

**Jerzy NAPIÓRKOWSKI\***, **Magdalena LEMECHA\***,  
**Piotr SZCZYGLAK\***

## **ANALIZA ZUŻYWANIA WARSTW WIERZCHNICH W NATURALNYCH WARUNKACH GLEBOWYCH**

### **ANALYSIS OF THE WEAR OF THE SURFACE LAYERS IN NATURAL SOIL CONDITIONS**

#### **Słowa kluczowe:**

zużycie w masie ścierniej, warstwy napawane, węgliki

#### **Key words:**

wear in abrasive mass, welded layers, carbides

#### **Streszczenie**

W pracy przedstawiono badania intensywności zużycia warstw wierzchnich w naturalnych warunkach glebowych. Badaniu poddano próbki wykonane ze stali XAR 600 oraz stali 38 GSA, na powierzchnię skrawającą próbek nałożono napoiny oraz spiekany węgiel wolframu. Przedstawiono wyniki pomiarów twardości oraz składu chemicznego badanych materiałów, a także struktury. Podczas badań dokonano analizy przebiegu zużycia poszczególnych materiałów w funkcji drogi tarcia. Na podstawie wyników uzyskanych z badań eksploata-

---

\* Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie. Katedra Budowy, Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, ul. Michała Oczapowskiego 11, 10-736 Olsztyn, Polska, tel. 089 523-34-63 lub 514-397-795, e-mail: [napij@uwm.edu.pl](mailto:napij@uwm.edu.pl), [magdalena.lemecha@uwm.edu.pl](mailto:magdalena.lemecha@uwm.edu.pl), [szczypio@uwm.edu.pl](mailto:szczypio@uwm.edu.pl).

cyjnych stwierdzono najwyższą odporność na zużycie masowe i zużycie geometryczne mierzone długością oraz szerokością próbek napawanych elektrodami XHD 6710 z zawartością węglików chromu.

## WPROWADZENIE

Intensywne zużywanie w masie glebowej dotyczy elementów roboczych narzędzi i maszyn rolniczych, budowlanych, drogowych oraz górniczych i zaliczane jest najczęściej do zużywania ściernego. Warunki środowiskowe, w tym klimatyczne spowodowały, że gleby odznaczają się swoistymi cechami morfologicznymi oraz właściwościami fizycznymi, chemicznymi i biologicznymi specyficznymi dla danego obszaru. W naturalnych warunkach eksploatacji występuje znaczne zróżnicowanie obrabianych gatunków gleb, a tym samym zmiana w szerokim zakresie warunków przebiegu procesów tribologicznych.

Przebieg i intensywność zużywania elementów roboczych obrabiających masę glebową uzależniona jest przede wszystkim od [L. 1, 2]:

- rozwiązania konstrukcyjno-technologicznego elementu roboczego,
- właściwości obrabianej gleby, między innymi: uziarnienia, wilgotności, zwięzłości i odczynu,
- rodzaju oddziaływania elementu roboczego na glebę.

Dobór materiałów konstrukcyjnych na elementy robocze oraz planowanie przebiegu eksploatacji jest możliwe wtedy, gdy znany jest przebieg wyczerpywania się ich zasobu użytkowego w ustalonym czasie i warunkach. Specyfika systemu tribologicznego uwarunkowana jest wzajemnym przenikaniem charakterystyk funkcjonalnych elementu roboczego, losowości czynnika biologicznego, jakim jest gleba oraz oddziaływaniem wymuszeń procesu roboczego. Badania w naturalnych warunkach eksploatacji uwzględniają przede wszystkim losowość czynników systemotwórczych, które decydują o specyfice ścierania w masie glebowej [L. 3].

Celem pracy jest analiza zużywania materiałów konstrukcyjnych stosowanych na elementy robocze obrabiające glebę w zróżnicowanych warunkach glebowych.

## MATERIAŁY DO BADAŃ

Pośród nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych, które stosuje się na elementy maszyn uprawowych wyróżnia się:

- stale odporne na zużycie ściernie,
- węgliki spiekane,
- wielowarstwowe napoiny na bazie pierwiastków amfoterycznych i metali przejściowych.

Cechą tych materiałów jest wysoka wytrzymałość na udarność i zużycie ściernie, którą można uzyskać po zastosowaniu obróbki cieplnej i odpowiednim doborze składu chemicznego.

Głównym mikrodotądkiem stali odpornych na zużycie ściernie jest bor w ilości 0,002–0,004%. Jest to zakres, w którym bor rozpuszcza się w austenicie, powodując w procesie hartowania możliwość otrzymania struktury bainitu o rozdrobionych ziarnach. Stale te cechują się dużą drobnoziarnistością struktur martenzytycznych uzyskiwaną po obróbce cieplnej, która zwiększa udarność, wytrzymałość i odporność na zużycie ściernie o 20–30%. Uzyskuje się także zwiększoną 2–3-krotnie udarność bainitu w stosunku do martenzytu o tej samej twardości, co jest istotne w przypadku oddziaływania uderzeniowego. Negatywne skutki wpływające na własności materiału powodują przekroczenie zawartości boru powyżej 0,004%. Tworzą się wówczas węgliki boru – borki, które lokują się na krawędzi ziaren stali, generując karby strukturalne, co wpływa na spadek plastyczności i udarności [L. 4, 5].

Najpowszechniejszą formą służącą do zwiększania odporności na zużycie elementów roboczych jest napawanie obszarów podlegających najintensywniejszemu procesowi ściernemu [L. 6, 7]. Do napawania najczęściej stosuje się spoiwa na bazie węgla, chromu i żelaza, uzupełniając je o dodatkowe pierwiastki węglidotwórcze. Warstwy napawane charakteryzują się najkorzystniejszymi właściwościami plastycznymi przy obciążeniach statystycznych i zmianami wytrzymałościowymi na zmęczenie.

Napoiny na bazie pierwiastków Fe i Cr oraz metali przejściowych (V, W, Mn, Nb) to materiały powstające podczas procesu napawania. Dobór materiałów do napawania odbywa się na podstawie składu chemicznego, który ma zapewnić odpowiednie właściwości bez dodatkowej obróbki cieplnej [L. 8].

Węgliki spiekane tworzą spieki twardych węglików metali wysokotopliwych (WC, TiC, TaC, NbC, VC), a także osnowy metalicznej, którą stanowi najczęściej kobalt. Węgliki zaliczane są do kompozytów spiekanych zbrojonych cząstkami z metaliczną osnową [L. 9].

Badaniom poddano próbki ze stali odpornej na zużycie ściernie XAR 600, napoiny uzyskane poprzez nałożenie ich na stal 38 GSA za pomocą elektrod otulonych XHD 6710 i XHD 6715 oraz węglik wolframu. Skład chemiczny stali 38 GSA przedstawiono w **Tabeli 1**.

**Tabela 1. Skład chemiczny stali 38 GSA**

Table 1. The chemical composition of the steel 38 GSA

Rodzaj materiału	Zawartość pierwiastków w%						
	C	Mn	Si	P	Cr	Cu	Al
38 GSA	0,38	1,07	1,17	0,028	0,18	0,16	0,022

Płytki z węgliku wolframu ze stalą 38 GSA połączone za pomocą lutowania. Skład chemiczny warstw wierzchnich przedstawiono w **Tabeli 2**.

**Tabela 2. Skład chemiczny warstw wierzchnich**

Table 2. Chemical composition of welded layers

Rodzaj materiału	Zawartość pierwiastków w%									
	C	Mn	Si	Cr	B	W	Nb	WC	Co	Mo
XAR 600	0,4	1,5	0,8	1,50	0,003	-	-	-	-	0,50
XHD 6710	1,15	13,2	0,56	45,0	1,0	-	-	-	-	-
XHD 6715	5,0	-	-	21,0	-	6,0	7,0	-	-	8,50
G10	-	-	-	-	-	-	-	94,0	6,0	-

## METODYKA BADAŃ

Badania przeprowadzono w naturalnych warunkach eksploatacji, na ściernisku, w glinie piaszczystej o uziarnieniu zgodnie z PN-EN ISO 14668-2, il – 13,6%, pył – 14,6%, piasek – 69,2% oraz żwir – 2,5%. Średnia prędkość robocza: 2 m/s, wilgotność gleby 14÷16,5%, PH – 6,7 oraz średnia głębokość skrawania ok. 100 mm.

Wilgotność gleby badano stosując sondę ThetaProbe typu ML2. Zwięzłość gleby oceniano z użyciem zwięzłościomierza poprzez wciskanie w glebę standaryzowanego stożka osadzonego na wgłębniku urządzenia. Pomiaru odczynu gleby dokonano Pehametrem ExStik™ PH-100.

Próbkę stanowił prostopadłościan o wymiarach 38 x 35 x 10 mm (**Rys. 2** i **3**). Ocenie poddano pięć próbek każdego rodzaju. Próbkę umieszczono w specjalnie przygotowanych uchwytach, które zamocowano w zębach kultywatora (**Rys. 4**).

Zużycie jednostkowe wyznaczono na podstawie wzoru:

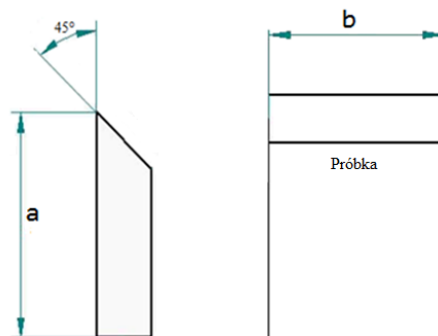
$$Z_j = \frac{Z_w}{s * P} [g/km * cm^2] \quad (1)$$

gdzie:  $Z_w$  – zużycie masowe [g],

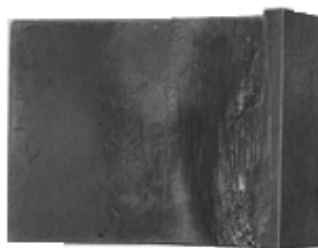
$s$  – droga tarcia [km],

$P$  – pole powierzchni badanej próbki [cm<sup>2</sup>].

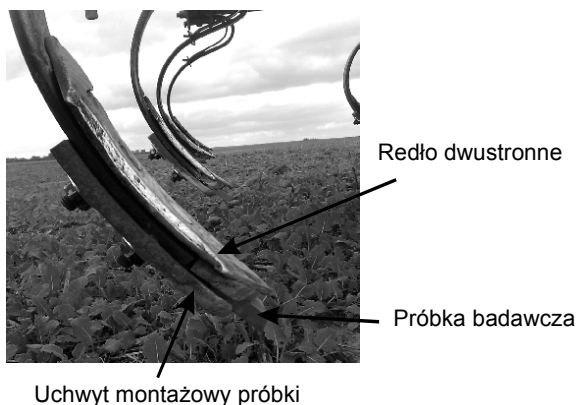
Zużycie geometryczne wyznaczono na podstawie pomiaru maksymalnych wartości szerokości i długości próbek.



**Rys. 2. Pomiarowe wielkości zużycia próbek; a – długość, b – szerokość**  
 Fig. 2. Measuring the size of sample consumption; a – length, b – width



**Rys. 3. Próbka z węglikiem wolframu przed badaniami**  
 Fig. 3. The sample with tungsten carbide before the test



**Rys. 4. Sposób montażu próbki badawczej przed badaniami polowymi**  
 Fig. 4. Installation of the sample before the test

Do pomiaru głębokości skrawania próbek wykorzystano ultradźwiękowy czujnik US7-M18-AVC-630, natomiast współrzędne geograficzne były gene-

rowane przez moduł GPS. Szerokość robocza stanowiska – 2,7 m, liczba badanych jednocześnie próbek – 9. Podczas badań rejestrowane były z częstotliwością 1 Hz parametry przedstawione na **Rysunku 5**.

DATA	12-07-14	CZAS	14:42:58
POLOZENIE GEOGRAF.	53 st 42.3495' N 020 st 02.2480' E		
PREDKOSC	2,05 [km/h]		
KAT RUCHU	16.93 [st.]		
GLEBOKOSC	9,7 [mm]		
STAN	MONITOROWANIE (2)		
INFO	SD-OK:501216 KB		1-8-1.05

**Rys. 5. Widok wyświetlacza w czasie monitorowania parametrów roboczych:**  
 1 – pole „Data”, 2 – pole „Czas”, 3 – pole „Polożenie geograficzne”, 4 – pole „Prędkość”, 5 – pole „Kąt ruchu”, 6 – pole „Zagłębienie próbki”, 7 – pole „Stan pracy”, 8 – pole „Jakość pomiaru danych z GPS”, 9 – pole „Obsługi karty SD/MMC”

Fig. 5. The view of the display while monitoring the operating parameters: 1 – field “Date”, 2 – field “Time”, 3 – the “Location”, 4 – field “Speed”, 5 – the “angle of movement”, 6 – the “recess samples”, 7 – the “Status work”, 8 – the “quality of the measurement data from the GPS”, 9 – the “Support SD / MMC card”

Oceny zmian geometrii oraz ubytku masy próbki dokonywano po każdorazowym przebyciu przez nią 1 500 [m]. Całkowita droga przebyta przez próbkę to 7500 [m]. Masę wyznaczono na wadze technicznej z dokładnością  $\pm 0,1$  g. Pomiar długości, grubości oraz szerokości wykonano za pomocą suwmiarki z dokładnością  $\pm 0,02$  mm.

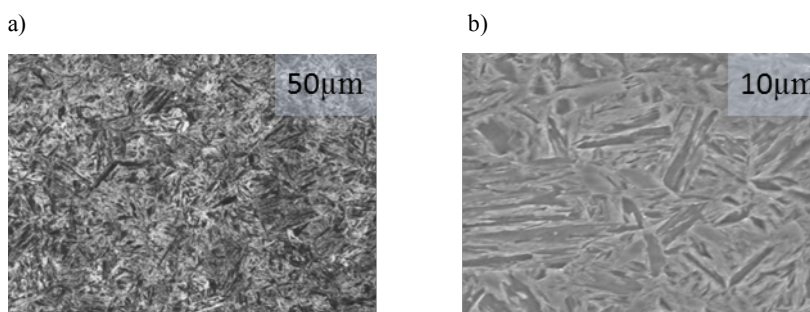
Pomiaru twardości oraz ocenę metalograficzną struktury warstw wierzchnich dokonano z wykorzystaniem:

- twardościomierza Vickersa typu HM010u zgodnie z PN-EN ISO 6507-1:1999, stosując obciążenie węgelnika 98 N, czas działania obciążenia 10 s,
- mikroskopu Neophot 52 sprzężonego z kamerą cyfrową Visitron Systems,
- mikroskopu skaningowego JEOL JSM – 5800 LV sprzężonego z mikroanalizatorem promieniowania rentgenowskiego Oxford LINK ISIS – 300.

## WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

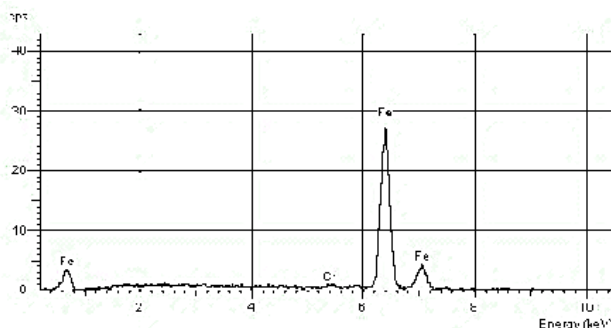
Na podstawie przeprowadzonych badań metalograficznych zidentyfikowano następujące struktury badanych materiałów:

- XAR 600 – mikrostruktura martenzytu odpuszczonego – **Rys. 6**. Widmo energetyczne promieniowania rentgenowskiego przedstawiono na **Rys. 7**.
- XHD 6710 – duże, pierwotne wydzielenia węglików chromu na tle mieszaniny ferryt stopowy + węgliki – **Rys. 8**. Widmo energetyczne promieniowania rentgenowskiego przedstawiono na **Rys. 9**.
- XHD 6715 – duże wydzielenia węglików chromu na tle mieszaniny ferryt stopowy + węgliki niobu. Widoczne także niewielkie obszary ledeburytu – **Rys. 10**. Widmo energetyczne promieniowania rentgenowskiego przedstawiono na **Rys. 11**.
- G10 –  $\alpha$  – węgiel wolframu WC pierwotny, o wielkości ziarna 0,001–0,002 mm,  $\alpha 1$  – roztwór stały kobaltu w węgliku wolframu WC pierwotnym, który nie uległ rekrytalizacji podczas spiekania,  $\alpha 2$  – węgiel wolframu WC wtórny, o wielkości ziarna 0,004 – 0,006 mm, który uległ rekrytalizacji podczas spiekania,  $\gamma$  – roztwór stały wolframu, tantalu i węgla w kobaltcie – **Rys. 12**.



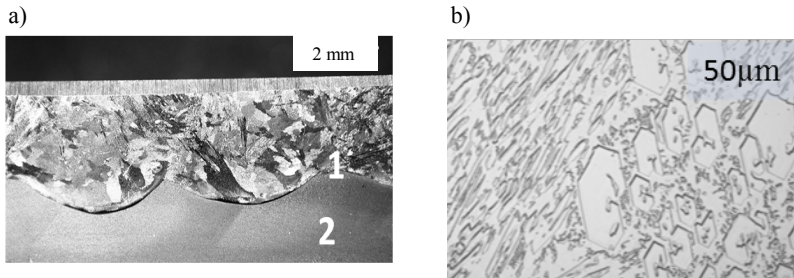
**Rys. 6. XAR 600; mikrostruktura martenzytu odpuszczonego: a) mikroskopia świetlna, b) mikroskopia SEM**

Fig. 6. XAR 600; Microstructure of martensite: a) light microscopy, b) SEM microscopy



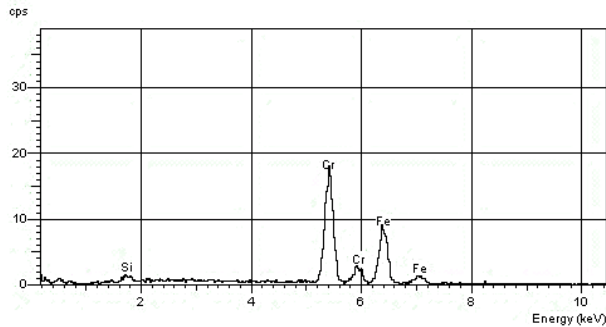
**Rys. 7. Widmo energetyczne promieniowania rentgenowskiego; mikroskop skaningowy JEOL JSM – 5800 LV**

Fig. 7. Energy spectrum of roentgen radiation; scanning tunneling microscope JEOL JSM-5800 LV



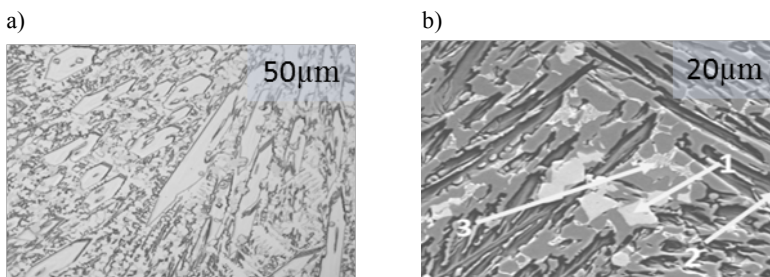
**Rys. 8. Mikrostruktura warstwy napawanej XHD 6710: a) makroskopowy obraz napoiny (1) i podkładki (2); mikroskopia świetlna, b) duże wydzielenia pierwotnych węglików chromu; mikroskopia świetlna**

**Fig. 8. Microstructure of XHD 6710 welded layers: a) macroscopic image of the weld (1) and supports (2); light microscopy, b) large primary chromium carbides; light microscopy**



**Rys. 9. Widmo energetyczne promieniowania rentgenowskiego; mikroskop skaningowy JEOL JSM – 5800 LV**

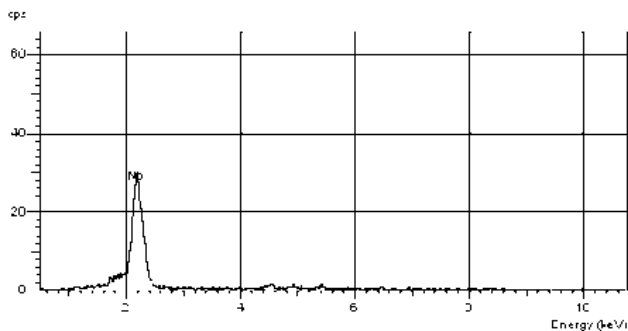
**Fig. 9. Energy spectrum of roentgen radiation; scanning tunnelling microscope JEOL JSM-5800 LV**



**Rys. 10. Mikrostruktura napoiny XHD 6715: a) węgliki niobu, węgliki chromu; mikroskopia świetlna; b) duże wydzielenia pierwotnych węglików chromu (2) oraz węglików niobu (1). Widoczne niewielkie obszary ledeburytu (3), mikroskopia SEM**

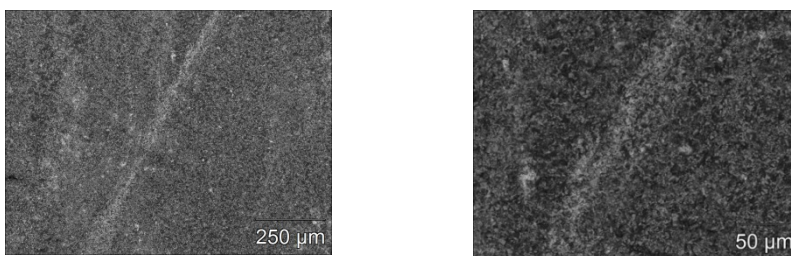
**Fig. 10. XHD 6715 weld layer microstructure: a) niobium carbides, chromium carbides; light microscopy; b) large primary chromium carbides (2), in ferrite groundwork and niobium carbides (1). Visible small areas of ledeburite, SEM microscopy**





**Rys. 11. Widmo energetyczne promieniowania rentgenowskiego; mikroskop skaningowy JEOL JSM – 5800 LV**

Fig. 11. Energy spectrum of roentgen radiation; scanning tunneling microscope JEOL JSM-5800 LV



**Rys. 12. Powierzchnia węgla G10 zużywanego w glebie średniej**

Fig. 12. G10 cemented carbide surface worn in medium soil

Największą twardość warstwy wierzchniej odnotowano dla węgla G10 (1430 HV10), kolejno XHD 6715 (820 HV10), XHD 6710 (795 HV10) oraz XAR 600 (627,2 HV10).

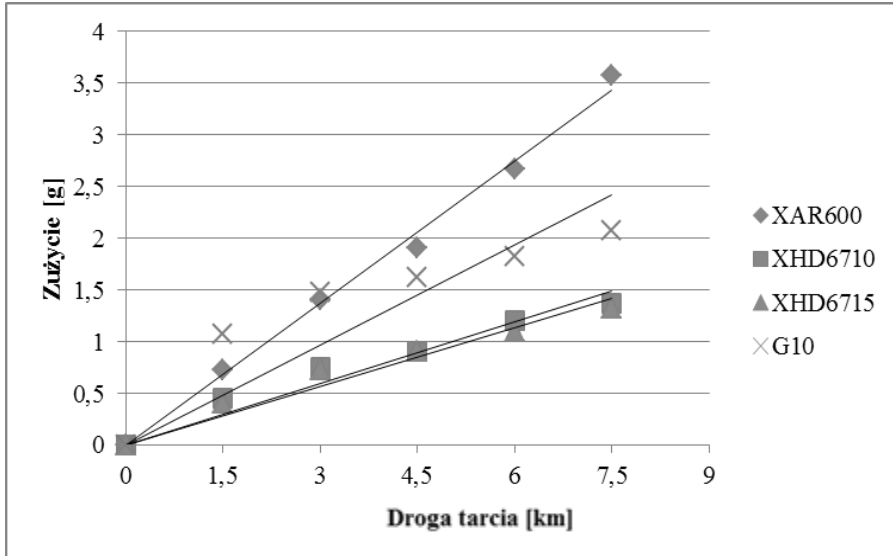
Uzyskane wyniki z badania próbek wartości zużycia wagowego i geometrycznego w funkcji drogi tarcia przedstawiono na **Rys. 13÷15**.

Największe wartości zużycia masowego zaobserwowano dla stali XAR 600 i było ono 2,7 razy większe od zużycia napoiny o najmniejszym zużyciu XHD 6715.

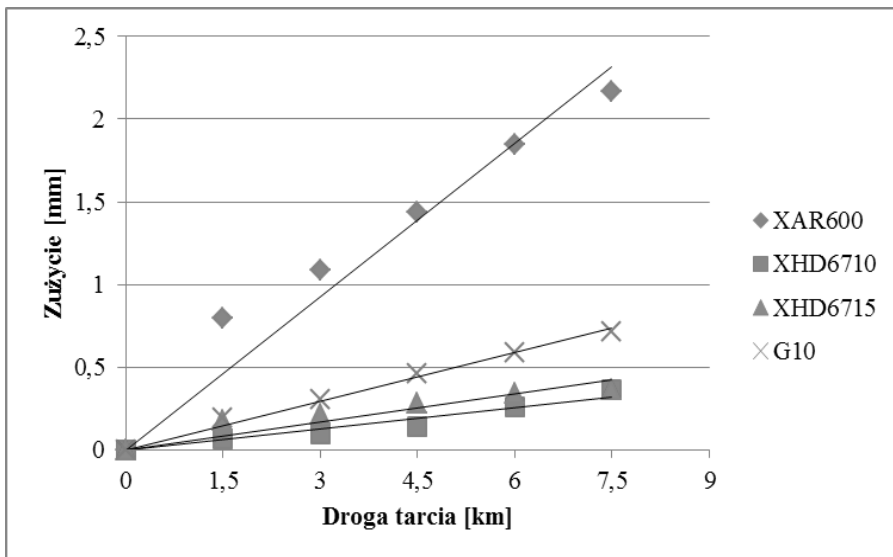
Najmniejsze zmiany geometrii próbek odnotowano dla napoiny XHD 6710. Jej długość zmniejszała się 6-krotnie wolniej od stali XAR 600, zaś szerokość aż 3-krotnie w stosunku do szerokości węgla G10.

Celem określenia statystycznej istotności stwierdzonych zależności zużycia warstw wierzchnich przeprowadzono analizę wariancji zużycia jednostkowego (**Tab. 3**). Dla każdego rodzaju gleby przyjęto hipotezę zerową o braku istotnych różnic pomiędzy wartościami zużycia po drodze tarcia 7,5 km i hipotezę alternatywną o występowaniu istotnych różnic. W sytuacji, gdy hipotezę

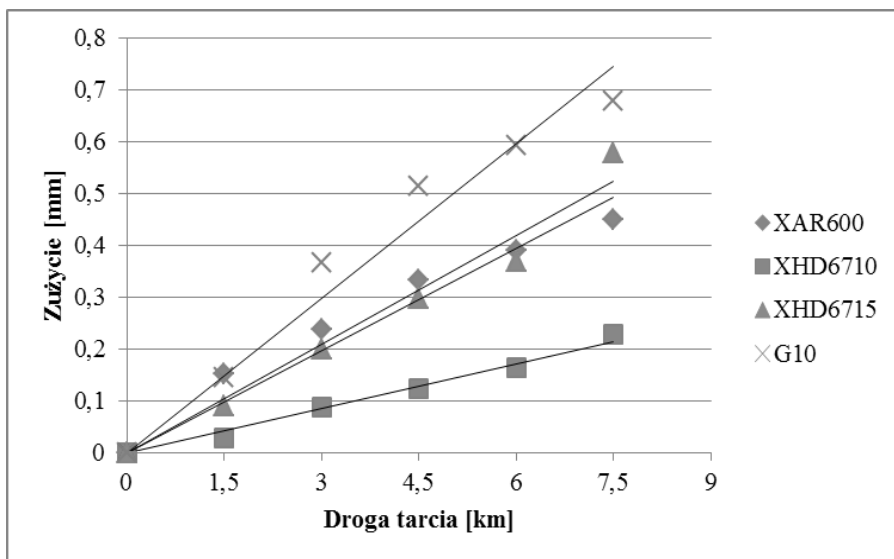
zerową odrzucano na korzyść alternatywnej, stosowano test Duncana w celu wyróżnienia grup jednorodnych.



Rys. 13. Przebieg zużycia masowego próbek stali, napoin i węglkawolframu  
Fig. 13. Mass wear of samples of steel, weld and tungsten carbide



Rys. 14. Przebieg ubytku długości próbek stali, napoin i węgliku wolframu  
Fig. 14. Geometric wear (length) of samples of steel, weld and tungsten carbide



**Rys. 15. Przebieg zmian szerokości próbek stali, napoin i węgla wolframu**

Fig. 15. Geometric wear (width) of samples of steel, weld and tungsten carbide

**Tabela 3. Wyniki analizy wariancji**

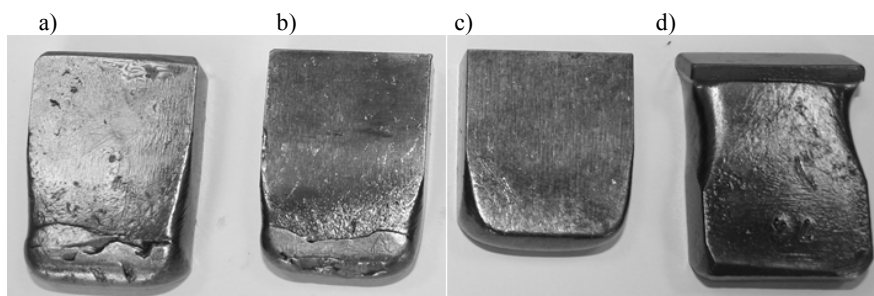
Table 3. Variation analysis results

Zużycie	Wyniki analizy wariancji	Grupy jednorodne	Wartość zużycia
Masowe [g/km]	H0 należy odrzucić na korzyść H1	1. XAR 600 G10	1,835
		2. XHD 6710 XHD 6715	0,915
Geometryczne po długości [mm/km]	H0 należy odrzucić na korzyść H1	1. XAR 600	1,470
		2. XHD 6710 XHD 6715 G10	0,303
Geometryczne po szerokości [mm/km]	H0 należy odrzucić na korzyść H1	1. XAR 600 XHD 6715 G10	0,360
		2. XHD 6710	0,130

Na podstawie analizy statystycznej można potwierdzić, iż materiałami, które były najbardziej odporne zarówno na zużycie masowe, jak i geometryczne

są napoiny XHD 6710 i XHD 6715. Uzasadnienia stwierdzonych zależności należy upatrywać w sposobie zużywania próbek charakteryzujących się twardą warstwą wierzchnią materiału, np. węglika (G10). W przypadku próbek z zawartością węglika G10 zużycie masowe nie różniło się istotnie od zużycia stali XAR 600 i było znacznie wyższe od zużycia napoin XHD 6710 i XHD 6715. W przypadku zużycia na geometrii stwierdzono zużycie na jednym poziomie próbek z zawartością węglika i bez.

