczeniowych: a) normatywna [9]; b) minipróbka [12]
Fig. 4. Specimen geometry for the fatigue tests: a) normative [9]; b) mini specimen [12]

5.3. Stosowane obciążenia

Próbki badano z kontrolowanym naprężeniem. Stosowano obciążenia w zakresie zmęczenia wysokocyklowego z określoną wartością naprężenia średniego (cykl symetryczny, jednostronny). Zastosowano cykl zmiany obciążenia ze składową rozciągającą w celu wyeliminowania wyboczenia się minipróbki.

5.4. Stanowiska badawcze

Badania przeprowadzono na serwohydraulicznej maszynie wytrzymałościowej Instron 8874 i stanowisku niestandardowym. Zastosowano w nim wymuszenie kinematyczne złożone z mimośrodru i układu podatnego (dwie równoległe sprężyny naciskowe). Wykorzystane stanowiska przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Stanowiska badawcze wykorzystane w badaniach: a) Instron 8874, b) własna konstrukcja
Fig. 5. Test stands used in the tests: a) Instron 8874, b) own stand

6. PRZYKŁADOWE WYNIKI BADAŃ WŁASNYCH

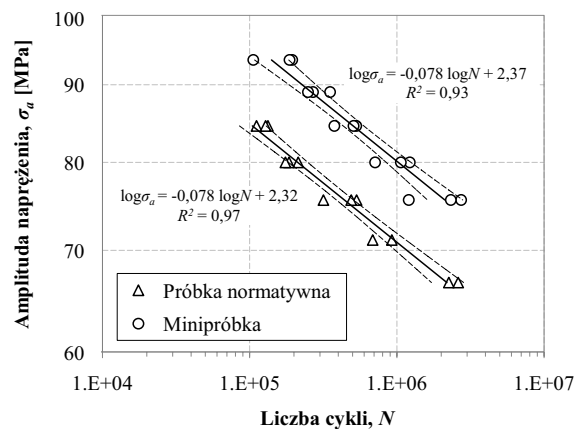
Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe wyniki badań zmęczeniowych dla dwóch różnych geometrii próbek wykonanych ze stopu aluminium EN AW-6063 T6. Punkty eksperymentalne opisano prostą regresji i przedziałem ufności. Uzyskana rozbieżność trwałości zmęczeniowych na danym poziomie wytrzymałości dla różnych geometrii próbek uwiaryściła wyraźny wpływ efektu

skali. Wyznaczono współczynnik wielkości przekroju w zakresie trwałości wysokocyklowej (równanie (1b) – $K_{HC} = 1,13$), który pokrywa się z prostą zamieszczoną na rysunku 1. Pochodzenie efektu skali dla próbek gładkich poddanych obciążeniom jednoosiowym jest klasyfikowane w ujęciu statystycznym. Szczegółowe analizy wyników w tym obszarze zamieszczono w pracy [11].

7. ANALIZA WYNIKÓW

Warunki badań minipróbki generują potrzebę analizy wpływu efektu skali i naprężenia średniego na wytrzymałość i trwałość zmęczeniową. W zakresie efektu skali weryfikowano wybrane modele efektu skali, a wyniki tych analiz zawarto w pracy [15]. Modele wykorzystano do analitycznego wyznaczenia wykresu σ_a-N dla próbki normatywnej na podstawie badań minipróbki. Najmniejsze błędy szacowania trwałości zmęczeniowej uzyskano na podstawie podejścia monofrakalnego [15].

Geometria minipróbki (wielkość przekroju, nieznaczna sztywność) charakteryzuje się niewielką odpornością na wyboczenie. Prowadzi to do konieczności stosowania obciążeń rozciągających ($R = \sigma_{min}/\sigma_{max} > 0$). Wytrzymałość i trwałość zmęczeniowa metali zależy od amplitudy naprężenia σ_a i naprężenia średniego σ_m . W celu oceny poprawności szacowania wykresu σ_a-N dla cykli symetrycznych ($R = -1$) wykonano analizy modeli wpływu naprężenia średniego, które zamieszczono w pracy [13].



Rys. 6. Krzywe σ_a-N wyznaczone dla stopu aluminium EN AW-6063 T6 [14]

Fig. 6. Curve σ_a-N obtained for the aluminum alloy EN AW-6063 T6 [14]

8. PODSUMOWANIE

Przytoczone wyniki badań eksperymentalnych umożliwią weryfikację hipotez badawczych w zakresie metodyki prowadzenia badań na minipróbkach i analizy matematycznych modeli efektu skali.

