

**Dr inż. Paweł Mikołajczak**

**Dr hab. inż. Jerzy Napiórkowski prof. UWM**

Wydział Nauk Technicznych

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

Ul. Oczapowskiego 11, 10-719 Olsztyn, Polska

E-mail: pawel.mikolajczak@uwm.edu.pl, napj@uwm.edu.pl

## **Analiza niezawodności elementów roboczych funkcjonujących w glebowej masie ścierniej z uwzględnieniem czynników zakłócających**

**Słowa kluczowe:** *tarcie, zużycie ściernie, analizy wielowymiarowe, niezawodność*

**Streszczenie:** Praca poświęcona jest zagadnieniom związanych z zużywaniem materiałów konstrukcyjnych stosowanych do produkcji elementów roboczych funkcjonujących w glebowej masie ścierniej. Badania własne przeprowadzono dla sześciu rodzajów stali: Hardox 500 i Hardox 600, XAR 600, TBL Plus, B27 i 38GSA, 13 warstw napawanych oraz dwóch rodzajów warstw z węglnikami. Uzyskane wyniki posłużyły do przeprowadzenia analizy niezawodności i trwałości w aspekcie osiągnięcia założonych wartości granicznych zużycia ściernego. Jako narzędzia analityczne wykorzystano analizy wielowymiarowe takie, jak: analiza skupień, analiza korespondencji oraz analiza porównawcza funkcji niezawodności z zastosowaniem testu Mantela-Haenszela. Ostatnia z wymienionych metod posłużyła do zbadania jak wpływa czynnik zakłócający (zmiana rodzaju masy glebowej), na wyznaczone modele niezawodności.

### **1. Wprowadzenie**

Jakość funkcjonowania obiektów technicznych, opisana między innymi ich stanem technicznym, jest zdeterminowana stopniem zaawansowania procesów zużyciowych zachodzących w obiektach, w trakcie ich eksploatacji. Istotą problemu predykcji przebiegu użytkowania (czasu, drogi, liczby cykli itp.) do uszkodzenia jest trudność w ilościowym opisie stopnia zaawansowania procesów zużyciowych zachodzących w obiektach technicznych. W przypadku oddziaływania ścierniwa na elementy robocze maszyn, do podstawowej przyczyny uszkodzeń zalicza się zużycie ściernie. Jeżeli zużycie wynika z normalnego (oczekiwanego) przebiegu eksploatacyjnego, to istotą w sterowaniu procesem eksploatacji jest określenie wartości granicznych zużycia i ich przewidywanego czasu wystąpienia. W przypadku, gdy ten warunek nie jest spełniony celem badań eksploatacyjnych (niezawodnościowych) staje się identyfikacja przyczyn nadmiernego zużycia i opracowanie metody ograniczającej to zużycie.

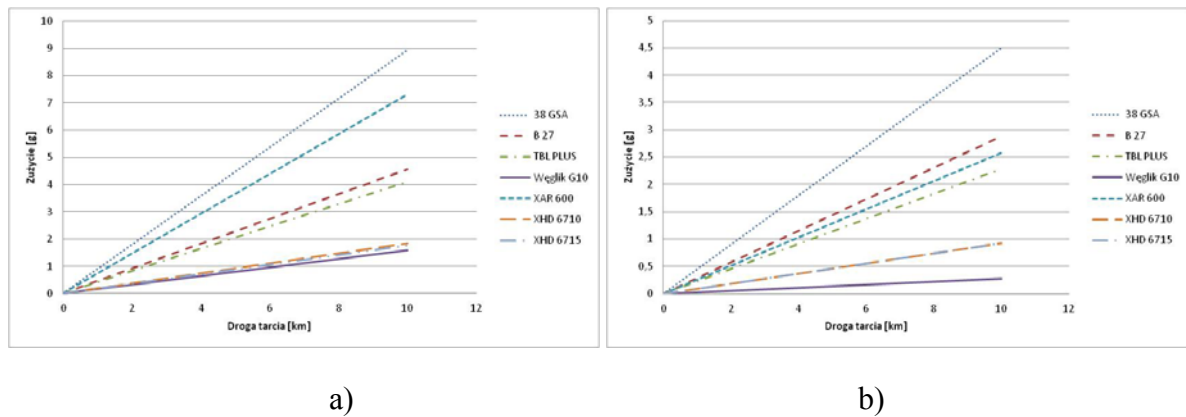
Osiągnięcie celu obniżenia materiałochłonności węzłów konstrukcyjnych jest możliwe poprzez ograniczenie intensywności zjawisk destrukcyjnych zachodzących w materiałach poprzez odpowiednie ukształtowanie elementów, poznanie związków pomiędzy składem chemicznym, mikrostrukturą i właściwościami materiałów, opracowanie metod badawczych dobrze modelujących zjawiska zużycia oraz opracowanie metod opisu zjawisk i metod prognozowania trwałości [12].

Proces zużywania elementu roboczego w masie glebowej należy do klasy procesów naturalnych [11, 16]. Oprócz procesów niesterowalnych, na których przebieg nie ma możliwości wpływać, występują również procesy sterowalne. Zakres sterowalności uzależniony jest od stopnia znajomości procesów naturalnych oraz możliwości wpływu na ich przebieg. Problematyka zużywania w masie glebowej jest bardzo złożona i wymaga podejścia interdyscyplinarnego. Na ogół analiza procesu zużywania jest dokonywana w oparciu o ocenę jego skutków. Podstawowym celem rozwiązywania problemów jest dostosowanie rozwiązań materiałowych i konstrukcyjnych elementów roboczych do wymuszeń środowiskowych, w tym właściwości masy ścierniej. Wielość czynników wpływających na proces zużywania elementów roboczych w masie glebowej sprawia, że dotychczas nie opisano w sposób zadowalający relacji systemotwórczych pomiędzy elementem roboczym a oddziaływaniem otoczenia. Pomimo losowości oddziaływania otoczenia i trudności w tworzeniu rozwiązań kompleksowych, można dokonać racjonalnego doboru postaci konstrukcyjno-technologicznych elementów roboczych oraz planowania przebiegu eksploatacji. Warunkiem do realizacji takich opracowań jest przeprowadzenie złożonych eksperymentów dla różnych przebiegów wyczerpywania się ich zasobu użytkowego w ustalonym czasie i wymuszeniach. Można tego dokonać poprzez kompozycję istotnych charakterystyk kształtujących proces. W ramach inżynierii materiałowej opracowywane są coraz doskonalsze materiały konstrukcyjne, z których, mogą być wykonane elementy robocze do obrabiania masy glebowej [1]. Powstaje jednak pytanie, czy we wszystkich rodzajach masy ścierniej winien być stosowany element roboczy wykonany z jednakowego tworzywa konstrukcyjnego? Ustalenie związku między intensywnością zużywania, a wielkością charakteryzującą materiał konstrukcyjny znacznie upraszcza dobór odpowiedniego rodzaju materiału dla danych wymuszeń glebowych. Dostępne stale, staliwa i żeliwa o specjalnie ukonstytuowanych własnościach, napoiny i węgliki mogą zawierać duże ilości deficytowych dodatków stopowych, co znacznie podraża ich wykorzystanie. W związku z tym potrzebne jest badanie wpływu pierwiastków węglilotwórczych na skład strukturalno-fazowy i właściwości tworzyw w poszczególnych rodzajach mas ściernych.

