

Czasopismo Naukowo-Techniczne
Wydziału Inżynierii Mechanicznej
Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy

Scientific-Technical Journal of
Mechanical Engineering Faculty of
UTP University of Science and Technology in Bydgoszcz



POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ

DEVELOPMENTS
IN MECHANICAL
ENGINEERING

13(7)
2019

Wydawnictwa Uczelniane
Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
w Bydgoszczy



ZESPÓŁ REDAKCYJNY **EDITORIAL BOARD**

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

Redaktorzy Działowi – Branch editors:

Eksploatacja Maszyn <i>Machine Operating and Maintenance</i>	Bogdan LANDOWSKI
Inżynieria Biomedyczna <i>Biomedical Engineering</i>	Adam MAZURKIEWICZ
Inżynieria Produkcji <i>Production Engineering</i>	Marek SZCZUTKOWSKI
Mechanika i Konstrukcja Maszyn <i>Mechanics and Machinery Design</i>	Janusz ZACHWIEJA
Maszyny i urządzenia energetyczne <i>Machines and energetic devices</i>	Marcin ZASTEMPOWSKI
Transport – <i>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)	Jurek DUSZCZYK (NL)
Friedrich FRANEK (A)	Andrzej GOŁABCZAK (PL – PL)
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)
Holger SEIDLITZ (D)	Vasily S. SHEVCHENKO (BL)
Mirosław Jan SKIBNIEWSKI (USA)	Marian SZCZEREK (PL – ITE PIB)
Zdeněk TRÁVNÍČEK (CZ)	

Opracowanie redakcyjne i techniczne – mgr Dorota Ślachciak, mgr Patrycja Fereni-Morzyńska

Projekt okładki – mgr inż. Daniel Morzyński

© Copyright

Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz 2019

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.

Praca powstała przy wsparciu projektu „Realizacja II etapu regionalnego Centrum Innowacyjności” współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Kujawsko-Pomorskiego na lata 2007-2013

ISSN 2300-3383

Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego

Redaktor Naczelny: prof. dr hab. inż. Józef Flizikowski
ul. Sucha 9B, 85-796 Bydgoszcz, tel. 52 3749482, 52 3749426
e-mail: wydawucz@utp.edu.pl <http://www.wu.utp.edu.pl>

Wyd. I. Nakład 40 egz. Ark. aut. 4, l. Ark. druk. 5, l.
Zakład Małej Poligrafii UTP Bydgoszcz, ul. Sucha 9B

SPIS TREŚCI

CONTENTS

Mateusz Gorzejewski, Marietta Markiewicz	
Analiza wpływu oddziaływania systemu ABS na drogę hamowania	5
Analysis of the impact of the ABS system on the braking distance	
Julia Hernet	
Ilościowe oznaczanie dodecylosiarczanu sodu zmodyfikowaną	
metodą miareczkowania fotometrycznego	13
The quantitative determination of sodium dodecyl sulphate	
by modified photometric titration method	
Maciej Kotyk, Krzysztof Kowalicki, Andrzej Skibicki	
Analiza twardości zgrzewanego wybuchowo materiału warstwowego	
Al – Ti oraz jego materiałów bazowych	25
Analysis of hardness of explosionally welded Al – Ti layer material	
and its base materials	
Jarosław Robert Mikołajczyk	
Influence of consumables on the amount of power consumption	
of kinematic vapor of conformal contact	39
Wpływ PE na pobór mocy pary kinematycznej o styku konforemnym	
Jarosław Robert Mikołajczyk	
Statistical analysis of the mass variation of samples as a result	
of the wear process	51
Analiza statystyczna zmiany masy próbek w wyniku procesu	
zużywania	
Emil Smyk, Wojciech Szmyt, Dariusz Mrozik	
Zawór osiowosymetryczny wykorzystujący strumienie	
syntetyzowane	63
Axisymmetric valve used synthetic jets	
Wojciech Ziółkowski, Maciej Kotyk, Paweł Maćkowiak	
Wpływ grubości elementów łączonych na wytrzymałość	
zakładkowego połączenia klejonego	73
The influence of joined elements thickness on the strength	
of a plastic glue joint	

Mateusz GORZEJEWSKI¹, Marietta MARKIEWICZ²

ANALIZA WPLYWU ODDZIAŁYWANIA SYSTEMU ABS NA DROGĘ HAMOWANIA

Streszczenie: Każdego roku zwiększa się liczba pojazdów poruszających się po drogach. Produkowane samochody osiągają coraz większą moc znamionową, przy coraz mniejszej masie oraz pojemności silnika. W niniejszym opracowaniu prowadzone badania dotyczyły pomiaru drogi hamowania pojazdów, które podzielone zostały na dwie grupy: z systemem ABS oraz nieposiadające systemu ABS. Celem badań było określenie wpływu działania systemu wspomagającego proces hamowania pojazdów na różnego rodzaju nawierzchniach, z uwzględnieniem rodzaju ogumienia, zmiennej prędkości jazdy oraz różnych warunków atmosferycznych. Analizując uzyskane wyniki badań, jednoznacznie można stwierdzić, że wyposażenie pojazdu w system ABS przynosi pożądane korzyści i zwiększa bezpieczeństwo jazdy.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo czynne, hamowanie, droga hamowania, system ABS, samochód

1. WPROWADZENIE

Układ hamulcowy jest jednym z najważniejszych układów pojazdu i ma bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo w ruchu drogowym. Prawidłowo działający układ zapewnia kontrolę prędkości oraz prawidłowe zatrzymanie pojazdu. Na skuteczność układu hamulcowego nie ma wpływu prędkość pojazdu oraz obciążenie. Przebieg procesu hamowania zależy od warunków atmosferycznych, warunków drogowych, stanu układu oraz umiejętności kierowcy.

Droga hamowania definiowana może być na dwa sposoby. Całkowita długość drogi hamowania to droga zatrzymania pojazdu, która oznacza przebytą przez pojazd drogę od chwili wystąpienia konieczności użycia hamulca – do chwili jego zatrzymania. Często jednak przyjmuje się początek redukcji prędkości jako początek pomiaru drogi hamowania. Wartości wymienionych wielkości różnią się od siebie. W celach marketingowych wykorzystuje się mniejsze wartości, a w celach homologacyjnych opiera się na procesie hamowania, rozpoczynającego się od nacisku na dźwignię hamulca [1, 5, 7, 8]. Otrzymane wartości są podstawą do oceny czynnego bezpieczeństwa pojazdów. Jednocześnie należy podkreślić, że hamowanie jest najskuteczniejsze, jeśli nie występuje poślizg kół.

Natomiast kierowanie samochodem niewyposażonym w system przeciwblokujący kół – ABS wymaga od kierowcy dużego doświadczenia w stosowaniu metody hamowania pulsacyjnego, które zapewnia najlepszą skuteczność hamowania,

¹ mgr inż. Mateusz GORZEJEWSKI, UTP Bydgoszcz, e-mail: m.gorzejewski@gmail.com

² mgr inż. Marietta MARKIEWICZ, UTP Bydgoszcz, e-mail: marmar000@utp.edu.pl

przy jednoczesnej możliwości sterowania pojazdem. Stosowanie tej praktyki we współczesnych samochodach, które wyposażone są w system ABS, nie jest wskazane, ponieważ przynosi odwrotne skutki. W pojazdach wyposażonych w ABS należy mocno wcisnąć pedał hamulca do chwili zatrzymania pojazdu. Wówczas uruchomiony system zapewnia kontrolę nad procesem hamowania, uniemożliwiając zablokowanie kół, a jednocześnie dając możliwość kontrolowanego kierowania pojazdem [1, 5, 7, 8].

Prawidłowo działające układy hamulcowe w pojazdach są podstawą bezpieczeństwa ruchu drogowego. Droga hamowania pojazdu zależna jest od wielu czynników, np. ludzkiego oraz technicznego. Czynnikiem technicznym dotyczy trwałości oraz niezawodności elementów hamulca oraz całych układów, w które wyposażony jest pojazd [2–4, 6, 9, 10].

2. METODYKA BADAŃ

Prowadzone badania dotyczyły pomiaru drogi hamowania pojazdów wyposażonych w system ABS i nieposiadających tego systemu. Pomiar dotyczył prędkości rozpoczęcia hamowania z uwzględnieniem warunków atmosferycznych, rodzaju nawierzchni oraz zamontowanego ogumienia. Zakres prędkości podczas badań ograniczono do wartości: 30, 50 i 80 km·h⁻¹ na nawierzchni asfaltowej oraz 30, 50 i 60 km·h⁻¹ na nawierzchni zaśnieżonej i oblodzonej.

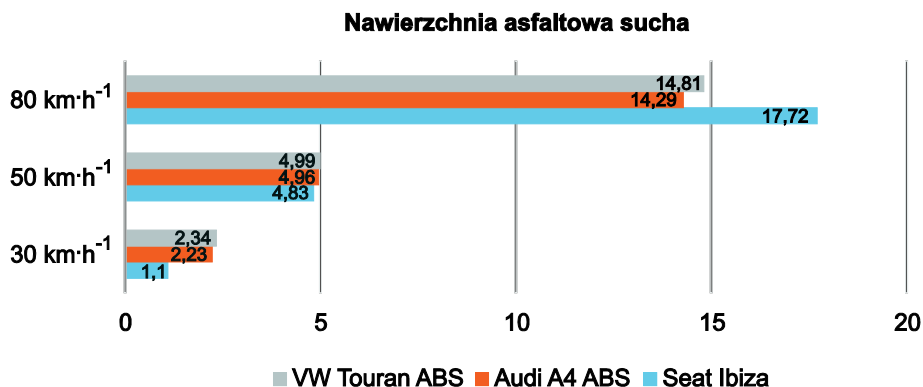
Badania prowadzono dla trzech pojazdów: kompaktowego (Seat Ibiza), pojazdu klasy średniej (Audi A4) oraz VAN (Volkswagen Touran). Pomiary wykonywano dla każdego pojazdów z uwzględnieniem prędkości, warunków atmosferycznych oraz warunków drogowych. Próby przeprowadzano w odpowiednich odstępach czasu, by elementy cierne układu hamulcowego (tarcze oraz okładziny klocków hamulcowych) posiadały podobną wartość temperatury. Temperatura tarcz hamulcowych mierzona była za pomocą termometru bezdotykowego. Długość drogi hamowania mierzona była za pomocą koła pomiarowego, zwanego potocznie drogomierzem.

Pomiary procesu hamowania rozpoczynały się w wyznaczonym miejscu oznaczonym dwoma słupkami ostrzegawczymi ustawionymi na wyznaczonym odcinku drogi – aż do miejsca zatrzymania przedniej osi kół badanego pojazdu. W doświadczeniu wykorzystano odcinki drogi wewnętrznej, uwzględniając jednocześnie rodzaj nawierzchni, jak i panujące warunki atmosferyczne. Analizowane odcinki drogi miały odpowiednie długości, co pozwoliło na rozpędzenie pojazdu, utrzymanie określonej prędkości, realizację procesu hamowania i dokładny pomiar drogi hamowania.

3. WYNIKI ZREALIZOWANYCH BADAŃ

Pomiary drogi hamowania wszystkich badanych pojazdów zostały wykonane kilkakrotnie dla każdej z wybranych prędkości. W poniższej analizie przedstawiono średnią długość drogi hamowania z trzech pomiarów dla każdego z badanych pojazdów przy danych prędkościach.

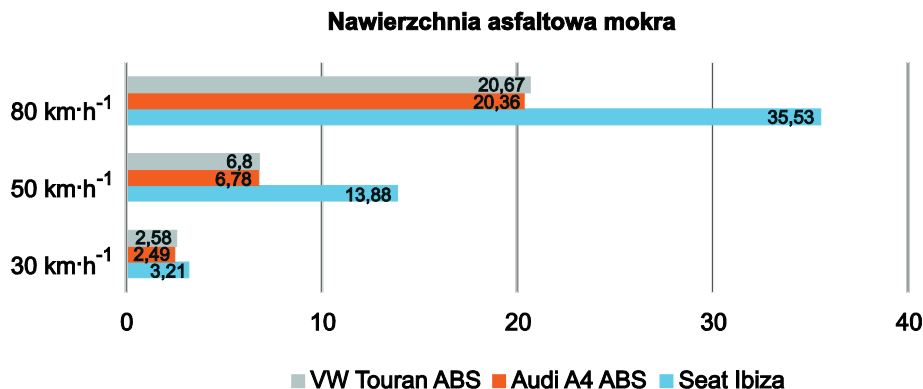
Pierwsze pomiary wykonano na drodze o suchej nawierzchni asfaltowej, w temperaturze otoczenia około 25°C. Wyniki zrealizowanych pomiarów przedstawiono w postaci graficznej na rysunku 1.



Rys. 1. Długość drogi hamowania na nawierzchni asfaltowej suchej, w [m]

Fig. 1. Braking distance on dry asphalt pavement, in [m]

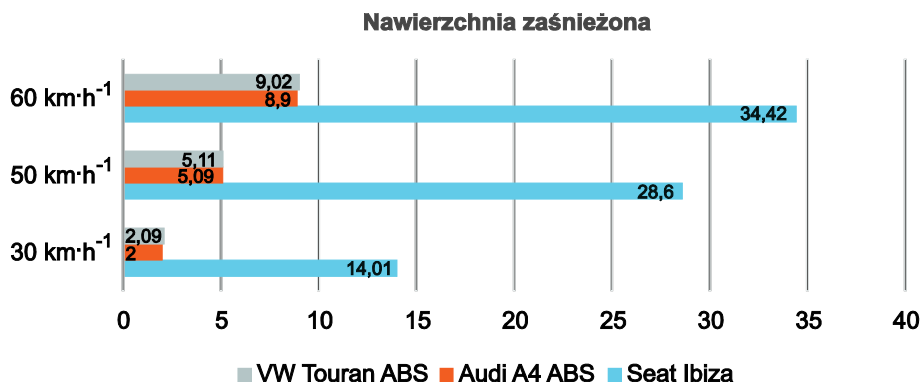
Kolejne pomiary wykonywano w warunkach drogowych utrudniających proces hamowania, w temperaturze otoczenia około 22°C. Badania prowadzono w deszczu, kiedy nawierzchnia drogi była śliska, co bezpośrednio przekładało się na drogę hamowania (rys. 2).



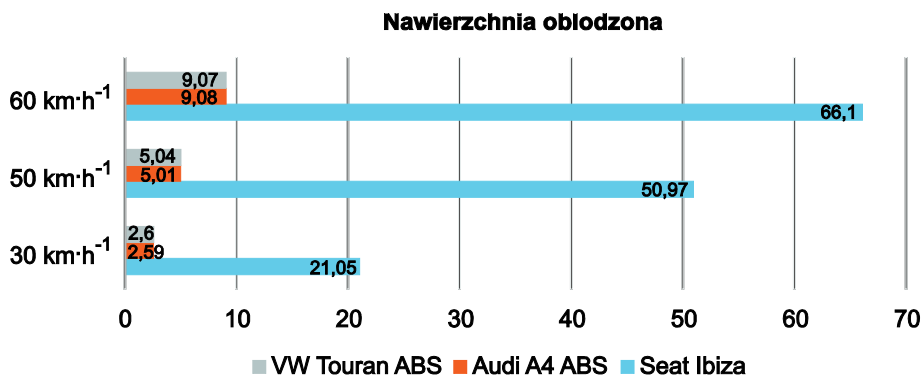
Rys. 2. Długość drogi hamowania na nawierzchni asfaltowej mokrej, w [m]

Fig. 2. Braking distance on wet asphalt pavement, in [m]

Badania realizowano również w warunkach zimowych. Pomiar wykonywany był w rzeczywistych warunkach, na zaśniewionej i oblodzonej nawierzchni w temperaturze -8°C. Badane pojazdy wyposażone były w ogumienie zimowe, w rozmiarach zalecanych przez producenta danej marki. Podczas badania w warunkach zimowych prędkość maksymalna została zredukowana do 60 km·h⁻¹. Wyniki tych badań przedstawiono na rysunkach 3 oraz 4.



Rys. 3. Długość drogi hamowania na nawierzchni zaśniewionej na ogumieniu zimowym M+S, w [m]
Fig. 3. Braking distance on a snowy surface on winter tires M+S, in [m]



Rys. 4. Długość drogi hamowania na nawierzchni oblodzonej na ogumieniu zimowym M+S, w [m]
Fig. 4. Braking distance on icy surfaces on winter tires M+S, in [m]

4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ EKSPLOATACYJNYCH

W tabeli 1 zestawiono wyniki badań dotyczących średniej długości drogi hamowania na suchej i mokrej nawierzchni asfaltowej, dla każdego z analizowanych środków transportowych.

Tabela 1. Droga hamowania na nawierzchni asfaltowej suchej i mokrej
Table 1. Braking distance on dry and wet asphalt surfaces

Pojazd	System ABS	Prędkość [km·h ⁻¹]	Droga hamowania [m]		Różnica [m]
			Asfalt suchy	Asfalt mokry	
Seat	NIE	30	1,10	3,21	2,11
		50	4,83	13,88	9,08
		80	17,72	35,53	17,81
Audi	TAK	30	2,23	2,49	0,26
		50	4,96	6,78	1,82
		80	14,29	20,36	6,07
Volkswagen	TAK	30	2,34	2,58	0,24
		50	4,99	6,80	1,81
		80	14,81	20,67	5,86

W pomiarach drogi hamowania na suchej nawierzchni asfaltowej najniższe wartości uzyskano dla prędkości $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ – dla pojazdu kompaktowego bez systemu ABS w trakcie hamowania awaryjnego, dla którego droga hamowania wyniosła 1,1 m.

Natomiast podczas próby przy prędkości $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ samochód kompaktowy niewyposażony w system ABS wykazał dłuższą drogę hamowania w stosunku do pomiarów dla niższej prędkości.

Podczas pomiaru na mokrym asfalcie najbardziej niekorzystne wyniki odnotowano dla samochodu niewyposażonego w system ABS, którego droga hamowania aż do całkowitego zatrzymania była najdłuższa w każdym z pomiarów. Pojazdy typu kombi i Van wyposażone w ABS osiągały bardzo zbliżone wyniki.

Kolejny etap badań dotyczył pomiaru drogi hamowania na nawierzchniach zaśniewanej i oblodzonej, a ich wyniki zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 2. Droga hamowania na nawierzchni zaśniewanej i oblodzonej na ogumieniu zimowym
Table 2. Braking distance on snowy and icy surfaces on winter tires

Pojazd	System ABS	Prędkość [$\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$]	Droga hamowania [m]		Różnica [m]
			Nawierzchnia ośnieżona	Nawierzchnia oblodzona	
Seat	NIE	30	14,01	21,05	7,04
		50	28,60	50,97	22,37
		60	34,42	66,10	31,68
Audi	TAK	30	2,00	2,59	0,59
		50	5,09	5,01	0,08
		60	8,90	9,08	0,18
Volkswagen	TAK	30	2,09	2,60	0,51
		50	5,11	5,04	0,07
		60	9,02	9,07	0,05

Na podstawie analizy wyników badań na nawierzchni ośnieżonej stwierdzono, że wszystkie pojazdy znacząco skróciły swoją drogę hamowania w stosunku do nawierzchni oblodzonej.

Kompaktowy samochód marki Seat bez systemu ABS na nawierzchni oblodzonej, zatrzymał się na odcinku 66,1 metra, natomiast na nawierzchni ośnieżonej już po 34,42 metra, co skróciło drogę hamowania o połowę.

Tabela 3. Porównanie drogi hamowania pojazdów z systemem ABS na nawierzchni asfaltowej suchej
Table 3. Comparison of braking distance vehicles with ABS on dry asphalt

Prędkość [$\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$]	Droga hamowania [m]		Różnica [m]
	Seat	Audi	
30	1,1	2,23	1,13
50	4,83	4,96	0,13
80	17,72	14,29	3,43

Podczas pomiaru drogi hamowania przy prędkościach do $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ najkorzystniejsze wyniki osiągnięto dla pojazdu bez systemu ABS, który przy prędkości początkowej $30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ wykazał krótszą drogę hamowania o 1,13 m w stosunku do pojazdu klasy kombi oraz 1,24 m w stosunku do klasy VAN. Różnica drogi hamowania przy prędkości $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ zmniejszyła się do wartości 0,13 m oraz 0,16 m. Droga hamowania Seata wyniosła 17,72 m, co pozwoliło na uzyskanie różnicy długości drogi hamowania 3,43 m w stosunku do Audi oraz 2,91 m do VW.

Tabela 4. Porównanie drogi hamowania pojazdów z systemem ABS na nawierzchni asfaltowej mokrej
Table 4. Comparison of braking distance vehicles with ABS on wet asphalt

Prędkość [$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$]	Droga hamowania [m]		Różnica [m]
	Seat	Audi	
30	3,21	2,49	0,72
50	13,88	6,78	7,1
80	35,53	20,36	15,17

Wyniki badań zamieszczone w tabeli 4, dotyczące Seata niewyposażonego w system ABS i Audi z układem ABS, świadczą o tym, że samochód wyposażony w system ABS miał krótszą drogę hamowania dla każdej prędkości początkowej.

Tabela 5. Porównanie drogi hamowania pojazdów z systemem ABS na nawierzchni zaśniewzonej na ogumieniu zimowym
Table 5. Comparison of braking distance vehicles with ABS on snowy surfaces on winter tires

Prędkość [$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$]	Droga hamowania [m]		Różnica [m]
	Seat	Audi	
30	14,01	2,00	12,01
50	28,60	5,09	23,51
60	34,42	8,90	25,52

Analiza różnicy długości drogi hamowania pojazdów wyposażonych w system ABS (tabela 5) na nawierzchni zaśniewzonej wskazuje, że różnica wyników pomiarów dla obu analizowanych pojazdów wyniosła od 12,01 do 25,52 m, w zależności od rozpatrywanych zakresów prędkości. Natomiast analizując drogę hamowania na nawierzchni oblodzonej (tabela 6), różnice wartości pomiarów pomiędzy pojazdami były większe i wynosiły od 18,46 do 57,02 m.

Tabela 6. Porównanie drogi hamowania pojazdów z systemem ABS na nawierzchni oblodzonej na ogumieniu zimowym
Table 6. Comparison of braking distance vehicles with ABS on icy surfaces on winter tires

Prędkość [$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$]	Droga hamowania [m]		Różnica [m]
	Seat	Audi	
30	21,05	2,59	18,46
50	50,97	5,01	45,96
60	66,10	9,08	57,02

Na podstawie analizy otrzymanych wyników badań dotyczących drogi hamowania rozpatrywanych samochodów – na nawierzchni oblodzonej stwierdzono, że wraz ze wzrostem prędkości początkowej różnica drogi hamowania wzrasta. Pojazdy z systemem ABS przy maksymalnej prędkości $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ wykazały krótszą drogę hamowania aż o 57,02 m.

5. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań eksploatacyjnych dla rozpatrywanych środków transportowych oraz analizy ich wyników można stwierdzić, że:

- 1) najniższą średnią pomiarów drogi hamowania zanotowano na nawierzchni suchej dla pojazdu niewyposażonego w system ABS. Pojazd wykazał krótszą o 50% drogę hamowania w stosunku do pojazdu wyposażonego w system ABS przy minimalnej prędkości wynoszącej $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$;
- 2) najdłuższą drogę hamowania na mokrej nawierzchni – aż do pełnego zatrzymania miał w każdym z przeprowadzonych pomiarów samochód niewyposażony w system ABS. Przy prędkości wynoszącej $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ droga hamowania wydłużyła się o około 35%;
- 3) zastosowanie ogumienia zimowego na nawierzchni mokrej skutkuje wydłużeniem drogi hamowania bez względu na wyposażenie pojazdu w system ABS;
- 4) pojazdy wyposażone w system ABS wykazują znacznie krótszą drogę hamowania w warunkach zimowych na nawierzchni oblodzonej. Pojazd niewyposażony w system ABS przy prędkości $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ zatrzymał się ponad 45 m dalej niż posiadający taki system;
- 5) droga hamowania na nawierzchni ośnieżonej skróciła się prawie 50% w porównaniu z drogą hamowania na nawierzchni oblodzonej.

Po przeprowadzeniu doświadczenia można jednoznacznie określić skuteczność systemu przeciwblokowania kół, który nawet w ekstremalnych warunkach skraca drogę hamowania o 25% przy maksymalnej prędkości.

LITERATURA

- [1] CHALECKI M.: Konwencjonalne i elektroniczne układy hamulcowe. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006.
- [2] GREGA R., HOMIŠIN J., KRAJŇÁK J., URBANSKÝ M.: Analysis of the impact of flexible couplings on gearbox vibrations. Scientific Journal of Silesian University of Technology, Series Transport, 2016.
- [3] HOMIŠIN J., KAŠŠAY P., PUŠKÁR M., GREGA R., KRAJŇÁK J., URBANSKÝ M., MORAVIČ M.: Continuous tuning of ship propulsion system by means of pneumatic tuner of torsional oscillation. International Journal of Maritime Engineering: Transactions of The Royal Institution of Naval Architects, 2016.
- [4] MEDVEČKÁ-BEŇOVÁ S.: Influence of the face width and length of contact on teeth deformation and teeth stiffness. Scientific Journal of Silesian University of Technology, Series Transport, 2016.
- [5] MIATLUK M., KAMIŇSKI Z.: Układy hamulcowe pojazdów: obliczenia. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 2005.

- [6] PUŠKÁR M., BIGOŠ P., PUŠKÁROVÁ P.: Accurate measurements of output characteristics and detonations of motorbike high-speed racing engine and their optimization at actual atmospheric conditions and combusted mixture composition. Measurement, 2012.
- [7] SIŁKA W.: Teoria ruchu samochodu. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
- [8] TYLUSIŃSKA-KOWALSKA A.: ABS. Układy zapobiegające blokowaniu kół, Wydawnictwo Auto, Warszawa 2011.
- [9] VOJTKOVÁ J.: Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport, 2015.
- [10] ZUBER N., BAJRIĆ R., ŠOSTAKOV R.: Gearbox faults identification using vibration signal analysis and artificial intelligence methods. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance And Reliability, 2014.

ANALYSIS OF THE IMPACT OF THE ABS SYSTEM ON THE BRAKING DISTANCE

Summary: Every year, the number of vehicles traveling on the road increases. Manufactured cars achieve increasing power rating, with less and less mass and engine capacity. In this study, the research involved measuring the braking distance of vehicles that were divided into two groups: with the ABS system and those without the ABS system. The purpose of the research was to determine the impact of the system supporting the braking process of vehicles on various types of surfaces, including the type of tires, variable speed and various weather conditions. Analyzing the obtained test results, it can be clearly stated that equipping the vehicle with the ABS system brings the desired benefits and increases driving safety.

Key words: active safety, braking, braking distance, ABS system, car

Julia HERNET

ILOŚCIOWE OZNACZANIE DODECYLOSIARCZANU SODU ZMODYFIKOWANĄ METODĄ MIARECZKOWANIA FOTOMETRYCZNEGO

Streszczenie: Znana procedura wyznaczania krzywych wzorcowych do ilościowego oznaczania dodecylosiarczanu sodu (SDS) wykorzystuje powolne miareczkowanie roztworów SDS błękitem toluidynowym do momentu osiągnięcia zdefiniowanej wartości absorbancji. Podstawą proponowanej zmodyfikowanej metody wyznaczania krzywych wzorcowych jest wprowadzenie do roztworu analitu dawki titranta i pomiar absorbancji. Modyfikacja ta ma skrócić czas analizy surfaktanta. Surfactanty należą do grupy związków chemicznych szeroko stosowanych do produkcji środków czystości i kosmetyków, a także środków chemicznych stosowanych w przemyśle spożywczym, maszynowym i motoryzacyjnym. Celem badań było wyznaczanie krzywych wzorcowych do oznaczania SDS wg standardowej oraz zmodyfikowanej procedury miareczkowej i porównanie oraz analiza uzyskanych wyników.

