



## Badania mikrostrukturalne i fraktograficzne warstw napawanych na wykrojach matryc kuźniczych

### *Microstructural and fractographic investigations of padded layers in cavities of hot forging dies*

(1) Jan Turek<sup>1</sup>, (2) Stanisław Pytel<sup>2</sup>, (3) Stanisław Okoński<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Podkarpacka Szkoła Wyższa im. bł. ks. Władysława Findysza, ul. Na Kotlinę 8, 38-200 Jasło, Poland

<sup>2</sup> Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut Inżynierii Materiałowej, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, Poland

#### Informacje o artykule

Data przyjęcia: 8.07.2015

Data recenzji: 9.02.2016

Data akceptacji: 22.03.2016

#### Wkład autorów

- (1) Koncepcja i technologia napawania matryc
- (2) Badania strukturalne i fraktograficzne
- (3) Badania strukturalne i fraktograficzne

#### Streszczenie

W pracy zaprezentowano wyniki badań mikrostrukturalnych i fraktograficznych trzech rodzajów warstw napawanych drutami F-818, F-812 i UTOP38 na podłożu ze stali 42CrMo4 (40HM). Przedstawiono zdjęcia oraz charakterystyki mikrostruktur i przełomów. Badania mikrostrukturalne ujawniły zróżnicowany skład fazowy otrzymanych warstw. Warstwy napawane drutem UTOP38 miały strukturę dwufazową, składającą się z osnowy martenzytyczno-bainitycznej i wydzielen ferrytu na granicy byłych ziarn austenitu, przy czym udział powierzchniowy ferrytu przy powierzchni wynosił ok. 5%, wzrastał do ok. 20% w połowie grubości warstwy i spadał do zera w pobliżu granicy warstwy z osnową. Warstwy F-812 również miały budowę martenzytyczno-bainityczną z wydzieleniami ferrytu. Tym razem maksymalny udział powierzchniowy ferrytu (ok. 12%) występował przy powierzchni i spadał do zera przy granicy warstwy z osnową. Warstwy F-818 miały jednorodną budowę martenzytyczną. Podczas badań fraktograficznych prowadzonych w obrębie napoiny i materiału podłoża stwierdzono występowanie przełomów ciągliwych i quasi-łupliwych (warstwy UTOP38 i F-812) oraz transkryystalicznych (F818). We wszystkich przypadkach stwierdzono dobrą spójność materiału napoiny i podłoża. Przeprowadzone badania mikrostrukturalne i fraktograficzne pozwoliły na sformułowanie wytycznych odnośnie do zastosowania drutów F-818, F-812 i UTOP38 do napawania wykrojów matryc kuźniczych lub ich fragmentów. Warstwy o wyższej plastyczności (UTOP38 i F812) są przydatne, jeżeli dominującym mechanizmem zużycia matryc jest zmęczenie cieplno-mechaniczne. Warstwy F-818 należy stosować, gdy powierzchnie wykrojów są narażone głównie na zużycie ściernie.

**Słowa kluczowe:** warstwy napawane, mikrostruktura, fraktografia, matryce kuźnicze

#### Article info

Received: 8.07.2015

Reviewed: 9.02.2016

Accepted: 22.03.2016

#### Authors' contribution

- (1) Concept and die padding technology
- (2) Structural and fractographic investigations
- (3) Structural and fractographic investigations

#### Abstract

The paper presents results of microstructural and fractographic research of three types of padded layers deposited by wires F-818, F-812 and UTOP38 on the base of steel 42CrMo4 (40HM). Microstructural studies revealed a varied phase composition of these layers. The layers done by wire UTOP38 characterized as two phase microstructure consisting of martensitic-bainitic ferrite and the precipitates at the boundaries of the prior austenite grains. The ferrite amount nearby the surface was approx. 5%, and increased to approx. 20% at mid-thickness layer, and fell to zero near the boundary of the steel base. Padded layers of F-812 had also martensitic-bainitic microstructure with ferrite precipitates. In this case the maximum amount of ferrite (approx. 12%) occurred at the surface and fell to zero at the boundary of steel base matrix. In padded layers of F-818 homogeneous martensitic microstructure was observed. During the fractographic study carried out within the padded layer and steel base of ductile and quasi-cleavage (UTOP38 layer and F-812) and intergranular (F818) were found. In all

\* Autor do korespondencji. Tel.: +48 12 628 34 56; fax: +48 12 628 34 91; e-mail: okonski@mech.pk.edu.pl

\* Corresponding author. Tel.: +48 12 628 34 56; fax: +48 12 628 34 91; e-mail: okonski@mech.pk.edu.pl

*cases a good cohesion in the padded layer–steel base boundaries were recognized. The microstructural and fractographic studies allowed to formulate guidelines for the use of wires of F-818, F-812 and UTOP38 for padding the cavities of hot forging dies or their fragments. Padded layers of higher strength (wires of UTOP38 and F812) are useful if the dominant mechanism is the thermo-mechanical fatigue wear. The padded layer of F-818 should be used when the cavities of forging dies are primarily subject to wear.*

**Keywords:** hot forging dies, padded layers, microstructure, fractography

## 1. WSTĘP

Trwałość narzędzi kuźniczych ma istotny wpływ na jakość i koszty produkcji odkuwek. Dążenie do podwyższenia trwałości stanowi stałą tendencję w doskonaleniu technik wytwarzania, eksploatacji i regeneracji oprzyrządowania kuźniczego. Do nowoczesnych metod podwyższania trwałości oprzyrządowania kuźniczego należy – obok doboru właściwych materiałów narzędziowych i warunków eksploatacji – uszlachetnianie ich powierzchni roboczych poprzez natrysk ciepły lub napawanie specjalnymi elektrodami, albo drutami. W praktyce przemysłowej stosuje się przede wszystkim różne techniki napawania, zarówno do uszlachetniania warstw wierzchnich wykrojów matryc nowych, jak i do regeneracji matryc zużytych [5]. Z analizy literatury oraz własnych badań [1] wynika, że poprzez napawanie części roboczych matryc można poprawić ich trwałość nawet dwukrotnie. Stosując różnorodne materiały do napawania, można zwiększać odporność na zmęczenie cieplno-mechaniczne oraz na zużycie cieerne narzędzi kuźniczych [1, 4, 6, 7]. Większość prac dotyczy napawania powierzchni wykrojów matryc wykonanych ze stali narzędziowych do pracy na gorąco.

