

Andrzej SKRZYPCZYK¹
Sławomir RUTKOWSKI²
Justyna KASIŃSKA³

NAPAWANIE WARSTW TRUDNOŚCIERALNYCH NA STALI HARDOX METODAMI OAW I MMA

W artykule przedstawiono efekty napawania warstw trudnościeralnych w postaci węgliku chromu i wolframu na stali Hardox. Napoiny układano ręcznie na odcinki blachy o wymiarach 120x80x10 mm metodami OAW (Oxy Acetylene Welding – 311) oraz MMA (Manual Metal Arc Welding – 111) pod kątem doboru optymalnych parametrów technologicznych. Przeprowadzono obserwacje mikroskopowe z obszaru napoiny, linii wtopienia i strefy wpływu ciepła. Dokonano analizy rozkładu pierwiastków na granicy napoina–materiał podstawowy. Dla obu wariantów technologicznych wykonano badania rozkładu twardości na przekrojach poprzecznych napoin. Autorzy pokazali wpływ zastosowanych technologii na sposób kształtowania się napoin oraz na ich właściwości.

Słowa kluczowe: napawanie ręczne, spoiwa, węglik chromu, węglik wolframu

1. Wprowadzenie

W ostatniej dekadzie XX w. rozpoczęto produkcję wysokojakościowych stali odpornych na ścieranie, o bardzo dobrych właściwościach wytrzymałościowych oraz odporności na obciążenia udarowe. Stale typu Hardox są produkowane przez szwedzki koncern SAAB w gatunkach 400, 450, 500, 550, 600 oraz Extreme. Ich strukturę i właściwości kształtuje się w toku ciągłego procesu ulepszania cieplnego. Głównym obszarem zastosowania są elementy narażone na ścieranie (burty wozów dostawczych i transportowych, łyżki koparek i ładowarek, rynny kruszarek, wykładziny separatorów), a także noże, listwy, zęby czerpaków itp. [1-5]. W Polsce klasyfikuje się je jako niskostopowe stale martenzytyczne lub stale konstrukcyjne o podwyższonej odporności na ścieranie [6]. Odporność na ścieranie można zwiększyć przez zastosowanie warstw trudnościeralnych w postaci węglików chromu czy wolframu w różnych osnowach. Metody te są stosowane

¹ Autor do korespondencji: Andrzej Skrzypczyk, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, tmaask@tu.kielce.pl

² Sławomir Rutkowski, T.S.A S. Rutkowski M. Górski Sp.j, e-mail: srutkowski@pwtsa.pl

³ Justyna Kasińska, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, e-mail: kasinska@tu.kielce.pl

w przemyśle zbrojeniowym, np. do napawania na łopatki sprężarek silników lotniczych [7].

Stale Hardox należą do grupy stali dobrze spawalnych. Spawanie i napawanie stali Hardox można prowadzić większością przemysłowych metod spawania [8]. Podczas procesów spawania czy napawania dochodzi jednak do zmiany ich właściwości w obszarze strefy wpływu ciepła (SWC), związanych ze zmianą struktury oraz do zmian twardości [9-10]. Miejsca takie są narażone na uszkodzenia oraz na obniżenie odporności na ścieranie. Niekorzystne efekty można redukować przez procesy obróbki cieplnej wykonanych połączeń [9] lub przez odpowiedni dobór materiałów spawalniczych, warunków oraz parametrów spawania i napawania [10-11].

W artykule autorzy przedstawiają efekty napawania blach ze stali Hardox 400 dwoma rodzajami spoiw, tj. węglikiem chromu (CrC) w osnowie żelaza metodą MMA oraz węglikiem wolframu (WC) w osnowie żelaza metodą OAW. Istotnym zagadnieniem w procesie napawania jest wyeliminowanie warstw buforowych [12] i napawanie bezpośrednio na powierzchnię blachy.