Trwałość i wytrzymałość zmęczeniowa minipróbki i próbki normatywnej wykonana z tego samego materiału jest inna. Efekt ten definiowany jest jako wrażliwością materiału na zmianę wielkości przekroju. Opis tej zależności realizowany jest z wykorzystaniem modeli efektu skali (np. teoria najsłabszego ogniwa, podejście monofrakalne).

Badania na minipróbkach zawężają zakres warunków badań. W celu uniknięcia wyboczenia się próbki stosowane są cykle ze składową permanentnie rozciągającą (jednostronne, $R > 0$). W celu oszacowania charakterystyki innej (np. $R = -1$) niż oczekiwana, wykorzystuje się modele wpływu naprężenia średniego.

Wyniki badań eksperymentalnych na minipróbkach potwierdzają hipotezę o możliwości stosowania metodyki badań w zakresie obciążeń jednoosiowych dla wybranych materiałów konstrukcyjnych. W przypadku potrzeby otrzymania wyników o charakterze materiałowym niezbędnym jest uwzględnienie wpływu efektu skali i naprężenia średniego.

LITERATURA

- [1] Çam G., Erim S., Yeni., Koçak M.: Determination of mechanical and fracture properties of laser beam welded steel joints. *Welding Journal*, 1999, 193-201.
- [2] Carpinteri A., Chiaia B.: Multifractal scaling laws in the breaking behavior of disordered materials. *Chaos, Solitons & Fractals* 8(3), 1997, 135-150.
- [3] Carpinteri A., Spagnoli A.: Size effect in S-N curves. A fractal approach to finite-life fatigue strength. *International Journal of Fatigue* 31, 2009, 927-933.
- [4] Furuya Y.: Notable size effects on very high cycle fatigue properties of high-strength steel. *Materials Science and Engineering, A* 528, 2011, 5234-5240.
- [5] Hirose T., Tanigawa H., Ando M., Suzuki T., Kohyama A., Katoh Y., Narui M.: Evaluation of creep fatigue properties with miniature hourglass specimen. *Small Specimen Test Techniques. Fourth Volume*, 2002, 181-194.
- [6] Kocańda S.: Zmęczeniowe pękanie metali. WNT Warszawa, 1985.
- [7] Kocańda S., Szala J.: Podstawy obliczeń zmęczeniowych. PWN Warszawa, 1997.
- [8] Lord J., Orkney L., Roebuck B. Validation of a miniature tensile strength measurement system. *Small Specimen Test Techniques. Fourth Volume. Journal of ASTM International* 2002, 234-250.
- [9] PN-74/H-04327, Badanie metali na zmęczenie. Próba osiowego rozciągania – ściskania przy stałym cyklu obciążeń zewnętrznych.
- [10] PN-76/H-04325, Badania metali na zmęczenie – Pojęcia podstawowe i ogólne wytyczne przygotowania próbek oraz przeprowadzenia prób.
- [11] Tomaszewski T., Sempruch J.: Analysis of size effect in high-cycle fatigue for EN AW-6063, *Solid State Phenomena* 224, 2015, 75-80.
- [12] Tomaszewski T., Sempruch J.: Determination of the fatigue properties of aluminum alloy using mini specimen. *Material Science Forum* 726, 2012, 63-68.
- [13] Tomaszewski T., Sempruch J.: Practical implementation of selected mean stress models for results of fatigue tests realized for mini specimen. *Engineering Mechanics*, 2014, 664-667.
- [14] Tomaszewski T., Sempruch J.: Verification of the fatigue test method applied with the use of mini specimen. *Key Engineering Materials* 598, 2014, 243-248.
- [15] Tomaszewski T., Sempruch J., Piątkowski T.: Verification of selected models of size effect based on high-cycle fatigue testing on mini specimens made of EN AW-6063 aluminum alloy. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 52(4), 2014, 883-894.

- [16] Weibull W.: A statistical representation of fatigue failures in solids, Transaction of the Royal Institute of Technology 27, 1949.

USE OF MINI SPECIMENS FOR DETERMINING THE FATIGUE STRENGTH AND FATIGUE LIFE OF STRUCTURAL MATERIALS

Summary: This paper presents the research methodology for determining the fatigue properties of the material with the use of mini specimens. The hypotheses and research methodology were formulated. The results of size effect were analyzed.