Słowa kluczowe: dodecylosiarczan sodu, titrant, miareczkowanie fotometryczne

1. WSTĘP

Surfaktanty to powszechnie stosowana grupa związków chemicznych przydatnych w bardzo wielu dziedzinach życia. Można je znaleźć w składzie produktów zaliczanych do chemii gospodarczej (głównie w środkach czystości), w kosmetykach i produktach spożywczych. Znajdują również zastosowanie podczas wytwarzania i eksploatacji elementów maszyn i pojazdów. Wchodzą w skład detergentów oraz środków pianotwórczych wykorzystywanych w produktach kosmetycznych i środkach czyszczących wysokiej jakości używanych do czyszczenia pojazdów; są także składnikami substancji stosowanych w procesie formułacji do natryskowego czyszczenia metali. Rozpatrywane związki chemiczne z grupy powierzchniowo czynnych to również substancje emulgujące, używane do produkcji farb i olejów stosowanych w przemyśle maszynowym i samochodowym.

2. METODA MBAS

Zazwyczaj do oznaczania stężenia anionowego środka powierzchniowo czynnego w roztworze wodnym stosuje się metodę indeksu błękitu metylenowego (BM), oznaczaną skrótem MBAS, pochodzącym od angielskiego sformułowania **Methylene Blue Active Substances assay**. Błękit metylenowy jest barwnikiem kationowym, który rozpuszcza się w wodzie, ale jest praktycznie nierozpuszczalny w cieczach organicznych, takich jak np. chloroform. Rozpuszczanie BM w cieczach organicznych obserwuje się jednak w obecności anionowego środka powierzchniowo czynnego. Środek powierzchniowo czynny i barwnik łączą się

w pary jonów, a ten kompleks można łatwo wyekstrahować do fazy organicznej. Opisane zjawisko umożliwia oznaczanie stężenia środka powierzchniowo czynnego techniką spektrofotometryczną poprzez pomiar absorbancji błękitu metylenowego wyekstrahowanego z fazy wodnej rozpuszczalnikiem organicznym [1]. W celu oznaczenia stężenia anionowego środka powierzchniowo czynnego w roztworze wodnym próbkę alkalinizuje się za pomocą roztworu buforowego. Kolejnym etapem jest ekstrakcja błękitu metylenowego chloroformem. Następnie ekstrakt chloroformowy oddziela się i przemywa zakwaszonym roztworem błękitu metylenowego. Absorbancję mierzy się przy długości fali 650 nm. Indeks MBAS odczytuje się z krzywej wzorcowej. Procedura MBAS jest bardzo pracochłonna i wymaga użycia toksycznego rozpuszczalnika – chloroformu lub dichlorometanu [3, 4]. Z tego powodu poszukuje się nowych, wygodniejszych i bezpieczniejszych metod oznaczania anionowych SPC. Uproszczenie metody MBAS polega na zmniejszeniu objętości rozpuszczalnika i eliminacji kolejnych etapów ekstrakcji, a także eliminacji filtracji [4].

3. MIARECZKOWANIE BARWNIKAMI TIAZYNOWYMI

Metoda ilościowego oznaczania środków powierzchniowo czynnych za pomocą barwnika tiazynowego polega na miareczkowaniu roztworu analitu standaryzowanym roztworem barwnika, z jednoczesnym pomiarem absorbancji. Pomiar prowadzi się przy długości fali odpowiadającej maksimum absorpcji barwnika (dla błękitu metylenowego 660 nm), a jako detektor można wykorzystać sondę zanurzeniową. Podstawą oznaczenia jest tworzenie się par jonowych surfaktant–barwnik. Zjawisko to powoduje, że podczas miareczkowania ilość promieniowania zaabsorbowanego przez wolne cząsteczki barwnika zależy od ilości surfaktanta w próbce. Stężenie analitu odczytuje się z krzywej wzorcowej, która jest zależnością stężenia od ilości titranta potrzebnej do uzyskania pewnej zdefiniowanej wartości absorbancji [3, 4].

Metoda miareczkowa jest dużo szybsza niż metoda MBAS. Główną jej zaletą jest nieużywanie toksycznego rozpuszczalnika organicznego. Dodatkowo proces analizy może być przeprowadzony przy użyciu automatycznego titratora. Metoda wymaga minimalnego wysiłku ze strony analityka ze względu na brak konieczności przygotowywania próbek do miareczkowania. Zakres oznaczenia zależy od wartości absorbancji w punkcie końcowym miareczkowania [3, 4].

Wynik miareczkowania zależy od różnych czynników, np. pH i siły jonowej roztworu analitu oraz rodzaju analitu. Przy wyborze barwnika ważny jest jego współczynnik molowej ekstynkcji. Barwnik dobiera się w zależności od stężenia analizowanego surfaktanta [5].

4. METODYKA BADAŃ

Do badań wykorzystano krzywe miareczkowania dodecylosiarczanu sodu (SDS) roztworem błękitu orto-toluidynowego (BT). Oba odczynniki pochodziły z firmy Sigma-Aldrich. Automatyczne miareczkowanie przeprowadzono za pomocą biurety Titronic 500 (SI Analytics). Analit w ilości zależnej od jego stężenia

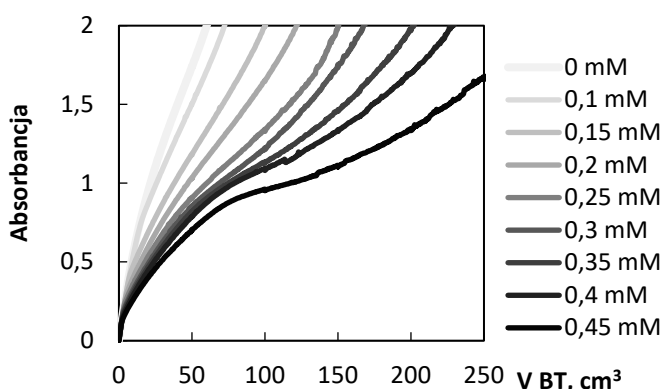
(tabela 1) wprowadzano do naczynia reakcyjnego umieszczonego na mieszadle magnetycznym. Barwnik dozowano porcjami o objętości $0,5 \text{ cm}^3$, co 10 sekund. Absorbancję roztworu mierzono przy długości fali 640 nm , stosując sondę zanurzeniową Optrode® (Metrohm) o długości drogi optycznej 10 mm . Do sterowania pomiarem i rejestracji wyników zastosowano dedykowane oprogramowanie ChemiON.

Tabela 1. Charakterystyka układów pomiarowych

Table 1. Characteristics of measuring systems

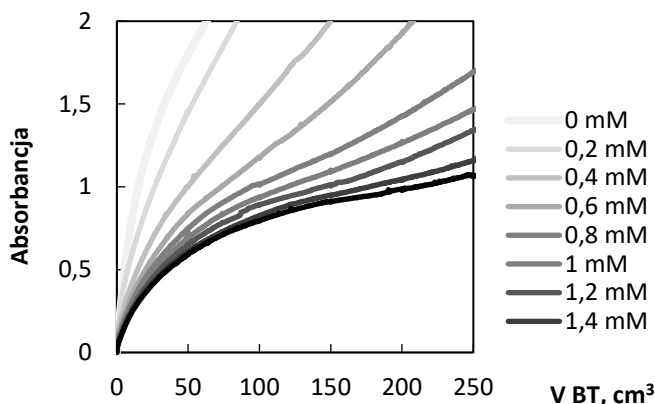
Seria pomiarowa	Objętość analitu, cm^3	Zakres stężeń analitu, $\text{mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$	Stężenie barwnika, $\text{mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$
A	50	0,1–0,45	0,035
B	20	0,2–1,6	0,025
C	10	0,2–1,8	0,02

Analizie poddano sześć zestawów krzywych miareczkowania roztworów SDS standardowym roztworem BT. Krzywe miareczkowania pod względem kształtu różnią się w zależności od stężenia analitu. W obszarze małych stężeń SDS (serie A i B) posiadają punkt przegięcia pomiędzy odcinkami wypukłym i wklęsłym (rys. 1 i 2). Wraz ze wzrostem stężeń SDS (serie C) krzywa miareczkowania w całym zakresie jest krzywą wypukłą (rys. 3). Na wszystkich wykresach można natomiast zaobserwować, że wraz ze wzrostem objętości błękitu toluidynowego następuje wzrost absorbancji. Jednocześnie widać, że im większe stężenie środka powierzchniowo czynnego, tym większy jest kąt nachylenia krzywych miareczkowania. Kształt krzywych miareczkowania SDS roztworem błękitu toluidynowego jest specyficzny, tzn. charakteryzuje się brakiem charakterystycznych miejsc pozwalających na wskazanie punktu końcowego miareczkowania. Jednakże z uwagi na wyżej opisaną zależność nachylenia krzywej od stężenia SDS w celu ilościowego oznaczenia analitu można posłużyć się metodą krzywej wzorcowej.



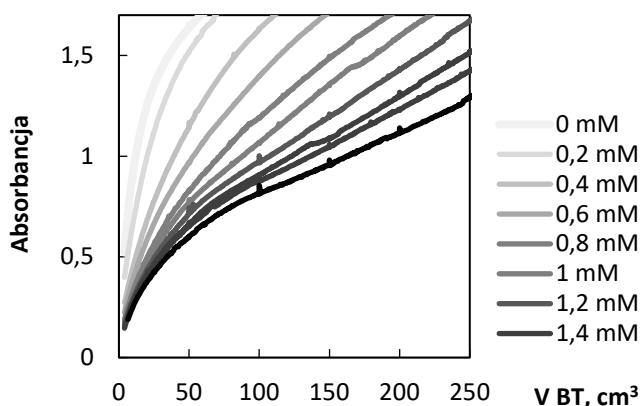
Rys. 1. Zestaw krzywych miareczkowania A; w legendzie podano stężenia roztworów SDS ($\text{mM} \equiv \text{mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$)

Fig. 1. A set of titration curves A; the legend gives concentrations of SDS solutions ($\text{mM} \equiv \text{mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$)



Rys. 2. Zestaw krzywych miareczkowania B; w legendzie podano stężenia roztworów SDS ($\text{mM} \equiv \text{mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$)

Fig. 2. A set of titration curves B; the legend gives concentrations of SDS solutions ($\text{mM} \equiv \text{mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$)



Rys. 3. Zestaw krzywych miareczkowania C; w legendzie podano stężenia roztworów SDS ($\text{mM} \equiv \text{mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$)

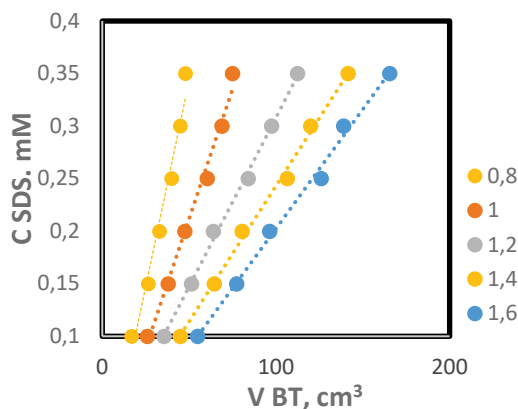
Fig. 3. A set of titration curves C; the legend gives concentrations of SDS solutions ($\text{mM} \equiv \text{mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$)

5. KRZYWE KALIBRACYJNE OTRZYMANE PRZY ZDEFINIOWANEJ WSRTOŚCI ABSORBANCJI

Na podstawie krzywych miareczkowania wykreślono zależności stężenia analitu od objętości titranta potrzebnej do uzyskania pewnej zadanej wartości absorbancji. W tabelach 2–4 podano równania opisujące wyznaczone zależności oraz dokładność interpolacji, R^2 . Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że zależności stężenia SDS od objętości barwnika potrzebnej do uzyskania pewnej zadanej wartości absorbancji są liniami prostymi. Korelacja pomiędzy danymi doświadczalnymi i równaniami regresji jest bardzo dobra – na ogół wartość współczynnika R^2 przekracza 0,99. Dzięki temu równania zamieszczone

w tabelach, jak również równania dla pośrednich wartości absorbancji w poszczególnych seriach pomiarowych mogą służyć jako linie kalibracyjne do ilościowego oznaczania SDS w roztworach. Jak widać, dobrej jakości linie kalibracyjne można uzyskać w szerokim zakresie zadanych wartości absorbancji, jednak na ogół najlepsze wyniki uzyskuje się dla absorbancji równej od 1,2 do 1,5. Przedstawione rezultaty są zgodne z danymi literaturowymi [3].

Równania linii kalibracyjnych poddano dodatkowej analizie, polegającej na zbadaniu zależności pomiędzy wartością współczynnika kierunkowego linii kalibracyjnej a zadaną wartością absorbancji. Na podstawie otrzymanych wykresów można stwierdzić, że we wszystkich badanych seriach pomiarowych współczynnik kierunkowy maleje wraz ze wzrostem zadanej wartości absorbancji (rys. 4–6). Zależność z dobrą dokładnością opisuje równanie potęgowe. Istnienie zdefiniowanej zależności pomiędzy współczynnikiem kierunkowym a wartością absorbancji pozwala na optymalizację krzywej kalibracyjnej do oznaczania stężeń SDS.



Rys. 4. Krzywe wzorcowe do oznaczania stężeń SDS na podstawie zadanych wartości absorbancji podanych w legendzie, wyznaczone na podstawie serii pomiarowej A

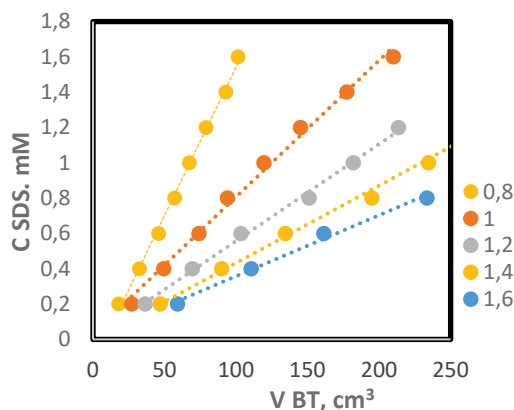
Fig. 4. Calibration curves for determining SDS concentration based on the absorbance values given, in the legend determined on the basis of measurement series A

Tabela 2. Charakterystyka krzywych wzorcowych wyznaczonych na podstawie zadanych wartości absorbancji w serii pomiarowej A

Table 2. Characteristics of standard curves determined on the basis of the absorbance values given in the measurement series A

Abs	Równanie linii kalibracyjnej	R ²
1,1	$y = 0,0078x - 0,485$	0,9735
1,3	$y = 0,0049x - 0,0347$	0,9889
1,5	$y = 0,0032x - 0,0134$	0,9975
1,7	$y = 0,0026x - 0,0151$	0,9959
1,9	$y = 0,0023x - 0,0245$	0,9944

y – stężenie analitu w mM, x – objętość titranta w cm³



Rys. 5. Krzywe wzorcowe do oznaczania stężeń SDS na podstawie zadanych wartości absorbancji podanych w legendzie, wyznaczone na podstawie serii pomiarowej B

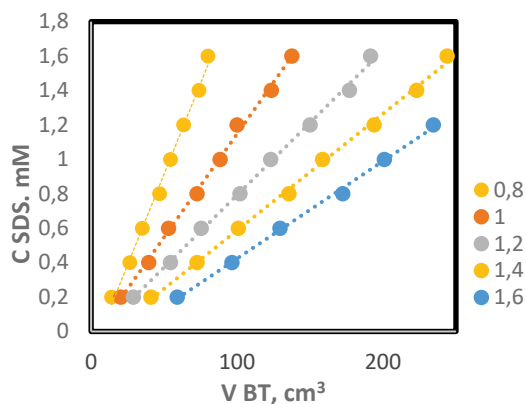
Fig. 5. Calibration curves for determining SDS concentration based on the absorbance values given, in the legend determined on the basis of measurement series B

Tabela 3. Charakterystyka krzywych wzorcowych wyznaczonych na podstawie zadanych wartości absorbancji w serii pomiarowej B

Table 3. Characteristics of standard curves determined on the basis of the absorbance values given in the measurement series B

Abs	Równanie linii kalibracyjnej	R ²
0,8	$y = 0,0211x - 0,1402$	0,9951
1	$y = 0,012x - 0,525$	0,9971
1,2	$y = 0,0084x - 0,0478$	0,9977
1,4	$y = 0,0068x - 0,09$	0,9978
1,6	$y = 0,0057x - 0,1424$	0,9977

y – stężenie analitu w mM, x – objętość titranta w cm³



Rys. 6. Krzywe wzorcowe do oznaczania stężeń SDS na podstawie zadanych wartości absorbancji podanych w legendzie, wyznaczone na podstawie serii pomiarowej C

Fig. 6. Calibration curves for determining SDS concentration based on the absorbance values given, in the legend determined on the basis of measurement series C

Tabela 4. Charakterystyka krzywych wzorcowych wyznaczonych na podstawie zadanych wartości absorbancji w serii pomiarowej C

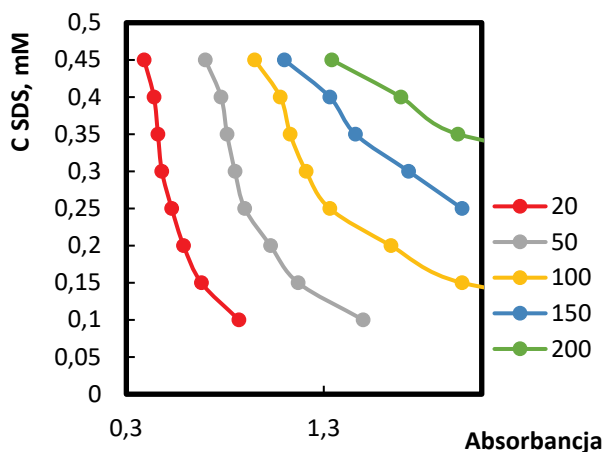
Table 4. Characteristics of standard curves determined on the basis of the absorbance values given in the measurement series C

Abs	Równanie linii kalibracyjnej	R ²
0,8	$y = 0,0168x - 0,1392$	0,9972
1	$y = 0,0077x - 0,0338$	0,9936
1,2	$y = 0,0055x - 0,0081$	0,9963
1,4	$y = 0,0044x - 0,0062$	0,9925
1,6	$y = 0,0035x - 0,0125$	0,9923

y – stężenie analitu w mM, x – objętość titranta w cm³

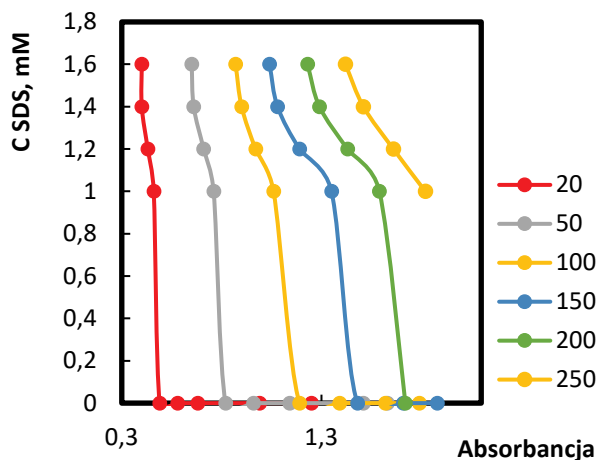
6. KRZYWE KALIBRACYJNE OTRZYMANE PRZY ZADANEJ OBJĘTOŚCI TITRANTA

Alternatywną metodą analizy krzywych miareczkowania może być wykorzystanie zależności stężenia analitu od absorbancji mieszaniny analit–barwnik, oznaczonej po jednorazowym wprowadzeniu określonej dawki barwnika. W celu sprawdzenia słuszności tej tezy z krzywych miareczkowania odczytano odpowiednie wartości absorbancji w sposób pokazany przykładowo dla dwóch wybranych wartości objętości titranta. Na tej podstawie wykreślono zależności stężenia SDS od absorbancji dla kilku wybranych objętości BT (rys. 7–9).



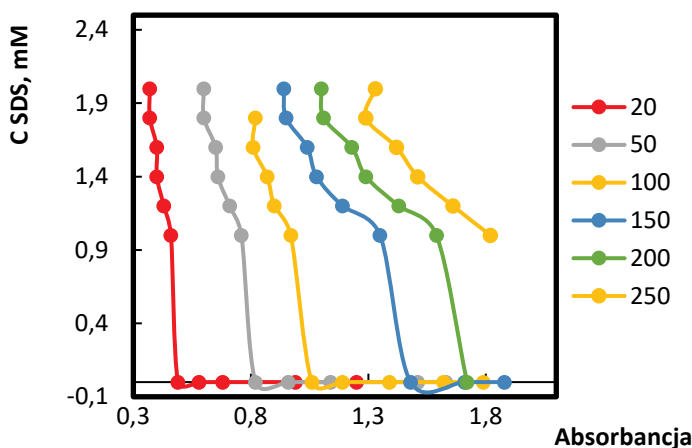
Rys. 7. Zależności stężenia SDS od wartości absorbancji oznaczonej po dodaniu określonej objętości barwnika, uzyskane na podstawie serii pomiarowej A; objętości barwnika wyrażono w cm³

Fig. 7. Dependence of SDS concentration on absorbance value determined after adding a specific dye volume obtained on the basis of measurement series A; dye volumes are expressed in cm³



Rys. 8. Zależności stężenia SDS od wartości absorbancji oznaczonej po dodaniu określonej objętości barwnika, uzyskane na podstawie serii pomiarowej B; objętości barwnika wyrażono w cm^3

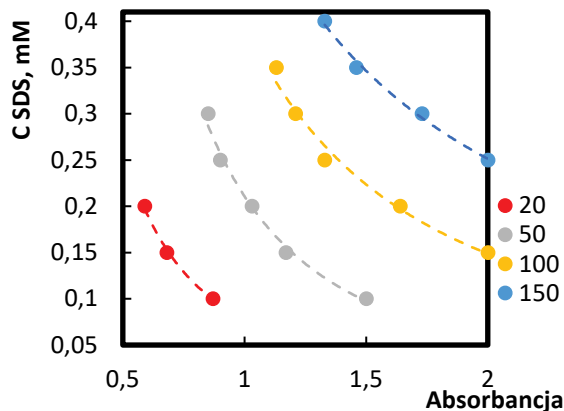
Fig. 8. Dependence of SDS concentration on absorbance value determined after adding a specific dye volume obtained on the basis of measurement series B; dye volumes are expressed in cm^3



Rys. 9. Zależności stężenia SDS od wartości absorbancji oznaczonej po dodaniu określonej objętości barwnika, uzyskane na podstawie serii pomiarowej C; objętości barwnika wyrażono w cm^3

Fig. 9. Dependence of SDS concentration on absorbance value determined after adding a specific dye volume obtained on the basis of measurement series C; dye volumes are expressed in cm^3

Otrzymane wykresy we wszystkich przypadkach są krzywoliniowe. Dodatkowo niektóre z nich w pewnych zakresach stężeń są niemal równoległe do osi wykresu, co uniemożliwia zastosowanie ich jako linii kalibracyjnych. Z tego względu, na podstawie zależności pokazanych na rysunkach 7–9, wyznaczono krzywe kalibracyjne do ilościowego oznaczania SDS poprzez wyselekcjonowanie z rysunków tych części wykresów, dla których istnieje wyraźna zależność pomiędzy absorbancją a stężeniem analitu (rys. 10–12). Równania linii kalibracyjnych i dokładność ich dopasowania do punktów doświadczalnych zebrano w tabelach 5–7.



Rys. 10. Krzywe wzorcowe do oznaczania stężeń SDS na podstawie zdefiniowanej objętości barwnika, wyznaczone na podstawie serii pomiarowej A

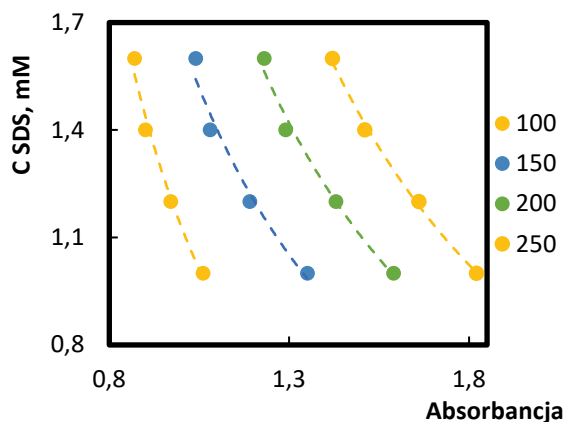
Fig. 10. Standard curves for determining SDS concentrations based on a defined dye volume, determined on the basis of measurement series A

Tabela 5. Charakterystyka krzywych wzorcowych wyznaczonych na podstawie zadanych objętości barwnika w serii pomiarowej A

Table 5. Characteristics of the calibration curves determined on the basis of the dye volume set points in measurement series A

Objętość barwnika, cm ³	Równanie linii kalibracyjnej	R ²
20	$y = 0,0775x^{-1,769}$	0,9968
50	$y = 0,2109x^{-1,903}$	0,9931
100	$y = 0,3973x^{-1,417}$	0,9865
150	$y = 0,5444x^{-1,115}$	0,9939

y – stężenie analitu w mM, x – absorbancja



Rys. 11. Krzywe wzorcowe do oznaczania stężeń SDS na podstawie zdefiniowanej objętości barwnika, wyznaczone na podstawie serii pomiarowej B

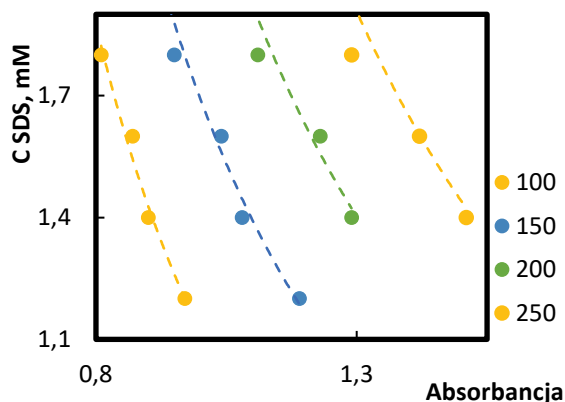
Fig. 11. Standard curves for determining SDS concentrations based on a defined dye volume, determined on the basis of measurement series B

Tabela 6. Charakterystyka krzywych wzorcowych wyznaczonych na podstawie zadanych objętości barwnika w serii pomiarowej B

Table 6. Characteristics of the calibration curves determined on the basis of the dye volume set points in measurement series B

Objętość barwnika, cm ³	Równanie linii kalibracyjnej	R ²
100	$y = 1,1309x^{-2,292}$	0,9855
150	$y = 1,2088x^{-2,552}$	0,9971
200	$y = 1,5259x^{-1,84}$	0,9975
250	$y = 3,0502x^{-1,858}$	0,9976

y – stężenie analitu w mM, x – absorbancja



Rys. 12. Krzywe wzorcowe do oznaczania stężeń SDS na podstawie zdefiniowanej objętości barwnika, wyznaczone na podstawie serii pomiarowej C

Fig. 12. Standard curves for determining SDS concentrations based on a defined dye volume, determined on the basis of measurement series C

Tabela 7. Charakterystyka krzywych wzorcowych wyznaczonych na podstawie zadanych objętości barwnika w serii pomiarowej C

Table 7. Characteristics of the calibration curves determined on the basis of the dye volume set points in measurement series C

Objętość barwnika, cm ³	Równanie linii kalibracyjnej	R ²
100	$y = 1,1309x^{-2,292}$	0,9855
150	$y = 1,6496x^{-1,717}$	0,9758
200	$y = 2,2545x^{-1,764}$	0,9897
250	$y = 3,0502x^{-1,858}$	0,9976

y – stężenie analitu w mM, x – absorbancja

7. PODSUMOWANIE

Zmodyfikowana metoda ilościowego oznaczania surfaktantów, polegająca na wprowadzeniu do określonej objętości roztworu analitu zdefiniowanej ilości barwnika i pomiarze absorbancji tej mieszaniny, w znaczny sposób przyspiesza

i ułatwia analizę. W celu otrzymania dobrej jakości krzywej wzorcowej do ilościowego oznaczania surfaktanta należy właściwie dobrać dawki analitu i barwnika. Dawki te są uzależnione od zakresu oznaczanych stężeń surfaktanta oraz stężenia barwnika. Właściwy dobór parametrów oznaczenia pozwala uzyskać bardzo dobrą korelację pomiędzy punktami krzywej wzorcowej i równaniem regresji, mieszczącą się w zakresie 0,98–0,99. Wadą zmodyfikowanej metody ilościowego oznaczania surfaktantów, w porównaniu ze standardową metodą miareczkowania analitu do uzyskania zdefiniowanej wartości absorbancji, jest mniejszy zakres stężeń krzywych kalibracyjnych.