2. Materiał do badań

Do wykonania napoin wytypowano stal Hardox 400 o składzie chemicznym przedstawionym w tab. 1. Z blach wykonano próby do napawania o wymiarach 150x80x10 mm. Do wykonania napoin na próbach z blachy w gatunku Hardox 400 o grubości 10 mm zastosowano proces napawania gazowego acetylenowo-tlenowego – OAW (311) i napawania łukowego ręcznego elektrodą otuloną – MMA (111). W obu przypadkach napawanie prowadzono jako dwuwarstwowe. W pracy analizowano efekty napawania gazowego z zastosowaniem spoiwa w gatunku capilla 550G (T Fe 20-65-gz wg PN-EN 14700) oraz napawania łukowego za pomocą elektrod capilla 68 HRC (E Fe 15-70-cgt wg PN-EN 14700). Sposób i parametry technologiczne napawania gazowego i łukowego podano w tab. 2. i 3.

Do obserwacji mikroskopowych zastosowano elektronowy mikroskop skaningowy JSM 7100F (ang. SEM – *scanning electron microscope*). Obserwacje prowadzono na zglądach metalograficznych nietrawionych z wykorzystaniem elektronów wtórnych rozproszonych wstecznie (ang. BSE – *backscattered electrons*) oraz na zglądach trawionych 4% roztworem HNO₃ w C₂H₅OH (*nital*). Analizy składu chemicznego wykonano z użyciem detektora EDS (ang. EDS – *energy dispersive spectrometer*). Pomiary twardości metodą Vickersa przeprowadzono z wykorzystaniem twardościomierza NEXUS 4300.

Tabela 1. Skład chemiczny blachy ze stali Hardox 400

Table 1. Chemical composition of a Hardox 400 steel plate

Skład chemiczny [% wag.]								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
0,13	0,25	1,34	0,009	0,001	0,40	0,08	0,08	0,002

Tabela 2. Parametry technologiczne napawania metodą OAW

Table 2. Technological parameters of OAW pad welding

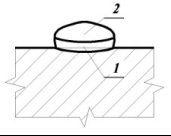
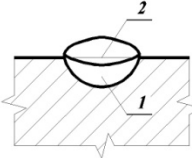
Nr warstwy	Sposób napawania metodą OAW – „w lewo”	Dane napawania					
		średnica spoiwa [mm]	rozmiar dyszy	rodzaj gazu palnego	ciśnienie gazu palnego [MPa]	ciśnienie O ₂ [MPa]	rodzaj płomienia
1, 2		3,0	2	acetylen	0,09	0,5	obojętny
Temperatura podgrzewania i międzyścięgowa: ok. 500°C. Chłodzenie po napawaniu: w materiale termoizolacyjnym.							

Tabela 3. Parametry technologiczne napawania metodą MMA

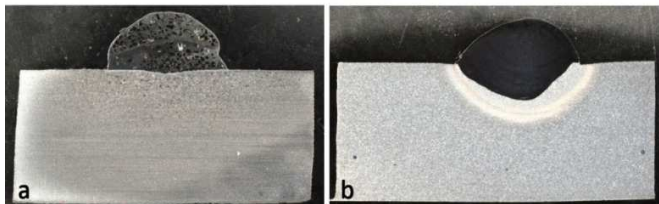
Table 3. Technological parameters of MMA pad welding

Nr warstwy	Sposób napawania metodą MMA	Parametry napawania				
		średnica spoiwa [mm]	natężenie prądu [A]	napięcie prądu [V]	rodzaj prądu/biegunowość	prędkość napawania [cm/min]
1, 2		3,25	140-150	25-26	= (+) ~	10,0
Temperatura podgrzewania i międzyścięgowa: ok. 300°C. Chłodzenie po napawaniu: w materiale termoizolacyjnym.						

3. Wyniki badań

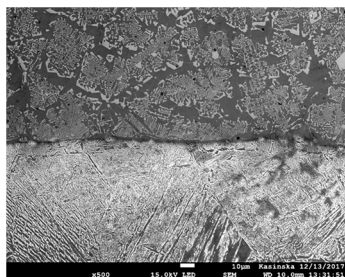
Obserwacje makroskopowe przeprowadzone na przekrojach poprzecznych napoin ujawniły istotne różnice pomiędzy poszczególnymi technologiami napawania. Dla napoiny dwuwarstwowej wykonanej metodą OAW charakterystyczne jest występowanie cząstek węgla wolframu o różnej wielkości i niejednorodnym rozmieszczeniu (rys. 1a). Ten wariant napawania zapewnia niewielkie wtopienie