Nowa koncepcja matryc kuźniczych z wykrojami napawanymi została opracowana przez J. Turka w Kuźni „Glinik” Gorlice [1, 4]. Polega ona na zastąpieniu matryc ze stali narzędziowych do pracy na gorąco (X37CrMoV1-5 i 55NiCrMoV7) matrycami ze stali konstrukcyjnej 42CrMo4 z napawanymi powierzchniami wykrojów. W latach 2006–2010 skonstruowano, wykonano i wdrożono do produkcji kilkadziesiąt takich matryc, przeznaczonych do kucia na gorąco różnorodnych odkuwek na prasach hydraulicznych LZK 1000, LZK 1600, LKM 1600 i LKM 2500.

## 1. INTRODUCTION

*The durability of hot forging tools is an important factor influencing the quality and cost of the production. The drive to increase the durability is a constant tendency in the improvement of production techniques, exploitation and regeneration of forging equipment. Among the methods of durability upgrading the forging dies cavities there are also modern technologies focusing on enriching these surfaces by heat spray or padding with special electrodes or rods. In industrial practice different techniques of padding for forging tools are used. They can be applied both to sole refining of outward padded layers of new forging tools as well as to the regeneration of used up work parts or tool elements [5]. The analysis of literature [1] provides a statement that by application of padding in cavities of dies their durability can be improved, in some cases even twice. The resistance to impact and heat fatigue as well as friction wear of the tools can be improved depending on the type of material used in padding technology [1, 4, 6, 7]. Nevertheless majority of the investigations are concerned with padding of die cavities made from hot-work tool steels.*

*A new concept of hot forging dies with padded layers was developed by J. Turek in Forge “Glinik” Gorlice [1, 4]. It involved replacing the steel (X37CrMoV1-5 and 55NiCrMoV7) dies by means of the structural steel 42CrMo4 blanks with padded surfaces inside their cavities. In the years 2006–2010 dozens of such tools were designed, manufactured and implemented into the production for a variety of hot forging parts using forging presses: LZK 1000, LZK 1600, LKM 1600 and LKM 2500.*

Wykroje napawano z wykorzystaniem własnej oryginalnej technologii [1, 4], stosując między innymi druty do napawania o handlowych nazwach UTOP38, F-812 i F-818. Wybór kilku składów chemicznych materiałów do napawania był spowodowany koniecznością dostosowania własności warstw napawanych do dominujących mechanizmów zużycia wykrojów występujących przy kuciu różnych typów odkuwek.

Przeprowadzone w warunkach produkcyjnych [1] badania wykazały, że zastąpienie tradycyjnych matryc ze stali narzędziowych do kucia na gorąco matrycami ze stali 42CrMo4 z napawanymi powierzchniami wykrojów przyniosło bardzo dobre wyniki [1, 4]. Podczas kucia na prasach hydraulicznych osiągnięto trwałość matryc rzędu 10000 szt. odkuwek, możliwość wielokrotnej regeneracji wykrojów bez konieczności obróbki cieplnej kostek matrycowych i wyeliminowano pęknięcia całych matryc. W niektórych przypadkach wzrost trwałości sięgał 100%.

Szczegółowe badania różnorodnych własności mechanicznych i eksploatacyjnych warstw napawanych przeprowadzono w pracy [1]. Obiektem badań były głównie jednowarstwowe napoiny o grubości 1–4 mm na podłożu ze stali 42CrMo4. Próby zginania, twardości, udarności i odporności na zużycie ściernie zostały uzupełnione badaniami mikrostrukturalnymi łącznie z mikroanalizą składu chemicznego z wykorzystaniem elektronowej mikroskopii skaningowej. Najważniejsze uzyskane wyniki opublikowano w [2, 3].

W niniejszej pracy przedstawiono wybrane, niepublikowane dotąd wyniki badań mikrostrukturalnych i fraktograficznych warstw napawanych i podłoża. Napawanie próbek wykonano w Kuźni „Glinik” Gorlice, natomiast badania doświadczalne – w Instytucie Inżynierii Materiałowej Politechniki Krakowskiej.

## 2. OGÓLNE ZASADY DOBORU MATERIAŁÓW DO NAPAWANIA I CHARAKTERYSTYKA MATERIAŁÓW BADANYCH

Skład chemiczny materiału przeznaczonego do napawania należy dobierać w zależności od cech konstrukcyjnych odkuwki (wykroju) i wa-

*These blanks were padded using own original technology [1, 4]. Among the other things the specialty steel wires for hard facing under the commercial names: UTOP38, F-812 and F-818 were applied. Selecting multiple chemical composition of these steels was due to the need of adjusting the specific properties of the deposited layers. The most important factor was to prevail wear mechanism occurring inside the cavities of various types of forgings.*

*Experiments carried out under production conditions [1] have shown that replacing the conventional tool steel dies by means structural steel 42CrMo4 blanks with padded cavities produced very good results [1, 4]. During hot forging procedure the observed mean life of tools achieved about 10,000 forged parts. In addition the possibility of multiple regeneration of tools without their heat treatment have been obtained. In some cases the increase of tool durability reached 100%.*

*Detailed studies of various mechanical and exploitation characteristics of padded layers were conducted during work [1]. The bending, hardness, impact strength and friction wear trials were supplemented with microstructural research together with microanalysis of chemical composition conducted with the use of scanning electron microscopy. The most important results were published in [2, 3].*

