

Jerzy NAPIÓRKOWSKI*, Magdalena LEMECHA*, Krzysztof LIGIER*

ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNYCH NAPOIN Z ZAWARTOŚCIĄ NIOBU W GLEBOWEJ MASIE ŚCIERNEJ

THE ANALYSIS OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF NIOBIUM
WELDED IN THE ABRASIVE SOIL MASS

Słowa kluczowe

warstwy napawane, zużycie w masie ścierniej, niob

Key words

welded layers, wear in abrasive mass, niobium

Streszczenie

W pracy przedstawiono badania intensywności zużycia warstw napawanych w zróżnicowanych warunkach glebowych. Badaniu poddano próbki wykonane ze stali 38GSA, na powierzchnię której nałożono napoiny. Określono właściwości tribologiczne materiałów – twardość, skład chemiczny i strukturę. Badania przeprowadzono w trzech rodzajach glebowej masy ścierniej. Analiza wartości zużycia wskazuje, że napoina zawierająca obok węglików chromu i niobu,

* Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Katedra Budowy, Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, ul. M. Oczapowskiego 11, 10-736 Olsztyn, Polska, e-mail: napj@uwm.edu.pl, magdalena.lemecha@uwm.edu.pl, klig@uwm.edu.pl.

także węgliki molibdenu i wanadu okazała się najbardziej odporna na zużycie we wszystkich badanych masach ściernych. Stosowanie w warstwach wierzchnich Fe-Cr-C samego niobu nie zapewnia wysokiej odporności na zużycie w głębokiej masie ścierniej ze względu na wykruszanie twardych węglików niobu ze stosunkowo miękkiej osnowy.

WPROWADZENIE

Procesem, który ma miejsce podczas eksploatacji elementów skrawających masę głęboką jest intensywne zużywanie ściernie [L. 1]. Zachodzi ono pod wpływem uderzeń luźnych cząstek ściernych o powierzchnię materiału, powodując zmęczenie i dekohezję, natomiast w przypadku zwartej masy ścierniej występują ubytki materiału w sposób charakterystyczny dla zużycia ściernego [L. 2].

Poprawnie ukształtowana warstwa wierzchnia powinna zapewniać optymalne właściwości tribologiczne w danej masie ścierniej, które określone są przez jej właściwości fizykochemiczne [L. 3]. Powszechnie stosowaną metodą poprawiającą właściwości warstwy wierzchniej materiałów narażonych na zużycie ściernie jest równomierne osadzanie na powierzchni materiału stopu poprzez napawanie różnymi technikami [L. 4, 5]. Na właściwości tribologiczne warstwy napawanej wpływa nie tyle technologia nałożenia, co jej skład chemiczny [L. 6]. Na kształtowanie mikrostruktury warstwy wierzchniej duży wpływ mają pierwiastki sprzyjające tworzeniu węglików, wśród nich przede wszystkim niob, tytan i wanad [L. 7, 8].

Dotychczas nie zweryfikowano przydatności niobu w kształtowaniu właściwości warstw wierzchnich w aspekcie zużywania w głębokiej masie ścierniej. Niob używany jest przede wszystkim w produkcji wytrzymałych stali niskostopowych w postaci żelazostopu. Może być również stosowany jako węgiel NbC w węglkach spiekanych. Stopy niobu z tytanem, cyrkonem, wolframem, borem i molibdenem (Ti, Zr, W, B, Mo) znajdują zastosowanie do wytwarzania narzędzi użytkowanych w warunkach korozyjno-ściernych [L. 9]. Wpływają one na umacnianie powierzchni tych stopów poprzez oddziaływanie z C, O₂ i N₂. Węgliki niobu (NbC) stanowiące warstwę wierzchnią stopowych stali narzędziowych przyczyniają się do polepszenia własności materiału poprzez udoskonalenie parametrów mechanicznych, zwiększenie odporności na ścieranie i zmęczenie cieplne [L. 10].