w materiał podstawowy na całej szerokości napoiny. Przedstawiona na rys. 1b napoina zawierająca węgliki chromu została wykonana metodą MMA. Na przekroju poprzecznym napoiny jest widoczne znaczne wtopienie w materiał podstawowy, a napoina charakteryzuje się jednorodną budową, bez widocznych niezgodności spawalniczych. Na rysunku 2. pokazano mikrostrukturę napoiny i materiału podstawowego w obszarze linii wtopienia. Obserwacje mikroskopowe napoin wykazały występowanie mikropęknięć w obszarze napoiny, jak również porowatości na linii wtopienia w materiał podstawowy (rys. 3.).



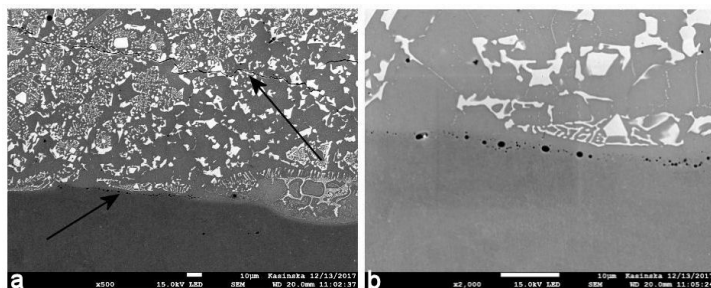
Rys. 1. Makrostruktura napoiny na stali Hardox: a) napawanie OAW, b) napawanie MMA

Fig. 1. Micro-structure of a padding weld on a Hardox 400 steel plate: a) OAW pad welding, b) MMA pad welding



Rys. 2. Mikrostruktura napoiny z węglkami wolframu i materiału podstawowego z widoczną linią wtopienia

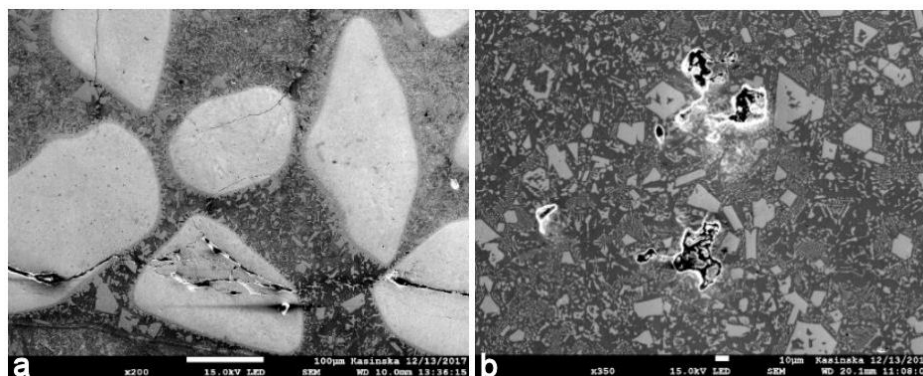
Fig. 2. Microstructure of the padding weld with tungsten carbides and base material with a visible fusion line



Rys. 3. Przykładowa napoina z węglkami wolframu z widocznymi pęknięciami oraz pustkami na linii wtopienia, SEM, BSE

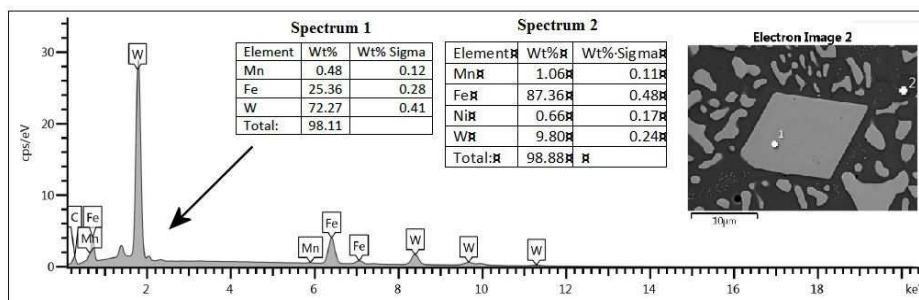
Fig. 3. An example of a padding weld with tungsten carbides with visible cracks and cavities in the line of fusion, SEM, BSE