Kryterium doboru materiału wybiera się na podstawie dwóch kierunków, a mianowicie: uzyskanie odpowiedniej twardości oraz wytworzenie ściśle określonego składu fazowego heterogenicznej struktury napoiny [5, 9, 13]. W przypadku stopów żelaza, chodzi tu głównie o fazy węglikowe. Stąd biorą się tendencje do podwyższania zawartości węgla w materiałach napoin oraz trend do wprowadzania pierwiastków silnie węglilotwórczych (Nb, B) [14, 22]. Oprócz udziału objętościowego węglików w strukturze napoiny, ważną rolę odgrywają także wymiary, kształt i sposób ich rozmieszczenia. Dobór węglików o określonych własnościach musi uwzględniać wzajemne relacje pomiędzy Fe-Cr-C oraz pierwiastkami węglilotwórczymi. Do najczęściej występujących węglików należą Fe<sub>3</sub>C (840-1000HV), Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> (1800HV), Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub> (1500HV), WC (2400HV), VC (2800HV), Mo<sub>2</sub>C (1200HV), TiC (3200HV). Posługiwanie się jako punktem odniesienia stopami Fe-Cr-C wynika z faktu, że stopy, w których podstawowym składnikiem jest chrom, są najczęściej stosowane i uważane za najbardziej ekonomiczne. Do najczęściej stosowanych dodatków należą W, Mo, V, B, Nb. Na przykład dodatek boru umożliwia powstanie borków i węglików typu: Ti<sub>2</sub>B, FeB, Cr<sub>2</sub>BC, M<sub>23</sub>(C, B)<sub>6</sub>.

Odporność na zużycie zależy również od innych czynników, z których najważniejsze to: zawartość pierwiastków, w tym ilość i postać węglików, wytrzymałość, sprężystość, twardość metalicznej osnowy i charakter mikrostruktury. Przeprowadzona analiza danych literaturowych [1, 2, 3, 6, 7, 15, 21] wskazuje, że interpretację budowy fazowej i struktury napoin należy przeprowadzić indywidualnie dla danych składów chemicznych. Jednoznaczna i uniwersalna klasyfikacja materiałów do napawania jest trudna, ponieważ materiały te ze względu na specyfikę budowy wymagają odpowiedniego doboru w zależności od istniejących

warunków użytkowania. Przedstawione przebiegi (Rys. 1) wskazują na zróżnicowane zużycie materiałów w poszczególnych warunkach glebowych.



Rys. 1. Przebieg zużycia materiałów (próbek) o powierzchni 750 mm<sup>2</sup>, a) w glinie lekkiej, b) w piasku gliniastym [12]

Analizując wykresy przedstawione na Rys. 1 można zauważyć, że rodzaj gleby wpływa nie tylko na wartość zużycia ale również zmienia ranking odporności poszczególnych materiałów. Chcąc uzyskać dodatkową odpowiedź na pytanie, które z materiałów można uznać za podobne i przypisać im odpowiednie cechy odporności na zużycie (np. wysoka odporność, zadawalająca, nieakceptowana), stosuje się różne metody statystyczne – od podstawowych, takich jak analiza wariancji i testy *post-hoc* (po fakcie) [8], do metod wielowymiarowej analizy porównawczej, które można zdefiniować, jako metody służące do porównywania obiektów opisywanych przez wiele ich właściwości, np. analiza dyskryminacyjna, korespondencji, składowych głównych oraz analiza skupień [8, 10, 12]. Z punktu widzenia typowo niezawodnościowego, uzupełnieniem tych metod mogą być zastosowane metody porównawcze funkcji niezawodności, wykorzystujące następujące testy [18]:

- long-rank,
- Coxa-Mantela,
- F Coxa,
- Wilcoxona według Gehana,
- Wilcoxona według Peto I Peto oraz
- Mantela-Haenszela.

Celem pracy jest analiza niezawodności i trwałości w aspekcie wartości granicznych zużycia ściernego materiałów konstrukcyjnych, stosowanych na elementy robocze obrabiających glebową masę ścierną. Jako narzędzia analityczne wykorzystano analizy wielowymiarowe, pozwalające na przeprowadzenie identyfikacji zużycia badanych materiałów, z uwzględnieniem:

- podziału na grupy podobne, jako wstęp do dalszych wielowymiarowych analiz;
- powiązań zachodzących pomiędzy kategoriami zmiennych, w tym dla zmiennych jakościowych;
- wpływu czynników zakłócających - rodzaju masy glebowej na wyznaczone modele niezawodności.

## 2. Badania laboratoryjne

### 2.1. Cel i zakres badań

Celem przeprowadzonych badań było uzyskanie danych o przebiegu zużycia ściernego w zależności od twardości warstw wierzchnich badanych materiałów, ich struktury i składu chemicznego oraz rodzaju gleby.

Materiały badano w glebowej masie ścierniej o składzie granulometrycznym scharakteryzowanym w Tab. 1. Badania przeprowadzono dla 21 rodzajów materiałów, wymienionych w Tab. 2. Pomiary zużycia wykonywano, co 4 km drogi tarcia, do 20 km. Ilość powtórzeń wynosiła 5 próbek, dla każdego materiału. Wartości zużycia wykorzystane w dalszych analizach, są wartościami uśrednionymi z pięciu prób.