*In this paper the select, unpublished results of research related to microstructure and fractography of padded layers are presented. The padding of the samples in “Glinik” Forge in Gorlice were done. All experiments in the Institute of Materials Engineering of Cracow University of Technology were conducted.*

## 2. GENERAL RULES OF STEEL SELECTION FOR PADDING WELDS AND THEIR CHARACTERISTICS

*The chemical composition of the steel for the padding should be selected depending on the structural characteristics of forging blanks and thermo-*

runków termodynamicznych procesu – adekwatnie do dominujących mechanizmów zużycia. Najważniejszymi składnikami stopowymi napoin są: C, Cr i Mo, a ponadto Mn, W, V, Ni, Ti i Si. Własności warstw winny mieścić się w pewnym zakresie: od warstw o dobrych własnościach plastycznych odpornych przede wszystkim na zmęczenie cieplno-mechaniczne aż do warstw o wysokiej twardości, odpornych na ścieranie. W pracy [1] przyjęto, że napoiny bardziej plastyczne winny zawierać około 0,10–0,15% C, 5–10% Cr, 4% Mo oraz W, V, Ni, Ti i Si. Warstwa najtwardsza wreszcie powinna mieć więcej węgla (0,20–0,25%) i wolframu (ponad 1%) oraz stężenia pozostałych pierwiastków stopowych na poziomie zbliżonym do poprzednich. Powyższe założenia spełniają dość dobrze druty do napawania o handlowych nazwach UTOP38, F-812 i F-818, które ostatecznie zastosowano do wytwarzania badanych napoin.

Składy chemiczne drutów do napawania oraz charakterystykę materiału kostek matrycowych – stali 42CrMo4 – podano w tab. 1 i 2.

*dynamic conditions of the hot working process – adequately to the dominant mechanism of wear at elevated temperature. The main alloying elements of padding welds are C, Mn, Si, Cr and Mo and in addition: W, V, Ni and Ti. The properties of the layers should be contained within a certain range: from layers with good elastic properties primarily resistant to thermal and mechanical fatigue to layers having high hardness and resistance to abrasion. In paper [1] it has been assumed that the most plastic padding weld should contain about 0.10-0.15% C, 5% Cr, 4% Mo. The layer having intermediate properties – similar content of C and a higher content of Cr (about 10%) with small addition of Ni (0.8%) and Ti (0.2%). Finally, the hardest layer should have more carbon (0.20-0.25%) and additionally tungsten (over 1%). The concentration of other alloying elements should be at a level close to layer characterized by the intermediate properties. These assumptions meet quite well the wires for padding under the names UTOP38, F-812 and F-818, which eventually was used to produce the tested welds.*

*The chemical composition of padding rods and characteristic of the steel 42CrMo4 applied as die cubes are given in Tab. 1 and 2.*

Tab. 1. Składy chemiczne materiałów do napawania wykrojów matryc

Tab. 1. Chemical compositions of alloys for padding

Materiał Material	Twardość po napawaniu Hardness after padding	Skład chemiczny, % Chemical composition, %							
		C	Si	Cr	Mo	Ni	V	W	Ti
UTOP38	36–38	0,15	0,35	5,05	4,00	—	0,20	0,15	—
F-812	42–44	0,10	0,50	9,65	2,15	0,80	—	—	0,20
F-818	53–55	0,24	0,70	10,0	3,01	1,70	0,25	1,40	0,25

Tab. 2. Charakterystyka materiału podłoża

Tab. 2. Characteristic of the steel applied as die cubes

Materiał Grade of steel	Skład chemiczny, % Chemical composition, %						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
42CrMo4	0,39	0,30	0,80	0,34	0,30	0,11	0,21
Obróbka cieplna / Heat treatment							
Hartowanie Hardening	Odpuszczanie Tempering			Twardość po obróbce cieplnej Hardness after heat treatment			
840°C	620°C			33–36 HRC			



### 3. WYNIKI BADAŃ

Przełomy uzyskano przy okazji zginania próbek prostopadłościennych ze stali 42CrMo4 z warstwami napawanymi. Wymiary próbek były następujące: wysokość  $h=8-13$  mm, szerokość  $b=19-20$  mm i długość  $L=120$  mm, przy czym grubości warstw napawanych wynosiły od ok. 1 mm do 4 mm. Warstwy te podczas zginania znajdowały się po stronie naprężeń rozciągających. Rozstaw podpór  $l=100$  mm. Podczas prób zginania badano także próbki o wymiarach  $6 \times 10 \times 100$  mm przy rozstawie podpór 80 mm wykonane z samych warstw przez ich odcięcie od podłoża. Za pomocą tensometrów oporowych 1-XY-11-3/120 naklejonych na powierzchniach warstw mierzono odkształcenia wzdłużne i poprzeczne. Wyznaczono współczynniki Poissona  $\nu$  i moduły Younga  $E$ . Przykładowo:

- dla warstw F-812:  
 $\nu=0,20-0,28$ ,  $E=2,12 \cdot 10^5-2,16 \cdot 10^5$  MPa,
- dla warstw UTOP38:  
 $\nu=0,24-0,27$ ,  $E=2,01 \cdot 10^5-2,11 \cdot 10^5$  MPa.

W zakresie możliwych do zmierzenia stosowanymi tensometrami odkształceń wzdłużnych (ok. 3,5–5%) warstwy nie ulegały pękaniu. Wybrane próbki obciążano stopniowo, co pozwoliło na pomiar strzałek ugięcia w momencie pojawienia się pęknięć w warstwach napawanych. Ustalono, że pierwsze pęknięcia pojawiają się przy ugięciach (trwałych) ok. 0,7 mm, 1,7 mm i 2,3 mm odpowiednio dla warstw F-818 (najmniej plastycznej), UTOP38 i F-812. Przy całkowicie pękniętych warstwach ugięcia te były większe i wynosiły odpowiednio 1,9 mm, 5,3 mm i 8,2 mm – rys. 1 (dla próbek o wymiarach  $8 \times 19 \times 120$  mm, rozstawu podpór 100 mm i grubości warstw 4 mm). Fragmenty innych złamanych próbek pokazano na rys. 2.

Wybrane wyniki badań mikrostrukturalnych i fraktograficznych w postaci zdjęć fragmentów powierzchni zglądów i przełomów przedstawiają rys. 3–6. Zglądy do badań mikrostrukturalnych trawiono 5% azotalem lub wodą królewską. Stwierdzono, że materiały warstw (zwłaszcza F-818) wykazują znaczną odporność na zastosowane trawienie chemiczne.

### 3. RESULTS OF EXPERIMENTS

After the bending test of rectangular samples characterized by geometry (height 8-13 mm, width 20 mm and length 120 mm) with 100 mm spacing of the supports the fracture surfaces were obtained. The padding welds had a thickness of approx. 1 mm to 4 mm and during test were positioned on the side of the tensile stress. By using resistance strain gauges 1-XY-11-3/120 the longitudinal and transverse deformation on the surface of layers were measured. This procedure allowed to determine the elastic constants of the padded layers. Poisson coefficients ( $\nu$ ) and Young modules ( $E$ ) were calculated. For example:

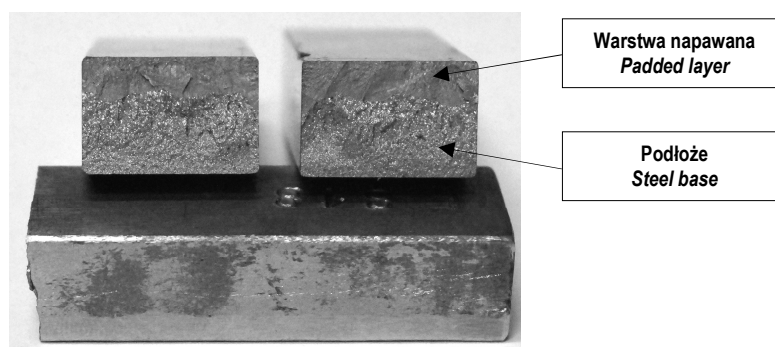
- for the layer F-812:  
 $\nu=0.20-0.28$ ,  $E=2.12 \cdot 10^5-2.16 \cdot 10^5$  MPa;
- for the layer UTOP38:  
 $\nu=0.24-0.27$ ,  $E=2.01 \cdot 10^5-2.11 \cdot 10^5$  MPa.

In terms of measurements by strain gauges applied in longitudinal direction on the surface of samples padded layer did not undergo cracking until strain (approx. 3.5–5%). Selected samples were gradually loaded. It allowed to measure the maximum of arrow of the samples when the nucleation of cracks in the layers occurred. It was found that the first cracks appeared when the deflection of the samples was about 0.7 mm, 1.7 mm and 2.3 mm respectively for the layers of F-818 (less plastic), UTOP38 and F-812. When layers were completely broken the deflection were larger and were larger: 1.9 mm, 5.3 mm and 8.2 mm respectively – Fig. 1 (for the samples characterized by geometry: height 8 mm, width 19 mm and length 120 mm) with 100 mm spacing of the supports. Padding welds had a thickness 4 mm). Fragments of other broken samples are shown in Fig. 2.

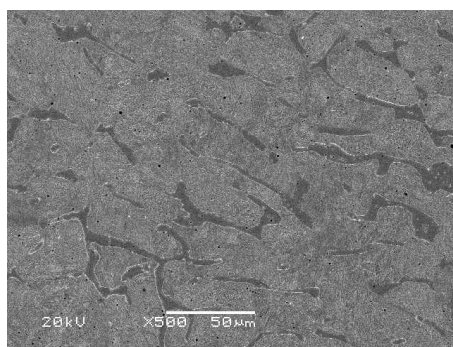
Selected results of microstructural and fractographic studies in the form of photographs with fragments cross-sectional views and fracture surfaces in Fig. 3–6 have been presented. Samples to study microstructure were digested with 5% nitric acid in ethanol or aqua regia. It has been found that materials of layers (particularly the F-818) exhibit significant resistance to the applied chemical etching.



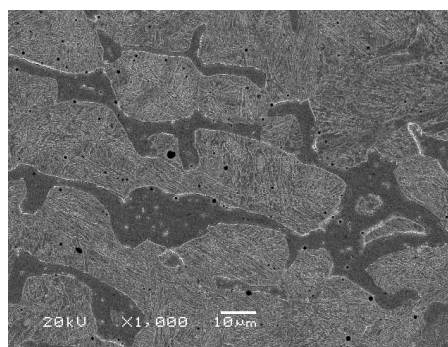
Rys. 1. Kształty próbek z całkowicie pękniętą warstwą napawaną po próbie zginania  
 Fig. 1. The shapes of samples with completely fractured padded layer after bending tests



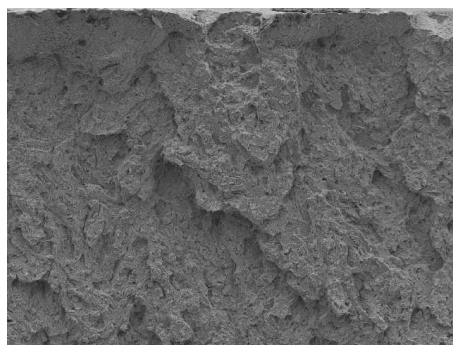
Rys. 2. Fragmenty złamanych próbek (warstwa F-818, podłoże – stal 42CrMo4)  
 Fig. 2. Fragments of fractured samples (padded layer F-818, steel base – 42CrMo4)



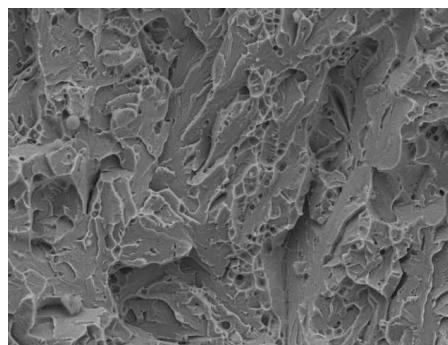
a) Mikrostruktura – warstwa napawana / Microstructure of padded layer