Stosowane skróty:

- MBAS – **M**ethylene **B**lue **A**ctive **S**ubstances assay, metoda indeksu błękitu metylenowego (BM)
 BT – **B**łękit **T**oluidynowy
 SDS – **D**odecylosiarczan **S**odu, organiczny związek chemiczny

LITERATURA

- [1] GEORGE A., WHITE G.: Optimization of the methylene blue assay for anionic surfactants added to estuarine and marine water. School of Biosciences, Cardiff University, 1999.
- [2] WĄSIK A.: Oznaczanie zawartości surfaktantu anionowych metodą pomiaru indeksu błękitu metylenowego. Katedra Chemii Analitycznej, Politechnika Gdańska, 2017.
- [3] ZIÓŁKOWSKA D., LAMKIEWICZ J., SHYICHUK A.: Determination of Sodium Dodecyl Sulfate by Means of Photometric Titration with o-Totuidine Blue Bye. Journal of Surfactants and Detergents, 2018.
- [4] ZIÓŁKOWSKA D., SHYICHUK A.: Determination of Anionic Surfactants by Means of Photometric Titration with Methelene Blue Dye. Journal of Surfactants and Detergents, 21, 2016, 751–756.
- [5] ZIÓŁKOWSKA D., SHYICHUK A., SYROTYŃSKA I.: Sposób ilościowego oznaczania surfaktantów anionowych w roztworach wodnych, zgłoszenie patentowe, UTP Bydgoszcz.

THE QUANTITATIVE DETERMINATION OF SODIUM DODECYL SULPHATE BY MODIFIED PHOTOMETRIC TITRATION METHOD

Summary: The aim of this thesis was to develop a modified method for photometric determination of anionic surfactant (SDS) as well as to compare this new method with the standard procedure. In the practical part presented are results of the analysis of the photometric titration curves obtained in the system: surfactant – thiazine dye. The modified method of surfactant determination consists of introducing into the analyte solution a large dose of the dye, measuring the absorbance and reading the concentration from the calibration curve. Such procedure accelerates considerably the quantitative determination of SDS while maintaining the accuracy characteristic of the standard titrimetric method.

Key words: anionic surfactant, SDS, titration, titrimetric method

Maciej KOTYK¹, Krzysztof KOWALICKI², Andrzej SKIBICKI³

ANALIZA TWARDOŚCI ZGRZEWANEGO WYBUCHOWO MATERIAŁU WARSTWOWEGO Al – Ti ORAZ JEGO MATERIAŁÓW BAZOWYCH

Streszczenie: Szeroko rozpowszechniony trend polegający na zmniejszeniu ciężaru obiektów technicznych poprzez zastosowanie do ich budowy materiałów lekkich wciąż nie traci na aktualności. W konsekwencji powoduje on powstawanie coraz to nowych, lżejszych materiałów, których charakterystyki mechaniczne wymagają weryfikacji eksperymentalnej. W artykule zaprezentowano wyniki pomiarów twardości jednego z opisywanych materiałów, tj. AA2519 – AA1050 – Ti6Al4V dwiema metodami. Dodatkowo wyniki badań odniesiono również do twardości materiałów bazowych. Stwierdzono, że twardość materiału bazowego różni się od warstwy w materiale warstwowym wykonanej z tego samego materiału.

Słowa kluczowe: twardość, materiał warstwowy, stop Ti6Al4V, stop AA2519, materiały lekkie, materiał warstwowy Al – Ti

1. WPROWADZENIE

Twardość jest jedną z mechanicznych własności metali. W ogólności twardość można określić jako opór materiału przy wciskaniu w niego wgłębnika lub miarę oporu metalu na odkształcenia trwale wywołane wciskaniem wgłębnika [4]. Ma ona wpływ na decyzję o wykorzystaniu danego materiału do budowy maszyny. Dodatkowo pomiar twardości jest metodą sprawdzenia powtarzalności wyrobów przy wytwarzaniu materiałów konstrukcyjnych [12].

Określenie twardości metali odbywa się poprzez badania eksperymentalne wykonywane z zastosowaniem twardościomierzy. Wspomnianą aparaturę podzielić można na urządzenia dynamiczne i statyczne. Ze względu na większą dokładność częściej stosowane są twardościomierze statyczne. Dzieli się je na te, w których twardość mierzy się za pomocą analizy geometrii odcisku pozostawionego przez wgłębnik na powierzchni badanego materiału oraz na takie, w których opisywaną charakterystykę mechaniczną określa się poprzez pomiar kąta wychylenia młota [7].

1.1. Badanie twardości stopów aluminium i tytanu

Badania twardości i mikrotwardości są wykonywane powszechnie. W literaturze można odnaleźć wiele publikacji, w których opisywane są tego typu eksperymenty. Zdecydowanie powszechniejsze oraz mniej wymagające z uwagi na wykorzystywaną aparaturę są badania twardości w skali „makro”.

¹ dr inż. Maciej KOTYK, UTP Bydgoszcz, e-mail: maciej.kotyk@utp.edu.pl

² inż. Krzysztof KOWALICKI, e-mail: kkowalicki37@gmail.com

³ dr inż. Andrzej SKIBICKI, UTP Bydgoszcz, e-mail: andrzej.skibicki@utp.edu.pl

Pomiary twardości w skali makro przedstawiono w pracy [9]. Przeprowadzono je na poprzecznych przekrojach spoin wykonanych na falowodzie w kształcie walca ze stopu aluminium 2017A, które nałożono metodą MIG. Pomiary wykonano metodą Vickersa pod obciążeniem 100 gramów.

Podobne badania, ale na innym stopie aluminium zaprezentowano w pracy [14]; zmierzono w nich opisywaną charakterystykę materiałową na warstwie wierzchniej kutego matrycowo tłoka silnika samochodowego. Pomiar mikrotwardości wykonano również metodą Vickersa na wybranych wycinkach powierzchni elementu. Wycinki poddano obciążeniu, a następnie z wyników badania opracowano krzywą wgłębnikową potrzebną do wyznaczenia wartości parametrów niezbędnych do obliczenia mikrotwardości.

W kolejnym artykule [15] opisano wpływ efektu retrogresji na twardość stopu aluminium 7085. Do badania zastosowano blachę o wymiarach 25×20 mm, którą wycięto z dużej płyty wzdłuż kierunku jej walcowania. Po zastosowaniu retrogresji wypolerowano powierzchnię próbek w celu otrzymania optymalnej dokładności pomiaru twardości. Do badania zastosowano metodę Vickersa zgodnie z procedurą opisaną w ASTM E92-17, a urządzeniem pomiarowym był tester twardości MH-5L. W temperaturze otoczenia (pokojowej) na każdej z próbek zrobiono 10 odcisków przy obciążeniu 1000 g i z uzyskanych wyników obliczono średnią wartość twardości HV. Wyniki badania pokazują, że retrogresja w temperaturze 180°C daje znaczny wzrost twardości, natomiast po obróbce w temperaturze 200°C stop aluminium wykazuje dużą utratę twardości.

W pracy Bai [1] omówiono wzrost twardości stopu tytanu przygotowanego w drodze transformacji fazy martenzytycznej. Próbkę stopu TC21 została wycięta z pręta kutego, a następnie poddana wygrzewaniu do 1050°C i chłodzeniu w wodzie, mającym na celu wytworzenie martenzytu. Kolejnym etapem przygotowania materiału było odpuszczanie w zakresie temperatur od 300 do 700°C przez dwie godziny. W trakcie odpuszczania mierzono twardość Vickersa. Stwierdzono, że twardość stopu TC21 wzrasta wraz ze wzrostem temperatury odpuszczania, osiągając swoje maksymalne wartości przy 500°C , a po jej przekroczeniu stopniowo maleje.

Kolejny przykład pomiaru twardości dla stopu tytanu przedstawiono w pracy [10]. Analizie poddano twardość połączenia spawanego laserem czystego tytanu w trakcie rekrytalizacji. Obiektami badania były arkusze czystego tytanu o grubości 2,5 mm. Łączenie płyt odbyło się za pomocą lasera o mocy 4 kW z zastosowaniem systemu spawania laserowego IPG YLR-4000. Takie połączenie zostało pocięte na mniejsze próbki, a następnie poddane odpuszczaniu w temperaturze od 625 do 700°C . Twardość była mierzona przed obróbką cieplną i po jej przeprowadzeniu urządzeniem HXD-1000TMC/LCD pod obciążeniem 0,98 N w odstępach co 0,1 mm. Wyniki wskazują, że twardość jest wyższa w strefie spoiny przed obróbką cieplną, jednak po procesie odpuszczania i wraz z rozwojem rekrytalizacji średnie wartości twardości wykazują spadek.

1.2. Badanie mikrotwardości stopów aluminium i tytanu

Pomiary mikrotwardości wykonuje się często na małych elementach, takich jak cienkie druty, taśmy o grubości poniżej jednego milimetra i powłoki metalowe. Polegają one na statycznym wciskaniu wgłębnika twardościomierza w powierzchnię elementu prostopadłą do jego osi [4].

Przykładem badań mikrotwardości metodą Vickersa jest pomiar przeprowadzony na złączu lutowanym wykonanym pomiędzy stopem aluminium AW 5754 oraz tytanem Grade 2. Do połączenia wykorzystano spoiwo AlSi5. W badaniach wykorzystano twardościomierz HVS-1000 firmy Sinowon. Pomiar przeprowadzono w dwóch liniach, które zawierały strefę między lutowaną a tytanem Grade 2 oraz strefę pomiędzy lutowaną i stopem aluminium AW 5754 [16].

Mikrotwardość zbadano także na połączeniu lutowanym między stopem aluminium EN AW-1050A wg PN-EN 573-3 oraz miedzią Ecu58-CuETP (99,9% Cu). Podobnie jak w poprzednich badaniach w opisywanym przypadku zastosowano metodę Vickersa za pomocą twardościomierza PMT3, przy obciążeniu ostrosłupa diamentowego równym 25 G, zgodnie z zaleceniami normy PN EN ISO 6507-1. Z badania wynika, że na granicy połączenia lutowiny z miedzią powstaje strefa reakcyjna, w której występuje duży gradient twardości. Skutkuje tendencją do powstawania pęknięć cieplnych [13].

Na uwagę zasługuje również artykuł [11], w którym zaprezentowano wyniki badań wpływu frezowania na mikrotwardość warstwy wierzchniej stopu tytanu Ti6Al4V oraz stali nierdzewnej 15-5PH. Próbkę została zeszlifowana pod kątem 3 stopni i następnie wypolerowana. Na każdej z badanych próbek wykonano po dziesięć pomiarów metodą Vickersa. Rozkład mikrotwardości dla wszystkich badanych przypadków miał podobny charakter. Różnice w wartościach wystąpiły natomiast pomiędzy poszczególnymi badanymi materiałami. Przy powierzchni odnotowane były największe wartości, które malały w głębszych warstwach. Wyniki pokazały, że warstwa wierzchnia stopu tytanu (przy posuwie wynoszącym 0,233 mm na obrót) została umocniona o 18,3%.

W artykule Liu [8] przedstawiono wyniki badań wpływu mikroelastycznego walcowania i wyżarzania na mikrostrukturę oraz mikrotwardość stopu aluminium. Do badania zastosowano stop aluminium 1060 o grubości 460 μm . Wyniki pokazują, że cieńsze strefy ze zredukowanym walcowaniem wykazują wyższą mikrotwardość. Wspomniana twardość spada natomiast w głębszych warstwach materiału, gdzie wpływ zredukowanego walcowania był mniejszy. Natomiast podczas wyżarzania mikrotwardość stopniowo maleje wraz ze zmianą temperatury z 200 do 400°C.

Podczas przeglądu literatury zwrócono również uwagę na artykuł [5], pokazujący wpływ jonów miedzi na mikrotwardość warstwy wierzchniej stopów tytanu VT1-0. Do badania zastosowano metodę Vickersa, a urządzenie, którym wykonano pomiar, to Nano Hardness Tester. Dla uzyskania wiarygodnych wyników dla każdej próbki wykonano nie mniej niż 10 odcisków wgłębnika pod obciążeniem 50 mN. Mikrotwardość została obliczona na podstawie analizy gałęzi odciażającej zgodnie z metodą Olivera-Pharra.

2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Badania eksperymentalne polegały na pomiarze twardości oraz mikrotwardości poszczególnych warstw (stron) bimetalu AA2519 – AA1050 – Ti6Al4V

oraz jego materiałów bazowych. Ze względu na niewielką grubość warstwy przeładkowej wykonanej z AA1050 pomiary twardości tego materiału pominięto. Zasadniczym celem badań było dokonanie analizy porównawczej wyników uzyskanych na podstawie pomiarów twardości dokonanych różnymi metodami.

W oparciu o analizę literatury z zakresu tematu ustalono, że najodpowiedniejszą metodą pomiaru twardości dla tak szerokiej grupy będzie pomiar metodą Vickersa. Ze względu na to za wielkość wyjściową, tj. taką, do której odniesiono pozostałe wyniki badań, przyjęto wyniki uzyskane za pomocą standardowego twardościomierza mierzącego twardość we wcześniej wspomnianej skali. Dodatkowo postanowiono wykonywać pomiary z naciskiem 100 N.

2.1. Obiekt badań

Pomiar twardości odbywał się na trzech obiektach, tj. materiale warstwowym AA2519 – AA1050 – Ti6Al4V oraz jego materiałach bazowych.

Badany materiał warstwowy nie jest obecnie wykorzystywany. Jest całkowicie nowy, wytworzony przez opolską firmę Explomet. Został opracowany, aby wyjść naprzeciw oczekiwaniom konstruktorów, którzy poszukują do projektowanych przez siebie urządzeń coraz to lżejszych materiałów, nie zmniejszając przy tym własności mechanicznych. Dodatkowo ze względu na połączenie materiału o wysokiej wytrzymałości mechanicznej (R_m o wartości blisko 1000 MPa), jakim jest stop tytanu, oraz plastycznego aluminium sprawia, że powstały w wyniku zgrzewania wybuchowego kompozyt wykazuje odporność balistyczną. Jest to cecha, która sprawia, że materiał jest dedykowany do zastosowań militarnych.

Ze względu na innowacyjny charakter badanego materiału warstwowego oraz materiałów bazowych znajdujących się w zupełnie różnym obszarze zastosowań trudno jednoznacznie opisać własności badanego kompozytu, opierając się na powszechnie stosowanych metodach. Z tego powodu analizę twardości kompozytu Al – Ti postanowiono rozpocząć od pomiarów twardości materiałów bazowych.

Należy zaznaczyć, że wybrane własności mechaniczne badanych materiałów zostały już wcześniej wyznaczone. Szczegółowe wyniki tych badań można odnaleźć w autorskich artykułach [2, 3, 8].

Skład chemiczny stopu aluminium AA 2519 przedstawiono w tabeli 1, natomiast skład chemiczny tytanu Ti6Al4V – w tabeli 2.

Tabela 1. Skład chemiczny stopu aluminium AA2519 [6]

Table 1. Chemical composition of aluminum alloy AA2519 [6]

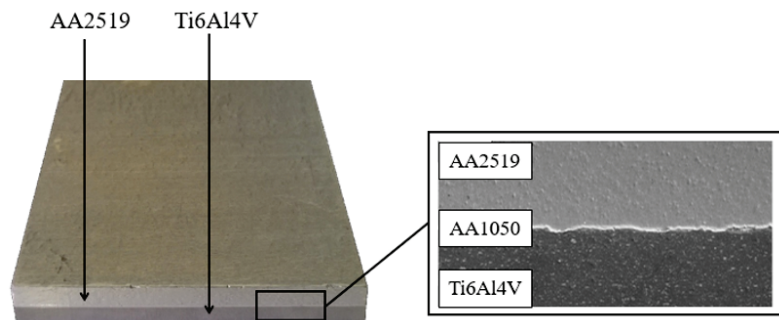
Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Ti	V	Zr
0,06	0,08	5,77	0,18	0,01	0,04	0,12	0,2

Tabela 2. Skład chemiczny stopu tytanu Ti6Al4V [17]

Table 2. Chemical composition of titanium alloy Ti6Al4V [17]

Al	V	Fe	Si	O	C	N	H
6,42	4,12	0,18	0,024	0,12	0,013	0,011	0,004

Materiały bazowe, których skład chemiczny przedstawiono w tabelach 1 i 2, zostały połączone ze sobą metodą wysokoenergetyczną, tj. za pomocą zgrzewania wybuchowego z wykorzystaniem saletrolu. Arkusz blachy uzyskany właśnie podczas tego procesu przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Arkusz blachy powstały w wyniku zgrzewania wybuchowego stopów AA2519 – AA1050 – Ti6Al4V

Fig. 1. The sheet was formed as a result of explosive welding of AA2519 – AA1050 – Ti6Al4V alloys

Ze względu na znaczne oddziaływanie ciepła podczas procesu łączenia blach po procesie zgrzewania konieczna jest obróbka termiczna powstałego kompozytu. Polega ona na wygrzewaniu blachy w temperaturze (530–550)°C przez dwie godziny oraz przyspieszonym starzeniu w temperaturze 165°C przez 10 godzin. Naturalnie taka temperatura nie jest w stanie wpłynąć na własności stopu tytanu, jednak w przypadku stopu aluminium AA2519 wspomniana obróbka wpływa pozytywnie na własności wytrzymałościowe tego stopu poprzez wytwarzanie się cząstek fazy θ .

2.2. Opis badań

Badania składały się z pomiarów twardości z wykorzystaniem dwóch twardościomierzy. Zmierzono twardość każdego z materiałów bazowych oraz poszczególnych warstw. Wszystkie próbki przed rozpoczęciem badań zostały zeszlifowane w taki sposób, aby chropowatość powierzchni nie zakłóciła pomiarów. Należy zaznaczyć, że wszystkie próbki do badań stanowiły wycinki z arkusza poszczególnych blach o grubości 10 mm i pozostałych wymiarach dostosowanych do zakresu aparatury badawczej. Każdorazowo dopilnowano, aby kolejne pomiary twardości odbywały się w odpowiednim odstępnie od pomiaru poprzedzającego. Zgodnie z procedurami opisanymi w stosownych instrukcjach, za minimalny odstęp przyjęto dwukrotność wielkości odcisku pozostawionego po wykonaniu pomiaru poprzedzającego.

Wspomniane pomiary twardości wykonano za pomocą standardowego twardościomierza Vickersa firmy Huatec z obciążeniem 100 N. Zmierzono twardość zarówno materiału warstwowego, jak i materiałów bazowych. Twardościomierz, przy wykorzystaniu którego wykonano pomiary, zaprezentowano na rysunku 2.



Rys. 2. Twardościomierz HV 10 wykorzystany podczas badań
Fig. 2. HV 10 hardness tester used during tests

Następnie przystąpiono do pomiarów tej samej charakterystyki mechanicznej za pomocą uniwersalnego twardościomierza TH – 110, dokonując pomiaru metodą Leeba z głowicą typu D. W przypadku gdy było to możliwe, zmierzona wartość była przeliczana na twardość Vickersa. Należy zaznaczyć, że zgodnie z metodyką pomiaru próbki w sposób trwały zamocowano w uchwycie, którego masa wraz z próbką przekraczała 5 kg. Twardościomierz wykorzystany podczas badań zaprezentowano na rysunku 3. Należy zaznaczyć, że wyniki twardości mierzone za pomocą twardościomierza Leeba – przeliczone do twardości wyrażonej na skali Vickersa – oznaczone zostały za pomocą symbolu HV_L .



Rys. 3. Twardościomierz TH – 110 (Leeba) wykorzystany podczas badań twardości
Fig. 3. TH –110 hardness tester (Leeba) used during hardness tests

2.3. Wyniki badań

Wyniki badań uzyskane zgodnie z przedstawioną w poprzednich rozdziałach procedurą zebrano i opracowano w postaci tabelarycznej. Wyniki badań twardości stopu aluminium AA2519 jako materiału samodzielnego (bazowego) zaprezentowano w tabeli 3, natomiast graficzną formę wyników – na rysunku 4a.

Podobnie jak w przypadku stopu aluminium, tak w przypadku Ti6Al4V otrzymane wyniki zestawiono w postaci tabelarycznej (tabela 4), a ich graficzne przedstawienie – na rysunku 4b.

Tabela 3. Wyniki pomiarów twardości stopu aluminium AA2519

Table 3. The results of measuring the hardness of the AA2519 aluminum alloy

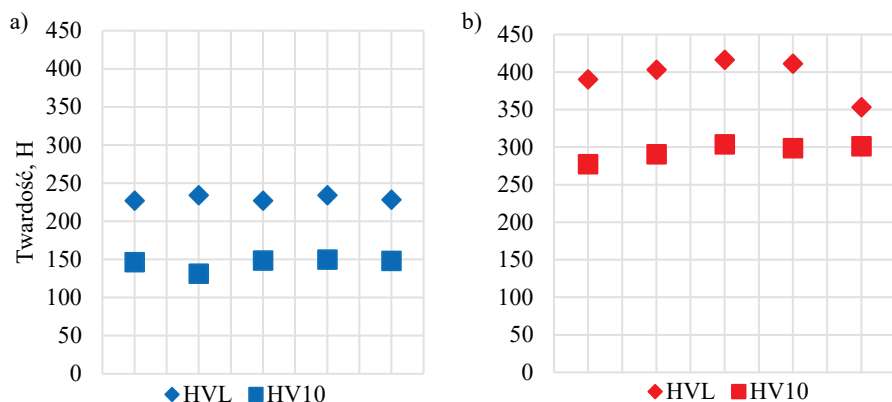
Materiał	Twardość		
	HL	HV ₁₀	HV _L
AA2519	504	146	227
	511	131	234
	504	148	227
	511	150	234
	505	148	228
Wartość średnia $\overline{H_L}$	507,0	144,7	230,0
Odchylenie standardowe	3,7	7,7	3,7

Tabela 4. Wyniki pomiarów twardości stopu tytanu Ti6Al4V

Table 4. Results of hardness measurements of titanium alloy Ti6Al4V

Materiał	Twardość		
	HL	HV ₁₀	HV _L
Ti6Al4V	642	277	390
	651	290	403
	660	303	416
	656	299	411
	615	301	353
Wartość średnia $\overline{H_L}$	644,8	294,0	394,6
Odchylenie standardowe	18,0	10,7	25,2

W kolejnej części badań przeprowadzono pomiary poszczególnych stron materiału warstwowego Al – Ti. Wyniki pomiarów dla strony aluminiowej materiału Al – Ti przedstawiono w tabeli 4 oraz na rysunku 5a, natomiast dla strony tytanowej – w tabeli 5, a w formie graficznej – na rysunku 5b.



Rys. 4. Wyniki pomiarów twardości materiałów bazowych: a) stopu aluminium AA2519, b) stopu tytanu Ti6Al4V

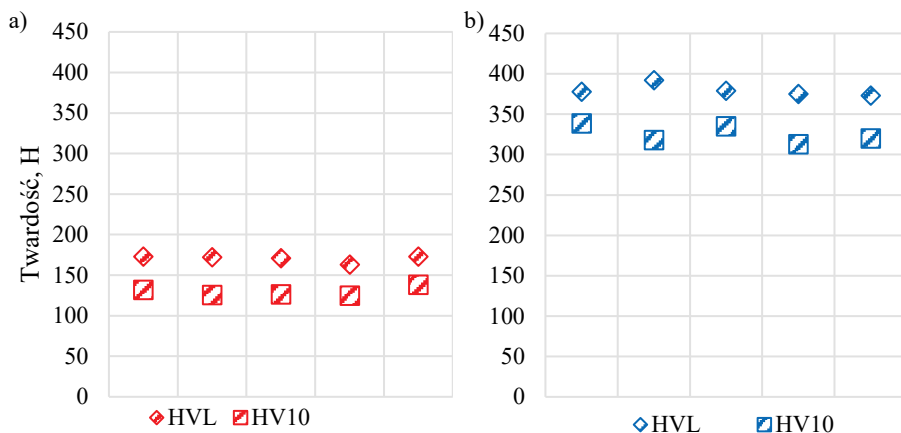
Fig. 4. Results of hardness measurements of base materials: a) AA2519 aluminum alloy, b) Ti6Al4V titanium alloy

Tabela 5. Wyniki pomiarów twardości stopu aluminium AA2519 w materiale warstwowym Al – Ti
Table 5. Results of hardness measurements of AA2519 aluminum alloy in Al – Ti material

Materiał	Twardość		
	HL	HV ₁₀	HV _L
AA2519 w Al – Ti	446	132	173
	445	125	172
	443	126	171
	435	125	163
	446	138	173
Wartość średnia $\overline{H}_t$	443,0	129,4	170,4
Odchylenie standardowe σ	4,6	5,8	4,2

Tabela 6. Wyniki pomiarów twardości stopu tytanu Ti6Al4V w materiale warstwowym Al – Ti
Table 6. Results of hardness measurements of titanium alloy Ti6Al4V in the Al – Ti layer material

Materiał	Twardość		
	HL	HV ₁₀	HV _L
Ti6Al4V w Al – Ti	633	339	378
	643	318	392
	634	335	379
	631	313	375
	630	320	373
Wartość średnia	634,2	324,9	379,4
Odchylenie standardowe	5,2	11,3	7,4



Rys. 5. Wyniki pomiarów twardości poszczególnych warstw w materiale warstwowym Al – Ti:
a) strona stopu aluminium AA2519, b) strona stopu tytanu Ti6Al4V

Fig. 5. Results of hardness measurements of individual layers in the Al –Ti layered material:
a) AA2519 aluminum alloy side, b) Ti6Al4V titanium alloy side

2.4. Analiza wyników badań

Analizując otrzymane wyniki posługiwano się uśrednionymi wartościami z pomiarów. Ze względu na to, że pomiary twardości HV_L są wartością uzyskiwaną na podstawie twardości mierzonej na skali Leebea, nie poddano analizie wyników HL, ponieważ trudno je jednoznacznie odnieść do wyników wyrażonych na skali Vickersa.