Próbki z warstwą wierzchnią z węglika wolframu najintensywniej zużywały się na szerokości tuż za warstwą wierzchnią (**Rys. 16**). Te same zależności można zauważyć dla pozostałych warstw z zawartością węglików. Ubytek ich szerokości charakteryzował się jednak mniejszą intensywnością. Podczas skrawania gleby następowało wyłabianie materiału rodzimego tuż za twardą warstwą wierzchnią. Próbki ze stali XAR 600 zużywały się stopniowo na grubości i szerokości w miarę zwiększania drogi skrawania.



**Rys. 16.** Widok wybranych próbek z każdej grupy po badaniu: a) XHD 6710, b) XHD 6715, c) XAR 600, d) G10

Fig. 16. Samples of each group after the test: a) XHD 6710, b) XHD 6715, c) XAR 600, d) G10

## WNIOSKI

1. O intensywności zużywania elementów roboczych w naturalnej masie glebowej decydują właściwości całego elementu roboczego nie zaś tylko warstwy wierzchniej. W przypadku miękkiego podłoża występuje zużywanie warstw podpowierzchniowych poprzez wyłabianie materiału wokół twardych węglików, co powoduje duże ubytki masowe i zmiany geometrii elementu.
2. Przydatność do zastosowań praktycznych wykazały materiały napawane. Ze względu na znaczną zawartość drobnych węglików najmniejsze zużycie pod względem masowym, jak i geometrycznym stwierdzono dla napoiny XHD 6710.
3. W procesie obrabiania gleby w warunkach trójosiowego stanu naprężeń dla warstw zawierających węgliki niobu i wolframu stwierdzono znaczne ubytki szerokości materiału. W przypadku napoiny XHD 6715 zmiany te dotyczyły warstwy wierzchniej, zaś dla węglika spiekanego G10 warstw bezpośrednio za warstwą wierzchnią.

## LITERATURA

1. Napiórkowski J., Kołakowski K., Pergoł A.: Ocena zużycia nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych stosowanych na narzędzia obrabiające glebę. *Inżynieria Rolnicza* 5 (130)/2011.
2. Łąbecki M. i inni: Badania tribologiczne, wytrzymałościowe i strukturalne wybranych materiałów stosowanych na elementy maszyn rolniczych pracujących w glebie. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, Vol. 52, 2007, s. 43–51.
3. Napiórkowski J.: Badanie i modelowanie procesów zużywania ściernego i zmęczeniowego. Wydawnictwo UWM, Olsztyn 2014.
4. Dushynat Singh, Mondal D.P., Modi O.P., Sethi V.K.: Low stress abrasive wear response of boron steel under three body abrasion: Effect of heat treatment and peening intensities. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*. Vol. 17, 2010, s. 208–218.
5. Łętkowska B., Dudziński W., Frydman S.: Zużywanie ściernie wybranych gatunków niskowęglowych stali z borem w różnych stanach obróbki cieplnej. *Tribologia* 2012, nr 4, s. 151–166.
6. Kostencki P., Łętkowska B., Nowowiejski R.: Polowe badania odporności na zużycie ściernie lemieszki płuznych wykonanych ze stali z dodatkiem boru. *Tribologia* 3/2013.
7. Lubas J.: Tribological properties of surface layer with boron. *Tribology* 1 (157) 2009.
8. Gierek A.: Zużycie tribologiczne. Gliwice 2005.
9. Napiórkowski J., Kołakowski K., Pergoł A.: Ocena zużycia nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych stosowanych na narzędzia obrabiające glebę. *Inżynieria Rolnicza* 5 (130)/2011.

## Summary

**The following paper presents research on the wear intensity of the surface layers in natural soil conditions. The study was conducted with the steel type XAR 600 and 38 GSA on the cutting surface where welds of cemented tungsten carbides had been applied. The results of the measurements of hardness and the chemical composition of the tested materials as well as their structure are presented. During the study, the processes of the wear of specific materials in their friction were analysed. Based on the results obtained from the field tests, we may observe an increase of the resistance to the mass wear and geometrical wear that can be seen on the length and width of samples that have been welded with XHD 6710 electrodes that additionally contain chromium carbides.**