Key words: high-cycle fatigue, mini specimen, σ_a - N curve

Mateusz WIRWICKI, Tomasz TOPOLIŃSKI

OCENA TRWAŁOŚCI I WYTRZYMAŁOŚCI POŁĄCZENIA ZĄB – DWUTLENEK CYRKONU

Streszczenie: Lekarz stomatolog podczas wykonywania zabiegów musi rozwiązywać problemy funkcjonalne i estetyczne. Pojawiają się również przeszkody związane z oceną wytrzymałości i trwałości połączeń klejonych w jamie ustnej pacjenta. W pracy opisana została technologia wykonania próbek z dwutlenku cyrkonu, metody badawcze oraz stanowisko do badań. Przedstawiono wyniki badań dla statycznego i zmęczeniowego trzypunktowego zginania. Przedmiotem przedstawionych badań jest określenie trwałości i wytrzymałości połączenia klejonego zęb – dwutlenek cyrkonu.

Słowa kluczowe: dwutlenek cyrkonu, badania wytrzymałościowe, połączenia klejowe

1. GENEZA

Dzięki najnowszym materiałom pacjent ma poczucie, że ząb wypełniany zachowuje się jak ząb naturalny. Istnieją możliwości odbudowy zęba na korzeniu, gdzie nie ma możliwości doklejenia korony. Pojawiła się również możliwość osadzenia implantu na kości żuchwowej. Każdy z zabiegów wyżej opisanych ma swoje problemy w zakresie odbudowy funkcjonalnej i estetycznej. Są również niejednoznaczności związane z oceną wytrzymałości i trwałości powyższych zabiegów, w tym także w odniesieniu do połączenia klejowego z koroną pełnoceramiczną. Problem ten dotyczy zatem również ukształtowania połączenia pomiędzy koroną a zębem przy braku kryteriów oceny cech konstrukcyjnych tego połączenia. Stąd zainteresowanie i aktualność tej problematyki.

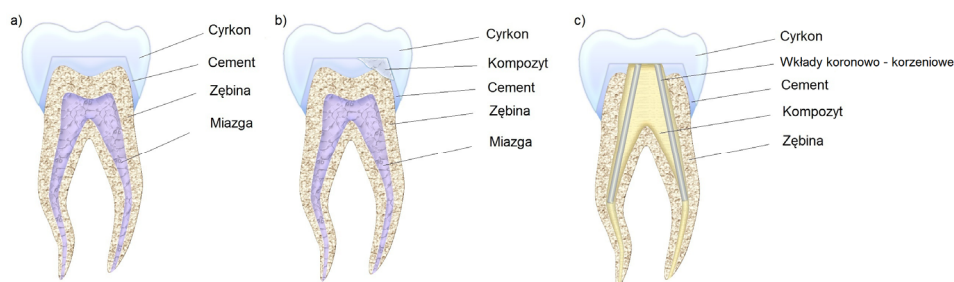
Temat, jak i problem badawczy, został sformułowany przy udziale pracowników kliniki stomatologicznej DENmed z Torunia, która zajmuje się implantologią oraz wykorzystywaniem najnowocześniejszych rozwiązań dla stomatologii. Lekarze stomatolodzy mocują implanty, mosty oraz korony wykonane z jednego z materiałów, jakim jest dwutlenek cyrkonu. Materiał ten jest stosunkowo nowy na rynku – pierwsze mocowanie korony z dwutlenku cyrkonu przypada na lata 90. ubiegłego wieku. Wraz z lekarzami stomatologami z kliniki DENmed zauważono problem klejenia korony cyrkonowej do wcześniej przygotowanej podbudowy z zęba naturalnego.

mgr inż. Mateusz WIRWICKI, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: wirwicki@utp.edu.pl
prof. dr hab. inż. Tomasz TOPOLIŃSKI, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: tomasz.topolinski@utp.edu.pl

Na rynku stomatologicznym można znaleźć różne rodzaje oraz różne generacje substancji klejowych tworzących połączenia między zębem a koroną cyrkonową. Wszystkie produkty, według producentów, wykazują wysoką wytrzymałość i trwałość uzyskiwanego połączenia. W rzeczywistości jednak, z uwagi na trudności w kształtowaniu geometrii połączenia, należy się spodziewać niższych własności mechanicznych niektórych z tych połączeń, a cena ich niekoniecznie odzwierciedla poziom tych własności. Wyniki przeprowadzonych badań mają ułatwić lekarzom stomatologom lepszy dobór materiałów – zestawu klej oraz korony zęba – dwutlenku cyrkonu. Mogą one także w znaczący sposób ograniczyć koszty przeprowadzonego zabiegu doklejania korony, a tym samym zwiększyć dostępność do nowych technologii w protetyce stomatologicznej. Wynikiem pracy będzie również, przy współpracy lekarzy stomatologów, opracowanie bardziej wydajnej technologii przygotowania powierzchni klejonych oraz bardziej świadomego prowadzenia procesu klejenia koron wykonanych z dwutlenku cyrkonu [7].