Materiały z zawartością niobu są bardziej odporne na zużycie ściernie poprzez tworzenie się twardych pierwotnych węglików niobu.

Biorąc pod uwagę przeprowadzoną analizę zagadnienia, można przypuszczać, że zawartość niobu w napoinie powinna poprawić odporność warstwy wierzchniej narzędzia na zużycie w warunkach głębokich.

Celem pracy jest analiza zużywania warstw wierzchnich z zawartością niobu w zróżnicowanej głębokiej masie ścierniej.

MATERIAŁY DO BADAŃ

Badaniom poddano napoiny uzyskane poprzez nałożenie ich na stal 38 GSA. Skład chemiczny stali przedstawiał się następująco: C – 0,38%, Mn – 1,07%, Si – 1,17%, P – 0,028%, Cr – 0,18%, Cu – 0,16%, Al – 0,022%. Napoiny nakładano na stal 38GSA hartowaną na wskroś. Materiał podkładki ma strukturę martenzytu z bainitem i troostytem (**Rys. 1**). Zmierzona twardość materiału podłoża wynosiła 414HV10.



Rys. 1. Stal 38GSA – mikrostruktura martenzytu odpuszczania z bainitem oraz niewielkim udziałem troostytu

Fig. 1. 38GSA Steel – microstructure of martensite, bainite and a small contents of troostyt

Na powierzchnię stali nałożono materiały dodatkowe zawierające C+Cr+Mo+W+V+Nb z wykorzystaniem elektrod otulonych El-Hard 61, El-Hard 65, XHD 6715 (**Tab.1**).

Tabela 1. Skład chemiczny warstw wierzchnich

Table 1. Chemical composition of welded layers

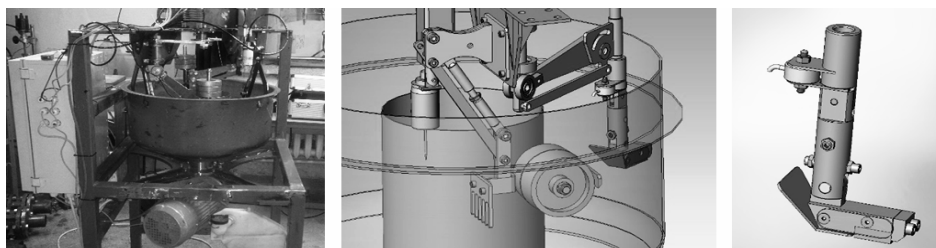
Rodzaj materiału	Zawartość pierwiastków w %					
	C	Cr	Mo	W	V	Nb
Elektroda otulona El-Hard 61	5,2	29,0	0,71	–	–	7,0
Elektroda otulona El-Hard 65	4,5	34,0	6,0	2,0	1,0	6,0
Elektroda otulona XHD 6715	5,0	21,0	8,50	6,0	1,9	7,0

METODYKA BADAŃ

Badania wykonano w warunkach laboratoryjnych metodą „wirującej misy” (**Rys. 2**). Badaniu odporności na zużywanie poddano wcześniej oczyszczone próbki prostopadłościowe o wymiarach 30 × 25 × 10 mm. Misę maszyny wypełniono naturalną glebową masą ścierną odpowiadającą glebie suchej, zgodnie

z klasyfikacją Polskiego Towarzystwa Gleboznawczego z 2008 roku, o następującym składzie granulometrycznym (PN- EN ISO 14668-2(2004)):

- gleba lekka: ił: 1,69%; pył: 20,83%; piasek: 77,48%,
- gleba średnia: ił: 7,02%; pył: 40,32%; piasek: 52,66%,
- gleba ciężka: ił: 16,5%; pył: 49,92%; piasek: 33,62%.



Rys. 2. Widok ogólny stanowiska oraz widok jednej sekcji badawczej i uchwytu próbki
Fig. 2. General view of test-stand and sample handle

Podczas badań przyjęto następujące parametry tarcia: prędkość 1,40 m/s, droga tarcia 10 000 m, nacisk jednostkowy 67 kPa. Wilgotność gleby zawierała się w granicach od 10% dla gleby lekkiej do 15% dla gliny ciężkiej, co odpowiada glebie wilgotnej. Odczyn mas ściernych zawierał się w przedziale od 6,3 do 6,9. Pomiaru zużycia dokonywano co 2000 m. Zużycie jednostkowe wyznaczono na podstawie wzoru:

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

gdzie: Z_w – zużycie masowe [g], s – droga tarcia [km], P – pole powierzchni badanej próbki [cm^2];

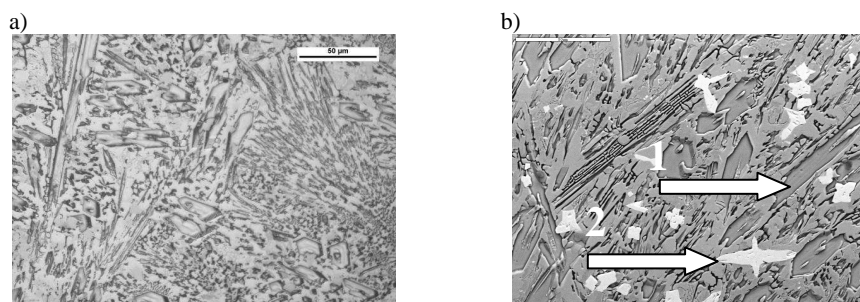
Pomiaru twardości oraz ocenę metalograficzną struktury warstw wierzchnich dokonano z wykorzystaniem:

- twardościomierza Vickersa typu HM010u zgodnie z PN-EN ISO 6507-1:1999; Zastosowano obciążenie węgelnika 98N, czas obciążenia 10s;
- metod mikroskopii świetlnej za pomocą mikroskopu Neophot 52 sprzężonego z kamerą cyfrową Visitron Systems;
- metod elektronowej mikroskopii skaningowej oraz mikroanalizy składu chemicznego za pomocą mikroskopu skaningowego JEOL JSM – 5800 LV sprzężonego z mikroanalizatorem promieniowania rentgenowskiego Oxford LINK ISIS – 300.

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

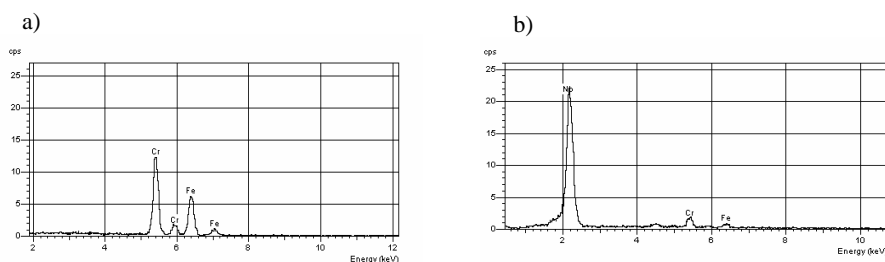
Na podstawie przeprowadzonych badań zidentyfikowano następujące struktury badanych warstw:

- El-Hard 61 – ferryt stopowy przechodzący w strukturę warstwy składającej się fazowo z ferrytu stopowego i węglików (budowa ledeburytyczna) (**Rys. 3a**). W mikrostrukturze warstwy napawanej zidentyfikowano wydzielienia węglików chromu i niobu (**Rys. 3b**). Widmo energetyczne promieniowania rentgenowskiego przedstawiono na **Rys. 4**.
- El-Hard 65 – w osnowie ferrytu stopowego widoczne pierwotne wydzielienia dużych węglików chromu (typu M7C3), innych drobnych węglików (**Rys. 5a**) oraz węglików niobu (**Rys. 5b**). Widmo energetyczne promieniowania rentgenowskiego przedstawiono na **Rys. 6**.
- XHD 6715 – w osnowie ferrytu stopowego duże wydzielienia pierwotnych węglików chromu (**Rys. 7a**) oraz inne rodzaje węglików (Mo, Nb, W). Widoczne także niewielkie obszary ledeburytu (**Rys. 7b**). Widmo energetyczne promieniowania rentgenowskiego przedstawiono na **Rys. 8**.



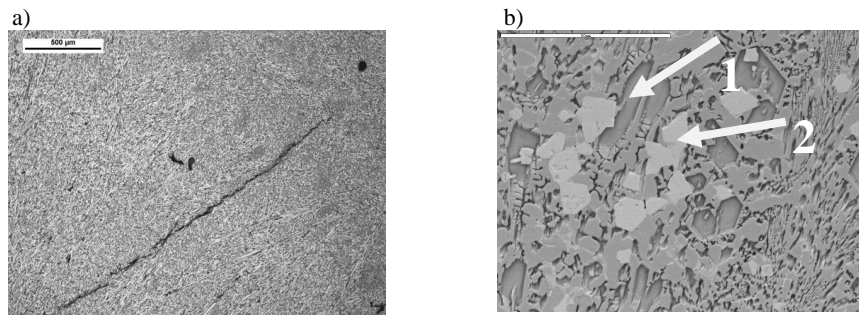
Rys. 3. Mikrostruktura warstwy napawanej El-Hard 61: a) mikroskopia świetlna, b) wydzielienia węglików chromu (1 – szare) i niobu (2 – białe), mikroskopia SEM

Fig. 3. Microstructure of El-Hard 61 welded layer: a) light microscopy, b) chromium carbide (1-grey) and niobium chromium (2-white) exuded



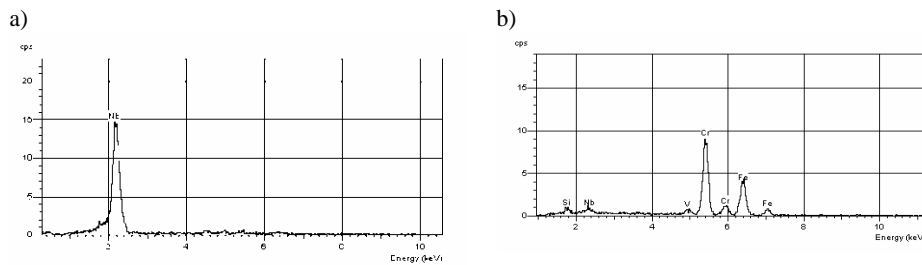
Rys. 4. Widmo energetyczne promieniowania rentgenowskiego: a) obszar węglika chromu, b) obszar węglika niobu

Fig. 4. Energy spectrum of roentgen radiation: a) chromium carbide area, b) niobium carbide area



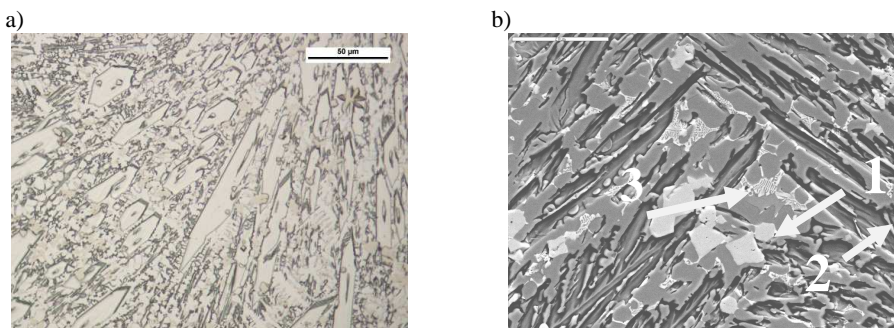
Rys. 5. Mikrostruktura napoiny El-Hard 65: a) mikroskopia świetlna, b) mieszanina ferrytu stopowego i węglków M7C3 – [Fe,Cr7C3] (1) oraz węglków niobu (2), mikroskopia SEM

Fig. 5. El-Hard 65 welded layer microstructure: a) light microscopy, b) mixture of ferrite and M7C3 – [Fe,Cr7C3] carbides (1) and niobium carbides (2), SEM microscopy



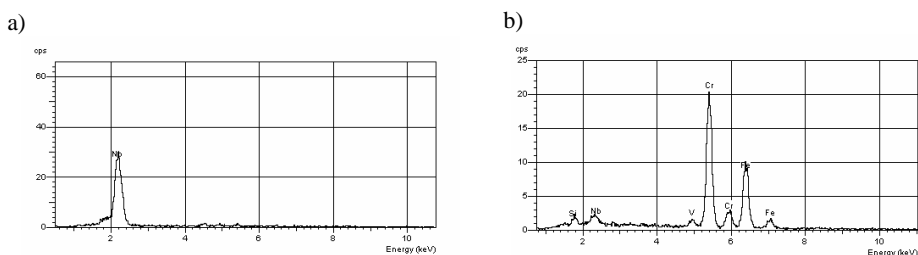
Rys. 6. Widmo energetyczne promieniowania rentgenowskiego: a) obszar węglka niobu, b) obszar wydzielenia węglka pierwotnego

Fig. 6. Energy spectrum of roentgen radiation: a) niobium carbide area, b) primary carbide area



Rys. 7. Mikrostruktura napoiny XHD 6715: a) mikroskopia świetlna 1 – węglki niobu, 2 – węglki chromu, b) duże wydzielenia pierwotnych węglków chromu (2), w osnowie ferrytu stopowego oraz węglkami niobu (1). Widoczne także niewielkie obszary ledeburytu (3), SEM

Fig. 7. XHD 6715 welded layer microstructure: a) light microscopy 1 – niobium carbides, 2 – chromium carbides, b) large primary chromium carbides (2), in ferrite groundwork and niobium carbides (1). Visible small areas of ledeburite (3), SEM microscopy



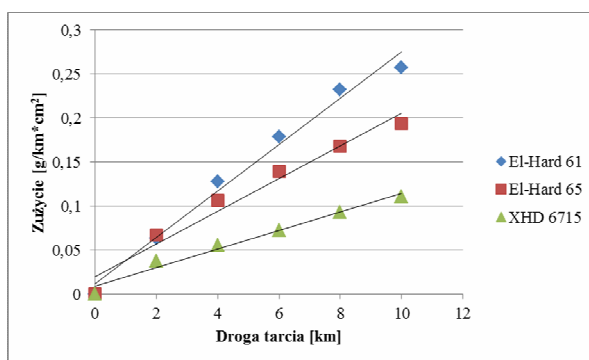
Rys. 8. Widmo energetyczne promieniowania rentgenowskiego: a) obszar węglika niobu, b) obszar węglika chromu

Fig. 8. Energy spectrum of roentgen radiation: a) niobium carbide area, b) chromium carbide area

Najwyższą twardość warstwy wierzchniej stwierdzono dla napoiny XHD 6715 (820 HV10), następnie EL-Hard 65 (682 HV10) oraz EL-Hard 61 (632 HV10).

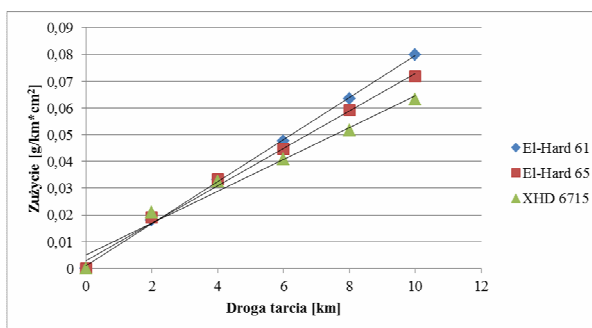
Wyniki badania wartości zużycia wagowego badanych materiałów w funkcji drogi tarcia dla poszczególnych rodzajach masy glebowej przedstawiono na **Rys. 9-11**.

Największe wartości zużycia zaobserwowano dla gleby lekkiej (**Rys. 12**). Jest to wynikiem przede wszystkim oddziaływania dużej zawartości twardych, a zarazem o nieregularnym kształcie frakcji piasku. W glebie tej dominują mechaniczne procesy zużywania poprzez bruzdowanie i rysowanie (**Rys. 13**). Natomiast dla gleby ciężkiej i średniej wartości zużycia były porównywalne. Na powierzchniach zużytych materiałów widoczne są nieliczne zarysowania oraz lokalne wyrwania świadczące o oddziaływaniu zmęczeniowym cząstek ściernych masy glebowej. Najmniejsze różnice intensywności zużycia badanych materiałów zaobserwowano dla gleby średniej, gdzie występuje największe zróżnicowanie jej uziarnienia. Przebieg zużywania uzależniony jest od losowego ukształtowania się powierzchni tarcia. W pozostałych masach glebowych najmniejszym zużyciem charakteryzowała się napoina XHD 6715. Dla gleby lekkiej napoina ta wykazała zużycie 2,5-krotnie mniejsze od napoiny El-Hard 61 i dwukrotnie mniejsze od napoiny El-Hard 65. Dla gleby ciężkiej różnice w zużyciu XHD 6715 były odpowiednio 2,4 razy mniejsze od El-Hard 61 i 1,6 razy od El-Hard 65 (**Rys. 9 i 11**).



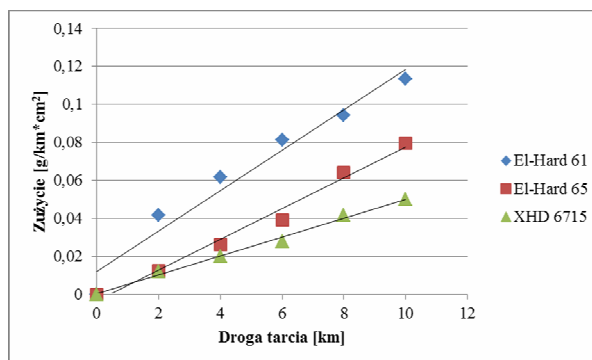
Rys. 9. Przebieg zużycia w glebie lekkiej

Fig. 9. Wear course in light soil



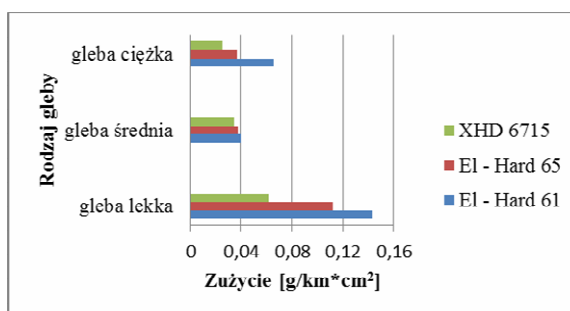
Rys. 10. Przebieg zużycia w glebie średniej

Fig. 10. Wear course in medium soil



Rys. 11. Przebieg zużycia w glebie ciężkiej

Fig. 11. Wear course in heavy soil



Rys. 12. Zestawienie wartości zużycia jednostkowego w poszczególnych rodzajach gleb

Fig. 12. Wear values comparison of investigated materials

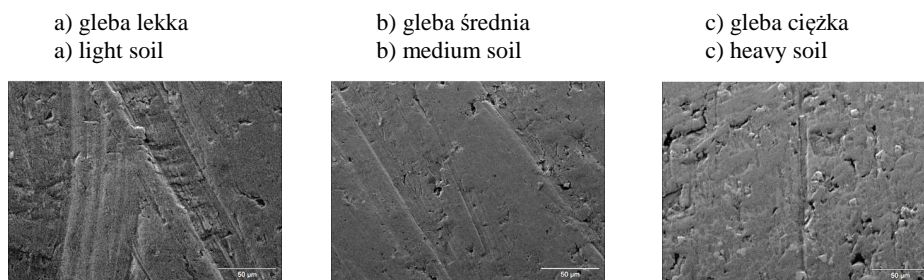
W celu określenia wpływu istotności zużycia badanych warstw zastosowano analizę wariancji (**Tab. 2**). Dla każdego rodzaju gleby przyjęto hipotezę zerową o braku różnic pomiędzy wartościami zużycia po drodze tarcia 10 000 m i hipotezę alternatywną H1 o występowaniu istotnych różnic w zużyciu. W przypadku, gdy hipotezę zerową odrzucano na korzyść alternatywnej, stosowano test Duncana dla wyróżnienia grup jednorodnych.

Wyniki uzyskane z analizy potwierdzają zauważone zależności, że napoina zawierająca obok węglików chromu i niobu także węgliki molibdenu i wanadu okazała się najbardziej odporna na zużycie we wszystkich badanych masach ściernych. Dla gleby średniej różnice wartości zużycia nie były istotne statystycznie.

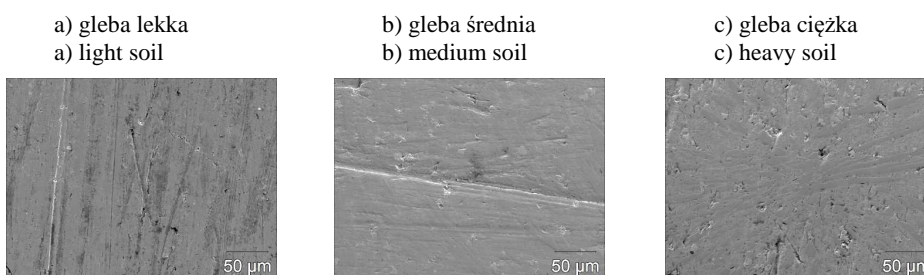
Tabela 2. Wyniki analizy wariancji

Table 2. Variation analysis results

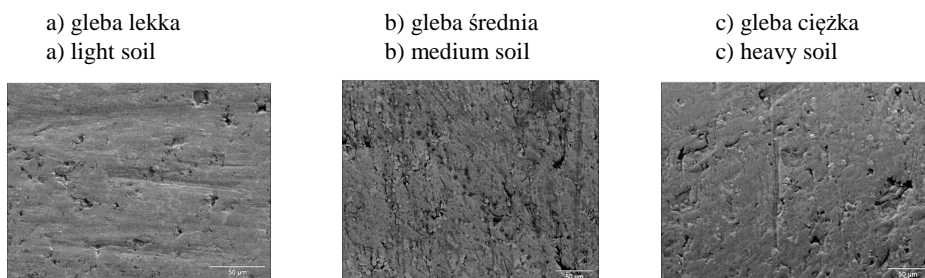
Gleba	Wyniki analizy wariancji	Grupy jednorodne	Wartości zużycia po 10 km [g/kg*cm ²]
Lekka	Hipotezę H0 należy odrzucić na korzyść hipotezy H1	1. El-Hard 61 El-Hard 65	0,153
		2. XHD6715	0,042
Średnia	Nie ma podstaw do odrzucenia H0	1. El-Hard 61 El-Hard 65 XHD6715	0,045
Ciężka	Hipotezę H0 należy odrzucić na korzyść hipotezy H1	1. El-Hard 61	0,080
		2. El-Hard 65 XHD6715	0,035



Rys. 13. Powierzchnia napoiwy El-Hard 61 po badaniu zużycia
Fig. 13. El-Hard 61 welded layer surface following wear test



Rys. 14. Powierzchnia napoiwy El – Hard 65 po badaniu zużycia
Fig. 14. El-Hard 65 welded layer surface following wear test



Rys. 15. Powierzchnia napoiwy XHD 6715 po badaniu zużycia
Fig. 14. XHD 6715 welded layer surface following wear test