Tab. 1. Charakterystyka glebowej masy ścierniej

Opis gleby	Rodzaj	Piasek 1 ÷ 0,1 mm [%]	Pył 0,1 ÷ 0,02 mm [%]	Części spławiane < 0,02 mm [%]	Wilgotność wagowa
					[%]
Gleba ciężka	Glina zwykła	33,62	49,92	16,56	15
Gleba lekka	Piasek gliniasty	77,48	20,83	1,69	8
Gleba średnia	Glina lekka	52,66	40,32	7,02	12

Tab. 2. Wykaz badanych materiałów

Stale	Warstwy napawane	Warstwy z węglkami
38GSA	El-Hard 61	Węglik B 26
B27	El-Hard 63	Węglik G 10
Hardox 500	El-Hard 65	
Hardox 600	El-Hard 67	
Tbl Plus	El-Hard 70	
XAR 600	F-600 TiC	
	F-61	
	F-64	
	F-65	
	F-67	
	F-78	
	XHD 6710	
	XHD 6715	

### 2.2. Stanowisko badawcze

W badań wykorzystano stanowisko laboratoryjne do oceny przebiegu zużywania warstw wierzchnich w zróżnicowanych warunkach glebowych (Rys.2).

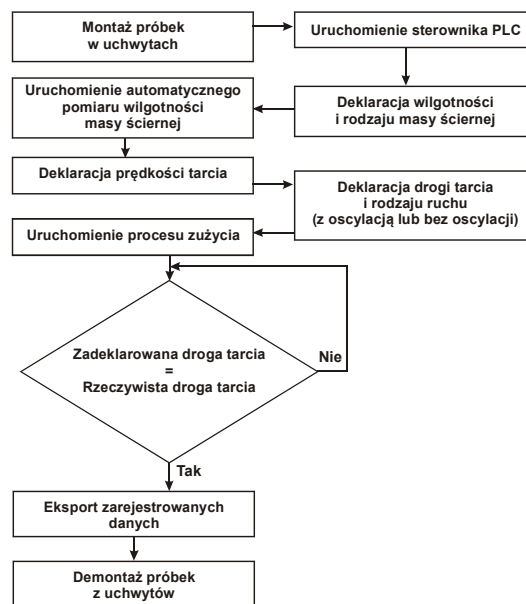


Rys. 2. Maszyna do badania zużycia w glębowej masie ściernej

Maszyna wyposażona jest w wirującą misę i dwie sekcje ścierające z możliwością wykonywania ruchu oscylacyjnego. Procesy robocze sekcji są monitorowane i nadzorowane przez sterownik PLC V350-35-R2. Do pamięci sterownika wgrano oprogramowanie, dzięki któremu istnieje możliwość:

- precyzyjnego zadawania drogi tarcia;
- wyboru rodzaju ruchu (z oscylacją lub bez oscylacji);
- pomiaru i rejestracji sił tarcia niezależnie dla dwóch sekcji;
- pomiaru i rejestracji przebytej drogi tarcia;
- pomiaru i rejestracji wilgotności i temperatury masy ściernej;
- deklaracji prędkości liniowej ścieranych próbek;
- deklaracji prędkości oscylacji;
- sterowanie wilgotnością masy ściernej.

Algorytm funkcjonowania stanowiska do badania zużycia w glębowej masie ściernej przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Algorytm funkcjonowania stanowiska do badania zużycia w glębowej masie ściernej

Do mikroanaliz składu chemicznego wykorzystano mikroskop skaningowy JEOL JSM – 5800 LV sprzężony z mikroanalizatorem promieniowania rentgenowskiego Oxford LINK ISIS – 300.

### 3. Wyniki badań i ich analiza

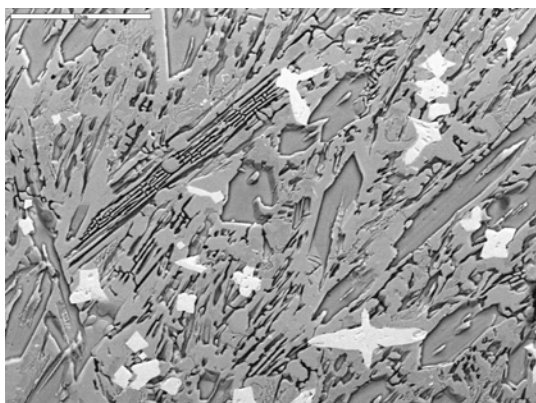
#### 3.1. Skład chemiczny, struktura i twardość

Wyniki badań składu chemicznego, struktury i twardości warstw napawanych elektrodą otuloną przedstawiono w Tab. 3, natomiast charakterystykę pozostałych materiałów można znaleźć w pracy [12].

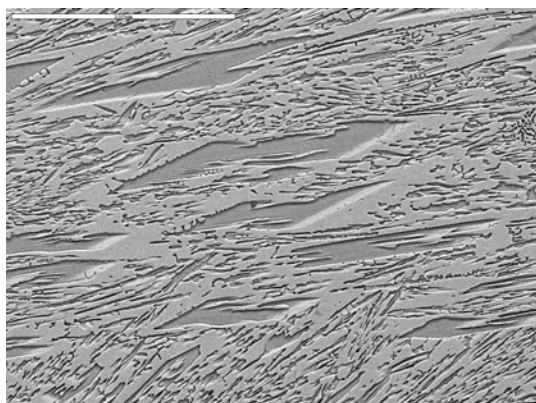
Tab. 3. Charakterystyka warstw wierzchnich napawanych elektrodami otulonymi