W pracach [2, 4, 6] przedstawiono badania wytrzymałości trzypunktowego zginania ceramiki stomatologicznych. Analiza przeglądu literaturowego pozwala wnioskować, że badania ceramiki stomatologicznych prowadzone są w środowisku ciekłym i suchym. Bardzo duży wpływ na wytrzymałość ceramiki ma sposób obróbki próbek wykorzystywanych do badań monotonicznych i zmęczeniowych. W publikacjach przedstawiono badania kilku najczęściej wykorzystywanych ceramiki przez lekarzy stomatologów. Otrzymane wyniki badań poddane zostały analizie rozkładu Weibulla.

Dzięki współpracy z lekarzami stomatologami udało się wyróżnić trzy najbardziej prawdopodobne stany zębów w jamie ustnej, z jakimi lekarz stomatolog styka się podczas klejenia korony zębowej do podbudowy (rys 1.) – a) ząb z doklejoną koroną cyrkonową, b) ząb z wypełnieniem ubytków, c) ząb po leczeniu kanałowym.



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie zęba w przekroju z: a) doklejoną koroną cyrkonową, b) z wypełnieniem ubytków, c) po leczeniu kanałowym

Fig. 1. Schematic shown of teeth: a) glued zirconium crown, b) filled voids, c) after root canal treatment

2. PODMIOT BADAŃ

Podmiotem badań jest trwałość i wytrzymałość połączenia klejonego między zębem naturalnym a koroną wykonaną z dwutlenku cyrkonu.

3. WSTĘPNE HIPOTEZY BADAWCZE

Elementami decydującymi o jakości zespolenia zęba z materiałami rekonstrukcyjnymi są: technologia połączenia klejowego, w tym własności i generacja kleju stomatologicznego, zestaw materiałów rekonstrukcyjnych i ukształtowanie połączenia.

Istnieje zespół cech konstrukcyjnych połączenia korona-zęb umożliwiający osiągnięcie wymaganej cechami użytkowymi wytrzymałości i trwałości tego połączenia w jamie ustnej.

4. CELE PRACY

Celem pracy jest opracowanie metodyki badań zmęczeniowych dla połączenia klejonego między zębem naturalnym, a koroną wykonaną z dwutlenku cyrkonu. Ponadto celami są:

- badanie dwutlenku cyrkonu firmy 3M ESPE o nazwie handlowej LAVA w postaci wykorzystywanej przez stomatologów,
- badanie zjawisk zachodzących w materiale podczas przenoszenia obciążeń roboczych, określenie charakterystyki zjawiska o nazwie „wzmocnianiem się materiału”,
- badania kleju firmy 3M ESPE o nazwie handlowej RelyX U200.

5. METODY BADAWCZE

Rozwiązanie wyżej wymienionego problemu badawczego wymaga realizacji badań eksperymentalnych, według zaproponowanej metodyki, w skład której wchodzi określenie:

- materiału próbki,
- wytrzymałości materiału,
- geometrii badanych próbek.

6. MATERIAŁ DO BADAŃ

Badanym materiałem jest Cyrkon Lava firmy 3M ESPE, z którego można wykonać:

- pojedyncze korony,
- 3 punktowe mosty,
- 4 punktowe mosty,
- łączniki implantów.

Zaletą tego materiału jest:

- wysoka wytrzymałość,
- doskonała i naturalna estetyka,
- biogodność,
- brak zawartości metali w swojej strukturze.

Poniżej przedstawiono tabelę, w której zostały umieszczone najczęściej wykorzystywane materiały ceramiczne w stomatologii. Warto zaznaczyć, że materiały znajdujące się w tabeli, poza dwutlenkiem cyrkonu, muszą być umieszczane – napawane na podbudowach metalowych, a dopiero tak przygotowane korony, mosty doklejane do podbudowy zęba naturalnego.