PODSUMOWANIE

Stosowanie w napawanych warstwach wierzchnich Fe-Cr-C uzyskanych z wykorzystaniem elektrod otulonych o wysokiej zawartości chromu oraz węgla chłodzonych na wolnym powietrzu sprzyja tworzeniu monokrystalicznych węglików o nieregularnym kształcie M7C3. Osnowa uzyskanych warstw składa się z ferrytu stopowego oraz w przypadku warstwy XHD6715 także ledeburytu. Uzyskane węgliki niobu charakteryzują się nieregularnym kształtem, który znacznie odbiega od sześciokątnego przekroju poprzecznego. Niob ma silne

powinowactwo do węgla i łatwo tworzy węglík niobu. Ze względu na przeprowadzenie procesu napawania (duża zawartość węgla i chromu) w stosunkowo niskiej temperaturze nie uzyskano struktur osnowy złożonej z austenitu. Stwierdzono natomiast znaczną ilość węglików chromu usytuowanych w pobliżu węglików niobu. W przypadku napoiny ze znaczną zawartością wolframu (6%) oraz wanadu (1,9%) uzyskano zwiększoną ilość węglików o znacznie mniejszym rozmiarze w stosunku do pozostałych warstw, w osnowie ferrytu stopowego i drobnego ledeburytu. Związane to było ze zmniejszeniem zawartości węgla w osnowie kosztem powstania większej ilości węglików. Struktura taka zapewnia najwyższą twardość warstwy wierzchniej oraz odporność na zużycie w masie glebowej. Stosowanie w warstwach wierzchnich Fe-Cr-C samego niobu nie zapewnia wysokiej odporności na zużycie w glebowej masie ścierniej ze względu na wykruszanie twardych węglików niobu ze stosunkowo miękkiej osnowy. Dla zwiększenia odporności na zużycie tej warstwy należałoby rozważyć chłodzenie wodą uzyskiwanej napoiny celem uzyskania osnowy austenitycznej.

LITERATURA

1. Napiórkowski J.: Analiza właściwości glebowej masy ścierniej w aspekcie oddziaływania zużyciowego. *Tribologia* 5/2010, s. 53–62.
2. Napiórkowski J.: Badanie i modelowanie procesów zużywania ściernego i zmęczenia. Wydawnictwo UWM, Olsztyn 2014.
3. Müller M., Hrabè P.: Overlay materials used for increasing lifetime of machine parts working under conditions of intensive abrasion, *Res. Agr. Eng.* 59: 2012, s. 16–22.
4. Buchley M.F., Gutierrez J.C., Le`on L.M., Toro A.: The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. *Wear*, 259, 2005, s. 52–61.
5. Hutchings I.M.: *Friction and wear of Engineering Materials*, Cambridge, 1992, s. 133–171.
6. Napiórkowski J., Ligier K., Lemecha M.: Wpływ technologii nanoszenia warstw Fe-C-Cr-B na właściwości zużyciowe w glebowej masie ścierniej. *Mechanik* 4/2015, s. 92–97.
7. Filipovic M., Kamberovic Z., Korac M.: Microstructure and mechanical properties of Fe – Cr – C – Nb white cast irons. *Mater. Des.*, 2013, 47: 41–48.
8. Zhiguo Zhang, Chengkai Yang, Peng Zhang, Wei Li, Microstructure and wear resistance of high chromium cast iron containing niobium. Vol. 11, 2014, s. 179–184.
9. Dobrzański L.: *Metalowe materiały inżynierskie*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa 2004.
10. Dobrzańska-Danikiewicz A.D.: Metodologia komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów. *Open Access Library*, 2012, vol. 1 (7).

Summary

The paper presents the research of the wear intensity of welded layers in diverse soil conditions. The samples made of 38GSA steel with the surface layers welded using different welding technologies were the subject of the research. The tribological proprieties (hardness, chemical composition, and structure) of the tested materials were defined. The research was carried out in three types of soil mass. The analysis of the wear indicates that the welding layers containing niobium and chromium carbide, and molybdenum and vanadium carbides proved to be the most resistant to wear in all the tested abrasive masses. The Fe-Cr-C layers with only contents of niobium do not provide the high wear resistance in the soil mass due to spalling of the hard niobium carbide from relatively soft groundwork.