Jak wcześniej wspomniano, za wartość bazową uznano pomiar twardości metodą Vickersa z obciążeniem 100 N. Procentowe różnice pomiędzy poszczególnymi wynikami pomiarów, adekwatnie do rozpatrywanego przypadku, wyznaczano zgodnie z zależnością matematyczną (1):

$$\Delta H = \frac{HV_{10} - HV_L}{HV_{10}} \cdot 100\% \quad (1)$$

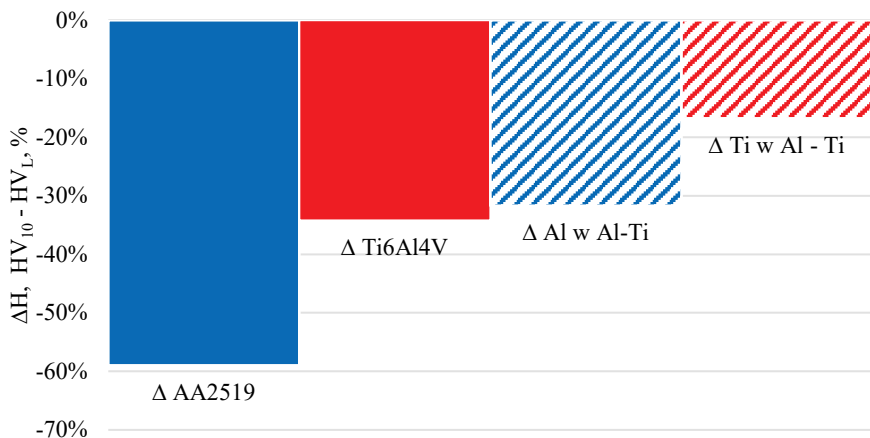
gdzie:

- ΔH – różnica w twardość mierzona przy wykorzystaniu różnych metod pomiarowych,
- HV_{10} – twardość mierzona za pomocą twardościomierza Vickersa z obciążeniem 100 N,
- HV_L – twardość mierzona za pomocą twardościomierza Leebea przeliczona na twardość w skali Vickersa.

Różnicę pomiędzy pomiarami twardości metodą Leebea przeliczoną do twardości wyrażonej w skali Vickersa dla obu materiałów bazowych przedstawiono na rysunku 6.

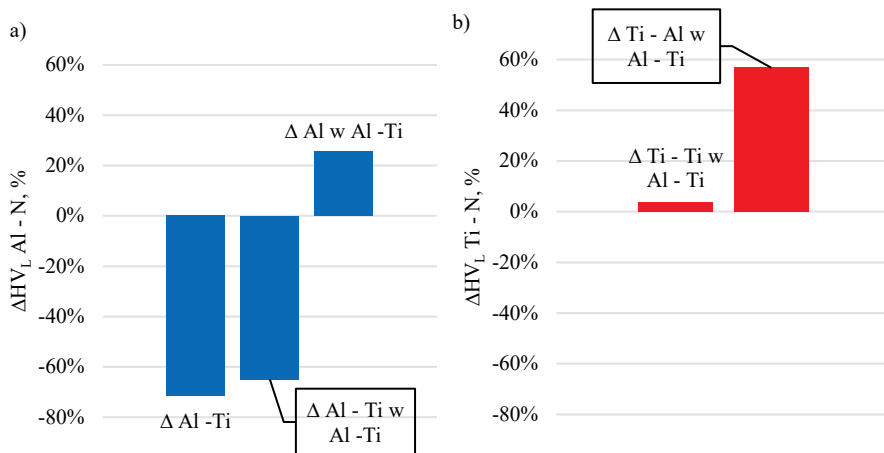
Pomiędzy materiałami bazowymi występują znaczne różnice własności mechanicznych, w tym także twardości (dla pomiarów HV_L – rys. 7, dla pomiarów HV₁₀ – rys. 8). Można również zaobserwować, jak zmieniała się uśredniona wartość różnic twardości w skutek zastosowanej metody pomiaru.

Takie samo porównanie wykonano dla stopu Ti6Al4V, przy czym nie porównywano ze sobą ponownie stopów AA2519 oraz Ti6Al4V (rys. 7 i 8).



Rys. 6. Procentowe różnice pomiędzy pomiarami twardości wykonanymi za pomocą twardościomierzy Leeba oraz Vickersa dla materiałów bazowych oraz poszczególnych warstw w materiale warstwowym

Fig. 6. Percentage differences between hardness measurements made with Lee and Vickers hardness testers for base materials and individual layers in the layered material

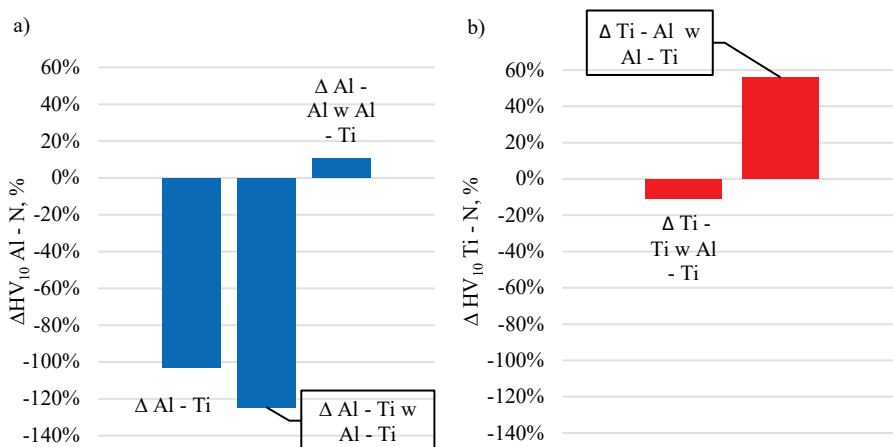


Rys. 7. Różnice w twardości materiałów bazowych oraz materiałów bazowych i poszczególnych warstw materiału warstwowego w skali Leeba przeliczone na wartość twardości w skali Vickersa: a) dla stopu aluminium AA2519, b) dla stopu tytanu Ti6Al4V

Fig. 7. Differences in the hardness of basic materials, as well as basic materials and individual layers of layered material on the Lee scale converted to Vickers hardness value: a) for aluminum alloy AA2519, b) for titanium alloy Ti6Al4V

Pomiary twardości wykonane w skali Leeba przeliczone do skali Vickersa pokazują, że stop tytanu Ti6Al4V jako materiał samodzielny (bazowy) wykazuje największą twardość. W stosunku do bazowego stopu aluminium AA2519 różnica sięga 72%. W przypadku warstwy aluminium w materiale warstwowym bazowy Ti6Al4V jest twardszy o 65%. Zestawiając ze sobą twardość wspomnianego

wcześniej bazowego stopu tytanu oraz warstwy tytanowej, w materiale warstwowym zaobserwowano niewielką rozbieżność wynoszącą zaledwie 4%. W przypadku stopu aluminium po zgrzewaniu wybuchowym zwiększyła się jego twardość o 26% w odniesieniu do AA2519 jako materiału bazowego.



Rys. 8. Różnice w twardości materiałów bazowych oraz materiałów bazowych i poszczególnych warstw materiału warstwowego w skali Vickersa (HV_{10}): a) dla stopu aluminium AA2519, b) dla stopu tytanu Ti6Al4V

Fig. 8. Differences in the hardness of base materials as well as base materials and individual layers of layered material on the Vickers scale (HV_{10}): a) for aluminum alloy AA2519, b) for titanium alloy Ti6Al4V

Podobnie jak w poprzednim przypadku wyznaczono procentowe różnice pomiędzy twardościami materiałów bazowych oraz poszczególnymi warstwami w materiale warstwowym. Tym razem obliczenia wykonano wyłącznie w oparciu o pomiary wykonane twardościomierzem Vickersa z obciążeniem 100 N zgodnie z zależnością (2) i (3):

$$\overline{\Delta HV}_{Al} = \frac{\overline{HV_{10 Al}} - \overline{HV_{10 Al w Al - Ti}}}{\overline{HV_{10 Al}}} \cdot 100\% \quad (2)$$

lub:

$$\overline{\Delta HV}_{Ti} = \frac{\overline{HV_{10 Ti}} - \overline{HV_{10 Ti w Al - Ti}}}{\overline{HV_{10 Ti}}} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie:

- ΔHV_{Al} – różnica w twardość wyrażonej w skali Vickersa pomiędzy bazowym stopem aluminium a warstwą aluminium w kompozycie Al – Ti,
- ΔHV_{Ti} – różnica w twardość wyrażonej w skali Vickersa pomiędzy bazowym stopem tytanu a warstwą tytanową w kompozycie Al – Ti,
- Al – indeks odnoszący się do stopu aluminium AA2519,
- Ti – indeks odnoszący się do stopu tytanu Ti6Al4V,
- $Al - Ti$ – indeks odnoszący się do materiały warstwowego Al – Ti.

W przypadku zastosowania metody Vickersa z obciążeniem 100 N, materiałem o większej twardości jest stop tytanu Ti6Al4V, będący warstwą w materiale warstwowym. Jest to sprzeczne z wynikami uzyskanymi za pomocą metody Leeba. Różnica między bazowym stopem tytanu a jego warstwą w Al – Ti wynosi 11%. Sam stop tytanu jest ponad dwukrotnie twardszy od swobodnego bazowego aluminium AA2519, a różnica ta wynosi 103%. Różnica w twardości jest jeszcze większa w przypadku, gdy porówna się ze sobą twardość bazowego stopu Ti6Al4V oraz warstwę aluminiową w kompozycie Al – Ti. Tytan bowiem jest o 125% twardszy. Samodzielny stop aluminium w porównaniu z warstwą kompozytu będącą tym samym stopem – podobnie jak w metodzie Leeba – jest twardszy, a różnica w twardości wynosi 11%.

3. WNIOSKI

1. Przeprowadzone badania z wykorzystaniem obu metod wskazują, że stop tytanu jest twardszy niż stop aluminium w przypadku pomiarów metodą Vickersa o 150 HV₁₀, natomiast w przypadku pomiarów wykonanych za pomocą twardościomierza Ti6Al4V był twardszy o 160 HV_L.
2. Obie metody dają powtarzalne wyniki, jednak po przeliczeniu wartości ze skali Leeba na skalę Vickersa są między nimi różnice. Pomiar metodą Leeba w każdym badanym przypadku daje w odniesieniu do pomiarów metodą Vickersa większy wynik. Różnica (pomiędzy metodami) w badaniach bazowego stopu AA 2519 wynosiła niespełna 60%, w przypadku bazowego stopu tytanu ponad 40%. W badaniach warstwy aluminiowej w materiale Al – Ti różnica wynosiła ponad 30%, a w warstwie tytanowej w materiale warstwowym – oscylowała w granicach 15%.
3. W badaniach twardościomierzem Leeba stwierdzono, że samodzielny stop Ti6Al4V jest twardszy od tego samego stopu będącego warstwą w kompozycie Al – Ti, a w przypadku badań metodą Vickersa uzyskano odmienne wyniki.
4. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że pomiar twardości metodą Leeba może być wykorzystywany jedynie do celów porównawczych w obrębie jednego materiału.
5. W przypadku materiału warstwowego do pomiarów twardości sugeruje się stosować metody wgłębnikowe ze względu na to, że na przeciwległej stronie badanego arkusza znajduje się materiał o innej sztywności, powodujący zakłócenia w badaniach metodami dynamicznymi.

LITERATURA

- [1] BAI F.M.: A significant increase in the hardness of nanotwinned titanium alloys prepared via the martensitic phase transformation. *Materials Letters*, 255, 2019, 126–507.
- [2] BOROŃSKI D.: Crack initiation and growth analysis in explosively welded AA2519–AA1050–Ti6Al4V layered material in ambient and cryogenic conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 232(8), 2018, 1470–1480.
- [3] BOROŃSKI D.: Fracture Toughness of Explosively Welded Al/Ti Layered Material in Cryogenic Conditions. *Procedia Structural Integrity*, 2, 2016, 3764–3771.

- [4] BUTNICKI S.: Metaloznawstwo. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1996.
- [5] FEDORISHEVA M.V.: The structure - phase state and microhardness of the surface layer of the VT1-0 titanium alloys treated by copper ions. *Vacuum*, 149, 2018, 150–155.
- [6] FISHER J.: Aluminum alloy 2519 in military vehicles. *Advanced Materials Process*, 160, 2002, 43–46.
- [7] KOLENDA J., KYZIOŁ L.: Porównawcza miara dynamicznej twardości metali. *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej*, 48 nr 3 (170), 2007, 39–45.
- [8] KOTYK M., BORONSKI D.: Influence of the theoretical load point on the value of the J – JQ integral during determination of fracture toughness of 2519 aluminium alloy. *MATEC Web Conf.*, 290, 2019, 08–011.
- [9] KRAJEWSKI A.: Wpływ fazy drgań ultradźwiękowych na strukturę i twardość napoin stopu aluminium 2017A. *Przegląd Spawalnictwa*, 85, nr 1, 2013, 45–50.
- [10] LIU H.: Microstructural evolution and hardness response in the laser beam welded joints of pure titanium during recrystallization and grain growth. *Materials Characterization*, 145, 2018, 87–95.
- [11] MATUSZAK J., ZALESKI K.: Badania porównawcze wpływu frezowania na chropowatość powierzchni i mikrotwardość warstwy wierzchniej stopu tytanu Ti6Al4V oraz stali nierdzewnej 15-5PH. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji*, 31(2), 2011, 59–68.
- [12] PEŁCZYŃSKI T.A.: Twardość metali i ich stopów z uwzględnieniem fizyki odkształceń plastycznych: monografia. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2008.
- [13] PIWOWARCZYK T.: Możliwości łączenia aluminium z miedzią lutami miękkimi na osnowie Sn-Zn. *Welding Technology Review*, 85, 2013, 8.
- [14] TARNOWSKI J.: Badanie modułu sprężystości i mikrotwardości warstw wierzchnich tłoka samochodowego w aspekcie jego zużycia. *Tribologia*, 5, 2013.
- [15] WANG Y., CAO L.: Effect of retrogression treatments on microstructure, hardness and corrosion behaviors of aluminum alloy 7085. *Journal of Alloys and Compounds*, 814, 2020, 152–264.
- [16] WOJDAT T.: Evaluation of the structure and selected properties of aluminum alloy and titanium joints welded with the CMT method. *Welding Technology Review*. 90, 2018, 8.
- [17] ZHANG W.: Preparation of TiBw/Ti–6Al–4V composite with an inhomogeneous reinforced structure by a canned hot extrusion process. *Journal of Alloys and Compounds*, 669, 79–90 (2016).

ANALYSIS OF HARDNESS OF EXPLOSIONALLY WELDED Al – Ti LAYER MATERIAL AND ITS BASE MATERIALS

Summary: Widespread trend which is technical objects weight reduction through using very light materials to build is still very common. It leads us to create new and lighter materials which mechanical characteristics needs some experimental verification. In this article we present results of measurement one of described material which is AA2519-AA1050-Ti6Al4V in two different methods. Additionally all experiment results were referred to durability of basic materials. It shows that hardness of base material is different from layer in layer material made from same material.

Key words: hardness, layered material, alloy Ti6Al4V, alloy AA2519, light materials, Al – Ti layer material

Jarosław Robert MIKOŁAJCZYK

INFLUENCE OF CONSUMABLES ON THE AMOUNT OF POWER CONSUMPTION OF KINEMATIC VAPOR OF CONFORMAL CONTACT

Summary: This paper presents a statistical analysis of the variation of electric power consumption of a tribological station as a consequence of the process of wear of kinematic vapor of conformal contact working in the presence of a consumable of a defined content. It contains the presentation of test conditions and design of a test rig. Tribological tests were carried out at a room temperature for one velocity of relative motion. Determined was the influence of concentration of a selected consumable in SN-150 oil base on the variation of electric consumption of a tribotester. The statistical analysis was carried out on the basis of R software.

Key words: surface texture, surface layer, base oil, oil additives, consumable, electric power

1. INTRODUCTION

The object of research of this paper is the process of wear of samples with conformal contact ongoing in the presence of a consumable of a defined content. In order to find out its course tests were carried out on a tribological wear test rig. The object of the test were samples in the shape of a cube. A counter sample was in the form of a flat ring-shaped plate.

The fulfilment of set functions by each kinematic vapor in the operating process requires the supply of energy. Part of that energy is used for the implementation of tasks, yet another part constitutes the loss of energy. The efficiency of kinematic vapor depends on the relation between the two parts. Because a defined fixed amount of energy is necessary for the realization of a specific function, hence as a result of monitoring the energy consumption by the system it is possible to observe its loss of energy. Thus, the course of power input is coupled, as it were, with the course of operating temperature of mating elements. Therefore, to describe the impact of tested consumables on the intensity of the wear process, taken was the consumption of electric power and its variation in the function of the path of friction. A smaller power input is equivalent to lower temperatures of the tribological system – the loss of energy resulting from the friction work is smaller. In presented tests, a 3-phase asynchronous cellular electric motor was applied for the drive of a tribotester.

2. TEST CONDITIONS

Values, which constitute the set of input factors, were selected on the basis of gathered literature information and preliminary tests:

- average relative motion velocity V_{sr} ,
- type of lubricating composition.

The average velocity of relative motion during the tests amounted to: $9.6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ($0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Samples with a counter sample were mating at the external load of 600N which – for the contact surface of samples with a counter sample amounting to 300 mm^2 – corresponds to the theoretical pressure in the contact zone of 2.0 MPa.

Taking into account the material of samples and counter sample, the following hardness of samples was adopted: 40 HRC, and for a counter sample: 60 HRC.

As additives to SN-150 oil base selected were consumables: Motor Life and Mind M. For their selection the following criteria were used: availability, operations mechanism, purpose. Apart from that no research was found in the analyzed literature as regards testing of a lubricating compound consisting of consumables mentioned above. The first mentioned consumable is widespread in Poland. It causes the modification of the surface layer by creating a boundary layer as a result of physisorption and chemisorption. It contains synthetic base components, anti-wear additives, antioxidants, extreme pressure additives. Whereas Mind M constitutes a hydrocarbon complex which combines chemically with the metal of the base forming a microscopic monomolecular layer which cannot be washed out. It distributes the pressure force on a greater surface thereby increasing the durability of construction materials. It interacts with the metallic base (ferrous or non-ferrous) mainly in places of an increased temperature of the friction process [11, 12].

Producers of consumables mentioned above recommend their 5% concentration in the oil base. In order to learn more about their operation, both lower than this value and higher concentration values were used in this paper. The following concentrations were used: 0% (pure oil base); 0.5%; 1%; 2%; 5% and 7% of tested additive in the oil base. The third consumable was a composition consisting of Motor Life and Mind M in a 1:1 ratio of concentrations: 0.5%; 2%; 5% and 7%.

On the basis of literature information, for the set of output factors taken were values which characterize the wear process, including the power input P [kW] of a tribotester, whose statistical analysis prepared in R software is presented below.

Constant factors in the tests included the construction material of samples, i.e. steel 102Cr6 (NC6). This steel is characterized by, inter alia, a small hardness straggling after heat treatment, therefore in order that hardness of samples be within a narrow range, this material was selected for testing. Samples were in the shape of a cube measuring $10 \times 10 \times 10$ [mm].

The following constant factors were adopted:

- material of a counter sample (steel X210Cr12 – formerly NC11),
- hardness (H) of a counter sample (60 ± 2 HRC),
- state of the surface texture of a counter sample (periodically controlled),
- conditions of treatment of tested elements (ground surface),
- path of friction $L = 2000 \text{ m}$,
- operating temperature (the temperature in which transformation of the surface layer proceeded) equal to the ambient temperature: 20°C ,
- pressure force of a counter sample onto samples $F = 600 \text{ N}$.

Random, uncontrolled input factors – disturbances include inter alia:

- vibrations resulting from deviations of structure elements of the test rig,
- contamination of the work environment,
- diversification of the surface texture of samples caused for example by the process of wear of tools during the treatment,
- variation of the pressure force resulting from the installation deviation of the spring deflection as well as progressive wear of samples,
- samples hardness straggling caused for instance by segregation of the samples material in its whole volume.

Tests were carried out on the rig presented in Fig. 1. Tested samples were fixed in three grooves every 120° on the face of the bush stabilizing samples in order to ensure a reliable and uniform three-surface pressure of mating elements.

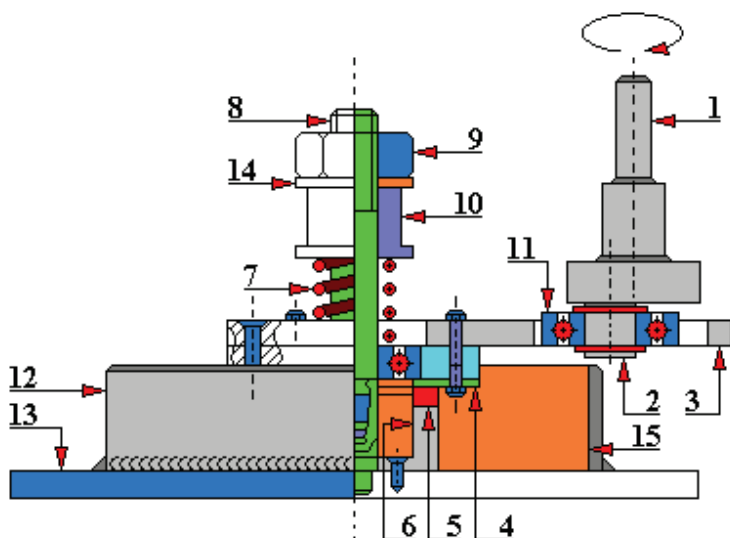


Fig. 1. Structural form of the test rig: 1 – eccentric handle, 2 – eccentric, 3 – lever, 4 – counter sample, 5 – tested samples, 6 – samples stabilizing bush, 7 – spring, 8 – central screw, 9 – nut, 10 – distance bush, 11 – single-row ball bearing, 12 – pipe jacket, 13 – steel plate of the base, 14 – washer, 15 – tested lubricating compound

Rys. 1. Postać konstrukcyjna stanowiska badawczego: 1 – uchwyt mimośrod, 2 – mimośród, 3 – dźwignia, 4 – przeciwpróbka, 5 – badane próbki, 6 – tuleja ustalająca próbki, 7 – sprężyna, 8 – śruba centralna, 9 – nakrętka, 10 – tuleja dystansowa, 11 – łożysko kulkowe jednorzędowe, 12 – płaszcz rury, 13 – płyta stalowa podstawy, 14 – podkładka, 15 – badana kompozycja smarowa

3. TEST RESULTS

For the relative motion velocity $V_1 = 0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the path of friction $L = 2000 \text{ m}$ was reached after 200 minutes. The measurement of power input was carried out every one second. Thus, $200 \times 60 = 12000$ measurements were made for each concentration of a tested consumable. These data were implemented into R software in order to generate a box plot (Fig. 2).

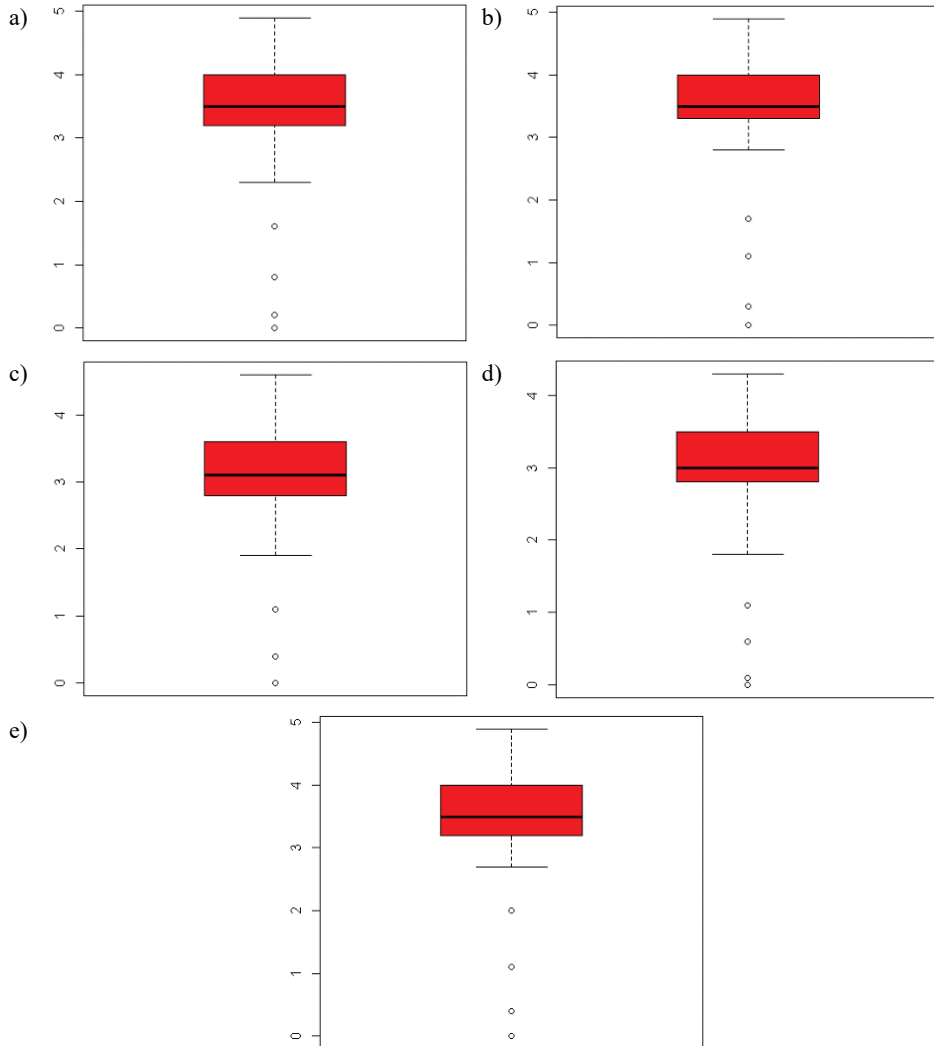


Fig. 2. A box plot generated in R software referring to the power input for the Composition consumable. Relative motion velocity $V = 0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, path of friction $L = 2000 \text{ m}$; on the vertical axle – power consumption in [kW]: a) 100% SN-150 (pure oil base), b) 0.5% Composition consumable, c) 2% Composition consumable, d) 5% Composition consumable, e) 7% Composition consumable

Rys. 2. Wykres pudełkowy wygenerowany w programie R dotyczący poboru mocy dla PE Kompozycja. Prędkość ruchu względnego $V = 0,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, droga tarcia $L = 2000 \text{ m}$; na osi pionowej – pobór mocy w [kW]: a) 100% SN-150 (czysta baza olejowa), b) 0,5% PE Kompozycja, c) 2% PE Kompozycja, d) 5% PE Kompozycja, e) 7% PE Kompozycja

In order to analyze the obtained results, the following statistical parameters were calculated, using R software, for measured values of the power input:

- Min – minimum value,
- 1stQu. – lower (first) sample quartile (Q_1),

- Median – median ('medial value' (Q_2),
- Mean – arithmetic mean,
- 3rdQu. – upper (third) sample quartile (Q_3),
- Max – maximum value,
- IQR – interquartile range,
- R – sample range,
- s – standard deviation,
- d_1 – average deviation from the mean value.

Statistical parameters mentioned above are tabulated in Table 1.

Table 1. List of selected statistical parameters for measured power consumptions for the Composition consumable. Relative motion velocity $V = 0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, path of friction $L = 2000 \text{ m}$
Tabela 1. Zestawienie wybranych parametrów statystycznych dla zmierzonych poborów mocy dla PE Kompozycja. Prędkość ruchu względnego $V = 0,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, droga tarcia $L = 2000 \text{ m}$

	Min	1stQu.	Median	3rdQu.	Max	IQR	R	s	d_1	Mean
0%	0.0	3.2	3.5	4.0	4.9	0.8	4.9	0.486	0.412	3.577
0.5%	0.0	3.3	3.5	4.0	4.9	0.7	4.9	0.434	0.367	3.621
2%	0.0	2.8	3.1	3.6	4.6	0.8	4.6	0.478	0.408	3.187
5%	0.0	2.8	3.0	3.5	4.3	0.7	4.3	0.444	0.383	3.146
7%	0.0	3.2	3.5	4.0	4.9	0.8	4.9	0.469	0.404	3.500

In order to determine a possible dependence between individual power inputs of the system (tribotester) for given concentrations of tested Composition consumable, correlations were calculated using the Pearson's and Spearman's method. It was assumed at the same time that results have a normal distribution. If correlation values are close to 1 or -1 value, then variables are dependent. If correlation values are close to 0 value, then we deal with independent variables. Results are presented in Table 2.

Table 2. Results of correlation between individual power inputs of the tribological system for defined concentrations of Composition consumable. Relative motion velocity $V = 0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, path of friction $L = 2000 \text{ m}$

Tabela 2. Wyniki korelacji pomiędzy poszczególnymi poborami mocy układu tribologicznego dla określonych stężeń PE Kompozycja. Prędkość ruchu względnego $V = 0,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, droga tarcia $L = 2000 \text{ m}$

	Pearson		Spearman	
0%	0.01		0.00	
0.5%				
2%	0.00	-0.01	0.00	-0.01
5%				
7%		0.00		0.00

A similar procedure was adopted for the next consumable – Motor Life. Measured power input data were implemented into R software in order to generate a box plot – Fig. 3.

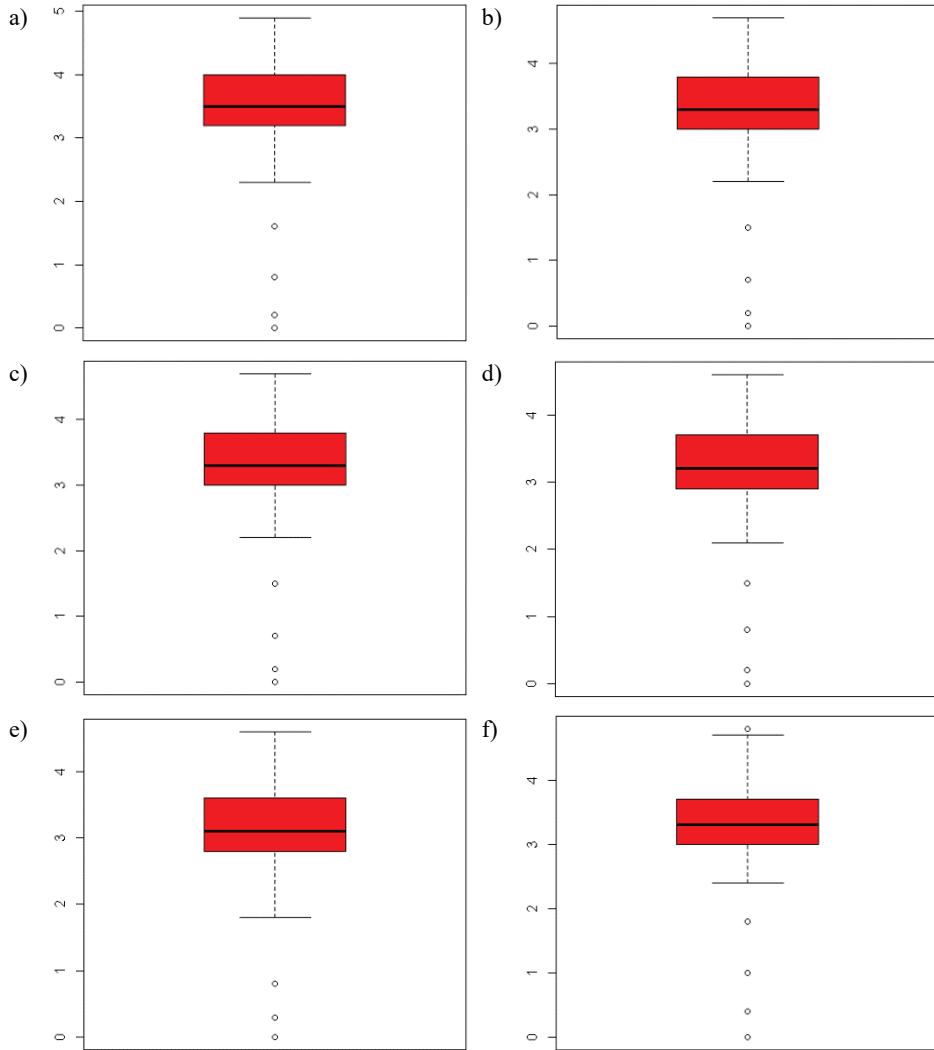


Fig. 3. A box plot generated in R software referring to the power input for Motor Life consumable. Relative motion velocity $V = 0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, path of friction $L = 2000 \text{ m}$; on the vertical axle – power consumption in [kW]: a) 100% SN-150 (pure oil base), b) 0.5% Motor Life, c) 1% Motor Life, d) 2% Motor Life, e) 5% Motor Life, f) 7% Motor Life

Rys. 3. Wykres pudełkowy wygenerowany w programie R dotyczący poboru mocy dla PE Motor Life. Prędkość ruchu względnego $V = 0,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, droga tarcia $L = 2000 \text{ m}$; na osi pionowej – pobór mocy w [kW]: a) 100% SN-150 (czysta baza olejowa), b) 0,5% PE Motor Life, c) 1% PE Motor Life, d) 2% PE Motor Life, e) 5% PE Motor Life, f) 7% PE Motor Life

In order to analyze the obtained results the selected statistical parameters were calculated, using R software, for measured values of the power input. Statistical parameters mentioned above are tabulated in Table 3.

Table 3. List of selected statistical parameters for measured values of power input for Motor Life consumable. Relative motion velocity $V = 0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, path of friction $L = 2000 \text{ m}$

Tabela 3. Zestawienie wybranych parametrów statystycznych dla zmierzonych wartości poboru mocy dla PE Motor Life. Prędkość ruchu względnego $V = 0,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, droga tarcia $L = 2000 \text{ m}$

	Min	1stQu.	Median	3rdQu.	Max	IQR	R	s	d _i	Mean
0%	0.0	3.2	3.5	4.0	4.9	0.8	4.9	0.486	0.412	3.577
0.5%	0.0	3.2	3.4	3.8	4.8	0.6	4.8	0.425	0.355	3.498
1%	0.0	3.0	3.3	3.8	4.7	0.8	4.7	0.461	0.391	3.413
2%	0.0	2.9	3.2	3.7	4.6	0.8	4.6	0.490	0.424	3.281
5%	0.0	2.8	3.1	3.6	4.6	0.8	4.6	0.513	0.443	3.205
7%	0.0	3.0	3.3	3.7	4.8	0.7	4.8	0.471	0.402	3.369

In order to determine a possible dependence between individual power inputs of the system (tribotester) for given concentrations of tested Motor Life consumable, correlations were calculated using the Pearson's and Spearman's method. Results are presented in Table 4.

Table 4. Results of correlation between individual values of power inputs of the tribological system for defined concentrations of Motor Life consumable. Relative motion velocity $V = 0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, path of friction $L = 2000 \text{ m}$

Tabela 4. Wyniki korelacji pomiędzy poszczególnymi wartościami poboru mocy układu tribologicznego dla określonych stężeń PE Motor Life. Prędkość ruchu względnego $V = 0,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ droga tarcia $L = 2000 \text{ m}$

	Pearson		Spearman	
0%	0.04		0.03	
0.5%		0.01		0.00
1.0%	0.03		0.02	
2%		-0.03		-0.05
5%	0.01		0.01	
7%				

The last consumable for which tests were conducted was Mind M for which measured data of power consumption were implemented into R software in order to generate a box plot – Fig. 4.

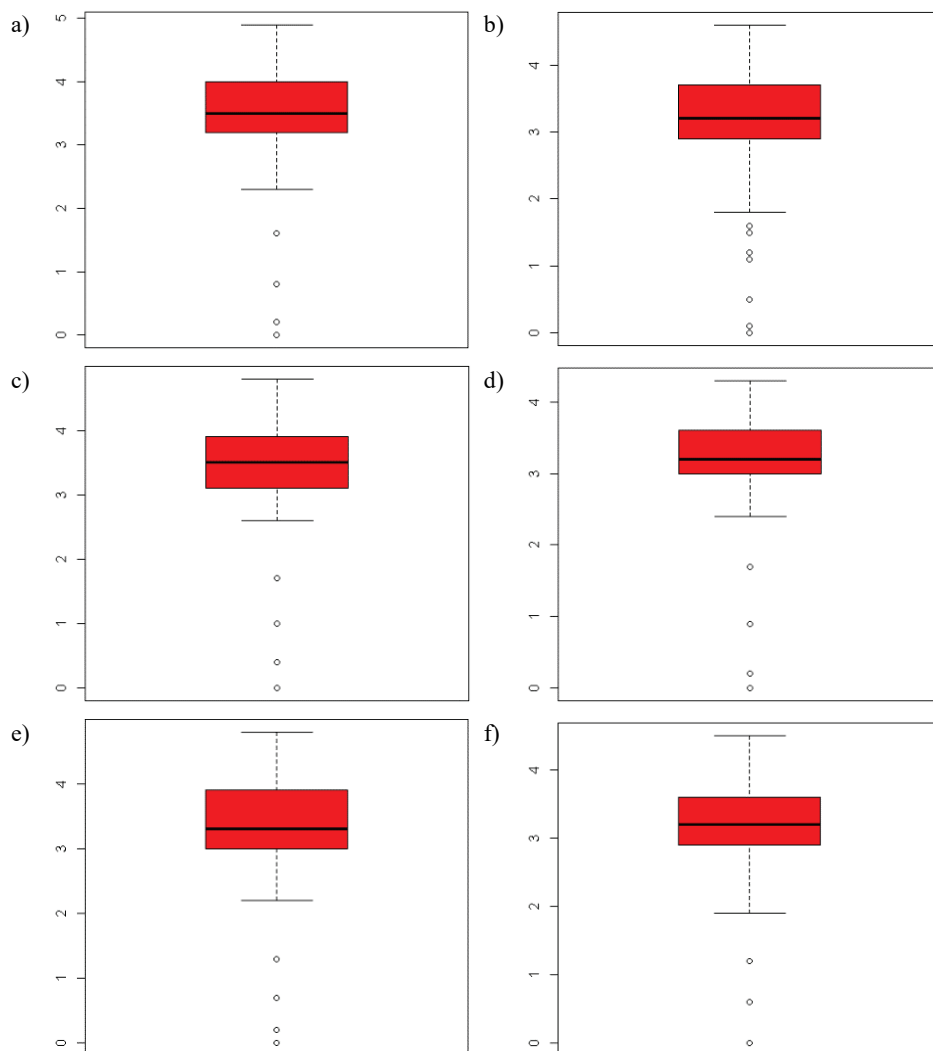


Fig. 4. A box plot generated in R software referring to the power input for Mind M consumable. Relative motion velocity $V = 0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, path of friction $L = 2000 \text{ m}$; on the vertical axis – electric power [kW]: a) 100% SN-150 (pure oil base), b) 0.5% Mind M consumable, c) 1% Mind M consumable, d) 2% Mind M consumable, e) 5% Mind M consumable, f) 7% Mind M consumable

Rys. 4. Wykres pudełkowy wygenerowany w programie R dotyczący poboru mocy dla PE Mind M. Prędkość ruchu względnego $V = 0,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, droga tarcia $L = 2000 \text{ m}$; na osi pionowej – pobór mocy w [kW]: a) 100% SN-150 (czysta baza olejowa), b) 0,5% PE Mind M, c) 1% PE Mind M, d) 2% PE Mind M, e) 5% PE Mind M, f) 7% PE Mind M

In order to analyze the obtained results the selected statistical parameters were calculated, using R software, for measured values of the power input. Statistical parameters mentioned above are tabulated in Table 5.

Table 5. List of selected statistical parameters for measured power inputs for Mind M consumable. Relative motion velocity $V = 0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, path of friction $L = 2000 \text{ m}$

Tabela 5. Zestawienie wybranych parametrów statystycznych dla zmierzonych wartości poboru mocy dla PE Mind M. Prędkość ruchu względnego $V = 0,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, droga tarcia $L = 2000 \text{ m}$

	Min	1stQu.	Median	3rdQu.	Max	IQR	R	s	d_1	Mean
0%	0.0	3.2	3.5	4.0	4.9	0.8	4.9	0.486	0.412	3.577
0.5%	0.0	2.9	3.2	3.7	4.6	0.8	4.6	0.523	0.443	3.298
1%	0.0	3.1	3.5	3.9	4.8	0.8	4.8	0.479	0.401	3.527
2%	0.0	3.0	3.2	3.6	4.3	0.6	4.3	0.355	0.300	3.320
5%	0.0	3.0	3.3	3.9	4.8	0.9	4.8	0.498	0.429	3.453
7%	0.0	2.9	3.2	3.6	4.5	0.7	4.5	0.419	0.356	3.260

In order to determine a possible dependence between individual power consumptions of the system (tribotester) for given concentrations of tested Mind M consumable, correlations were calculated using the Pearson's and Spearman's method, similarly as for Composition and Motor Life consumables. Results are presented in Table 6.

Table 6. Results of correlation between individual values of power inputs of the tribological system for defined concentrations of Mind M consumable. Relative motion velocity $V = 0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, path of friction $L = 2000 \text{ m}$

Tabela 6. Wyniki korelacji pomiędzy poszczególnymi wartościami poboru mocy układu tribologicznego dla określonych stężeń PE Mind M. Prędkość ruchu względnego $V = 0,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, droga tarcia $L = 2000 \text{ m}$

	Pearson		Spearman	
0%	0.05		0.04	
0.5%		0.02		0.01
1.0%	0.06		0.05	
2%	-0.01	0.04	-0.03	0.03
5%				
7%				

If the value of power input for SN-150 pure oil base is taken as:

$$P_{100\% \text{SN-150}} = 1.0 \text{ (lub 100\%)}$$

then the values of power consumption for individual concentrations of tested consumables shall be as those presented Tables 7–9.

Table 7. Presentation of relative variations of power input for individual concentrations of Composition consumable against pure oil base. Relative motion velocity $V = 0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, path of friction $L = 2000 \text{ m}$

Tabela 7. Zestawienie względnych zmian poboru mocy dla poszczególnych stężeń PE Kompozycja względem czystej bazy olejowej. Prędkość ruchu względnego $V = 0,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, droga tarcia $L = 2000 \text{ m}$

	Mean [kW]	$x/P_{100\% \text{SN-150}}$	[%]
0%	3.577	1.0	100%
0.5%	3.621	1.012	101.2%
2%	3.187	0.891	89.1%
5%	3.146	0.879	87.9%
7%	3.500	0.978	97.8%

Table 8. Presentation of relative variations of power input for individual concentrations of Motor Life consumable against pure oil base. Relative motion velocity $V = 0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, path of friction $L = 2000 \text{ m}$

Tabela 8. Zestawienie względnych zmian poboru mocy dla poszczególnych stężeń PE Motor Life względem czystej bazy olejowej. Prędkość ruchu względnego $V = 0,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, droga tarcia $L = 2000 \text{ m}$

	Mean [kW]	$x/P_{100\%SN-150}$	[%]
0%	3.577	1.0	100%
0.5%	3.498	0.978	97.8%
1%	3.413	0.954	95.4%
2%	3.281	0.917	91.7%
5%	3.205	0.896	89.6%
7%	3.369	0.942	94.2%

Table 9. Presentation of relative variations of power input for individual concentrations of Mind M consumable against pure oil base. Relative motion velocity $V = 0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, path of friction $L = 2000 \text{ m}$

Tabela 9. Zestawienie względnych zmian poboru mocy dla poszczególnych stężeń PE Mind M względem czystej bazy olejowej. Prędkość ruchu względnego $V = 0,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, droga tarcia $L = 2000 \text{ m}$

	Mean [kW]	$x/P_{100\%SN-150}$	[%]
0%	3.577	1.0	100%
0.5%	3.298	0.922	92.2%
1%	3.527	0.986	98.6%
2%	3.320	0.928	92.8%
5%	3.453	0.965	96.5%
7%	3.260	0.911	91.1%

4. SUMMARY

The following conclusions can be formulated upon the analysis of obtained characteristics of variations of electric power consumption during the process of friction:

- A reduction of power input, in relation to pure oil base, by ca. 12% was noted for 5% Composition consumable concentration (Table 7);
- A reduction of power input, in relation to pure oil base, by ca. 10% was noted for 5% Motor Life consumable concentration (Table 8);
- A reduction of power input, in relation to pure oil base, by ca. 9% was noted for 7% Mind M consumable concentration (Table 9);
- For Composition, Motor Life and Mind M consumables there are few outliers (Fig. 2, 3 and 4), mainly during the start-up (power-up) of tribotester;
- If the power consumption variation is accepted as a certain feature of tested consumables, then it should be concluded that for a relative motion velocity $V = 0.16 \text{ m/sec}$ there is a beneficial synergism between Motor Life and Mind M consumables. This is reflected by the reduction of power consumption for Composition consumable by as much as ca. 12% for 5% concentration (Table 7);
- The analysis of results of correlation between individual values of power consumption (Table 2, 4 and 6) proves there is no dependence between them.

The analysis of power input by frictional vapor is an important feature of a lubricant. In literature, mainly the variations of the surface layer or changes of surface texture of mating elements are analyzed, which of course is important. However, the analysis of power input by tribological systems practically cannot be found, which seems to be some kind of oversight while assessing tribological properties of a given lubricant. Of course, there will be different power inputs for different tribotesters, but there will always be a certain extremum (minimum or maximum) for tested concentrations.

This lubricant has better lubricating properties in given conditions, for which the smallest electric power inputs were observed.

LITERATURE

- [1] BENDAT J.S., PERSOL A.G.: Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1976.
- [2] BIECEK P.: Analiza danych z programem R. Modele liniowe z efektami stałymi, losowymi i mieszanymi. Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa 2013.
- [3] BIECEK P.: Przewodnik po pakiecie R. Oficyna Wydawnicza GIS, Wrocław 2017.
- [4] CRAWLEY M.: The R Book. Wiley-Blackwell 2012.
- [5] EVERITT B., HOTHORN T.: A Handbook of Statistical Analyses Using R. Chapman&Hall/CRC Computer Science & Data Analysis, 2010.
- [6] GAĞOLEWSKI M.: Programowanie w języku R. Analiza danych, obliczenia, symulacje. Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2016.
- [7] GILLESPIE C., LOVELACE R.: Wydajne programowanie w R. Praktyczny przewodnik po lepszym programowaniu. APN Promise, Warszawa 2018.
- [8] KORONACKI J., MIELNICZUK J.: Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych. Wydawnictwo WNT, Warszawa 2018.
- [9] KRZYSZTOFIK M., URBANEK D.: Metody statystyczne. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1977.
- [10] KRZYŚKO M.: Statystyka matematyczna. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Adama Mickiewicza w Poznaniu, Poznań 1996.
- [11] LABER S.: Preparaty eksploatacyjne. Wydział Mechaniczny Instytutu Budowy Maszyn i Pojazdów, Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra 2001.
- [12] LABER S.: Badania własności eksploatacyjnych i smarnych uszlachetnicza metalu Motor Life Professional. Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra 2008.
- [13] LUSZNIEWICZ A.: Statystyka ogólna. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1987.
- [14] MORRISON D.F.: Wielowymiarowa analiza statystyczna. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1990.
- [15] MIKOŁAJCZYK J.: A comparison list of depressive additives to oils. [W:] Zaawansowana tribologia, XXX Ogólnopolska Konferencja Tribologiczna, Nałęczów 2009, 92–105. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji Radom.
- [16] MIKOŁAJCZYK J.: Badanie wpływu preparatu eksploatacyjnego Mind M na zmianę własności smarnych oleju bazowego SN-150. Inżynieria i Aparatura Chemiczna 5, 2012, 235–236.
- [17] MIKOŁAJCZYK J.: Der Einfluss der ausgewählten Zusatzschmierstoffe auf die Exploitations – Eigenschaften der Mischung mit Basisöl SN-150; [W] 55. Tribologie-Fachtagung. 22 September bis 24 September 2014 in Göttingen. Reibung, Schmierung und Verschleiß. Forschung und praktische Anwendungen. Band II. Gessellschaft für Tribologie e.V., Germany.
- [18] MIKOŁAJCZYK J.: Maszyny tarciove. Budowa, przeznaczenie. Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej, Piła 2018.

- [19] MIKOŁAJCZYK J.: System wizualizacji i archiwizacji danych stanowiska do badań tribologicznych. Praca dyplomowa na Wydziale Elektrotechniki i Telekomunikacji, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz 2011.
- [20] MIKOŁAJCZYK J.: Tribotestery. Budowa, przeznaczenie. Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej, Piła 2019.
- [21] MIKOŁAJCZYK J.: Wpływ dodatków smarowych na transformację warstwy wierzchniej. Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej, Piła 2017.
- [22] MIKOŁAJCZYK J., MATUSZEWSKI M.: Einfluß der ausgewählten Schmierstoffzusätze auf ΔT und ΔP mit Basisöl SN-150. [W:] Tribology in Industry and Research. Materials, Lubricants and Technology. Symposium 2015, Wiener Neustadt, 25 November 2015, Austria, 145–152.
- [23] MIKOŁAJCZYK J., STYP-REKOWSKI M., MATUSZEWSKI M., MUSIAŁ J.: Einfluß der Kompositionen von Schmierzusätzen auf die Exploitations-Eigenschaften der Mischung mit Basisöl SN-150. [W:] Tribology and Mobility. Contribution from Tribotechnology to the Optimization of Production Processes, Maintenance, Lubrication (Friction Conditioning) and Reliability of Vehicles and Road Infrastructure. Symposium 2012, Wiener Neustadt, 15 November 2012, Austria, 94–104.
- [24] Praca zbiorowa pod red. Szydłowskiego H.: Teoria pomiarów. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1981.
- [25] ŻAKOWSKI W., KOŁODZIEJ W.: Matematyka cz. II. Analiza matematyczna. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003.

WPŁYW PE NA POBÓR MOCY PARY KINEMATYCZNEJ O STYKU KONFOREMNYM

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę statystyczną zmiany poboru mocy elektrycznej stanowiska tribologicznego w wyniku procesu zużywania pary kinematycznej o styku konforemnym, pracującej w obecności preparatu eksploatacyjnego PE o zdefiniowanym składzie. Omówiono warunki badań oraz budowę stanowiska badawczego. Badania tribologiczne wykonano w temperaturze pokojowej dla jednej prędkości ruchu względnego. Określono wpływ stężenia wybranego PE w bazie olejowej SN-150 na zmianę poboru mocy elektrycznej tribotestera dla wybranej prędkości ruchu względnego. Analizę statystyczną wykonano w oparciu o program R.

Słowa kluczowe: struktura geometryczna powierzchni, warstwa wierzchnia, olej bazowy, dodatki do olejów, preparat eksploatacyjny, moc elektryczna

Jarosław Robert MIKOŁAJCZYK

STATISTICAL ANALYSIS OF THE MASS VARIATION OF SAMPLES AS A RESULT OF THE WEAR PROCESS

Summary: This paper presents a statistical analysis of the variation of the mass of samples caused by the process of wear of kinematic vapor of conformal contact working in the presence of a consumable of a defined content. It contains the presentation of test conditions and design of a test rig. Tribological tests were carried out at a room temperature for one velocity of relative motion. Determined was the impact of the concentration of a selected consumable in SN-150 oil base on the mass decrement of tested samples. The statistical analysis was produced on the basis of R software.

Key words: surface texture, surface layer, base oil, oil additives, consumable

1. INTRODUCTION

The object of research in this paper is the process of wear of samples with conformal contact ongoing in the presence of a consumable of a defined content. In order to find out its course, tests were carried out on a tribological wear test rig. The object of the test were samples in the shape of a cube. A counter sample was in the form of a flat ring-shaped plate.

2. TEST CONDITIONS

Values, which constitute the set of input factors, were selected on the basis of gathered literature information and preliminary tests:

- average relative motion velocity v_{sr} ,
- type of lubricating compound.

The average velocity of relative motion during the test amounted to: $4.8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ($0.08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Samples with a counter sample were mating at the external load of 600 N which – for the contact surface of samples with a counter sample amounting to 300 mm^2 – corresponds to the theoretical pressure in the contact zone of 2.0 MPa.

Taking into account the material of samples and counter sample, the following hardness of samples was adopted: 40 HRC, and for a counter sample: 60 HRC.

As additives to SN-150 oil base selected were consumables: Motor Life and Mind M. For their selection I followed the criteria listed below: availability, operations mechanism, purpose. Apart from that no research was found in the analyzed literature as regards testing of a lubricating compound consisting of

consumables mentioned above. The first mentioned consumable is widespread in Poland. It causes the modification of the surface layer by creating a boundary layer as a result of physisorption and chemisorption. It contains synthetic base components, anti-wear additives, antioxidants, extreme pressure additives. Whereas Mind M constitutes a hydrocarbon complex which combines chemically with the metal of the base forming a microscopic monomolecular layer which cannot be washed out. It distributes pressure forces on a greater surface thereby increasing the durability of construction materials. It interacts with the metallic base (ferrous or non-ferrous) mainly in places of an increased temperature of the friction process [11, 12].

Producers of consumables mentioned above recommend their 5% concentration in the oil base. In order to learn more about their operation, both lower than this value and higher concentration values were used in this paper. The following concentrations were used: 0% (pure oil base); 0.5%; 1%; 2%; 5% and 7% of tested additive in the oil base. The third consumable was a composition consisting of Motor Life and Mind M in a 1:1 ratio of concentrations mentioned above [15, 16, 18, 19].

On the basis of literature information, for the set of output factors taken were values which characterize the wear process, including the mass decrement Δm whose statistical analysis prepared in R software is presented below.

Mass decrement is an absolute measure of wear commonly used in the research and industrial practice. It is a value which describes the wear process in a representative way.

Constant factors in the tests included the construction material of samples, i.e. steel 102Cr6 (NC6). This steel is characterized by, inter alia, a small hardness straggling after heat treatment, therefore in order that hardness of samples is within a narrow range, this material was selected for testing. Samples were in the shape of a cube measuring $10 \times 10 \times 10$ [mm].

It was assumed that the material of a counter sample and its hardness (H) remained unchanged during the tests. Thus, these features of samples were also included into the constant factors. A counter sample was made of steel X210Cr12 (formerly NC11) quenched to the hardness of 60 ± 2 HRC. The hardness of the counter sample was much greater than the hardness of samples in order that the process of wear be directed, and results of transformation of the surface layer be visible primarily on samples. The condition of the surface texture of the counter sample was periodically controlled – its texture did not show any significant symptoms of wear.

Conditions of treatment of tested elements were also accepted as constant factors – ground surface, friction face equal to $L = 2000$ m, pressure force of the counter sample onto samples $F = 600$ N, work temperature (temperature in which the transformation of the surface layer took place) equal to the ambient temperature: 20°C .

Random, uncontrolled input factors – disturbances include inter alia:

- vibrations resulting from deviations of structure elements of the test rig;
- contamination of the work environment;
- diversification of geometric surface structure of samples caused for example by the process of wear of tools during the treatment;
- variation of the pressure force resulting from the installation deviation of the spring deflection as well as progressive wear of samples.
- samples hardness straggling caused for example by heterogeneity of the samples material in its whole volume

Tests were carried out on the rig presented in Fig. 1. Tested samples were fixed in three grooves every 120° on the face of the bush stabilizing samples in order to ensure a reliable and uniform three-surface pressure of mating elements.

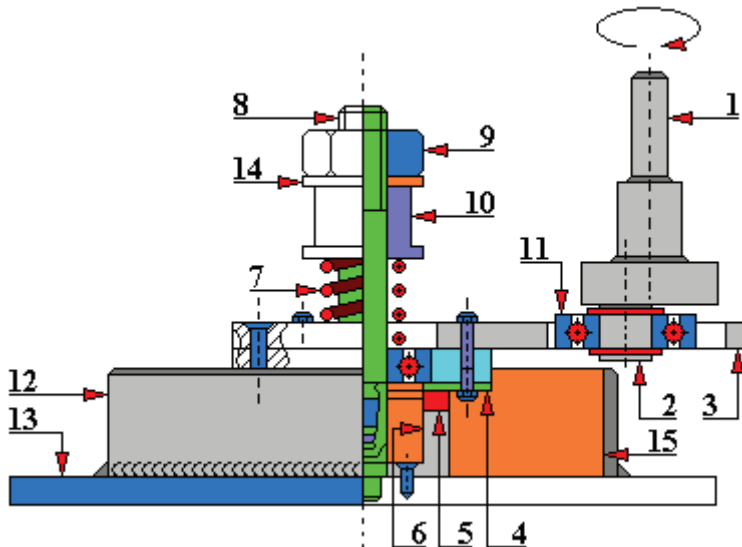


Fig. 1. Structural form of the test rig [15–19]: 1 – eccentric handle, 2 – eccentric, 3 – lever, 4 – counter sample, 5 – tested samples, 6 – samples stabilizing bush, 7 – spring, 8 – central screw, 9 – nut, 10 – distance bush, 11 – single-row ball bearing, 12 – pipe jacket, 13 – steel plate of the base, 14 – washer, 15 – tested lubricating compound

Rys. 1. Postać konstrukcyjna stanowiska badawczego [15–19]: 1 – uchwyt mimośrodowy, 2 – mimośród, 3 – dźwignia, 4 – przeciwpółka, 5 – badane próbki, 6 – tuleja ustalająca próbki, 7 – sprężyna, 8 – śruba centralna, 9 – nakrętka, 10 – tuleja dystansowa, 11 – łożysko kulkowe jednorzędowe, 12 – płaszcz rury, 13 – płyta stalowa podstawy, 14 – podkładka, 15 – badana kompozycja smarowa

3. TEST RESULTS

Table 1 presents measured mass decrements of samples on the length $L = 2000 \text{ m}$ at a relative motion velocity $V = 0.08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ mating with a counter sample immersed in Composition consumable. 0% indicates pure oil base

SN-150 (100%) without additives. Mass decrement of 0.0 mg indicates that the mass decrement was below the sensitivity threshold of a balance (wear traces testify for it). These data were implemented into R software in order to generate a box plot [1–10, 13, 14, 20, 21].

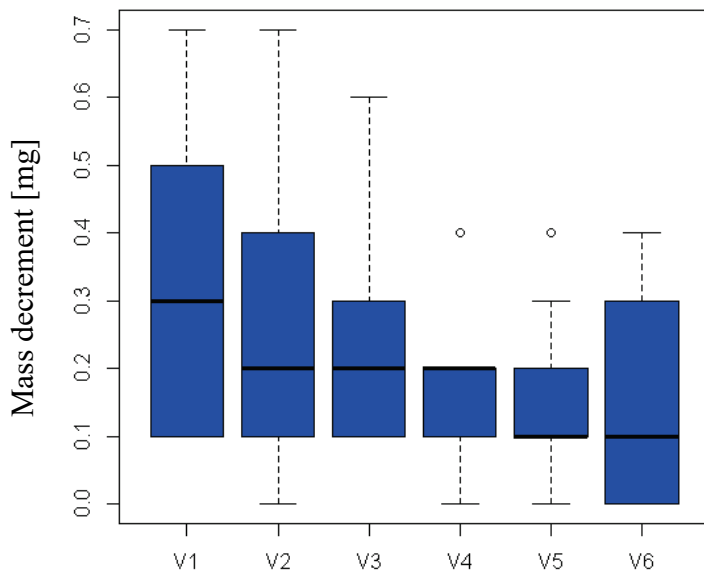


Fig. 2. A box plot generated in R software referring to the samples mass decrement for different concentrations of the Composition consumable. Relative motion velocity $V = 0.08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, path of friction $L = 2000 \text{ m}$; on the vertical axis – mass decrement [mg]; V1 – pure oil base (100% SN-150); V2 – 0.5% Composition consumable, V3 – 1% Composition consumable, V4 – 2% Composition consumable, V5 – 5% Composition consumable, V6 – 7% Composition consumable

Rys. 2. Wykres pudełkowy wygenerowany w programie R dotyczący ubytku masy próbek dla różnych stężeń PE Kompozycja; prędkość ruchu względnego $V = 0,08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, droga tarcia $L = 2000 \text{ m}$; na osi pionowej – ubytek masy [mg]; V1 – czysta baza olejowa (100% SN-150); V2 – 0,5% PE Kompozycja, V3 – 1% PE Kompozycja, V4 – 2% PE Kompozycja, V5 – 5% PE Kompozycja, V6 – 7% PE Kompozycja

Table 1. Mass increment [mg] of samples for particular concentrations of Composition consumable; relative motion velocity $V = 0.08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [15, 16, 19]

Tabela 1. Ubytki masy [mg] próbek dla poszczególnych stężeń PE Kompozycja; prędkość ruchu względnego $V = 0,08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [15, 16, 19]

	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6	Sample 7	Sample 8	Sample 9
0%	0.2	0.3	0.6	0.1	0.5	0.7	0.1	0.4	0.1
0.5%	0.3	0.1	0.4	0.7	0.0	0.2	0.4	0.1	0.1
1%	0.2	0.2	0.5	0.6	0.1	0.1	0.3	0.2	0.1
2%	0.1	0.2	0.2	0.2	0.0	0.2	0.4	0.1	0.0
5%	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	0.2	0.0
7%	0.4	0.3	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.3	0.2

In order to analyze the obtained results the following statistical parameters were calculated, using R software, for measured values of the mass decrement of samples:

- Min – minimum value;
- 1stQu. – lower (first) sample quartile (Q_1);
- Median – median ('medial value' Q_2);
- Mean – arithmetic mean;
- 3rdQu. – upper (third) sample quartile (Q_3);
- Max – maximum value;
- IQR – interquartile range;
- R – sample range;
- s – standard deviation;
- d_1 – average deviation from the mean value.

Statistical parameters mentioned above are tabulated in Table 2.

Table 2. List of selected statistical parameters for measured mass decrements of samples for the Composition consumable

Tabela 2. Zestawienie wybranych parametrów statystycznych dla zmierzonych ubytków masy próbek dla PE Kompozycja

	Min	1stQu.	Median	3rdQu.	Max	IQR	R	s	d_1	Mean
0%	0.1	0.1	0.3	0.5	0.7	0.4	0.6	0.229	0.192	0.3333
0.5%	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	0.3	0.7	0.218	0.172	0.2556
1%	0.1	0.1	0.2	0.3	0.6	0.2	0.5	0.181	0.140	0.2556
2%	0.0	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.4	0.123	0.093	0.1556
5%	0.0	0.1	0.1	0.2	0.4	0.1	0.4	0.123	0.096	0.1556
7%	0.0	0.0	0.1	0.3	0.4	0.3	0.4	0.150	0.128	0.1556

In order to determine a possible dependence between individual mass decrements of samples for given concentrations of tested Composition consumable, correlations were calculated using the Pearson's and Spearman's method. It was assumed at the same time that results have a normal distribution. If correlation values are close to 1 or -1 value, then variables are dependent. If correlation values are close to 0 value, then we deal with independent variables. Results are presented in Table 3.

Table 3. Results of correlation between individual concentrations of the Composition consumable. Relative motion velocity $V = 0.08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, path of friction $L = 2000 \text{ m}$

Tabela 3. Wyniki korelacji pomiędzy poszczególnymi stężeniami PE Kompozycja. Prędkość ruchu względnego $V = 0,08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, droga tarcia $L = 2000 \text{ m}$

	Pearson		Spearman	
0%	-0.34		-0.29	
0.5%		0.89		0.82
1.0%	0.45		0.63	
2%		0.75		0.61
5%	-0.05		0.00	
7%				

Next, in Table 4 presented are measured mass decrements of samples for particular concentrations of the next consumable – Motor Life, on the basis of which – after their implementation into R software – a box plot was made (Fig. 3).

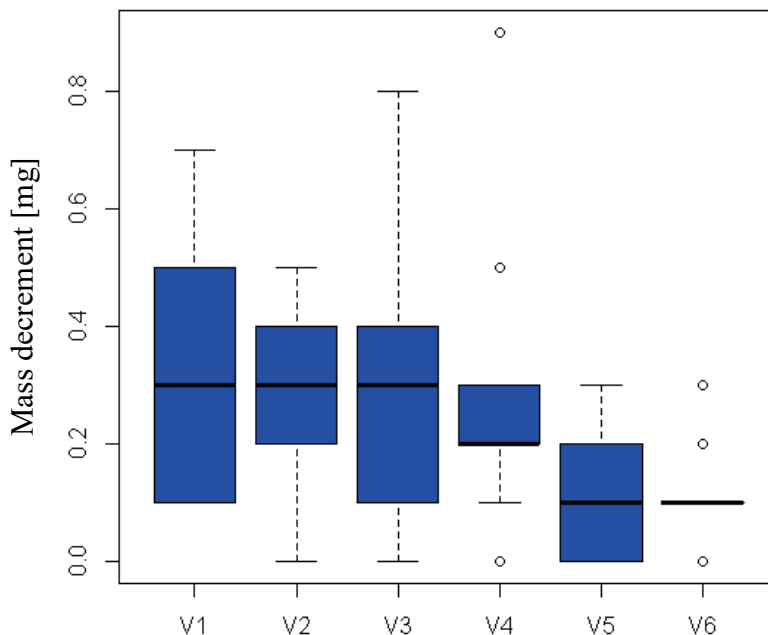


Fig. 3. A box plot generated in R software referring to the mass decrement of samples for different concentrations of Motor Life consumable; relative motion velocity $V = 0.08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, path of friction $L = 2000 \text{ m}$; on the vertical axis – mass decrement [mg]; V1 – pure oil base (100% SN-150); V2 – 0.5% Motor Life consumable, V3 – 1% Motor Life consumable, V4 – 2% Motor Life consumable, V5 – 5% Motor Life consumable, V6 – 7% Motor Life consumable

Rys. 3. Wykres pudełkowy wygenerowany w programie R dotyczący ubytku masy próbek dla różnych stężeń PE Motor Life; prędkość ruchu względnego $V = 0,08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, droga tarcia $L = 2000 \text{ m}$; na osi pionowej – ubytek masy [mg]; V1 – czysta baza olejowa (100% SN-150); V2 – 0,5% PE Motor Life, V3 – 1% PE Motor Life, V4 – 2% PE Motor Life, V5 – 5% PE Motor Life, V6 – 7% PE Motor Life

Table 4. Mass increments [mg] of samples for particular concentrations of Motor Life consumable; relative motion velocity $V = 0.08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, path of friction $L = 2000 \text{ m}$ [15, 16, 19]

Tabela 4. Ubytki masy [mg] próbek dla poszczególnych stężeń PE Motor Life; prędkość ruchu względnego $V = 0,08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, droga tarcia $L = 2000 \text{ m}$ [15, 16, 19]

	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6	Sample 7	Sample 8	Sample 9
0%	0.2	0.3	0.6	0.1	0.5	0.7	0.1	0.4	0.1
0.5%	0.1	0.3	0.5	0.3	0.4	0.4	0.2	0.3	0.0
1%	0.0	0.8	0.4	0.4	0.3	0.1	0.3	0.1	0.1
2%	0.3	0.5	0.2	0.2	0.9	0.3	0.2	0.1	0.0
5%	0.1	0.1	0.3	0.2	0.0	0.3	0.1	0.0	0.0
7%	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.3	0.2

In order to analyze the obtained results the selected statistical parameters were calculated, using R software, for measured values of the mass decrement of samples: Statistical parameters mentioned above are tabulated in Table 5.

Table 5. List of main statistical parameters of measured mass decrements of samples for Motor Life consumable; relative motion velocity $V = 0.08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, path of friction $L = 2000 \text{ m}$
Tabela 5. Zestawienie głównych parametrów statystycznych zmierzonych ubytków masy próbek dla PE Motor Life; prędkość ruchu względnego $V = 0,08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, droga tarcia $L = 2000 \text{ m}$

	Min	1stQu.	Median	3rdQu.	Max	IQR	R	s	d ₁	Mean
0%	0.1	0.1	0.3	0.5	0.7	0.4	0.6	0.229	0.192	0.3333
0.5%	0.0	0.2	0.3	0.4	0.5	0.2	0.5	0.156	0.118	0.2778
1%	0.0	0.1	0.3	0.4	0.8	0.3	0.8	0.243	0.180	0.2778
2%	0.0	0.2	0.2	0.3	0.9	0.1	0.9	0.264	0.177	0.3000
5%	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.2	0.3	0.120	0.096	0.1222
7%	0.0	0.1	0.1	0.1	0.3	0.0	0.3	0.092	0.061	0.1111

In order to determine a possible dependence between individual mass decrements of samples for given concentrations of tested Motor Life consumable, correlations were calculated using the Pearson's and Spearman's method. It was assumed at the same time that results have a normal distribution. If correlation values are close to 1 or -1 value, then variables are dependent. If correlation values are close to 0 value, then we deal with independent variables. Results are presented in table 6.

Table 6. Results of correlation between individual concentrations of Motor Life consumable; relative motion velocity $V = 0.08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, path of friction $L = 2000 \text{ m}$
Tabela 6. Wyniki korelacji pomiędzy poszczególnymi stężeniami PE Motor Life; prędkość ruchu względnego $V = 0,08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, droga tarcia $L = 2000 \text{ m}$

	Pearson		Spearman	
0%	0.79		0.83	
0.5%		0.37		0.44
1.0%	0.34		0.23	
2%		-0.15		0.15
5%	-0.47		-0.43	
7%				

The last consumable, for which tests were conducted, was Mind M, for which in table 7 presented are mass decrements of samples depending on its concentrations in the oil base SN-150. For these data, upon their implementation into R software, generated is the box plot (Fig. 4).

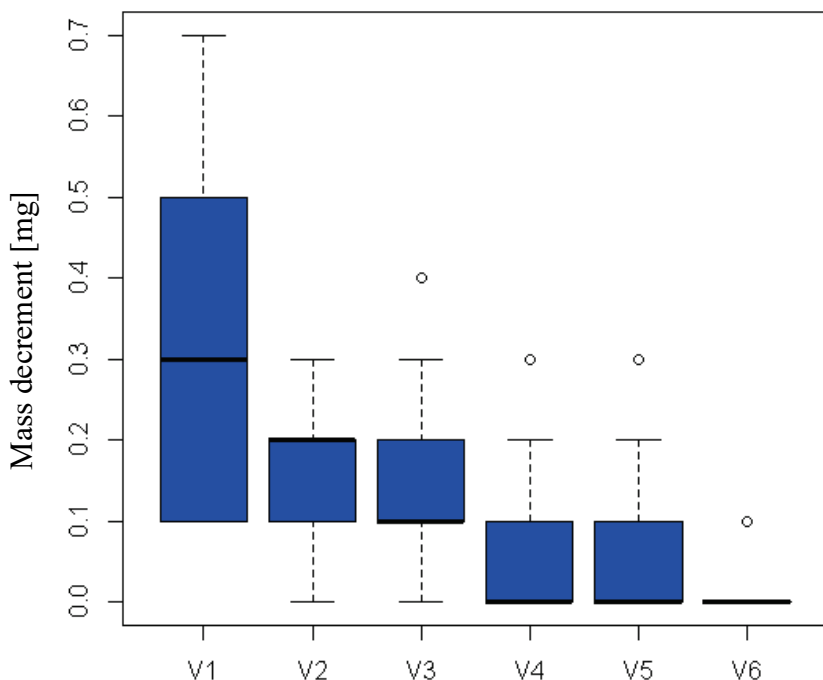


Fig. 4. A box plot generated in R software referring to the mass decrement of samples for different concentrations of Mind M consumable; relative motion velocity $V = 0.08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, path of friction $L = 2000 \text{ m}$; on the vertical axis – mass decrement [mg]; V1 – pure oil base (100% SN-150); V2 – 0.5% Mind M consumable, V3 – 1% Mind M consumable, V4 – 2% Mind M consumable, V5 – 5% Mind M consumable, V6 – 7% Mind M consumable

Rys. 4. Wykres pudełkowy wygenerowany w programie R dotyczący ubytku masy próbek dla różnych stężeń PE Mind M; prędkość ruchu względnego $V = 0,08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, droga tarcia $L = 2000 \text{ m}$; na osi pionowej – ubytek masy [mg]; V1 – czysta baza olejowa (100% SN-150); V2 – 0,5% PE Mind M, V3 – 1% PE Mind M, V4 – 2% PE Mind M, V5 – 5% PE Mind M, V6 – 7% PE Mind M

Table 7. Mass increments [mg] of samples for particular concentrations of Mind M consumable. Relative motion velocity $V = 0.08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, path of friction $L = 2000 \text{ m}$ [15, 16, 19]

Tabela 7. Ubytki masy [mg] próbek dla poszczególnych stężeń PE Mind M; prędkość ruchu względnego $V = 0,08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, droga tarcia $L = 2000 \text{ m}$ [15, 16, 19]

	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6	Sample 7	Sample 8	Sample 9
0%	0.2	0.3	0.6	0.1	0.5	0.7	0.1	0.4	0.1
0.5%	0.3	0.0	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.0	0.2
1%	0.1	0.1	0.2	0.1	0.0	0.3	0.1	0.4	0.1
2%	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
5%	0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0
7%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0

In order to analyze the obtained results the selected statistical parameters were calculated, using R software, for measured values of the mass decrement of samples: Statistical parameters mentioned above are tabulated in Table 8.

Table 8. List of selected statistical parameters of measured mass decrements of samples for Mind M consumable; relative motion velocity $V = 0.08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, path of friction $L = 2000 \text{ m}$

Tabela 8. Zestawienie wybranych parametrów statystycznych zmierzonych ubytków masy próbek dla PE Mind M; prędkość ruchu względnego $V = 0,08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, droga tarcia $L = 2000 \text{ m}$

	Min	1stQu.	Median	3rdQu.	Max	IQR	R	s	d_1	Mean
0%	0.1	0.1	0.3	0.5	0.7	0.4	0.6	0.229	0.192	0.3333
0.5%	0.0	0.1	0.2	0.2	0.3	0.1	0.3	0.101	0.081	0.1556
1%	0.0	0.1	0.1	0.2	0.4	0.1	0.4	0.123	0.096	0.1556
2%	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.1	0.3	0.111	0.088	0.0666
5%	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.1	0.3	0.109	0.086	0.0777
7%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.033	0.019	0.0111

4. SUMMARY

The following conclusions can be formulated upon the analysis of obtained characteristics of the mass decrement of tested samples during the process of friction:

- the increase of concentration of the Composition consumable in the oil base SN-150 causes the decrease of average mass decrement of samples from the value of 0.33 mg (pure oil base) to 0.155 mg (for 2%, 5% and 7% Composition consumable) – Fig. 2;
- despite the fact that for Composition consumable concentrations of 0.5% and 1% as well as for 2%, 5% and 7% the mean values of mass decrement are identical, the scatter of results is different – Fig. 2;
- for concentrations of Composition consumable 2% and 5% there are outliers present. It is difficult to determine the cause of their formation, however they do have an impact on the mean value;
- the smallest values of a standard deviation s for Composition consumable appear for concentrations of 2% and 5% (0.123) for which also the average deviation from the mean value d_1 is the lowest (0.096);
- for Composition consumable the concentrations of 0.5% and 1% as well as 2% and 5% are characterized by big values of correlation both in the Pearson's method and Spearman's method (Table 3), i.e. these concentrations are characterized by very similar effects of operation (similar mass decrements of samples);
- the increase of concentration of Motor Life consumable in the oil base SN-150 causes the decrease of average mass decrement of samples from the value of 0.33 mg (pure oil base) to 0.111 mg (7% Motor Life consumable);
- despite the fact that for Motor Life consumable concentrations of 0.5% and 1% identical mean values of the mass decrement were obtained (Fig. 3), the scatter of results is significantly different;
- for Motor Life consumable concentrations of 2% and 7% there are as many as three outliers;
- for Motor Life consumable the smallest standard deviation s is for 7% (0.092) – Table 5;

- for Motor Life consumable only for concentrations of 0% and 0.5% there is a strong correlation of the mass decrement of samples (respectively 0.79 Pearson, 0.83 Spearman); this indicates that small concentrations of this consumable do not have a significant impact on the decrease of the mass decrement of samples;
- for Mind M consumable the increase of concentration in the oil base causes the decrease of average mass decrement of samples from the value of 0.33 mg (pure oil base) to 0.011 mg (for 7%);
- concentrations of Mind M consumable 0.5% and 1% have the same mean value of the mass decrement but different scatter of results (Fig. 4);
- for concentrations of Mind M consumable 1%, 2%, 5% and 7% there are outliers which have an effect on the mean value; it is difficult to determine the cause of such a big number of outlier results for this consumable;
- for Mind M consumable the smallest standard deviation s was observed for 7% (0.019).

LITERATURE

- [1] Bendat J.S., Piersol A.G.: Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1976.
- [2] Biecek P.: Analiza danych z programem R. Modele liniowe z efektami stałymi, losowymi i mieszanymi. Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa 2013.
- [3] Biecek P.: Przewodnik po pakiecie R. Oficyna Wydawnicza GIS, Wrocław 2017.
- [4] Crawley M.: The R Book. Wiley-Blackwell, 2012.
- [5] Everitt B., Hothorn T.: A Handbook of Statistical Analyses Using R. Chapman&Hall/CRC Computer Science & Data Analysis. 2010.
- [6] Gągolewski M.: Programowanie w języku R. Analiza danych, obliczenia, symulacje. Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2016.
- [7] Gillespie C., Lovelace R.: Wydajne programowanie w R. Praktyczny przewodnik po lepszym programowaniu. APN Promise, Warszawa 2018.
- [8] Koronacki J., Mielniczuk J.: Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych. Wydawnictwo WNT, Warszawa 2018.
- [9] Krzysztofiak M., Urbanek D.: Metody statystyczne. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1977.
- [10] Krzyśko M.: Statystyka matematyczna. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Adama Mickiewicza w Poznaniu, Poznań 1996.
- [11] Laber S.: Badania własności eksploatacyjnych i smarnych uszlachetnicza metalu Motor Life Professional. Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra 2008.
- [12] Laber S.: Preparaty eksploatacyjne. Wydział Mechaniczny Instytutu Budowy Maszyn i Pojazdów, Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra 2001.
- [13] Luszniwicz A.: Statystyka ogólna. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1987.
- [14] Morrison D.F.: Wielowymiarowa analiza statystyczna. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1990.
- [15] Mikołajczyk J.: Badanie wpływu preparatu eksploatacyjnego Mind M na zmianę własności smarnych oleju bazowego SN-150. Inżynieria i Aparatura Chemiczna 5, 2012, 235–236.
- [16] Mikołajczyk J.: Maszyny tarciove. Budowa, przeznaczenie. Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Pile, Piła 2018.

- [17] Mikołajczyk J.: System wizualizacji i archiwizacji danych stanowiska do badań tribologicznych. Praca dyplomowa na Wydziale Elektrotechniki i Telekomunikacji Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2011.
- [18] Mikołajczyk J.: Tribotestery. Budowa, przeznaczenie. Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Pile, Piła 2019.
- [19] Mikołajczyk J.: Wpływ dodatków smarowych na transformację warstwy wierzchniej. Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Pile, Piła 2017.
- [20] Praca zbiorowa pod red. Szydlowskiego H.: Teoria pomiarów. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1981.
- [21] Żakowski W., Kołodziej W.: Matematyka. Cz. II. Analiza matematyczna. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003.

ANALIZA STATYSTYCZNA ZMIANY MASY PRÓBEK W WYNIKU PROCESU ZUŻYWANIA

Streszczenie: W pracy przedstawiono analizę statystyczną zmiany masy próbek w wyniku procesu zużywania pary kinematycznej o styku konforemnym, pracującej w obecności preparatu eksploatacyjnego PE o zdefiniowanym składzie. Omówiono warunki badań oraz budowę stanowiska badawczego. Badania tribologiczne wykonano w temperaturze pokojowej dla jednej prędkości ruchu względnego. Określono wpływ stężenia wybranego PE w bazie olejowej SN-150 na ubytek masy badanych próbek. Analizę statystyczną wykonano w oparciu o program R.

Słowa kluczowe: struktura geometryczna powierzchni, warstwa wierzchnia, olej bazowy, dodatki do olejów, preparat eksploatacyjny

Emil SMYK¹, Wojciech SZMYT², Dariusz MROZIK

ZAWÓR OSIOWOSYMETRYCZNY WYKORZYSTUJĄCY STRUMIENIE SYNTETYZOWANE

Streszczenie: W artykule opisano badania zaworu osiowosymetrycznego, który wykorzystuje w swojej konstrukcji dyszę osiowosymetryczną z siłownikiem strumienia syntetyzowanych wbudowanym w rdzeń dyszy. Strumienie syntetyzowane pełnią w zaworze funkcję strumienia sterującego. Przeprowadzony eksperyment wykazał, że utworzenie takiego zaworu jest możliwe, a spośród badanych warunków wykazano te, które spełniły postawione wymagania funkcjonowania zaworu: natężenie przepływu strumienia $Q = 0,0034 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ i moc czynna siłownika $P = 3 \text{ W}$ (współczynnik prędkości $c_U = 1,07$) oraz natężenie przepływu strumienia $Q = 0,0028 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ i moc czynna siłownika $P = 2 \text{ W}$ (współczynnik prędkości $c_U = 1,20$).

Słowa kluczowe: aktywne sterowanie strumieniami, zawór osiowosymetryczny, strumienie syntetyzowane

1. WSTĘP

Strumienie syntetyzowane powstają poprzez naprzemienne wtłaczanie i wytłaczanie medium roboczego (najczęściej powietrza lub wody) przez dyszę do zamkniętej komory. Odbywa się to poprzez zastąpienie jednej ze ścian komory ruchomym elementem, np. tłokiem, piezoelektrykiem lub membraną głośnika. Pomimo że uśredniony w czasie przepływ masy przez dyszę w czasie jednego cyklu pracy jest zerowy, to w pewnej odległości od dyszy tworzy się niezerowy strumień objętości płynu roboczego – między innymi wskutek tworzenia się na obrzeżach wytłoczonego z komory strumienia wirów brzegowych (rys. 1) [11, 14].

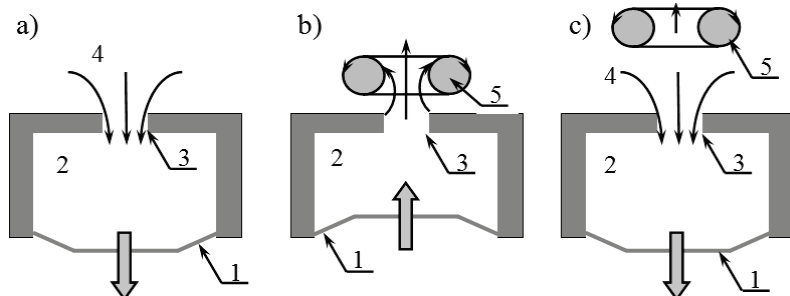
Problematyka strumieni syntetyzowanych należy do najbardziej rozwijanych zagadnień związanych z aktywnym sterowaniem strumieniami. Są także stosowane w wielu dziedzinach techniki oraz nauki, np. chemii [16], lotnictwie [2, 7], transporcie [5], chłodnictwie [1, 10] oraz szeroko pojętym sterowaniu przepływami i warstwą graniczną [3, 6, 8].

Strumienie syntetyzowane znalazły zastosowanie między innymi w różnego typu zaworach dwu- oraz trójwymiarowych [14, 15, 19]. Zawory tego typu należą do grupy zaworów płynowych, charakteryzujących się brakiem poruszających lub deformujących się elementów, co czyni je niezawodnymi. Ich działanie oparte jest na szeroko pojętej „czułości” strugi płynu, który reaguje poprzez zmianę kierunku przepływu. Z tego powodu zawory takie przeznaczone są dla przepływów o niewielkim natężeniu [17].

¹ dr inż. Emil SMYK, UTP Bydgoszcz, e-mail: emil.smyk@utp.edu.pl

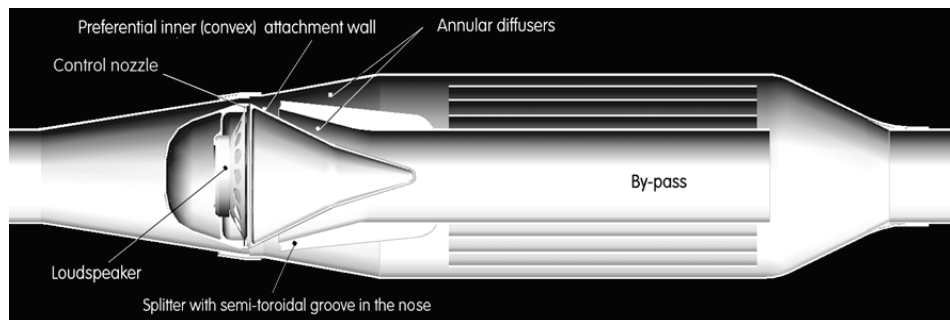
² inż. Wojciech SZMYT, UTP Bydgoszcz, e-mail: wszmyt@gmail.com

Zawór osiowosymetryczny sterowany strumieniami syntetyzowanymi, których generowanie przedstawiono schematycznie na rysunku 1, został pierwszy raz opisany, według wiedzy autorów, w patencie [18]. Na rysunku 2 przedstawiono wspomniany zawór. W przypadku gdy strumień sterujący (strumień syntetyzowany) jest wyłączony, strumień główny na skutek efektu Coandy „przykleja” się do stożka rdzenia dyszy. W związku z tym większość objętości strumienia głównego (sterowanego) przepływa przez kanał wewnętrzny – oznaczony jako by-pass. Zgodnie z powyższym opisem działania zaworów osiowosymetrycznych, w czasie gdy siłownik strumieni syntetyzowanych jest wyłączony, strumień główny płynie przez by-pass (rys. 2). Załączenie strumienia sterującego powoduje oderwanie się strumienia głównego od rdzenia dyszy i „przyklejenie” go do stożka zewnętrznego. W takim przypadku strumień przepływa przez kanał zewnętrzny, pierścieniowy.



Rys. 1. Generowanie strumieni syntetyzowanych: a) zassanie medium z otoczenia, b) wydmuch medium z komory roboczej oraz powstawanie na obrzeżach wydmuchiwanego strumienia wirów brzegowych, c) zassanie medium z otoczenia oraz oddalanie się strumienia generującego wiry brzegowe (1 – membrana, 2 – komora robocza, 3 – dysza siłownika, 4 – strumień zasysany z otoczenia, 5 – wiry brzegowe)

Fig. 1. Generation of synthetic jet: a) injection of the medium from the environment, b) expulsion of the medium from cavities and creation of edge vortex the edge of the expelled jets, c) injection of the medium from environment and the stream generating edge vortex is moving away (1 – diaphragm, 2 – cavity, 3 – actuator nozzle, 4 – jet injected from the environment, 5 – edge vortex)



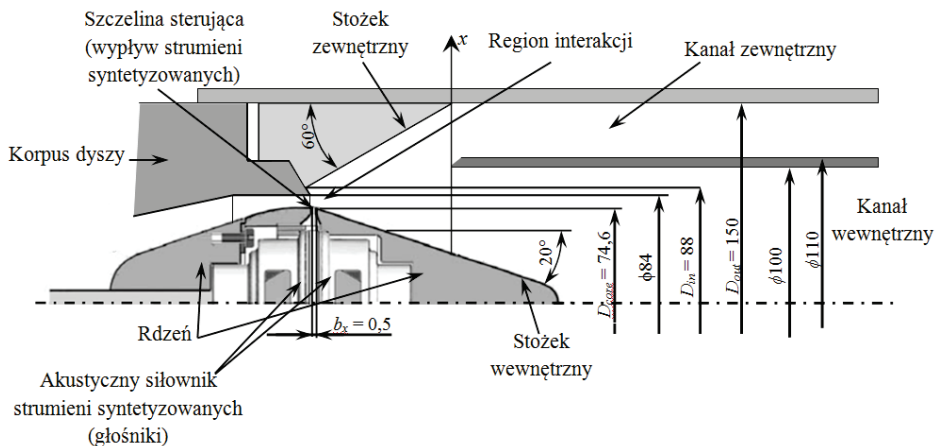
Rys. 2. Zawór osiowosymetryczny sterowany strumieniami syntetyzowanymi [18]

Fig. 2. Axisymmetric valve controlled by synthetic jets [18]

W artykule przedstawiono możliwość sterowania strumieniem głównym za pomocą strumieni syntetyzowanych w zaworze osiowosymetrycznym. Badania wykorzystanej do budowy zaworu dyszy osiowosymetrycznej oraz siłownika strumieni syntetyzowanych przedstawiono między innymi w [12, 13].

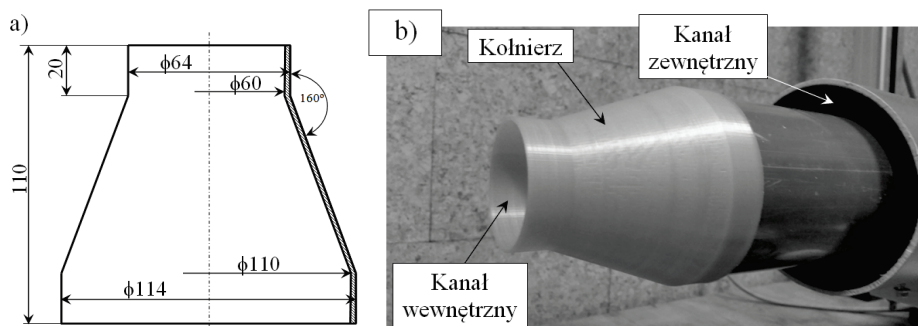
2. STANOWISKO BADAWCZE

Na rysunku 3 przedstawiono w sposób schematyczny budowę zaworu osiowosymetrycznego wraz z zaznaczonymi najważniejszymi elementami oraz wymiarami. Siłownik strumieni syntetyzowanych wbudowany w rdzeń dyszy składa się z dwóch umieszczonych naprzeciw siebie głośników pracujących w tej samej fazie, tzn. gdy jeden z głośników wykonuje ruch do przodu, powodując zmniejszenie objętości komory siłownika, drugi również wykonuje ruch powodujący zmniejszenie komory siłownika. Głośniki osadzone zostały w pierścieniu z dwudziestoma czterema otworami o średnicy $\phi 3$ mm. Pierścień został osadzony w rdzeniu dyszy w taki sposób, aby powstała szczelina o szerokości 0,5 mm. Za jednym z głośników znajduje się zamknięta komora. Wpływ komory na generowane strumienie syntetyzowane omówiono w pracy [12].



Rys. 3. Schemat zaworu osiowosymetrycznego z zaznaczonymi najważniejszymi elementami
Fig. 3. Schema of axisymmetric valve with marked the most important elements

Kanał zewnętrzny zaworu ma kształt pierścieniowy o średnicy wewnętrznej $\phi 110$ mm oraz średnicy zewnętrznej $\phi 150$ mm. Kanał wewnętrzny ma średnicę $\phi 100$ mm. Długość kanału zewnętrznego wynosi 350 mm, natomiast kanału wewnętrznego 500 mm. Dodatkowo na końcu kanału wewnętrznego zamieszczono kołnierz pomiarowy o łącznej długości 110 mm, średnicy końcowej 60 mm oraz kącie rozwarcia 160° . Rysunek oraz zdjęcie zamontowanego kołnierza przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Kolnierz pomiarowy: a) rysunek, b) zdjęcie kolnierza zamontowanego na kanale wewnętrznym

Fig. 4. Measuring collar: a) drawing, b) picture of the measuring collar mounted on the inner channel

Jako elementy wykonawcze siłownika zastosowano głośniki MONACOR SP-6/8SQ ($P_{MAX} = 20 \text{ W}$, $R = 8 \Omega$). Układ był zasilany za pomocą generatora funkcji RIGOL DG4162, poprzez wzmacniacz stereo SEOUM SA-3180B. Układ zasilano prądem o przebiegu sinusoidalnym i częstotliwości $f = 147 \text{ Hz}$, odpowiadającej częstotliwości naturalnej stosowanego siłownika. Zawór zasilany był z wykorzystaniem wentylatora odśrodkowego.

Pomiar prędkości powietrza strumienia głównego przeprowadzono z użyciem anemometru wiatrakowego TEST 491 o średnicy pomiarowej $\phi 60 \text{ mm}$, w zakresie pomiarowym $u = 0,2 \pm 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ i dokładności $\pm 0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ lub $\pm 2,5\%$ (w zależności która wartość jest większa). W przypadku odchyłu osi pomiarowej sondy od osi przepływu powietrza o 10% błąd pomiaru wynosi dodatkowo $\pm 3\%$ wartości zmierzonej. W trakcie pomiarów sonda anemometru wiatrakowego utwierdzona została na wylocie kolnierza – kanał wewnętrzny.

Pomiar prędkości strumieni syntetyzowanych odbywał się z użyciem anemometru termicznego HWA firmy Dantec Dynamics z zamontowaną sondą jednodrutową 55P16.

3. BADANIA I ANALIZA WYNIKÓW

Badania można podzielić na dwie zasadnicze części. Podczas badań wstępnych wyznaczono charakterystykę siłownika strumieni syntetyzowanych. W tym celu zmierzono prędkość charakterystyczną siłownika (w funkcji częstotliwości prądu zasilającego), którą można obliczyć na podstawie wzoru:

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^{T_E} u(t) dt \quad (1)$$

gdzie:

- T – okres pracy siłownika [s],
- T_E – czas wytłaczania powietrza z siłownika [s],
- $u(t)$ – prędkość chwilowa strumienia w szczeliny siłownika [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Główną częścią eksperymentu było badanie strumienia głównego, które można podzielić na następujące etapy:

- założenie zaślepki na kanał zewnętrzny,
- badanie strumienia objętości przepływającego przez dyszę – pomiar prędkości średniej w kanale wewnętrznym,
- zdjęcie zaślepki z kanału zewnętrznego,
- pomiar prędkości średniej w kanale wewnętrznym,
- załączenie siłownika strumieni syntetyzowanych,
- pomiar prędkości średniej w kanale wewnętrznym.

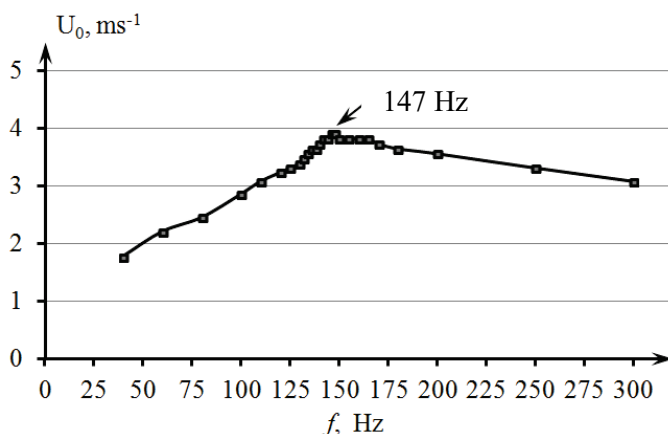
Badania przeprowadzono dla sześciu różnych natężeń przepływu strumienia przez dyszę oraz trzech różnych mocy czynnych zasilania siłownika strumieni syntetyzowanych (moc czynna $P = 0$ W oznacza wyłączony siłownik).

Jako warunek wystarczający do uznania, że istnieje możliwość sterowania strumieniem głównym za pomocą strumieni syntetyzowanych, uznano sytuację, gdy:

- 1) co najmniej 90% objętości strumienia przepływa przez kanał wewnętrzny, gdy siłownik jest wyłączony ($P = 0$);
- 2) co najmniej 75% objętości strumienia przepływa przez kanał zewnętrzny, gdy siłownik jest włączony.

3.1. Badania siłownika strumieni syntetyzowanych

Pierwszym etapem badań było wyznaczenie charakterystyki stosowanego siłownika strumieni syntetyzowanych. W tym celu wyznaczono zależność prędkości charakterystycznej strumieni (opisanych zależnością (1)) od częstotliwości prądu zasilającego siłownik. W czasie pomiarów sonda ciepłodrutowa umieszczona była w odległości 1 mm od wylotu strumieni syntetyzowanych. Charakterystykę przedstawiono na rysunku 5.

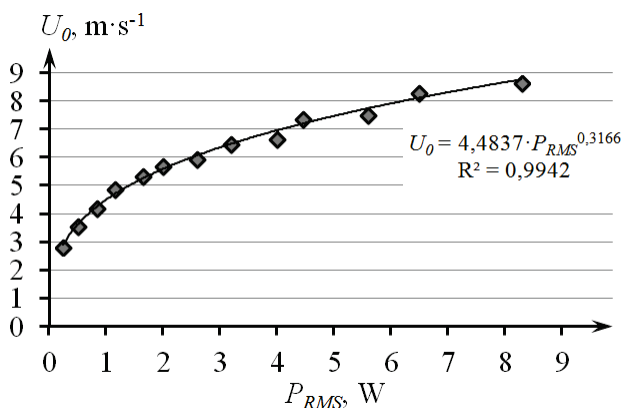


Rys. 5. Charakterystyka pracy siłownika przy mocy czynnej prądu zasilającego $P = 1$ W

Fig. 5. Operation characteristics of the actuator, at the active power of the power supply $P = 1$ W

Największą wartość prędkości charakterystycznej strumieni syntetyzowanych osiągnięto dla częstotliwości prądu zasilającego $f = 147$ Hz. Jest to tak zwana częstotliwość charakterystyczna, która odpowiada częstotliwości Helmholtza lub częstotliwości naturalnej siłownika.

Na potrzeby dalszych badań wyznaczono dodatkowo zależność prędkości charakterystycznej od mocy prądu zasilającego siłownik. Zależność tę przedstawiono na rysunku 6, dodatkowo na punkty pomiarowe naniesiono krzywą aproksymacji o równaniu potęgowym. Prędkość charakterystyczna jest tym wyższa, im wyższa jest moc czynna prądu zasilającego siłownik.



Rys. 6. Prędkość charakterystyczna strumieni syntetyzowanych w funkcji mocy czynnej zasilania siłownika dla częstotliwości prądu zasilającego $f = 147$ Hz

Fig. 6. Characteristic velocity of synthetic jet in the function of active power supply of actuator, by frequency of power supply $f = 147$ Hz

3.2. Badania strumienia głównego

W tabelach 1 i 2 przedstawiono wartości natężenia przepływu strumienia głównego Q , prędkość średnią $\bar{u}_{in}$ strumienia w kanale wewnętrznym oraz obliczone na tej podstawie wartości natężenia przepływu w kanale wewnętrznym Q_{in} i kanale zewnętrznym Q_{out} . Pomiarzy przeprowadzono dla wartości mocy czynnej zasilania siłownika strumieni syntetyzowanych $P = 0$ oraz $P = 2$ W (tabela 1) i $P = 3$ W (tabela 2).

Natężenie przepływu w kanale zewnętrznym Q_{out} obliczone zostało jako różnica pomiędzy natężeniem przepływu strumienia głównego Q a natężeniem przepływu strumienia w kanale wewnętrznym Q_{in} .

Tabela 1. Wartości objętościowego natężenia przepływu w kanale wewnętrznym Q_{in} i zewnętrznym Q_{out} dla różnych wartości natężeń przepływu strumienia głównego i wartości mocy czynnej zasilania siłownika $P = 0$ oraz $P = 2$ W

Table 1. Values of the volume flow rate in the internal duct Q_{in} and external Q_{out} for different values of the main stream flow rates and active power values of the actuator power supply $P = 0$ and $P = 2$ W

$Q, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$P = 0$			$P = 2 \text{ W}$		
	$\bar{u}_{in}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{in}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{out}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$\bar{u}_{in}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{in}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{out}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
0,0034	1,1	0,0031	0,0003	1,1	0,0031	0,0003
0,0028	0,9	0,0025	0,0003	0	0,0000	0,0028
0,0023	0,7	0,0020	0,0003	0	0,0000	0,0023
0,0020	0,5	0,0014	0,0006	0,2	0,0006	0,0014

Tabela 2. Wartości objętościowego natężenia przepływu w kanale wewnętrznym Q_{in} i zewnętrznym Q_{out} dla różnych wartości natężeń przepływu strumienia głównego i wartości mocy czynnej zasilania siłownika $P = 0$ oraz $P = 3$ W

Table 2. Values of the volume flow rate in the internal duct Q_{in} and external Q_{out} for different values of the main stream flow rates and active power values of the actuator power supply $P = 0$ and $P = 3$ W

$Q, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$P = 0$			$P = 3 \text{ W}$		
	$\bar{u}_{in}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{in}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{out}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$\bar{u}_{in}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{in}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{out}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
0,0045	1,5	0,0042	0,0003	1,5	0,0042	0,0003
0,0040	1,4	0,0040	0,0000	1,3	0,0037	0,0003
0,0034	1,1	0,0031	0,0003	0,2	0,0006	0,0028
0,0028	0,9	0,0025	0,0003	0,5	0,0014	0,0014
0,0023	0,7	0,0020	0,0003	0,6	0,0017	0,0006

W tabeli 3 wskazano (procentowo), jaka część strumienia głównego przepływa przez kanał wewnętrzny dla różnych wartości natężeń przepływu Q strumienia głównego oraz różnych wartości mocy czynnej P_{RMS} zasilania siłownika strumieni syntetyzowanych.

Należy zauważyć, że jedynie dla $Q = 0,0040 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ w przypadku wyłączono-ego siłownika strumieni syntetyzowanych cała objętość strumienia głównego przepływała przez kanał wewnętrzny. Uogólniając, im wyższa wartość natężenia przepływu Q strumienia głównego, tym więcej powietrza przepływało przez kanał wewnętrzny, a mniej przez kanał zewnętrzny. Ma to bezpośredni związek z intensywnością efektu Coandy. Im wyższa prędkość strumienia opływającego dane ciało, tym intensywniejszy jest efekt „przyklejania” się strumienia do powierzchni opływającego ciała [4], co zgadza się z przeprowadzonymi pomiarami.

Najkorzystniejszy efekt przesterowania strumienia głównego z kanału wewnętrznego do kanału zewnętrznego osiągnięto dla natężenia przepływu $Q = 0,0028 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i $Q = 0,0023 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dla mocy czynnej zasilania siłownika $P = 2 \text{ W}$. W tym miejscu należy jednak zaznaczyć, że minimalna wartość pomiarowa dla stosowanego anemometru wynosi $u_{min} = 0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, co oznacza, że rzeczywista wartość może znacząco różnić się od przedstawionej w tabeli 1. W związku z tym w tabeli 3 po ukośniku podano wartość, którą otrzymano by dla wartości prędkości średniej w kanale wewnętrznym $\bar{u}_{in} = u_{min} = 0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Tym niemniej, w obydwu przypadkach przesterowanie strumienia jest wystarczające i co najmniej 75% objętości strumienia przepływa przez kanał zewnętrzny.

W przypadku gdy siłownik zasilany był mocą o wartości $P = 3$ W, co najmniej 75% strumienia głównego przepływało przez kanał zewnętrzny jedynie dla wartości objętościowego natężenia przepływu $Q = 0,0034 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. W pozostałych przypadkach wpływ strumienia sterującego na strumień główny był niewystarczający.

Tabela 3. Wartości objętościowego natężenia przepływu Q_{in} w kanale wewnętrznym w stosunku do całkowitego strumienia objętości Q strumienia głównego dla różnych wartości mocy czynnej P_{RMS} zasilania siłownika strumieni syntetyzowanych

Table 3. Values of volume flow rate Q_{in} in internal duct relative to the total volume flow Q main stream for different values of active power P_{RMS} of synthetic jet actuator supply

$Q, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{in}/Q \cdot 100\%$		
	0	2 W	3 W
0,0045	93,75	–	93,75
0,0040	100,00	–	92,86
0,0034	91,67	91,67	16,67
0,0028	90,00	0,00 / 20,00	50,00
0,0023	87,50	0,00 / 25,00	75,00
0,0020	71,43	28,57	–

W tabeli 4 przedstawiono parametry strumienia głównego oraz siłownika strumieni syntetyzowanych, dla których przesterowanie strumienia głównego było wystarczające, aby spełnić kryterium drugie (co najmniej 75% objętości strumienia przepływa przez kanał zewnętrzny, gdy siłownik jest włączony) i jednocześnie kryterium pierwsze (co najmniej 90% objętości strumienia przepływa przez kanał wewnętrzny, gdy siłownik jest wyłączony ($P = 0$)) – z wyjątkiem ustawienia $Q = 0,0023 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $P = 2$ W, gdzie nie jest spełniony pierwszy warunek (ponieważ przy wyłączonym siłowniku przez kanał wewnętrzny przepływało 87,5% objętości strumienia – jedynie 2,5 punktu procentowego poniżej wymagań – oraz jako jeden z trzech przypadków spełniał założenie drugie – przypadek ten został również uwzględniony). Dodatkowo w tabeli 4 przedstawiono uzyskane w tych przypadkach współczynniki prędkości c_U (definicja w tabeli).

We wszystkich rozpatrzonych przypadkach wartość współczynnika prędkości wynosi $c_U > 1$, a najniższą wartość przyjął dla $Q = 0,0034 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ oraz $P = 3$ W.

Tabela 4. Stosunek prędkości c_U dla objętościowych natężeń przepływu Q strumienia przepływu i mocy czynnej P_{RMS} zasilania siłowników, przy których co najmniej 75% objętości strumienia głównego przepływało przez kanał zewnętrzny

Table 4. Velocity ratio c_U for volume flow rate Q of main stream and active power P_{RMS} of actuator supply by which at least 75% of the main stream volume flows through the external duct

Objętościowe natężenie przepływu, $Q, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Prędkość średnia, $\bar{U}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Moc czynna P_{RMS}, W	Prędkość strumieni syntetyzowanych, $U_0, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Stosunek prędkości, $c_U = U_0 \cdot \bar{U}^{-1}$
0,0034	2,90	3	3,12	1,07
0,0028	2,39	2	2,86	1,20
0,0023	1,96	2	2,86	1,46

4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wyniki badań zaworu osiowosymetrycznego opartego na dyszy osiowosymetrycznej z siłownikiem strumieni syntetyzowanych wbudowanym w rdzeń dyszy. Dla sześciu różnych wartości objętościowego natężenia przepływu Q strumienia głównego i trzech różnych wartości mocy czynnej P_{RMS} siłownika strumieni syntetyzowanych zmierzono objętościowe natężenie przepływu w kanale wewnętrznym oraz kanale zewnętrznym. Wykazano, że im wyższa prędkość strumienia głównego, tym większy procent objętości strumienia przepływa przez kanał wewnętrzny przy wyłączonym siłowniku strumieni syntetyzowanych. Przedstawiono ponadto warunki pracy zaworu, przy których spełnione są założone kryteria działania:

- 1) co najmniej 90% objętości strumienia przepływa przez kanał wewnętrzny, gdy siłownik jest wyłączony ($P = 0$);
- 2) co najmniej 75% objętości strumienia przepływa przez kanał zewnętrzny, gdy siłownik jest włączony;

oraz wyznaczono dla tych parametrów stosunki prędkości c_U .

- $P = 3 \text{ W}$ dla $Q = 0,0034 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ – $c_U = 1,07$,
- $P = 2 \text{ W}$ dla $Q = 0,0028 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ – $c_U = 1,20$.

Wykazano w ten sposób, że istnieje możliwość skonstruowania zaworu osiowosymetrycznego wykorzystującego jako strumień sterujący strumienie syntetyzowane, który spełnia postawione założenia.

LITERATURA

- [1] CHAUDHARI M., PURANIK B., AGRAWAL A.: Effect of orifice shape in synthetic jet based impingement cooling. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34(2), 2010, 246–256.
- [2] CIURYLA M., LIU Y., FARNSWORTH J., KWAN C., AMITAY M.: Flight Control Using Synthetic Jets on a Cessna 182 Model. *Journal of Aircraft*, 44(2), 2007, 642–653.
- [3] FENG L.H., WANG J.J.: Modification of a circular cylinder wake with synthetic jet: Vortex shedding modes and mechanism. *European Journal of Mechanics – B/Fluids*, 43, Jan. 2014, 14–32.
- [4] GILCHRIST A.R., GREGORY-SMITH D.G.: Compressible Coanda wall jet: predictions of jet structure and comparison with experiment. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 9(3), Sep. 1988, 286–295.
- [5] KRIEG M., MOHSENI K.: Thrust characterization of a bioinspired vortex ring thruster for locomotion of underwater robots. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 33(2), 2008, 123–132.
- [6] LESCHZINER M.A., LARDEAU S.: Simulation of slot and round synthetic jets in the context of boundary-layer separation control. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1940), 2011, 1495–1512.
- [7] MAMITAY M., HONOHAN A., TRAUTMAN M., GLEZER A.: Modification of the aerodynamic characteristics of bluff bodies using fluidic actuators. 28th Fluid Dynamics Conference, 1997.
- [8] MITCHELL G., BENARD S.E., COOPER R.: Interaction of synthetic jet with a thermal turbulent boundary layer. Diss. Queens University Belfast, 2007.
- [9] MOHSENI K., MITTAL E. (eds.): *Synthetic Jets: Fundamentals and Applications*. CRC Press, 2014.
- [10] SCHWICKERT M., NOSKA B.: LED Cooling in Harsh Environments with Synthetic Jet Technology. LED – professional, May/June 2011, 2–5.