Tabela 1. Właściwości mechaniczne wybranych ceramiek dentystycznych w tym dwutlenku cyrkonu
Table 1. Mechanical properties of ceramic with zirconium dioxide

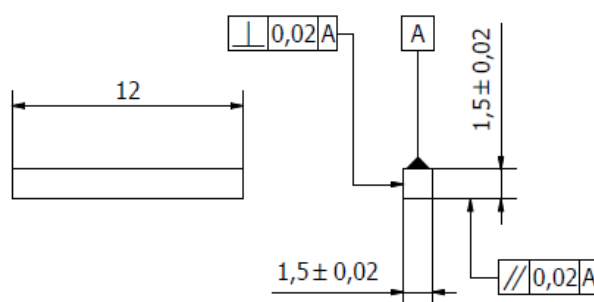
Ceramika	Wytrzymałość na zginanie [MPa]	Twardość Vickersa [GPa]	Gęstość [g·cm ⁻³]
Wzmocniona miką	71-107	3,72-4,46	2,56
Wzmocniona leucytem	109-154	6,57-6,67	2,50
Trójtlenek aluminium	601-687	15	2,47
Dwutlenek cyrkonu	840-1200	12,17-13,70	5,56-6,1

7. PRÓBKİ

Obróbka materiału, jakim jest dwutlenek cyrkonu jest bardzo złożona. W laboratoriach i centrach frezowania materiałów stomatologicznych znajdujących się przy większych placówkach i klinikach stomatologicznych odbywa się to etapami. Na samym początku od pacjenta pobiera się odcisk łuku zębowego górnego lub dolnego. Uzyskany odcisk za pomocą specjalnego skanera 3D skanuje się, następnie frezarka frezuje zeskanowany wcześniej odcisk. Sam proces frezowania odbywa się w bloczku cyrkonu, który jest wstępnie synteryzowany, czyli wstępnie utwardzony. Otrzymaną np. koronę należy utwardzić poprzez wypalenie jej w specjalnym piecu w temperaturze 1410°C przez 8 godzin. W tym momencie następuje skurcz technologiczny całej korony wynoszący około 20% objętości korony [8]. Materiał po wypaleniu jest śnieżno biały, ostatnim etapem jest dopasowanie kolorytu korony do kolorytu zębów naturalnych w jamie ustnej, czyli napawanie porcelany lub potocznie mówiąc nakładanie szkliwa na sztuczną koronę.

Wykonanie próbek do badań było kluczowym elementem przeprowadzenia badań wytrzymałościowych dwutlenku cyrkonu. Dzięki współpracy z firmą Marrodent jednym z liderów zaopatrzenia na rynku stomatologicznym, udało się pozyskać materiał zwany Cyrkonem LAVA firmy 3M ESPE. Materiał był wstępnie synteryzowany – utwardzony w kształcie prostopadłościanu o wymiarach 18 mm × 26 mm × 60 mm. Została wypracowana technologia obróbki materiału, w której bloczek został docięty za pomocą piły tarczowej ISOMET 5000 na mniejsze plastry o grubości 1,8 mm. Tak przygotowane ele-

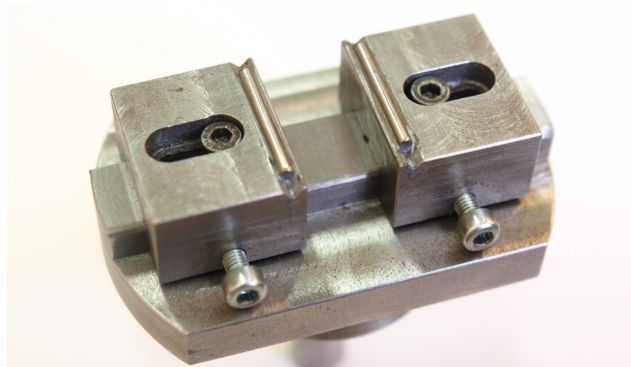
menty cięto dalej laserem Alfalas WS przy ustawieniach lasera niepozwalających przegrzać dwutlenku cyrkonu. Z takiego cięcia uzyskuje się około 8 próbek o wymiarach $1,8 \text{ mm} \times 1,8 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$. Próbkę te zostają na końcu wypalane w certyfikowanym przez producenta laboratorium – dokonuje się w ten sposób pełna synteryzacja. Po tym procesie uzyskuje się próbki do badań o wymiarach około $1,5 \text{ mm} \times 1,5 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ [10]. Geometrię, wymiary i ich odchylenia badanych próbek przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Geometria badanych próbek [10]
Fig. 2. Geometry of tested specimen

8. STANOWISKO BADAWCZE

Badania eksperymentalne przy obciążeniach monotonicznych, jak i zmęczeniowych przeprowadzono na serwohydraulicznej maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8874 z wykorzystaniem siłomierza tensometrycznego o wartości maksymalnej 5 kN. Na potrzeby badań wykonano uchwyt do trzy- i czteropunktowego zginania, który przedstawiono na rysunku 3. Uchwyt pozwala badać próbki o długości w zakresie od 10 mm do 35 mm.