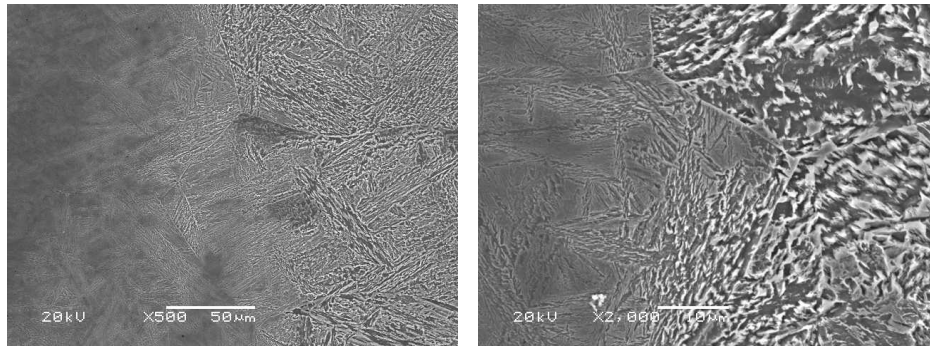
b)



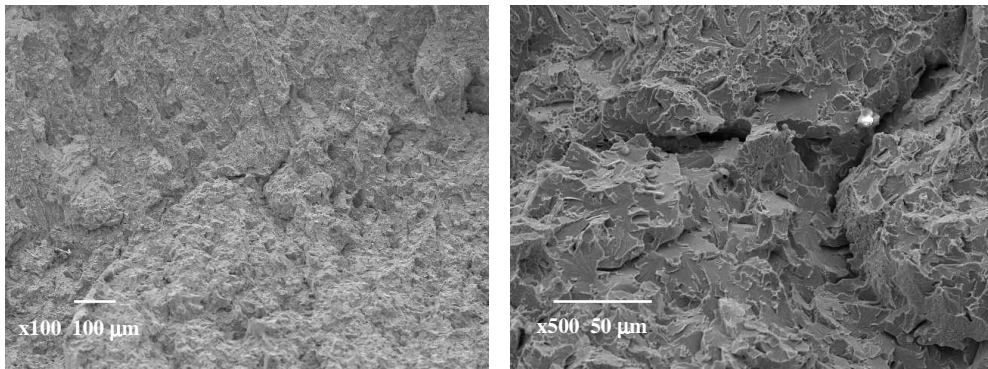
c) Przełom – warstwa napawana / Fracture surface of padded layer



d)



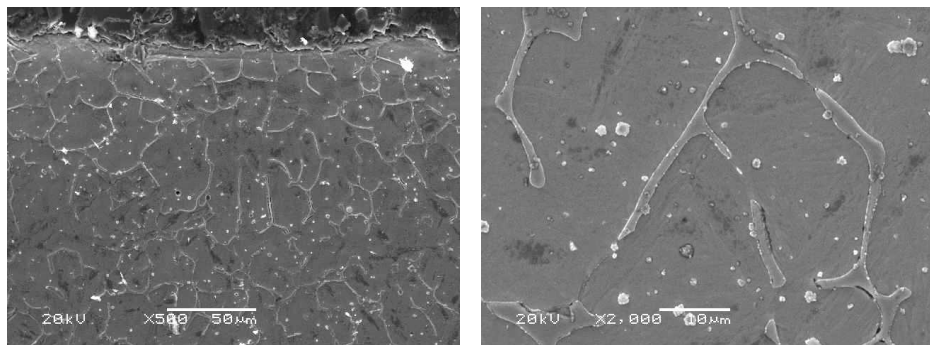
e) Mikrostruktura – strefa graniczna / *Microstructure of layer – steel base zone* f)



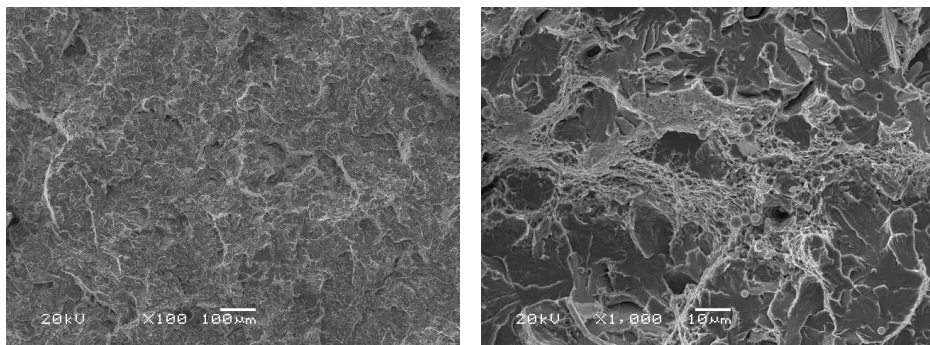
g) Przełom – strefa graniczna / *Fracture surface of layer – steel base zone* h)

Rys. 3. Warstwa UTOP38

Fig. 3. Results of SEM observations of sample with UTOP38 padded layer

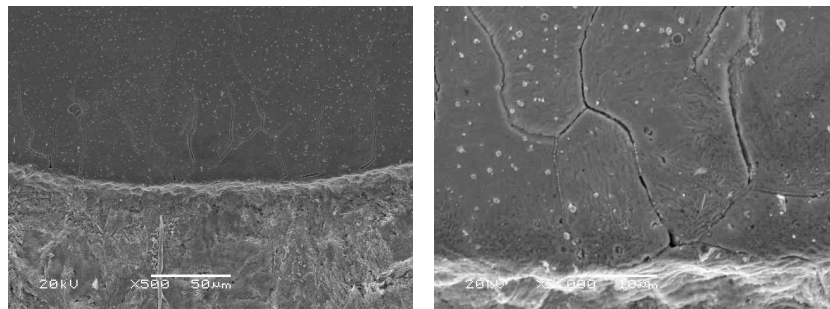


a) Mikrostruktura – warstwa napawana / *Microstructure of padded layer* b)



c) Przełom – warstwa napawana / *Fracture surface of padded layer* d)

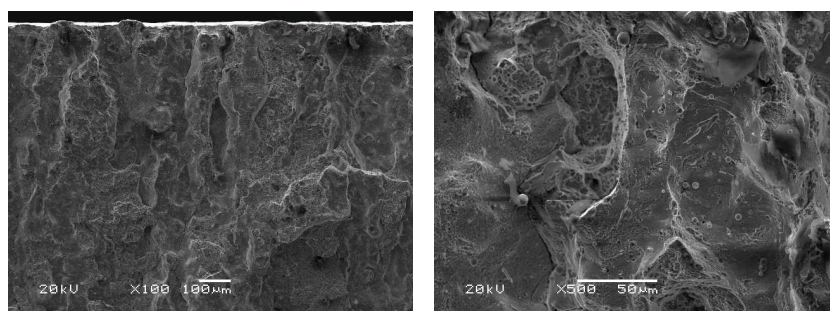




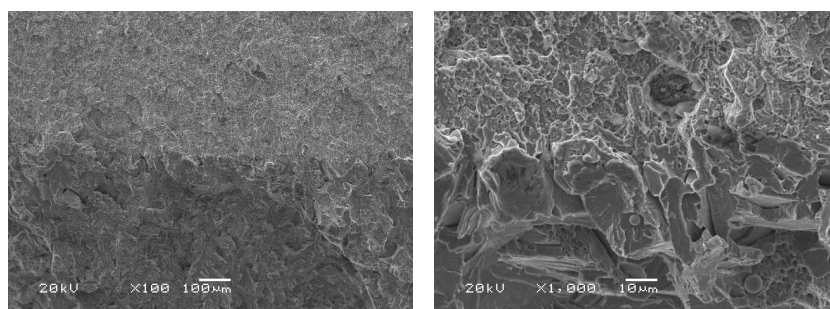
e) Mikrostruktura – strefa graniczna / *Microstructure of layer – steel base zone* f)

Rys. 4. Warstwa F-812

Fig. 4. Results of SEM observations of sample with F-812 padded layer



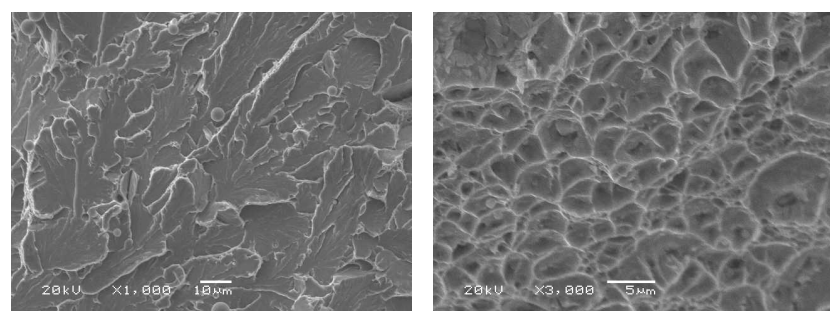
a) Przełom – warstwa napawana / *Fracture surface of padded layer* b)



c) Przełom – strefa graniczna / *Fracture surface of layer – steel base zone* d)

Rys. 5. Warstwa F-818

Fig. 5. Results of SEM observations of sample with F-818 padded layer



a)

b)

Rys. 6. Powierzchnie przełomów w obszarze podłoża (stal 42CrMo4)

Fig. 6. Fracture surfaces of samples in the zone of steel base (42CrMo4)

#### 4. CHARAKTERYSTYKA MIKROSTRUKTUR

Napoina wykonana drutem UTOP38 (rys. 3a, 3b, 3e, 3f) ma budowę dwufazową, składającą się z osnowy martenzytyczno-bainitycznej i wydzielen ferrytu na granicach byłych ziarn austenitu. Jak wykazały badania ilościowe (wykonane w [1]), udział powierzchniowy  $S_v$  ferrytu wzrasta od ok. 5% przy powierzchni, osiąga maksimum (ok. 20%) w połowie grubości warstwy, a następnie spada do zera w pobliżu granicy z podłożem.

W napoinie wykonanej drutem F-812 (rys. 4a, 4b) występują również wydzielenia ferrytu w osnowie martenzytyczno-bainitycznej. Tym razem (wg [1]) ich maksymalny udział powierzchniowy (ok. 12%) występuje przy powierzchni i stopniowo spada. W pobliżu granicy warstwy napawanej z podłożem na zgładach bardzo głęboko wytrawionych (rys. 4f) można zaobserwować ziarna kolumnowe.

Warstwa F-818 z powodu dużej zawartości składników stopowych (zwłaszcza Cr, Mo i Mn) jest bardzo odporna na trawienie chemiczne (nie pokazano zdjęć mikrostruktury). Ma ona budowę jednofazową (martenzytyczną, bez wydzielen ferrytu).

#### 5. CHARAKTERYSTYKA PRZEŁOMÓW

Jak wynika z rys. 3c, 3d, 3g i 3h, powierzchnia przełomu warstwy wykonanej drutem UTOP38 jest bardzo rozwinięta i zawiera liczne ślady zarodkowania mikropustek, co świadczy o dobrej plastyczności napoiny. Mechanizm pęknięcia podłoża jest niemal identyczny.

Topografię pęknięcia próbki z napoiną F-812 obrazuje rys. 4c i 4d. Analiza fraktograficzna nie potwierdziła wystąpienia w tym przypadku budowy dendrytycznej i przełomu międzykrystalicznego. Zaobserwowano natomiast przełom quasi-łupliwy z niewielkimi strefami pęknięcia ciągliwego.

Powierzchnia przełomu warstwy F-818 charakteryzuje się budową dendrytyczną z wyraźnymi śladami pęknięcia międzykrystalicznego (rys. 5). Na powierzchni dendrytów występuje mieszany mechanizm dekohezji – obok pęknięcia łup-

#### 4. CHARACTERISTIC OF MICROSTRUCTURES

*Padding made from UTOP38 (Fig. 3a, 3b, 3e, 3f) has a two phase microstructure, composed of a martensite-bainite matrix and ferrite network at the boundaries of prior austenite grains. As quantitative research has shown the volume fraction of ferrite increases from 5% nearby surface of the sample and it reaches maximum (20%) in the middle of the layer's thickness. Then it decreases to zero near the zone of layer-steel base [1].*

*In the padded layer made from F-812 (Fig. 4a, 4b) ferrite networks are also present around the martensite-bainite matrix. In this sample maximum ferrite network (12%) appears also nearby the surface and then gradually decreases [1]. In the boundary zone of the padded layer and steel base after deeply etching of metallographic specimen (Fig. 4f) columnar grains can be observed.*

*Padded layer of F-818 is very resistant to chemical etching (no photos of microstructure is shown) due to high amount of alloy components (mainly Cr, Mo and Mn). It has shown a one phase of martensitic microstructure. It was deduced on the basis of the hardness measurements and roentgen microanalysis conducted previously in [1].*

#### 5. CHARACTERISTIC OF FRACTURE

*As Fig. 3c, 3d, 3g and 3h show fracture surface of the layer made with UTOP38 is developed and includes many traces of microvoids nucleation, which signify a fine plasticity of the padded layer. The fracture mechanism of steel base is almost identical.*

*The topography of the broken sample with padding F-812 is shown in Fig. 4c and 4d. In this case fractographic analysis did not confirm the presence of dendritic structure or intercrystalline mode of fracture. Even so a quasi-cleavage fissure with small amount of ductile fracture breaking was observed.*

*The fracture surface of layer F-818 is characterized by dendritic structure with evident traces of intercrystalline breaking (Fig. 5). On the surface of the dendrites a mixed mechanism of decohesion is presented – next to cleavage break-*

liwego występują obszary rozdzielania ciągliwego, o czym świadczy kraterowa budowa tych stref. W strefie granicznej (rys. 5c i 5d) stwierdzono wyraźne zmiany mechanizmu pęknięcia. Przełom międzykrystaliczny przechodzi w quasi-łupliwy.

Mechanizmy pęknięcia w obrębie podłoża (rys. 6) wykazują pewne zróżnicowanie, co jest spowodowane różnymi warunkami przepływu ciepła podczas napawania i chłodzenia, które zależą między innymi od grubości nakładanej warstwy. Charakter przełomu może zmieniać się z odległością od strefy granicznej. W szczególności przełomy ciągliwe (rys. 6b) występują w większej odległości od granicy napoina–podłoże niż pozostałe przełomy quasi-łupliwe.

## 6. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania mikrostruktury warstw napawanych wykazały ich zróżnicowany skład fazowy. Jest on spowodowany występowaniem specyficznych, zróżnicowanych warunków chłodzenia od strony powierzchni i podłoża oraz różną hartownością materiałów warstw, zależną od ich składu chemicznego.

Podobnie zróżnicowany okazał się charakter przełomów. Podczas prób zginania najwcześniej powstawały pęknięcia w napoinach wykonanych drutem F-818 (brak wydzieleni ferrytu w strukturze warstwy). Większe odkształcenia wytrzymały warstwy UTOP38 (5% wydzieleni ferrytu przy powierzchni), a największe – warstwy F-812 (12% wydzieleni ferrytu przy powierzchni).

Należy podkreślić, że we wszystkich przypadkach występowała bardzo dobra spójność warstw napawanych z podłożem. W strefie granicznej nie zaobserwowano pęknięć wtórnych. Również podczas prób zginania nie stwierdzono przypadków naruszenia spójności na granicy warstwy i podłoża [1].

Otrzymane wyniki badań potwierdzają w pełni przydatność technologii nanoszenia warstw i zastosowanej obróbki cieplnej. Również dobór materiałów do napawania okazał się trafny. Przeprowadzone badania sugerują wykorzystanie warstw napawanych o zróżnicowanych własnościach do podwyższania trwałości wykro-

*ing appear areas of tough separation, which is attested by crater like topography of those areas. In the boundary zone visible changes to the fracture mechanism were noticed. Intercrystalline fissures convert into quasi-cleavage ones as it is presented in Fig. 5c and 5d.*

*The fracture mechanism in the steel base (Fig. 6) signifies certain differentiation which is due to various conditions of heat flow during padding and cooling, that is dependent among other things on the thickness of the padded layer. The character of the fracture can change with distance from the boundary zone. Especially tough fissures (Fig. 6b) are presented in longer distance from the padding-steel base boundary.*

## 6. SUMMARY

*The conducted research of padded layers microstructure has shown their different phase composition. It is due to the appearance of specific, various cooling conditions from surface and bottom side of the sample and due to different hardenability of layer materials, which hinges on their chemical composition.*

*Also the morphology of fracture has proved to be varied. During bending tests the earliest formed cracks in the layer made of wire F-818 (no ferrite precipitates in this microstructure were observed). Larger deflection withstand layer UTOP38 (5% ferrite precipitates nearby the surface) and the largest – a layer of F-812 (12% ferrite precipitates on the surface).*

*It should be emphasized that in all cases there was a very good cohesion of the layers deposited on the base of tool. In the layer-steel base zones any secondary cracks were noted. Also during bend trials no examples of breaches of integrity in these zones were observed [1].*

*The results obtained confirm that the technology of padding as well as the choice of materials were correct. The microstructural and fractographic research suggests the use of suitable padded layers with varying properties in order to*

jów matryc kuźniczych, a nawet ich fragmentów, na których występują różnorodne dominujące mechanizmy zużycia.

Właściwy dobór gatunku drutu do konkretnego wykroju matrycy warunkuje jej wysoką trwałość. Jak sprawdzono w warunkach przemysłowych [1], warstwy F-818 należy stosować, gdy wykrój jest narażony przede wszystkim na intensywne zużycie ścierne i adhezyjne, np. gdy zawiera duże powierzchnie, na które działają wysokie naciski jednostkowe. Druty UTOP38 i F-812 nadają się zwłaszcza do napawania wykrojów o skomplikowanych kształtach i małych wewnętrznych promieniach zaokrągleń (gdy dominującym mechanizmem zużycia jest zmęczenie cieplno-mechaniczne).

## PODZIĘKOWANIA

Część prezentowanych w pracy wyników uzyskano w ramach tematu DS: „Badania mikrostrukturalne i fraktograficzne warstw napawanych na powierzchniach wykrojów matryc kuźniczych” realizowanego w latach 2012–2013 w Instytucie Inżynierii Materiałowej Politechniki Krakowskiej (M-2/341/DS/2012, M-/350/2013/DS) [8].

## LITERATURA

- [1] Turek J. 2010. „Trwałość matryc kuźniczych z wykrojami napawanymi.” Praca doktorska, Kraków: Politechnika Krakowska.
- [2] Pytel S., Turek J., Okoński S., Zarębski K. 2010. „The properties and microstructure of padding welds built up on the surface of forging dies”. *Archives of Foundry Engineering* 10 (3): 5–10.
- [3] Pytel S., Turek J., Okoński S., Zarębski K. 2010. „Struktura i własności warstw napawanych na powierzchniach wykrojów matryc kuźniczych.” Mat. konf. Jubileuszowej Międzynarodowej Konferencji Naukowej: Jakość i innowacyjność w procesach wytwarzania. Kraków: Politechnika Krakowska, 321–326.
- [4] Turek J. 2006. „Trwałość matryc kuźniczych do pracy na gorąco”. Praca niepublikowana, Gorlice: Kuźnia „Glinik”.
- [5] Dobrzański L.A., Labisz K., Piec M., Klimpel A. 2008. „Poprawa własności warstwy wierzchniej stali

to increase the durability of forging die cavities which have different dominant wear mechanisms.

*Proper selection of a particular grades of wires to the die cavity determines its long durability. As tested in an industrial environment [1] F-818 wire should be used as layer when the cavity of forging die is exposed primarily to heavy and adhesive wear. For example in case when it contains large areas that are subject to heavy pressure. Wires UTOP38 and F-812 are particularly suitable for pad welding of complex shapes and small radius (when the dominant mechanism of wear is mostly related to of thermal or thermal-mechanical fatigue).*

## ACKNOWLEDGEMENTS

*Part of the results which are presented in this paper have been obtained earlier under the theme: “Microstructural and fractographics research of padding welds deposited in the cavities of forging dies”. This research was conducted in the Materials Engineering Institute of Cracow University of Technology in 2012–2013 (M-2/341/DS/2012, M-2/350/2013/DS) [8].*

## REFERENCES

- [1] Turek J. 2010. „Trwałość matryc kuźniczych z wykrojami napawanymi.” Ph.D. diss., Kraków: Politechnika Krakowska.
- [2] Pytel S., Turek J., Okoński S., Zarębski K. 2010. „The properties and microstructure of padding welds built up on the surface of forging dies”. *Archives of Foundry Engineering* 10 (3): 5–10.
- [3] Pytel S., Turek J., Okoński S., Zarębski K. 2010. „Struktura i własności warstw napawanych na powierzchniach wykrojów matryc kuźniczych.” Conf. proceedings of Jubileuszowa Międzynarodowa Konferencja Naukowa: Jakość i innowacyjność w procesach wytwarzania. Kraków: Politechnika Krakowska, 321–326.
- [4] Turek J. 2006. „Trwałość matryc kuźniczych do pracy na gorąco”. Unpublished paper, Gorlice: Kuźnia „Glinik”.
- [5] Dobrzański L.A., Labisz K., Piec M., Klimpel A. 2008. „Poprawa własności warstwy wierzchniej stali



- narzędziowej stopowej do pracy na gorąco”. *Przegląd Spawalnictwa* 11: 3–7.
- [6] Turek J., Zarębski K. 2009. „Właściwości mechaniczne stali narzędziowych X37CrMoV1-5 i 55NiCrMoV7 do pracy na gorąco”. *Zeszyty Naukowe OBR SM BOSMAL* 42 (I/2009): 45–49.
- [7] Bonek M., Dobrzański L.A., Klimpel A. 2007. „Structure and properties of hot-work tool steel alloyed by WC carbides by a use of high power diode laser”. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 24 (2): 175–178.
- [8] *Badania mikrostrukturalne i fraktograficzne warstw napawanych na powierzchniach wykrojów matryc kuźniczych*. Politechnika Krakowska: Instytut Inżynierii Materiałowej, symbol tematu: M-2/341/DS/2012, M-/350/2013/DS.
- narzędziowej stopowej do pracy na gorąco”. *Przegląd Spawalnictwa* 11: 3–7.
- [6] Turek J., Zarębski K. 2009. „Właściwości mechaniczne stali narzędziowych X37CrMoV1-5 i 55NiCrMoV7 do pracy na gorąco”. *Zeszyty Naukowe OBR SM BOSMAL* 42 (I/2009): 45–49.
- [7] Bonek M., Dobrzański L.A., Klimpel A. 2007. „Structure and properties of hot-work tool steel alloyed by WC carbides by a use of high power diode laser”. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 24 (2): 175–178.
- [8] *Badania mikrostrukturalne i fraktograficzne warstw napawanych na powierzchniach wykrojów matryc kuźniczych*. Politechnika Krakowska: Instytut Inżynierii Materiałowej, symbol tematu: M-2/341/DS/2012, M-/350/2013/DS.