- [11] SMITH B.L.,GLEZER A.: Jet vectoring using synthetic jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 458, 2002, 1–34.
- [12] SMYK E.: Interference in axisymmetric synthetic jet actuator. *EPJ Web of Conference*, 143(2111), 2017.
- [13] SMYK E., WAWRZYNIAK S., PERCZYNSKI D., KOLBER P.: Axisymmetric valve with synthetic jet actuator. *Engineering Mechanics*, 2017, 886–889.
- [14] TESAŘ V., BROUČKOVÁ Z., KORDÍK J., TRÁVNÍČEK Z., PESZYNSKI K.: Valves with flow control by synthetic jet. *EPJ Web of Conferences*, 25, 2012, 1092.
- [15] TESAŘ V., PAVELKA M., SMYK E., PESZYNSKI K.: Control of flow separation by vestigal ‘Synthetic Jet’, *Conference Fluidic Dynamics*, 2014.
- [16] TESAŘ V., SMYK E.: Fluidic low-frequency oscillator with vortex spin-up time delay. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 90, 2015, 6–15.
- [17] TESAŘ V., SMYK E., PESZYNSKI K.: Fluidic oscillator with bistable turn-down amplifier. *Conference Fluidic Dynamics*, 2014.
- [18] TESAŘ V., TRÁVNÍČEK Z.:Způsob dvourežimového řízení průtoku tekutiny a zařízení provádění tohoto způsobu (Ways and means for two-regime control of fluid flow; in Czech), patent no. 303280, 2010.
- [19] TRÁVNÍČEK Z., TESAŘ V., BROUČKOVÁ Z., PESZYNSKI K.: Annular impinging jet controlled by radial synthetic jet. *Heat Transfer Engineering*, 35(16), 2014, 1–12.

AXISYMMETRIC VALVE USED SYNTHETIC JETS

Summary: The article presents research of an axisymmetric valve, which uses in its construction axisymmetric nozzle with synthetic jet actuator build-in the nozzle core. The synthetic jets perform the function of the control jet in the valve. The executed experiment shows, that the creation of this valve is possible and among the tested conditions, these indicated, which met the set requirements for valve operation: volume flow rate of stream $Q = 0.0034 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ and active power of actuator supply $P = 3 \text{ W}$ (velocity ratio $c_U = 1,07$) and volume flow rate of stream $Q = 0.0028 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ and active power of actuator supply $P = 2 \text{ W}$ (velocity ratio $c_U = 1.20$).

Key words: synthetic jet, ZNMF, axisymmetric nozzle

Wojciech ZIÓŁKOWSKI¹, Maciej KOTYK², Paweł MAĆKOWIAK³

WPLYW GRUBOŚCI ELEMENTÓW ŁĄCZONYCH NA WYTRZYMAŁOŚĆ ZAKŁADKOWEGO POŁĄCZENIA KLEJONEGO

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki autorskich badań wpływu grubości łączonych ze sobą blach na wytrzymałość złącza klejonego. Obiekt badań stanowiły łączone w sposób zakładkowy za pomocą kleju Plexus MA 300 płaskowniki wykonane ze stopu aluminium PA 9. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że grubość łączonych blach w badanym zakresie wpływa na wytrzymałość złącza, przy czym wytrzymałość rośnie wprost proporcjonalnie do grubości łączonych blach.

Słowa kluczowe: wytrzymałość połączenia klejonego, połączenie zakładkowe, naprężenia maksymalne, wpływ grubości

1. ANALIZA LITERATURY

Kleje do łączenia materiałów stosowano już w starożytnym Egipcie. Do tego typu połączeń wykorzystywano składniki naturalne, takie jak żywice drzewne. Naturalnie wówczas nie opracowano na szeroką skalę innych metod spajania, jednak technologia łączenia za pomocą klejów jest bezspornie wykorzystywana do czasów współczesnych, choć przy zastosowaniu innego rodzaju spoiw [4].

Wzmiankowane w temacie pracy połączenia działają na zasadzie sił adhezji pomiędzy łączonymi materiałami. Niekiedy, aby wspomniane siły wystąpiły, pomiędzy materiałami nie musi być spoiwa. Proces łączenia opiera się wówczas na odpowiednim przygotowaniu materiałów łączonych (lub jego warstw). Doskonałym przykładem takiego zastosowania własności materiałów jest drukowanie w technologii 3D. Do łączenia poszczególnych warstw w tym procesie nie stosuje się klejów, a odpowiednio: nagrzewa, nakłada, a później chłodzi poszczególne warstwy materiału [6, 9, 13].

Wspomniane metody łączenia należą do rozwiązań niszowych. Można je zakwalifikować do metod tak zwanego szybkiego prototypowania, a wytworzony w opisywany sposób produkt stanowi częściej model (prototyp), a nie produkt finalny.

W zastosowaniach przemysłowych połączenia realizowane wskutek działania sił adhezji polegają na wprowadzeniu pomiędzy łączone warstwy dodatkowego materiału w postaci spoiwa (kleju). Połączenia tego typu z punktu widzenia obliczeń inżynierskich są obarczone dużą niepewnością w stosunku do innych, takich jak połączenia kształtowe lub spawane.

¹ Wojciech ZIÓŁKOWSKI, UTP Bydgoszcz, e-mail: wojciech.ziolkowski96@gmail.com

² dr inż. Maciej KOTYK, UTP Bydgoszcz, e-mail: maciej.kotyk@utp.edu.pl

³ mgr inż. Paweł MAĆKOWIAK, UTP Bydgoszcz, e-mail: pawel.mackowiak@utp.edu.pl

Liczne badania prowadzone w zakresie wytrzymałości połączeń klejonych są realizowane z co najmniej dwóch powodów. Pierwszym z nich jest atrakcyjność ekonomiczna i czasowa stosowania tego typu połączeń, drugim zaś duża niepewność dotycząca wytrzymałości opisywanych spoin [1]. Z analizy literatury przedstawiającej badania własności mechanicznych połączeń klejonych wynika, że są dwa kierunki badań. Są to badania prowadzone w celu określenia własności mechanicznych samego materiału kleju oraz badania połączeń w różnych cechach geometrycznych.

1.1. Analiza literatury z zakresu wyznaczania własności mechanicznych klejów

Badania naukowe, w których wyznaczano własności mechaniczne kleju z zakresu wytrzymałości statycznej, gdzie badane próbki były wykonane wyłącznie z kleju, przedstawiono w pracy [10]. Autorzy poza obszernym opisem opracowanej metody wykonywania (odlewnia) próbek zaprezentowali przykładowe wyniki badań monotonicznie narastającego obciążenia.

W publikacji [8] przedstawiono wyniki badań kleju pochodzącego z materiału spoiny, ale na próbkach okrągłych. Omówiono przykładowe wyniki badań ściskania z monotonicznym przyrostem obciążenia wspomnianych próbek.

Podobne podejście w sposobie badania zaprezentowano w pracy [5], gdzie również wyznaczano własności mechaniczne klejów epoksydowych, wykonanych wyłącznie z materiału kleju, ale w nieco innym ujęciu niż we wcześniej wymienionych artykułach. W artykule przedstawiono wyniki badań odporności na uderzenie z zastosowaniem młota Charpy'ego. W rozpatrywanym przypadku w sposób szczególny podkreślono zasadniczą trudność polegającą na usunięciu pęcherzy powietrza z przygotowywanej próbki.

Badania wytrzymałości spoiny klejonej prowadzi się nie tylko w warunkach otoczenia, ale także w podwyższonych temperaturach. W pracy [2] Da Silva oraz Adams – oprócz szerokiej analizy SEM mikrostruktury kleju – przedstawili również wyniki autorskich badań, w których wyznaczali spadek własności mechanicznych kleju wskutek działania temperatur dochodzących do 200°C.

1.2. Analiza literatury z zakresu wyznaczania własności mechanicznych połączeń klejonych

W literaturze zdecydowanie częściej występują prace, w których omawia się badania nie tylko wyłącznie kleju, ale całego połączenia. Odzwierciedla to rzeczywiste warunki eksploatacyjne, w jakich elementy ze złączami klejowymi są eksploatowane. Ze względu na znaczne zróżnicowanie obiektów technicznych w przedmiotowej literaturze można odnaleźć informacje o badaniach naukowych wykonywanych na próbkach o zróżnicowanej geometrii.

Doskonały przykład badań połączenia klejonego, a nie wyłącznie próbek pochodzących z materiału spoiny omówiono w pracy [3]. Dokonano analizy wybranych metod wyznaczania własności mechanicznych różnego rodzaju typów połączeń klejonych. Dodatkowo przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych

połączeń klejonych, będące przykładem praktycznego zastosowania omawianych w artykule metod.

Nie zawsze jednak geometria próbki jest modelem połączenia rzeczywistego. Niekiedy kształt złącza poddanego eksperymentowi ułatwia wyznaczenie ściśle określonych wielkości mechanicznych. Przykładem pracy, która w szerszy sposób prezentuje to zagadnienie, jest artykuł [11], w którym autorzy opisują metody wyznaczania modułu Kirchhoffa oraz współczynnika Poissona. W analizowanym przypadku kształty próbki nie są odwzorowaniem połączenia. Mają jedynie ułatwić wyznaczenie charakterystyk mechanicznych w sposób jednoznaczny (normatywny). Naturalnie opracowanie to jest pewnym rozwinięciem stosownych norm, jednak Maćkowiak i współautorzy prezentują metody wyznaczania tych wartości na próbkach o określonej już geometrii [11].

W artykule [6] dokonano analizy rozkładu naprężeń w zakładkowym połączeniu klejonym. Badaniu poddano różne kleje, w tym klej Plexus MA 300. Według autorów, rozkład w takim połączeniu ma charakter paraboliczny, przy czym wierzchołek paraboli, a więc zerowa wartość naprężeń (punkt zmiany zwrotu wektora naprężeń) przypada na środku połączenia zakładkowego.

Omawiane zagadnienie jest również obiektem analiz numerycznych. Propozycję modelu numerycznego połączenia zakładkowego zaprezentowano w pracy [12]. Autor podkreśla, jest to model uproszczony, jednak zaprezentowane podejście wskazuje, że problem połączeń klejonych, w tym także zakładkowych, jest zagadnieniem aktualnym, rozpatrywanym na wielu płaszczyznach – zarówno naukowych, jak i technicznych.

Po dokonaniu analizy wybranych pozycji literaturowych z zakresu tematycznego stwierdzono zasadność prowadzenia badań naukowych dotyczących wyznaczania wytrzymałości zakładkowych połączeń klejonych.

2. BADANIA DOŚWIADCZALNE

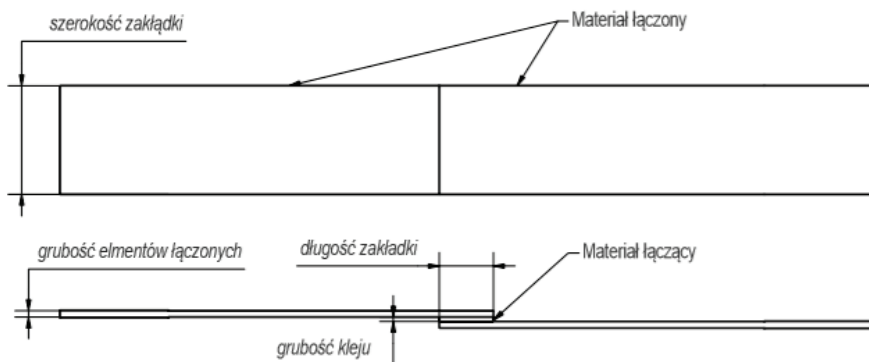
2.1. Obiekt badań

Badaniu poddano próbki w postaci zakładkowych połączeń klejonych, wykonanych w oparciu o normę PN EN 1456. Schematyczne przedstawienie opisywanego połączenia zaprezentowano na rysunki 1. Materiałem łączonym były blachy wykonane z aluminium PA9 o grubościach kolejno 1,5 mm, 3 mm oraz 5 mm. Pozostałe cechy geometryczne badanych próbek nie zmieniały się.

Głównym powodem, dla którego zdecydowano się na prowadzenie badań we wskazanym zakresie, jest eksperymentalna weryfikacja zaleceń producenta kleju. Dodatkowo zalecenia te w żaden sposób nie uwzględniają sztywności materiału łączonego za pomocą kleju. Przy tak szerokiej gamie materiałów, które według producenta można łączyć za pomocą badanego kleju, uwzględnienie w zaleceniach sztywności materiałów łączonych zdaniem autorów pracy wydaje się zasadne.

Spoiłem, jakie zastosowano do łączenia blach, był klej metakrylowy Plexus MA 300. Wybrane tworzywo adhezyjne ma czas wiązania wynoszący 4–6 minut

oraz uzyskuje 75% docelowej wytrzymałości w 10–15 minut. Klej umożliwia ponadto łączenie termoplastów, metali i kompozytów, co sprawia, że jest wykorzystywany w budowie maszyn i urządzeń.



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie zakładkowego połączenia klejonego

Fig. 1. Diagram of the overlap adhesive bond

2.2. Przygotowanie próbek

Proces klejenia rozpoczął się od przygotowania materiałów łączonych. Błachy poddano jednostronnemu piaskowaniu ścierniwem elektrokorundowym na odległość odpowiadającej długości zakładki. Następnie elementy łączone odtłuszczone jednokrotnie przy użyciu środka Cleaner MC 6060. Po osuszeniu płaszczyzn przystąpiono do procesu klejenia. Do tego celu użyto wcześniej przygotowanych form drewnianych, uniemożliwiających przemieszczenie łączonych elementów podczas spajania. Wspomniane formy zapewniały również powtarzalność wymiarów połączenia zakładkowego oraz umożliwiały zrealizowanie właściwego docisku spajanych ze sobą elementów. Wykonane połączenia zakładkowe, po usieciowaniu kleju, wyjęto z form i usunięto wypływki.

W opisywany sposób, zgodnie z założeniami przedstawionymi w pkt. 2.1, wykonano 3 rodzaje próbek różniących się grubością, a dla każdej z nich wykonano po 6 próbek.

2.3. Przebieg badań

Badania rozpoczęto od zmierzenia wymiarów geometrycznych (rys. 1). Następnie modele połączenia zakładkowego poddano próbie monotonicznie narastającego obciążenia, trwającego do momentu zerwania połączenia klejonego. Pomiarzy zostały przeprowadzone bez użycia ekstensometru. Seria eksperymentów została przeprowadzona na maszynie wytrzymałościowej Instron 5966. Dla każdej z próbek prędkość rozciągania wynosiła $0,05 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Próbkę zamocowaną w szczękach maszyny wytrzymałościowej zaprezentowano na rysunku 2.



Rys. 2. Próbką zamocowana w uchwycie maszyny wytrzymałościowej

Fig. 2. Sample clamped in the testing machine handle

2.4. Wyniki badań

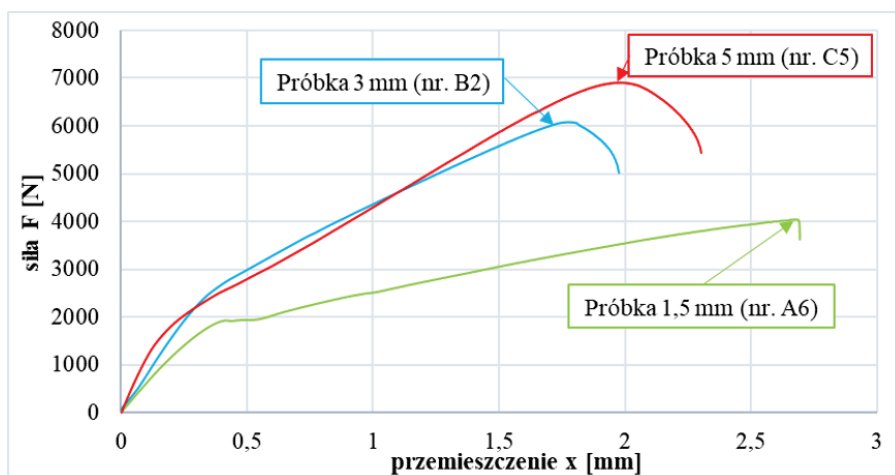
Uśrednione wartości charakteryzujące podstawowe wielkości geometryczne badanych próbek (zgodnie z rys. 1) zestawiono w tabeli 1. Należy zaznaczyć, że szczególnie istotna jest długość zakładki.

Tabela 1. Uśrednione wartości cech geometrycznych próbek

Table 1. Averaged values of geometrical quantities of the sample

Rodzaj próbki	Szerokość zakładki [mm]	Odch. standard.	Długość zakładki [mm]	Odch. standard.	Grubość kleju [mm]	Odch. standard.
Próbka 1,5 mm	24,97	0,24	13,58	0,31	0,89	0,17
Próbka 3 mm	24,75	0,48	13,32	0,66	0,84	0,15
Próbka 5 mm	24,92	0,08	13,37	0,21	0,99	0,10

W wyniku przeprowadzenia wcześniej wspomnianych prób monotonicznie narastającego obciążenia wyznaczono przebieg krzywej siła – przemieszczenie, dla poszczególnych rodzajów próbek. Wybrane z nich przedstawiono na rysunku 3. Natomiast wyniki badań eksperymentalnych wraz z wynikami obliczeń dla wszystkich próbek oraz grubości blach łączonych zestawiono w tabeli 2.



Rys. 3. Wybrane przebiegi siła – przemieszczenie dla poszczególnych grubości łączonych blach
Fig. 3. Selected curve – displacement, for individual thicknesses of joined sheets

Uzyskane wyniki badań odniesiono do pola przekroju badanego połączenia zgodnie z zależnością:

$$\tau = \frac{F_{MAX}}{S} \quad (1)$$

gdzie:

- τ – maksymalne naprężenia styczne występujące w połączeniu zakładkowym, tzw. naprężenia zrywające [MPa],
- F_{MAX} – maksymalna siła zmierzona podczas badania poszczególnych próbek [N],
- S – pole powierzchni klejonej poszczególnych próbek [mm²].

Tabela 2. Zestawienie wyników badań
Table 2. Summary of test results

Lp.	Obciążenie [N]			Naprężenie [MPa]			Odształcenie [mm]		
	1,5	3	5	1,5	3	5	1,5	3	5
1	4139,73	5708,07	6614,85	11,86	16,14	20,00	2,30	1,72	2,18
2	3617,32	6082,50	6895,75	10,46	18,64	20,87	1,75	1,99	2,12
3	4386,12	5903,97	7470,69	12,63	17,24	22,01	3,04	1,78	2,51
4	3061,61	6256,04	7479,34	9,44	20,06	23,98	1,75	2,14	3,10
5	4121,65	6430,20	6910,05	12,58	20,29	21,81	2,44	2,02	2,32
6	4042,27	6229,01	6839,01	11,98	19,06	22,84	2,70	1,78	2,32

2.5. Analiza wyników badań

Zgodnie z informacjami zaprezentowanymi w części 2, średnie wartości wymiarów szerokości i długości zakładki oraz grubości kleju poszczególnych rodzajów próbek są zbliżone, co pozwoliło ograniczyć wpływ geometrii próbek na wynik przeprowadzanej analizy porównawczej.

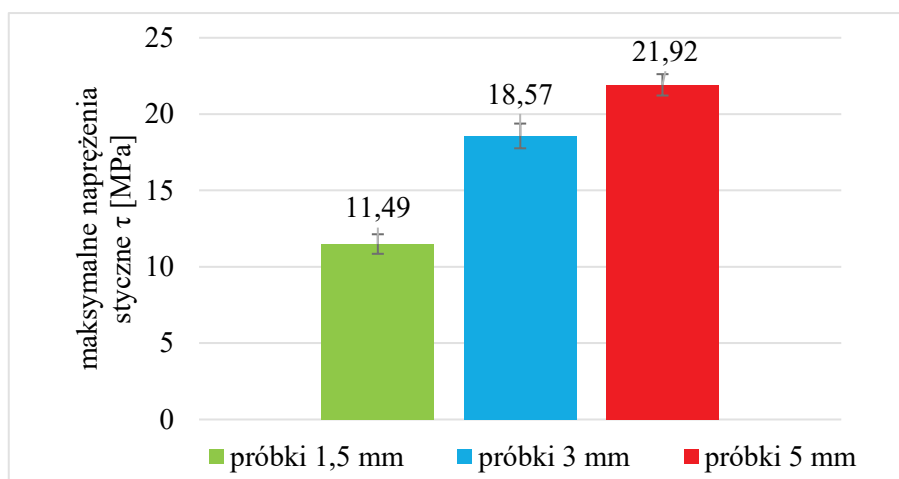
W tabeli 3 przedstawiono wartości średnie wyników pomiarów wpływu grubości blachy na wytrzymałość zakładkowego połączenia klejonego, natomiast na

rysunku 4 – średnie maksymalne wartości naprężeń stycznych zakładkowego połączenia klejonego dla poszczególnych grubości łączonych blach w formie graficznej.

Tabela 3. Uśrednione wartości wyników badań

Table 3. Averaged values of test results

Rodzaj próbki	Obciążenie [N]	Odch. standard.	Naprężenie [MPa]	Odch. standard.	Odkształcenie [mm]	Odch. standard.
próbka 1,5 mm	3894,78	478,71	11,49	1,28	2,33	0,51
próbka 3 mm	6101,63	261,67	18,57	1,62	1,91	0,17
próbka 5 mm	7034,95	356,99	21,92	1,41	2,43	0,35



Rys. 4. Średnie wartości siły zrywającej zakładkowe połączenie klejone dla poszczególnych grubości łączonych blach

Fig. 4. Average values of the destructive force of the lamellar joint for individual thicknesses of joined sheets

Na podstawie wartości średnich z otrzymanych wyników zauważono, iż zwiększanie grubości płaskowników spowodowało wzrost wartości siły zrywającej połączenie oraz zwiększenie wartości maksymalnych naprężeń stycznych. Zależność ta nie ma charakteru liniowego. Liczba zebranych wartości nie jest wystarczająca do zbudowania modelu określającego wpływ grubości na wytrzymałość połączenia.

3. WNIOSKI KOŃCOWE

Na podstawie wyników badań eksperymentalnych stwierdzono, że wraz ze wzrostem grubości blach wykonanych z PA9 rośnie również siła zrywająca zakładkowe połączenie klejone.

Zwiększenie grubości elementów łączonych powoduje wzrost sztywności zakładkowego połączenia klejonego. W konsekwencji, próbka podczas obciążania ulega mniejszemu odkształceniu, w związku z tym udział złożonego stanu naprężenia (konsekwencji wyboczenia próbki) zmniejsza się. Zdaniem autorów pracy wzrost sztywności próbek jest bezpośrednią przyczyną zwiększenia wartości naprężeń stycznych, niszczących połączenie.

W dalszych badaniach z tego zakresu sugeruje się zwiększanie grubości łączonych płaskowników, aby wyznaczyć takie cechy geometryczne, w których dalsze zwiększanie grubości elementów łączonych nie będzie wpływało na wzrost naprężeń niszczących zakładkowe połączenie klejone.

Wzrost wytrzymałości połączenia nie ma charakteru liniowego. W celu budowy modelu o szerszym zakresie, określającego wpływu grubości na wytrzymałość połączenia, sugeruje się zwiększyć liczbę rozpatrywanych grubości blach.

Uzyskane wyniki badań charakteryzują się niewielkim rozrzutem wyrażonym poprzez wartość odchylenia standardowego do wartości średniej (poniżej 11%), co w przypadku próbek klejonych korzystnie wpływa na jednoznaczność wyników badań.

LITERATURA

- [1] BĄBIŃSKI C., KOWALIK R., ZMYŚKO D., BIEŃCZAK R.: Projektowanie zakładów przemysłowych: tendencja postępu, architektura, budownictwo, projektowanie modelowe, laboratoria i elektrownie ciepłne. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1972.
- [2] DA SILVA L.F.M., ADAMS R.D.: Measurement of the mechanical properties of structural adhesives in tension and shear over a wide range of temperatures. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2, 2005, 109–141.
- [3] KARNY M.: Połączenia klejone w strukturach kompozytowych – metodyka badań. *Prace Instytutu Lotnictwa*, 3, 2016, 97–108.
- [4] KOCANDA D., GÓRKA A.: Nowe technologie łączenia tarcowego metali. *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*, 2, 2010, 395–411.
- [5] KOMOREK A., KOWALIK R., ZMYŚKO D., BIEŃCZAK R.: Wpływ modyfikacji fizycznej na udarność kleju konstrukcyjnego. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*, 6, 2016, 921–923.
- [6] KOTYK M., MAĆKOWIAK P.: Badanie podstawowych właściwości mechanicznych próbek z tworzywa ABS wykonanych za pomocą drukarki 3D w zależności od stopnia ich wypełnienia. [W:] *Nauka niejedno ma imię*, Wydawnictwa Uczelniane UTP, Bydgoszcz 2015, 34–52.
- [7] MAĆKOWIAK P., LIGAJ B.: Manufacture of specimens and mechanical properties determination of structural adhesives under static loading condition. *Engineering Mechanics*, 2018, 525–528.
- [8] MAĆKOWIAK P., LIGAJ B., PŁACZEK D., JASIŃSKA A.: Metody badania właściwości mechanicznych kleju metakrylowego stosowanego w budowie pojazdów. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*, 12, 2017, 1092–1095.
- [9] MAĆKOWIAK P., MAGDZIARZ D., KOTYK M., TOMKIEWICZ R., KABAT P.: Wielkość i liczba wad w elementach wyprodukowanych metodą FDM w zależności od parametru prędkości wytwarzania. *Postępy w Inżynierii Mechanicznej*, 4, 2016, 17–31.
- [10] MAĆKOWIAK P., PŁACZEK D., KOTYK M.: Determination of design mechanical properties of adhesives in a tensile and compression test. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 393, 2018, 1–8.

- [11] MAĆKOWIAK P., PŁACZEK D., SOŁTYSIAK A.: Metody wyznaczania modułu Kirchhoffa i współczynnika Poissona dla tworzyw adhezyjnych. *Postępy w Inżynierii Mechanicznej*, 5, 2017, 27–43.
- [12] MAJDA P.: Uproszczony model zakładkowego połączenia klejonego. *Modelowanie Inżynierskie*, 3, 2007, 93–98.
- [13] PEJKOWSKI Ł., ANDRZEJEWSKA A.: Wytrzymałość pojedynczej warstwy polilaktydu PLA wykonanej metodą druku 3D w warunkach monotonicznego rozciągania. *Postępy w Inżynierii Mechanicznej*, 8, 2016, 75–81.

THE INFLUENCE OF JOINED ELEMENTS THICKNESS ON THE STRENGTH OF A PLASTIC GLUE JOINT

Summary: The article presents the results of the author's research on the impact of thicknesses of joined sheets on the strength of the glued joint. In the experiment sheets welded together, made of aluminum PA 9, were welded together. Based on the tests of weld strength made of Plexus MA 300 adhesive, it was found that the thickness of the joined sheets in the tested range affects the strength of the joint, while the strength increases in direct proportion to the thickness of joined sheets.

Key words: bond strength, lap joint, maximum stress, thickness effect