Rys. 3. Uchwyt do trzy- i czteropunktowego zginania
Fig. 3. Handle of three and four point bending

9. WYNIKI BADAŃ

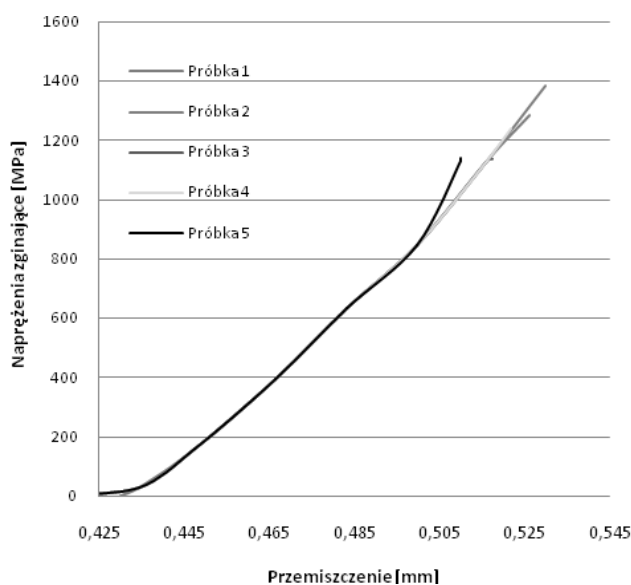
Statyczne trzypunktowe zginanie

Do badań przeprowadzonych zgodnie z normą PN-EN 843-1 zostały wybrane specjalnie wyselekcjonowane (sprawdzone pod mikroskopem stereoskopowym) próbki po to, aby wyeliminować wszystkie niedokładności spowodowane obróbką laserową, np. nieznaczne lokalne przepalenia, odłamania krawędzi próbek itp. Badane elementy zostały pomierzone w trzech miejscach pod względem szerokości i wysokości. Wyniki tych pomiarów, dla 5 próbek przewidzianych do monotonicznego zginania, w postaci średniej wartości wskaźnika wytrzymałości przekroju na zginanie (pomiar w trzech przekrojach) przedstawiono w kolumnie 2. tabeli 2. Wykresy zginania tych próbek przedstawiono na rysunku 4. W kolumnie 3. tabeli 2 zestawiono maksymalne obciążenia próbek w momencie ich pęknięcia, natomiast w kolumnie 4. odpowiadające im maksymalne naprężenia zginające.

Tabela 2. Przedstawienie wyników badań [10]

Table 2. Presentation of research results

Lp.	Wskaźnik wytrzymałości przekroju na zginanie [mm ³]	Wartość siły niszczącej [N]	Wartość naprężenia niszczącego [MPa]
1	0,4903	271	1381,5
2	0,5078	261	1284,9
3	0,4975	226	1135,4
4	0,4805	238	1238,1
5	0,4906	224	1141,3



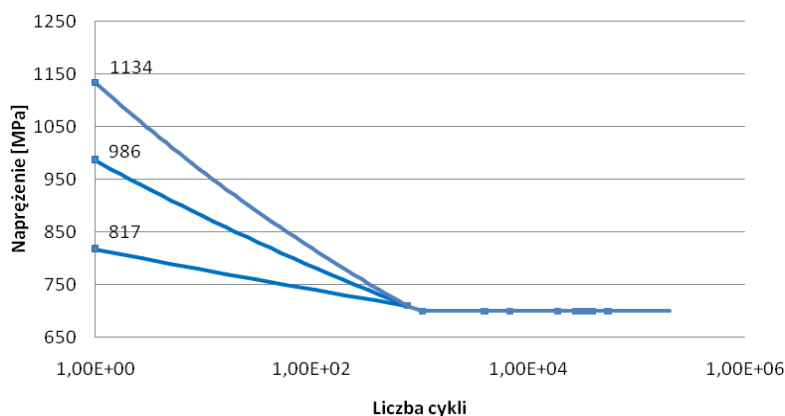
Rys. 4. Wykres naprężeń dla trzypunktowego zginania [10]