Pęknięcia propagowały na granicy lub przez twarde wydzielenia węglików wolframu (rys. 4a). W strukturze napoiny zaobserwowano również niezgodności spawalnicze w postaci pustek (rys. 4b). Mikrostruktura wykonanej napoiny jest złożona z licznych wydzieli węglików wolframu w osnowie żelaza, co potwierdziły analizy EDS (rys. 5-6). Analiza liniowa wykazała nagłe przejście pomiędzy napoiną a materiałem podstawowym, świadczące o niewielkim wtopieniu w materiał podstawowy blachy (rys. 6.).



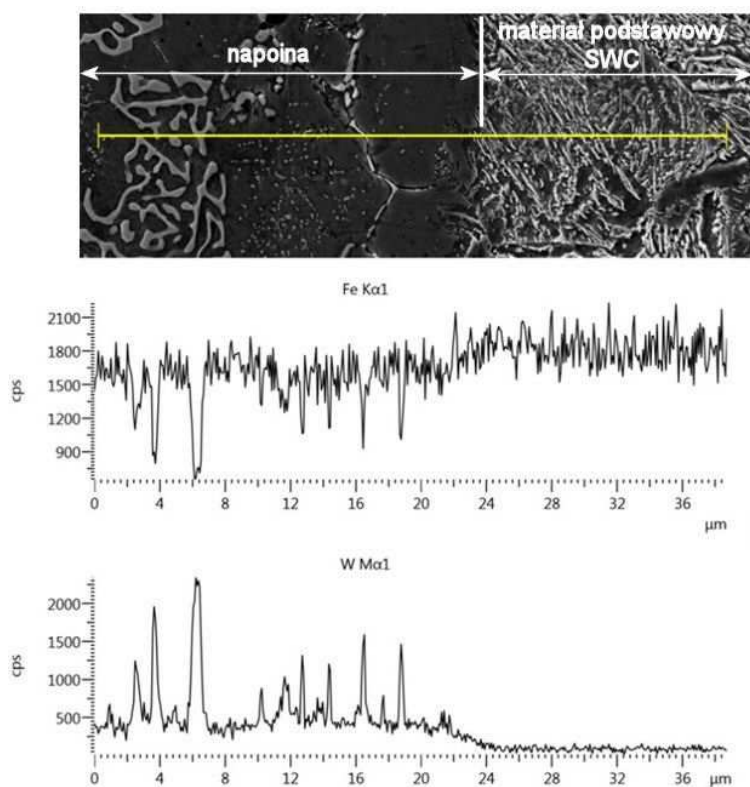
Rys. 4. Przykładowa napoina z węglnikami wolframu z widocznymi pęknięciami oraz pustkami, SEM, BSE

Fig. 4. An example of a padding weld with tungsten carbides with visible cracks and cavities, SEM, BSE



Rys. 5. Analizy punktowe wydzielenia (Spectrum 1) oraz osnowy (Spectrum 2) w napoinie z węglnikami wolframu, SEM, EDS

Fig. 5. Point analyses of particulates (Spectrum 1) and metal matrix (Spectrum 2) in the padding weld with tungsten carbides, SEM, EDS



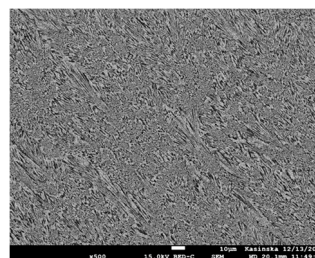
Rys. 6. Rozkład liniowy pierwiastków Fe i W na linii wtopienia napoina–materiał podstawowy

Fig. 6. Linescan analysis of Fe and W elements in the fusion line of the padding weld–base material

Mikrostruktura napoin wykonanych metodą MMA była jednorodna i miała charakter „iglastych” wydzieli (rys. 7.). Nie zaobserwowano niezgodności spawalniczych w postaci mikropęknięć, wykruszeń czy porowatości. Również w obszarze linii wtopienia nie stwierdzono występowania niezgodności spawalniczych (rys. 8.). W przypadku tej metody napawania zaobserwowano wyraźne oddziaływanie cyklu cieplnego napawania na materiał podstawowy. W strefie wpływu ciepła napoiny obserwuje się dwa obszary SWC o istotnie różnej wielkości ziarna (rys. 9.). Obserwacje metodą BSE wskazały różnice pomiędzy poszczególnymi obszarami napoiny (obszary jasne i ciemne), co świadczyło o ich zróżnicowanym składzie chemicznym. Zostało to potwierdzone w analizach punktowych poszczególnych obszarów (rys. 10. i 11.). Rozkład wybranych pierwiastków pomiędzy napoینą a materiałem podstawowym przedstawia analiza liniowa na rys. 12.

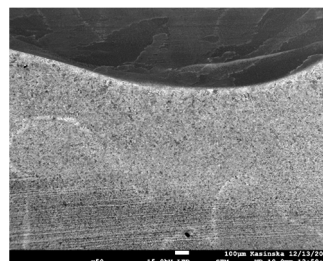
Rys. 7. Mikrostruktura napoiny z węglnikami chromu wykonanej metodą MMA; SEM, BSE

Fig. 7. Microstructure of padding weld with chromium carbides made by MMA; SEM, BSE



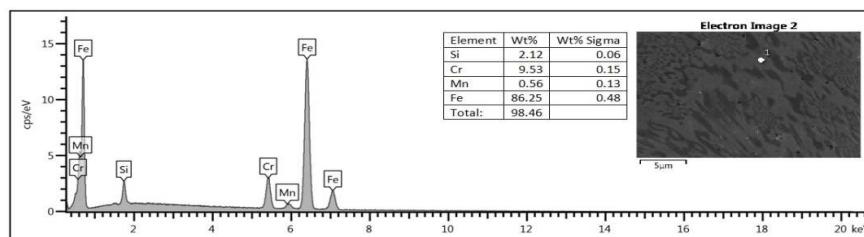
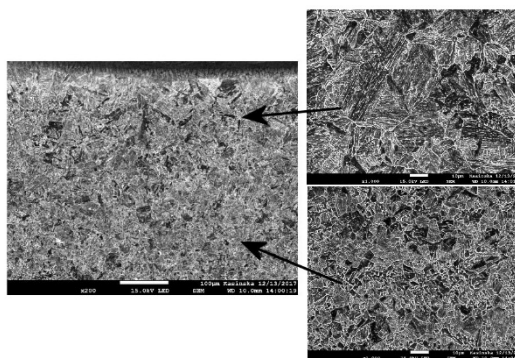
Rys. 8. Mikrostruktura napoiny z węglnikami chromu w obszarze linii wtopienia, SEM

Fig. 8. Microstructure of a padding weld in the area of fusion line, SEM



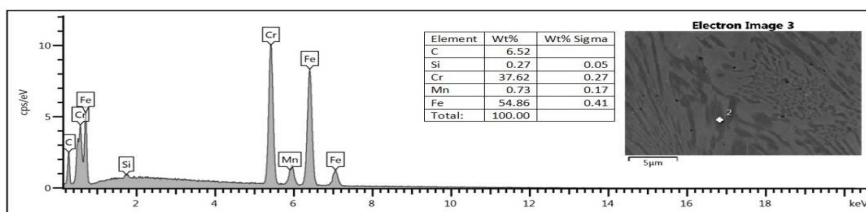
Rys. 9. Mikrostruktura SWC, SEM

Fig. 9. Microstructure of HAZ, SEM



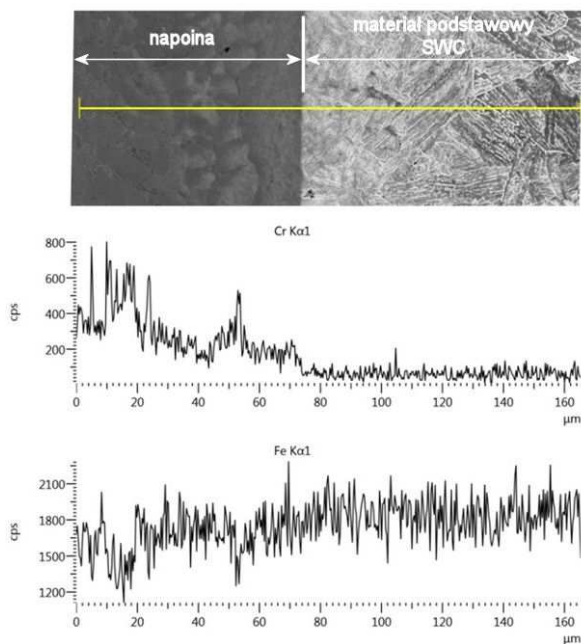
Rys. 10. Analiza punktowa jasnych obszarów (Spectrum 1) w napoinie z węglnikami chromu

Fig. 10. The point analysis of bright areas (Spectrum 1) in the padding weld with chromium carbides



Rys. 11. Analiza punktowa ciemnych obszarów (Spectrum 2) w napoinie z węglkami chromu

Fig. 11. The point analysis of dark areas (Spectrum 2) in padding weld with chromium carbides



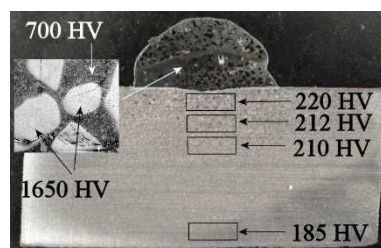
Rys. 12. Rozkład liniowy Cr i Fe dla napoiny wykonanej metodą MMA

Fig. 12. Linescan analysis of Cr and Fe elements of the MMA padding weld

Badania twardości na przekroju poprzecznym napoin pokazano na rys. 13. (OAW) i 14. (MMA). W przypadku napoin wykonanych metodą OAW przeprowadzone pomiary wykazały twardość średnio na poziomie ok. 1650 HV dla WC oraz 700 HV dla osnowy. Idąc od linii wtopienia w kierunku materiału podstawowego, stwierdzono spadek twardości od 220 do 185 HV (rys. 13.). Dla napoiny wykonanej metodą MMA pomiar twardości wykonano w skali makro, bez uwzględnienia poszczególnych obszarów (jasne, ciemne), ze względu na ich niewielkie rozmiary. Średnia twardość napoiny wynosiła ok. 770 HV. W obszarze SWC pomiary twardości były na poziomie od 314 do 230 HV, a dla materiału podstawowego średnia twardość wyniosła ok. 295 HV (rys. 14.).

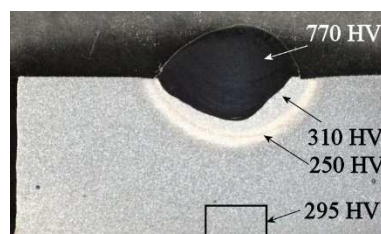
Rys. 13. Rozkład twardości HV dla poszczególnych obszarów napoiny wykonanej metodą OAW

Fig. 13. Distribution of HV hardness for individual areas of the padding weld made with the OAW method



Rys. 14. Rozkład twardości HV dla poszczególnych obszarów napoiny wykonanej metodą MMA

Fig. 14. Distribution of HV hardness for individual padding areas made with the MMA method



4. Wnioski

Przeprowadzone próby napawania metodą OAW i MMA na stali Hardox 400 wykazały skuteczność napawania bez stosowania warstw buforowych. W obu przypadkach udało się zagwarantować wymagane wymiary geometryczne napoin oraz ich odpowiednią jakość do stosowania w warunkach eksploatacyjnych. Zastosowane metody napawania w diametralnie różny sposób oddziaływały na materiał podstawowy. W metodzie OAW, gdzie źródłem ciepła jest płomień acetylenowo-tlenowy, stwierdzono zdecydowanie niższą twardość na przekroju poprzecznym blachy w porównaniu z metodą MMA, gdzie źródłem ciepła jest łuk elektryczny. Istotny wpływ na wartości twardości oraz strukturę SWC oraz materiału podstawowego miała temperatura podgrzewania wstępnego i międzyściegowa (500°C – OAW, 300°C – MMA). Otrzymane wyniki badań potwierdzają prawidłowy dobór spoiw oraz parametrów technologicznych napawania stali Hardox 400. Zastosowanie takich technologii napawania gwarantuje zwiększenie czasu użytkowania elementów maszyn i urządzeń stosowanych między innymi w przemyśle górnictwym i zbrojeniowym.

Literatura

- [1] Capanidis D., Konat Ł., Pękalski G., Sachadel U., Wieleba W.: Możliwości zastosowania stali Hardox a ich struktury i wybrane właściwości, XVIII Konf. Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych, Zakopane 2005.
- [2] Nosals X., Hernes J.: Badania eksploatacyjne odporności na ścieranie blach wykładzinowych stosowanych w kole czepakowym koparki typu SRS 1200, Tribologia, 4 (2011) 219-228.

- [3] Napiórkowski J., Kołakowski K., Pergoń A.: Ocena zużycia nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych stosowanych na narzędzia obrabiające glebę, *Inżynieria Rolnicza*, 15 (2011) 191-197.
- [4] Cegiel L., Kozerska A., Pękalski G.: Struktury i odporność na zużywanie ściernie stosowanych na płyty wykładzinowe zsuwni i przesypów koparek węgla brunatnego, *Górnictwo Odkrywkowe*, 5-6 (2006) 56-62.
- [5] Lisiecki A., Kubica S., Ślizak D., Kurc-Lisiecka A.: Ocena jakości warstw wierzchnich nanometalicznych napawanych GMA w sposób zrobotyzowany na powierzchniach krzywek przesiewacza koksu ze stali Hardox, *Przegląd Spawalnictwa*, 9 (2015) 82-86.
- [6] Dudziński M., Pękalski G., Haimann K.: Charakterystyki strukturalne, wytrzymałościowe i korozyjne niskostopowych stali martenzytycznych, *Górnictwo Odkrywkowe*, 5 (2010) 48-53.
- [7] Jakubowski J., Wysocki P., Senkara J.: Selektywne regeneracyjne napawanie plazmowe warstw Ni-WC na tytanowe łopatki sprężarki silnika lotniczego, *Przegląd Spawalnictwa*, 83 (2011) 38-42.
- [8] SAAB Poland Sp. z o.o.: Spawanie Hardox, www.saab.pl.
- [9] Frydman S., Konat Ł., Pękalski G.: Structure and hardness changes in welded joints of Hardox steels, *Arch. Civil Mech Eng*, 8 (2008) 15-27.
- [10] Tasak E.: *Metalurgia spawania*, Wydawnictwo JAK, Kraków 2008.
- [11] Brooks J.A., Garrison Jr. W.M.: Weld microstructure development and properties of precipitation-strengthened martensitic stainless steels, *Welding J.*, 71 (1999) 280-291.
- [12] Grigorenko G.M., Kostin W.A., Poznjakow W.D., Żdanow S.L., Żukow W.W.: Osobliwości przekształceń strukturalnych w strefie wpływu ciepła złączy spawanych MAG stali WELDOX 1300, *Przegląd Spawalnictwa*, 87 (2015) 42-46.

DEPOSITION OF HARDFACING LAYERS ON HARDOX STEEL BY OAW AND MMA

Abstract

This paper presents the effects of chromium and tungsten carbide hardfacing on Hardox steel. The padding welds were applied manually on the 120x80x10 mm steel plate sections using Oxy Acetylene Welding (311) and Manual Metal Arc Welding (111) to find the optimum processing parameters. The macrostructure of the padding welds was analyzed for quality. Microscopic observations of the padding weld, fusion line and heat affected zone were performed. The element distribution at the padding weld – base material boundary was analyzed. The distribution of hardness was investigated on the padding weld cross-sections for both technological variants. The authors demonstrated the influence of the technologies used on the formation mechanism and properties of the padding welds.

Keywords: manual hardfacing, filler metal, chromium carbide, tungsten carbide

DOI: 10.7862/rm.2018.18

Przesłano do redakcji: 28.04.2018

Przyjęto do druku: 17.05.2018