Materiał	C	Mn	Cr	Mo	B	W	V	Ti	Nb	Struktura	Twardość HV10
El-Hard 61	5,2	1,2	29,0	0,7	-	-	-	-	7,0	Feryt stopowy przechodzący w strukturę warstwy składającej się fazowo z ferrytu stopowego i węglików (budowa ledeburyticzna). Mikrostruktura warstwy napawanej z wydzieleniami węglików chromu i niobu.	632
El-Hard 63	5,0	-	34,0	-	-	-	-	-	-	Mikrostruktura napoiny. Duże wydzielenia węglików pierwotnych typu M7C3 (Fe,Cr7C3) na tle mieszaniny ferrytu stopowego i węglików. Zaeutektyczny stop Fe-Cr-C o budowie ledeburytycznej.	658
El-Hard 65	4,5	-	24,0	6,0	-	2,0	1,0	-	6,0	Mieszanina ferrytu stopowego i węglików M7C3 – [Fe,Cr7C3] oraz węglików niobu.	682
El-Hard 67	5,0	-	23,0	-	-	-	10,0	-	-	Feryt stopowy z węglnikami (o budowie mieszaniny ledeburytycznej) z nierównomiernie rozmieszczonymi pierwotnymi wydzieleniami węglików chromu i drobnymi, ciemnymi węglnikami wanadu.	720
El-Hard 70	5,0	1,0	38,0	1,5	3,50	-	-	-	-	Duże, lokalnie pofragmentowane, wydzielenia pierwotnych węglików chromu z drobnymi węglnikami boru. Ośnowę stanowi mieszanina o budowie ledeburytycznej składająca się z ferrytu stopowego i drobnych węglików.	776
XHD 6710	1,2	13,2	45,0	-	-	-	-	-	-	Duże, pierwotne wydzielenia węglików chromu na tle mieszaniny ferrytu stopowego + węgliki.	795
XHD 6715	5,0	-	21,0	8,5	-	6,0	1,5	-	7,0	Duże wydzielenia pierwotnych węglików chromu w osnowie ferrytu stopowego oraz węglików niobu. Widoczne także niewielkie obszary ledeburytu.	820

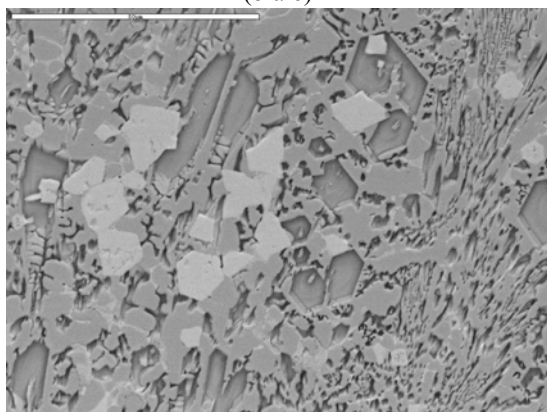
Na Rys. 4 przedstawiono przykładowe obrazy struktur badanych materiałów, które uzyskano na podstawie badań mikroskopowych.



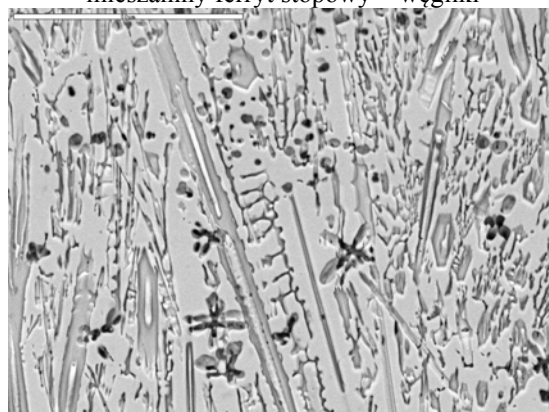
Mikrostruktura warstwy napawanej ELHARD 61 z wydzieleniami węglików chromu (szare) i niobu (białe)



Mikrostruktura warstwy napawanej ELHARD 63. Duże wydzielenia węglików chromu w osnowie mieszaniny ferrytu stopowy + węgliki



Mikrostruktura napoiny ELHARD 65. Mieszanka ferrytu stopowego i węglików M7C3 – [Fe,Cr7C3] oraz węglików niobu



Ledeburytyczna mikrostruktura napoiny ELHARD 67 z wydzieleniami węglików chromu (typu M7C3) i węglnikami wanadu

Rys. 4. Przykładowe mikrostruktury warstw napawanych

Zaprezentowane wyniki są tylko częścią kompleksowych wyników badań (składu chemicznego, struktury i twardości), natomiast w przedstawionych przykładach – analizach wielowymiarowych, wykorzystano wszystkie wyniki, adekwatne do zdefiniowanego celu.

### 3.2. Identyfikacja grup podobnych

W celu identyfikacji grup podobnych materiałów konstrukcyjnych, zastosowano analizę skupień. Podstawową ideą analizy skupień jest rozdzielanie obiektów do pewnej (ustalonej lub nieustalonej z góry) liczby grup „podobnych” do siebie obiektów, które zarazem nie są „podobne” do obiektów z pozostałych grup. Zakłada się, że takie grupowanie może wiele wnieść w poznanie struktury czynników wpływających na kształtowanie się zużycia, a w szczególności:

- wykryć, czy otrzymane skupienia nie wskazują na jakąś prawidłowość, np. związek między twardością materiału a zużyciem;
- dokonać redukcji dużego zbioru danych do średnich poszczególnych grup;
- potraktować rozdzielanie na grupy jako wstęp do dalszych wielowymiarowych analiz.

Analiza skupień obejmuje kilka różnych algorytmów klasyfikacji obiektów [18, 19]. W przedstawionym przykładzie posłużono się metodą aglomeracji – otrzymuje się tutaj hierarchicznie uporządkowane skupienia, które można przedstawić w postaci drzewa (dendrogramu), prezentującego odległości między grupowanymi obiektami. Do określenia odległości między nowymi skupieniami zastosowano metodę pełnego wiązania, w której odległość między skupieniami jest równa największej odległości między dwoma dowolnymi

obiektami należącymi do różnych skupień. Zastosowanie tej metody jest uzasadnione, gdy spodziewa się, że obiekty formują naturalnie swoiste „kępki”. Jako funkcję odległości wybrano odległość euklidesową.

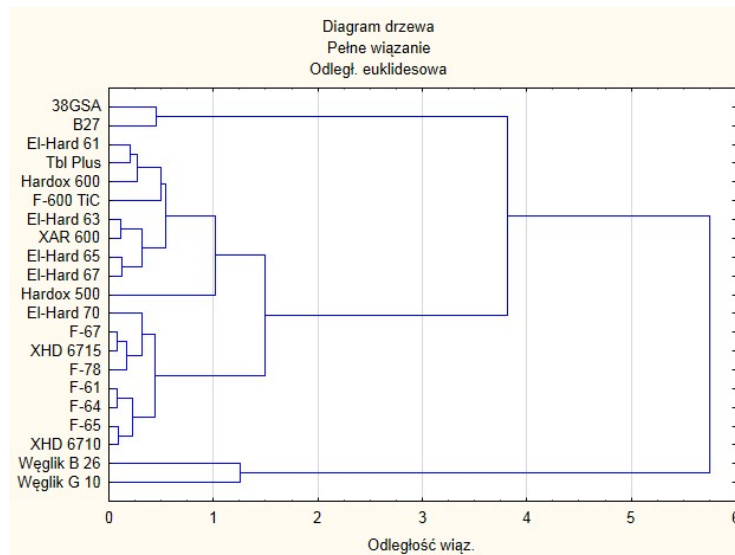
Dane do przykładu (Tab. 4) pochodzą z badań laboratoryjnych zużycia 21 materiałów w glebie lekkiej. Jako zmienne wpływające na skupienia wybrano zużycie jednostkowe, wyrażone w ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{km}^{-1}$ ) oraz twardość HV10, zatem celem analizy jest pogrupowanie materiałów w grupy charakteryzujące się podobnym zużyciem ściernym i twardością.

Tab. 4. Dane do analizy skupień dla gleby lekkiej

	Materiał	Twardość HV10	Zużycie po 20 km drogi tarcia [ $\text{cm}^{-2}\cdot\text{km}^{-1}$ ]
1.	38GSA	414	0,0160
2.	B27	549,7	0,0155
3.	El-Hard 61	632	0,0032
4.	El-Hard 63	658	0,0018
5.	El-Hard 65	682	0,0023
6.	El-Hard 67	720	0,0024
7.	El-Hard 70	776	0,0010
8.	F-600 TiC	680	0,0040
9.	F-61	779	0,0026
10.	F-64	786	0,0023
11.	F-65	824	0,0019
12.	F-67	846	0,0013
13.	F-78	874	0,0013
14.	Hardox 500	567,3	0,0060
15.	Hardox 600	554,1	0,0028
16.	Tbl Plus	578,8	0,0037
17.	Węglik B 26	1818	0,0011
18.	Węglik G 10	1430	0,0014
19.	XAR 600	627,2	0,0020
20.	XHD 6710	795	0,0018
21.	XHD 6715	820	0,0013

Przed przystąpieniem do analizy skupień dokonano standaryzowania zmiennych. Standaryzacja w przypadku pojedynczej analizy nie jest tak istotna ale, gdy dąży się do porównania kilku wyników analizy skupień (np. dla gleby ciężkiej, średniej i lekkiej), takie postępowanie umożliwia porównanie różnych dendrogramów, a odległości pomiędzy skupieniami będą zachowywały stałą skalę. Rys. 5 przedstawia wynik analizy skupień w postaci dendrogramu poziomego.





Rys. 5. Dendrogram dla skupień materiałów wg zużycia w glebie lekkiej i twardości

Należy zauważyć, że na początku każdy materiał stanowi własne skupienie. Gdy przeprowadza się analizę dendrogramu poziomego w prawo, materiały, które są „sobie bliskie” łączą się w kolejne skupienia. Na tej podstawie można stwierdzić, że najbardziej podobne są właściwości napoin F65 i XHD 6710 oraz F61 i F64. Skrajnie różne są natomiast węgliki w porównaniu ze wszystkimi innymi materiałami. Wyniki analizy skupień pozwalają bez większego wysiłku wybrać konkretne skupienia, np. o znacznej odporności na zużycie i dalszą obróbkę danych prowadzić na podstawie składu chemicznego lub struktury tylko tych materiałów, tak aby zidentyfikować ich wartości, które stanowią o korzystnych właściwościach eksploatacyjnych.

### 3.3. Identyfikacja powiązań zachodzących pomiędzy kategoriami zmiennych

W wielu badaniach niezawodnościowych konieczne jest dokonanie analizy zmiennych jakościowych (nominalne i porządkowe), np.: rodzaj gleby, struktura materiału. Punktem wejściowym do analiz takich danych jest zestawienie ich w tabeli wielodzieldzej. Powszechnie znane stosowane statystyki (chi-kwadrat, V Cramera, O-Yula, współczynnik kontyngencji) informują tylko o istotności i sile związku pomiędzy zmiennymi jakościowymi, nie opisują jednak charakteru powiązań pomiędzy kategoriami analizowanych zmiennych jakościowych. Dlatego kolejną analizą zastosowaną w identyfikacji odporności na zużycie ścierne jest analiza korespondencji, która dostarcza informacji podobnych w interpretacji do wyników analizy czynnikowej, dotyczących jednak zmiennych jakościowych. Analiza statystyk i wykresów – stosowanych w analizie korespondencji - pozwala na proste i intuicyjne wnioskowanie o powiązaniach zachodzących pomiędzy kategoriami zmiennych. Dlatego głównym celem analizy korespondencji jest przedstawienie analizowanego zbioru punktów w przestrzeni maksymalnie trójwymiarowej, przy zachowaniu pełnej lub prawie pełnej informacji o zróżnicowaniu wierszy modelu macierzowego. W rozwiązaniu tego problemu została wykorzystana metoda **rozkładu macierzy według wartości osobliwych** (ang. singular value decomposition — SVD) [4, 17].

Najczęściej stosowanym sposobem przedstawienia efektów wykonanej analizy korespondencji jest graficzna prezentacja jednoczesnych wystąpień kategorii zmiennych. Wykres ten nazywa się mapą korespondencji. Interpretacja otrzymanych wyników polega na ocenie położenia punktów obrazujących kategorie zmiennych na wykresie. Pod uwagę należy wziąć trzy elementy [20]:

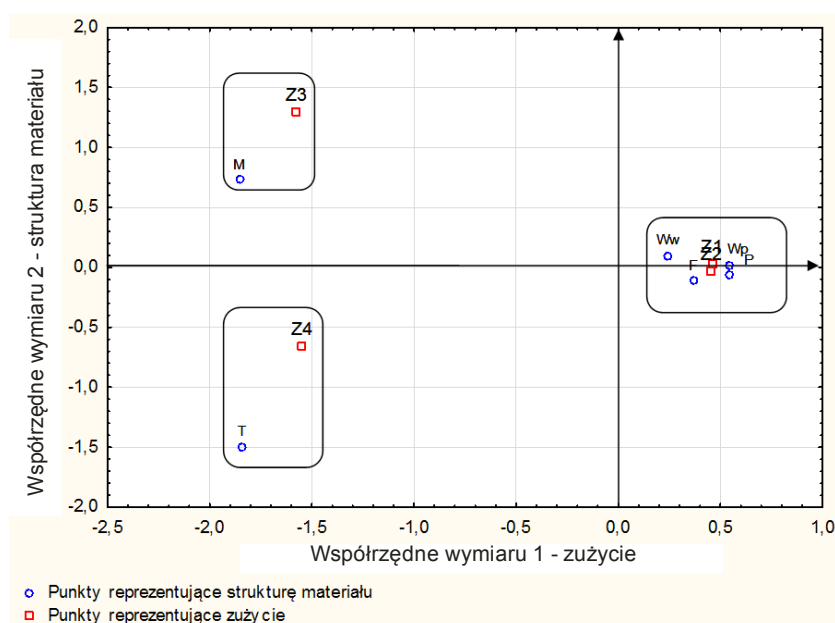
- położenie punktu wobec centrum rzutowania (punktu przecięcia osi);

- położenie punktu względem innych punktów określających kategorie należące do tej samej cechy;
- położenie punktu względem punktu opisującego kategorię innej cechy.

Chcąc określić wpływ struktury materiału konstrukcyjnego na odporność ścierną praktycznie nie ma danych liczbowych (procentowej zawartości jej składowych) a jedynie informacje o wystąpieniu poszczególnych rodzajów struktury w kategoriach „występuje” lub „nie występuje”. Nie ma zatem możliwości posługiwania się modelowaniem opartym na analizie czynnikowej. Analiza korespondencji daje taką możliwość i dlatego zdecydowano się ją zastosować do określenia powiązań pomiędzy strukturą 21 badanych materiałów i intensywnością zużycia (Tab. 5). Dane pochodzą z 57 prób zużyciowych. Uzyskaną mapę korespondencji zużycia ściernego w zależności od struktury materiału przedstawiono na Rys. 6.

Tab. 5. Dane do analizy korespondencji

Skład struktury materiału	Oznaczenie na mapie korespondencji	Zużycie zadawalające $Z_1$	Zużycie akceptowalne $Z_2$	Zużycie podwyższone $Z_3$	Zużycie nieakceptowane $Z_4$
Martenzyt	M	0	0	9	9
Troostyt	T	0	0	0	9
Ferryt	F	18	21	0	3
Węgliki pierwotne	Wp	24	12	0	0
Węgliki wtórne	Ww	24	18	3	3
Perlit	P	0	6	0	0



Rys. 6. Mapa korespondencji pomiędzy wartością zużycia i strukturą materiału

Analizując mapę korespondencji można sformułować następujące wnioski:

- korzystnym jest wystąpienie struktury ferrytu w połączeniu z węglkami wtórnymi i pierwotnymi, stan taki doprowadza do zużycia zadawalającego lub akceptowalnego;
- wystąpienie perlitu może mieć korzystny wpływ na ograniczenie zużycia ściernego, jednak należy pamiętać o bardzo małych wartościach „masy” i „jakości” dla tego punktu – należy stan ten dokładniej zbadać (statystyczny wskaźnik masy i jakości jest

wykorzystywany w analizie korespondencji do określenia siły związku pomiędzy badanymi cechami [1]);

- martenzyt i troostyt wyraźnie należą do grupy zużycia podwyższonego i nieakceptowanego. Przy wyborze materiału konstrukcyjnego elementów roboczych obrabiających glebę należy unikać materiałów z taką strukturą.

### 3.4. Wpływ czynników zakłócających

Często w badaniach eksploatacyjnych dąży się do porównania niezawodności dla kilku grup obiektów, gdzie należy uwzględnić wpływ dodatkowych czynników, nazywanych zmiennymi zakłócającymi (wikłającymi). Przykładowo, porównując wpływ dwóch metod napawania na niezawodność (lub trwałość) elementów roboczych funkcjonujących w glebowej masie ścierniej, można uwzględnić zmienne zakłócające, takie jak: wilgotność gleby, skład granulometryczny gleby, prędkość tarcia itp. W takich sytuacjach można zastosować metodę zaproponowaną przez Mantela i Haenszela [20]. Opracowany przez nich test opiera się na analizie tablic 2x2 (np. rodzaj warstwy napawanej, względem niezawodności), podzielonych względem innej zmiennej kategoryzującej (zmienna uwikłająca, np. rodzaj gleby).

Niech  $k$  oznacza liczbę kategorii zmiennej wikłającej. Wówczas dla każdej kategorii  $j$  ( $j=1,2,\dots,k$ ) można rozważyć tabele kontyngencji (Tab. 6). Liczba utworzonych tabel zależy od liczebności kategorii  $k$ .

Tab. 6. Ogólny przykład tabeli kontyngencji, przy założeniu dwóch rodzajów materiałów

Rodzaj materiału napawanego	Liczba próbek zużytych nadmiernie	Liczba próbek nie przekraczających granicznego zużycia	Suma
Materiał 1	$z_{1j}$	$n_{1j}-z_{1j}$	$n_{1j}$
Materiał 2	$z_{2j}$	$n_{2j}-z_{2j}$	$n_{2j}$
Suma	$Z_j$	$L_j$	$N_j$

W tab. 4 przyjęto następujące oznaczenia:

$z_{1j}$  – liczba próbek zużytych nadmiernie w  $j$ -tej kategorii dla materiału 1,

$z_{2j}$  – liczba próbek zużytych nadmiernie w  $j$ -tej kategorii dla materiału 2,

$n_{1j}, n_{2j}$  - liczebności odpowiednia dla materiału 1 i 2,

$Z_j$  – liczba próbek zużytych nadmiernie w  $j$ -tej kategorii (dla obu materiałów),

$L_j$  – liczba próbek nie przekraczających granicznego zużycia (dla obu materiałów),

$N_j$  – liczebność  $j$ -tej kategorii.

Przy tak przyjętych oznaczeniach, można sformułować następującą (ogólną) hipotezę zerową:

$$H_0: p_{11} = p_{12}, p_{12} = p_{22}, \dots, p_{1k} = p_{2k} \quad (1)$$

gdzie:  $p_{ij}$  jest prawdopodobieństwem wystąpienia nadmiernego zużycia w  $i$ -tej grupie i  $j$ -tej kategorii. Test Mantela i Haenszela pozwala na równoczesne (w  $k$  kategoriach) porównanie zawodności (lub niezawodności) w ujęciu probabilistycznym, w analizowanych grupach. W celu weryfikacji tak postawionej hipotezy, stosuje się statystykę chi-kwadrat o następującej postaci:

$$MH_i = \frac{\left( \sum_{j=1}^k z_{ij} - \sum_{j=1}^k E(z_{ij}) - 1 \right)^2}{\sum_{i=1}^k VAR(z_{ij})}, \quad (2)$$

gdzie:  $E(z_{ij})$  - oczekiwana liczba próbek zużytych nadmiernie dla  $i$ -tego materiału i  $j$ -tej kategorii,  $VAR(z_{ij})$  - wariancja próbek zużytych nadmiernie dla  $i$ -tego materiału i  $j$ -tej kategorii.

W przeprowadzonej analizie obliczono również ryzyko względne sumaryczne, według wzoru:

$$RW = \frac{\sum_{j=1}^k \frac{z_{1j}(n_{2j} - z_{2j})}{N_j}}{\sum_{j=1}^k \frac{z_{2j}(n_{1j} - z_{1j})}{N_j}}. \quad (3)$$

Dane do tego przykładu (Tab. 7) dotyczą dwóch grup materiałów, które zostały uznane jako podobne (wewnątrzgrupowo), na podstawie analizy skupień:

- 1grupa: XHD 6710, F61, F64, F65;
- 2 grupa: XHD 6715, F-67, F-78.

Powstaje teraz pytanie, czy można uznać grupę materiałów 1 i 2 za podobne do siebie (analiza skupień nie wyjaśnia tego w sposób jednoznaczny). W celu uzyskania odpowiedzi, na to pytanie, zastosowano test Mantela-Haenszela. Jako kryterium graniczne przyjęto wartość zużycia 0,2 g badanych próbek materiałów.

Tab. 7. Dane do porównania dwóch grup materiałów

Droga tarcia [km]	Grupa 1		Grupa 2	
	Liczba próbek zużytych nadmiernie	Liczba próbek nie przekraczających granicznego zużycia	Liczba próbek zużytych nadmiernie	Liczba próbek nie przekraczających granicznego zużycia
4	0	40	1	29
8	2	38	2	27
12	3	35	7	20
16	5	30	7	13
20	12	18	10	3

Przyjęto hipotezę zerową  $H_0$ : nie istnieje istotna różnica pomiędzy rozkładami niezawodności grupy 1 i 2 materiałów. Uzyskano następujące wyniki:  $MH=19,1626$ ;  $p=0,00001$ ;  $RW=0,27101$ . Wobec powyższego, należy uznać, że istnieje istotna różnica pomiędzy badanymi rozkładami ( $p<0,0001$ ). Wartość 0,27 wskaźnika ryzyka RW można interpretować w następujący sposób: w około 70% przypadków zużycie graniczne drugiej grupy materiałów, zostanie osiągnięte wcześniej (przy mniejszej drodze tarcia), w porównaniu do pierwszej grupy.

Dalsze badania przeprowadzono z uwzględnieniem wpływu zmiennej zakłócającej (rodzaju gleby). Dane do analizy przedstawiono w postaci tablic kontyngencji 2x2 (Tab. 8).

Tab. 8. Tablice kontyngencji (rodzaj materiału × rodzaj gleby)

Rodzaj materiału	Gleba lekka			Gleba średnia		
	Liczba próbek zużytych nadmiernie po 20 km drogi tarcia	Liczba próbek nie przekraczających granicznego zużycia	Suma	Liczba próbek zużytych nadmiernie po 20 km drogi tarcia	Liczba próbek nie przekraczających granicznego zużycia	Suma
Grupa 1	12	18	30	10	17	27
Grupa 2	10	3	13	7	5	12
Suma	22	21	43	17	22	39

Wyniki obliczeń wg wzorów 2 i 3 są następujące:  $MH=8,47$  ( $p=0,0036$ );  $RW=0,29$ . W tym przypadku należy również odrzucić hipotezę zerową. Oznacza to, że rodzaj gleby jest istotnie powiązany z wartością zużycia. Należy jednak zauważyć, że obliczona wartość  $p$  jest zdecydowanie większa, niż w poprzednim przykładzie, a więc istotność wpływu rodzaju gleby na trwałość i niezawodność elementów roboczych, obrabiających glebę nie jest tak dominująca, jak rodzaj samego materiału konstrukcyjnego.

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Zjawiskiem towarzyszącym eksploatacji elementów roboczych w masie glebowej jest intensywne zużywanie, będące procesem fizyko-chemicznych zmian jakościowych i ilościowych zachodzących na powierzchni tarcia. Proces intensywnego zużywania w glebie występuje w elementach roboczych narzędzi i maszyn rolniczych, budowlanych, drogowych i górniczych. Wśród tych elementów największą intensywnością zużywania charakteryzują się elementy robocze narzędzi uprawowych. Wykazano, że ubytek masowy jest zależny rodzaju materiału konstrukcyjnego i stanu masy glebowej. Przedstawione przykłady wykazują przydatność zastosowania analiz wielowymiarowych w modelowaniu zużycia ściernego i w analizach niezawodnościowych.

Analiza skupień okazała się bardzo przydatną w grupowaniu rodzajów materiałów konstrukcyjnych charakteryzujących się podobną odpornością na ścieranie. Identyfikacja grup podobnych jest łatwa i intuicyjna na podstawie dendrogramów skupień. Przykładowo, zidentyfikowano grupy materiałów podobnych:

- XHD 6710, F61, F64, F65;
- XHD 6715, F-67, F-78;
- 38GSA, B27;
- węgliki B26 i G10.

Analiza korespondencji pozwoliła na grupowanie cech o charakterze jakościowym i uzyskanie odpowiedzi, jaka struktura materiału konstrukcyjnego powoduje zmniejszenie lub zwiększenie zużycia. Prezentacja graficzna (w postaci mapy korespondencji) jest pomocna w interpretacji otrzymanych wyników. Dodatkowo wartości parametrów „masa” i „jakość” dają informację o randze poszczególnych zmiennych i stopniu (jakości) identyfikacji rozpatrywanych stanów przez zmienne jakościowe. Wyniki przeprowadzonej analizy korespondencji pozwalają na następujące stwierdzenia:

- wystąpienie struktury ferrytu w połączeniu z węglnikami wtórnymi i pierwotnymi, podwyższa trwałość elementów roboczych;
- wystąpienie perlitu może mieć korzystny wpływ na ograniczenie zużycia ściernego, jednak nie jest to do końca udowodnione – niskie wartości wskaźników „masy” i „jakości” dla takich struktur;

- zawartość martenzytu i troostytu w materiale, wpływa na znaczne zmniejszenie niezawodności elementów roboczych.

Wykorzystanie analizy Mantela i Haenszela pozwoliło na identyfikację istotności wpływu rodzaju gleby i rodzajów materiałów na wartości zużycia, przy czym stwierdzono, że większy wpływ na niezawodność tych elementów ma rodzaj materiału konstrukcyjnego.

Opisane w artykule analizy można prowadzić wielowariantowo, dla różnych rodzajów materiałów i warunków glebowych. Daje to podstawę do selekcji danych, na podstawie których można budować modele niezawodnościowe, np. modelem umożliwiającym prognozowanie zużycia w glebowej masie ścierniej jest warunkowy model Bayesa. Przydatność tego modelu jest szczególnie istotna dla określenia stanu granicznego pod warunkiem realizacji tarcia w zdefiniowanych wymuszeniach glebowej masy ścierniej. Takie postępowanie umożliwiła zastosowanie Bayesowskiego estymatora dystrybuanty drogi tarcia, i wyznaczanie a priori, prawdopodobieństwa osiągnięcia wartości granicznych w zależności od drogi tarcia.

Wstępna selekcja danych eksperymentalnych okazuje się przydatna również w modelowaniu przebiegu zużycia z wykorzystaniem rozkładu Weibulla. Bardzo dobre dopasowanie tego modelu uzyskuje się dla wartości parametru kształtu:  $k=2$ , oraz skali:  $\gamma=1$ . Dla tak dobranych parametrów modelu istnieje możliwość prognozowania zużywania stali z zawartością boru w grupach glebowej masy ścierniej, uznanych za jednorodne, ze względu na ich oddziaływanie na intensywność zużycia.

## References

1. Adamiak M, Górka J, Kik T. Comparison of abrasion resistance of selected constructional materials. *Journal of Achievements and Manufacturing Engineering* 2009; 37: 375-380.
2. Baba Zadeh M, Pour Asiabi H. Wear Characteristics of ADIs; A Comprehensive Review on Mechanisms and Effective Parameters. *Journal of Basic and Applied Scientific Research* 2013; 3(2): 646-656.
3. Badisch E, Winkelmann H, Franek F.: Hightemperature continuous impact abrasion testing (HAT-CIAT): Wear behaviour of single and multiphase materials up to 750 °C. 18th International Baltic Conference on Engineering Materials & Tribology – BALTMATRIB Talin 2009; 22-23.
4. Bénézecri J P. Correspondence Analysis Handbook. New York: Marcel Dekker Inc, 1992.
5. Buchely M F, Gutierrez J C , Le´on L M , Toro A.. The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. *Wear* 2005; 259: 52–61.
6. Ćikara D, Rakin M, Todić A. Cast Steel-SiC Composites as Wear Resistant Materials. *FME Transactions* 2009; 37: 151-155.
7. Fernández J E, Vijande R, Tucho R, Rodriguez J, Martin A. Materials selection to excavator teeth in mining industry. *Wear* 2001; volume 250: 11–18.
8. Gatnar E, Walesiak M. Metody statystycznej analizy wielowymiarowej w badaniach marketingowych. Wrocław: Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej, 2004.
9. Goel G, Cherukuri H P, Toro A. A Numerical Study of Abrasive Wear in Tillage Tools due to Soil-Tool Interaction. SIMULIA Customer Conference held at Rhode Island Convention, 2012.
10. Morison D F. Wielowymiarowa analiza statystyczna. Warszawa: PWN, 1990.

11. Nalbant M, Palali A T. Effects of different material coatings on the wearing of plowshares in soil tillage. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 2011; 35: 215-223.
12. Napiórkowski J, Drożyner P, Ligir K, Mikołajczak P. *Badania i modelowanie procesów zużywania ściernego i zmęczeniowego*. Olsztyn: Wydawnictwo UWM, 2014.
13. Napiórkowski J, Pękalski G, Kołakowski K. Badanie struktur i zużywania powłok napawanych w glebowej masie ścierniej. *Tribologia* 2012; 3: 111-118.
14. Pękalska L, Pękalski G. Budowa fazowa i struktury napoin stosowanych w górnictwie węgla brunatnego. *Węgiel Brunatny* 2000; wyd. specjalne: 86-91.
15. Perez M J , Cisneros M M, Lopez H F,; Wear resistance of Cu–Ni–Mo austempered ductile iron. *Wear* 2006; 260: 879–885.
16. Powierża A L. *Elementy inżynierii systemów*. Warszawa: Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 1997.
17. Stanimir A. Wykorzystanie analizy korespondencji w badaniach marketingowych. StatSoft Polska. 2008 [www.statsoft.pl/czytelnia](http://www.statsoft.pl/czytelnia) (dostęp 01.03.2013 r.).
18. Stanisław A. *Przystępny kurs Statystyki w oparciu o program Statistica PL na przykładach z medycyny. Tom 3. Analizy wielowymiarowe*. Kraków: StatSoft, 2007.
19. StatSoft . *Elektroniczny Podręcznik Statystyki PL*, Kraków, 2006. <http://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html>.
20. Stoma M. *Modele i metody pomiaru jakości*. Lublin: Q&R Polska, 2012.
21. Verma A, Gopinatha K, Sarkar S B. Boron Steel: An Alternative for Costlier Nickel and Molybdenum Alloyed Steel for Transmission Gears. *The Journal of Engineering Research* 2011; 8 (1): 12-18.
22. Wang Q, Li X. Effects of Nb, V, and W on microstructure and abrasion resistance of Fe-Cr-C hardfacing alloys. *Welding Journal* 2010; 89: 133–139.