Fig. 4. Graph of stress for three point bending

Badanie zmęczeniowe dla trzypunktowego zginania

Badanie zmęczeniowe trzypunktowego zginania zostało wykonane, jak poprzednio, przy obciążeniu zadawanym zgodnie z normą PN-EN 843-1. Wykorzystano wcześniej wyselekcjonowane próbki. Przyjęto cykl sinusoidalny jednostronny ujemny o wartości współczynnika asymetrii cyklu $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 0,1$ i częstotliwości zmiany obciążenia wynoszącej 5 Hz. Przegląd literaturo- wy pozwolił założyć przedział 700-710 MPa jako wartość graniczną wytrzyma- łości na zginanie podczas badań zmęczeniowych [1, 3]. Do badań wykorzystano 30 próbek, które badano do całkowitego zniszczenia. Geometria próbek przed- stawiona została wcześniej na rysunku 2.

Na rysunku 5 przedstawiono wykres zmęczeniowy uzyskany dla badanego dwutlenku cyrkonu. Na wykresie przyjęto jako jego wartości początkowe 1134 MPa, 986 MPa, 817 MPa, które odpowiadają maksymalnej, średniej oraz mini- malnej wartości naprężeń niszczących otrzymanych z statycznych badań trzy- punktowego zginania. Jest to zgodne z metodyką opracowania wykresu zmęcze- niowego zaproponowanego w literaturze [5]. Na rysunku 4 przedstawiono trzy wykresy zmęczeniowe z wartościami początkowymi wziętymi z badań statycz- nych – minimalnym, średnim i maksymalnym naprężeniem niszczącym [9].



Rys. 5. Krzywa S-N dwutlenku cyrkonu [11]

Fig. 5. S-N curve zirconium dioxide

10. PODSUMOWANIE

Dwutlenek cyrkonu jest jednym z najbardziej obiecujących materiałów wykorzystywanych w protetyce dentystycznej. Spowodowane jest to kilkoma czynnikami: łatwą obróbką, wysoką biogodnością oraz, jak to wskazują bada- nia statycznego trzypunktowego zginania, znaczną wartością naprężeń niszczą- cych wynoszącą średnio 1236 MPa. Autorzy zaproponowali metodę obróbki materiału przed syntetyzacją, co umożliwiło otrzymanie próbek w stadium koń- cowym o relatywnie nieznacznym rozrzucie wymiarów. Warto podkreślić, że o rozrzucie tym decyduje także skurcz materiału przy synteryzacji, który waha

się od 19%-23% [8], a w naszym przypadku średnio wynosił około 21%. W konsekwencji w przeprowadzonych badaniach wytrzymałościowych statycznych i zmęczeniowych dla trzypunktowego zginania uzyskano wyniki o relatywnie niewielkim rozrzucie. W ogólności trzeba uznać, że dwutlenek cyrkonu jest trudnym materiałem do badań. W tabeli 2 przedstawione zostały wybrane wyniki dla statycznej próby trzypunktowego zginania, z których analizy można stwierdzić, że materiał wykazuje bardzo dużą wytrzymałość wynoszącą średnio 1236 MPa. Kolejnym aspektem jest rozrzut wskaźnika wytrzymałości na zginanie. Spowodowany jest on skurczem materiału wynoszącym średnio 21%. Można zauważyć liniowość wykresu, co w przypadku tego kruchego materiału nie jest zaskakujące. Na wykresie zmęczeniowym (rys. 4) przedstawiono wyniki badań dla wartości naprężeń 700 i 710 MPa, dla których uzyskany zakres zmian trwałości to 7×10^2 do 2×10^5 cykli. Wyższe naprężenia dawały nieduże trwałości. Wykres ten uzupełniono o trzy wartości początkowe wzięte z badań statycznych: maksymalną, średnią i minimalną wytrzymałość dla $n = 1/4$ cyklu, aby w lepszy sposób zobrazować, w jakich przedziałach naprężeń materiał jest w stanie pracować [11].

LITERATURA

- [1] ATTIA A., ABDELAZIZ K.M., FREITAG S., KERN M.: Fracture load of composite resin and feldspathic all-ceramic CAD/CAM crowns. *J Prosthet Dent* 95(2), 2006, 117-123.
- [2] MARRELLI M., MALETTA C., INCHINGOLO F., ALFANO M., TATULLO M., 2013. Three-point bending tests of zirconia core/veneer ceramics for dental restorations. *Int. J. Dent.*, 2013, 831976.
- [3] POITEVIN A., de MUNCK J., CARDOSO M.V., MINE A., PEUMANS M., LAMBRECHTS P., van MEERBEEK B.: Dynamic versus static bond-strength testing of adhesive interfaces. *Dental Materials* 26, 2010, 1068-1076.
- [4] SCHERRER S.S., CATTANI-LORENTE M., VITTECOQ E., de MESTRAL F., a GRIGGS J., WISKOTT H.W.A.: Fatigue behavior in water of Y-TZP zirconia ceramics after abrasion with 30 μ m silica-coated alumina particles. *Dent. Mater.* 27(2), 2011, 28-42.
- [5] STUDART A., FILSER F., KOCHER P., GAUCKLER J.: In vitro lifetime of dental ceramics under cyclic loading in water. *Biomaterials* 28, 2007, 2695-2705.
- [6] STUDART A.R., FILSER F., KOCHER P., GAUCKLER L.J.: Fatigue of zirconia under cyclic loading in water and its implications for the design of dental bridges. *Dent. Mater.* 23(1), 2007, 106-114.
- [7] WIRWICKI M., TOPOLIŃSKI T.: Methodology of fatigue tests for glued dental samples. *Journal of Polish CIMAC*, 6(3), 2011, 355-364.
- [8] WIRWICKI M., TOPOLIŃSKI T.: Preliminary testing of zirconium dioxide – a comparison of selected dental ceramic. 29th Danubia – Adria Symposium, Belgrad, Serbia 2012, 26-29.
- [9] WIRWICKI M., TOPOLIŃSKI T.: Zirconium dioxide as a biomaterial; the microstructure. *Journal of Polish Cimac, Selected problems of designing and operating technical systems*, Gdańsk 7(3), 2012, 369-372.
- [10] WIRWICKI M., TOPOLIŃSKI T.: Trzypunktowe zginanie dwutlenku cyrkonu. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 2(52), 2013, 125-126.
- [11] WIRWICKI M., TOPOLIŃSKI T.: Determining the S-N fatigue Curve for lava zirconium dioxide. *Advanced Materials Research* 845, 2014, 153-157.

EVALUATION OF DURABILITY AND STRENGTH GLUED CONNECTION TOOTH – ZIRCONIUM DIOXIDE

Summary: Dentists need to deal with functional and aesthetic problems during dental procedures. Dentists also meet obstacles during the assessment of the strength and durability of bonded joints in the patient's mouth. The article presents material that is most commonly used in dental clinics. Technology of zirconia samples, test methods and test stand has been described in this article. The article shows results of studies for static and fatigue three-point bending. The subject of this study is determination of the durability and strength of the glued connection tooth-zirconium dioxide.

Key words: Zirconium Dioxide, strength test, adhesive joints

Lista recenzentów prac opublikowanych w numerach 3(2) 2014 oraz 4(2) 2014
Reviewers list publication published in issues 3(2) 2014 and 4(2) 2014

1. Marek BIELIŃSKI	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz
2. Zdzisław BOGDANOWICZ	Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa
3. Jacek DŁUGOSZ	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz
4. Józef FLIZIKOWSKI	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz
5. Irena GOŁĘBIEWSKA	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz
6. Aleksander KAROLCZUK	Politechnika Opolska, Opole
7. Andrzej KOCĄDA	Politechnika Warszawska, Warszawa
8. Bogdan LIGAJ	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz
9. Marek MACKO	Uniwersytet Kazimierza Wielkiego, Bydgoszcz
10. Monika MADEJ	Politechnika Świętokrzyska, Kielce
11. Maciej MATUSZEWSKI	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz
12. Grzegorz MILEWSKI	Politechnika Krakowska, Kraków
13. Jerzy OKRAJNI	Politechnika Śląska, Gliwice
14. Tomasz PIĄTKOWSKI	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz
15. Paweł PYRZANOWSKI	Politechnika Warszawska, Warszawa
16. Norbert RADEK	Politechnika Świętokrzyska, Kielce
17. Dariusz ROZUMEK	Politechnika Opolska, Opole
18. Šefan SEGLA	Technical University of Košice, Košice
19. Maciej WOROPAY	Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa