



Ocena plastycznego płynięcia oraz mikrostruktury stali Orvar Supreme w podwyższonej temperaturze

Assessment of plastic flow and microstructure of Orvar Supreme steel at elevated temperature

(1) Grzegorz Płaczek*, (2) Beata Pachutko

Instytut Obróbki Plastycznej, ul. Jana Pawła II 14, 61-139 Poznań, Poland

Informacje o artykule

Zgłoszenie: 7.07.2017

Recenzja: 7.08.2017

Akceptacja: 29.09.2017

Wkład autorów

- (1) Autor koncepcji, założeń i metodyki, wykonanie próby ściskania z wyznaczeniem krzywych umocnienia, opracowanie wyników badań
- (2) Współautor koncepcji, założeń i metodyki, wykonanie badań metalograficznych i opracowanie wyników badań

Streszczenie

Wyznaczone właściwości reologiczne badanego materiału w postaci krzywych zależności naprężenia od odkształcenia są bogatym źródłem informacji na temat procesów wynikających z mechanizmu odkształcenia plastycznego, procesów umocnienia, a także zjawisk aktywowanych cieplnie takich, jak zdrowienie i rekrytalizacja dynamiczna. Wiedza płynąca z prawidłowej interpretacji krzywych umocnienia jest podstawą do optymalnego projektowania procesów kształtowania metali na ciepło i gorąco. Celem pracy była ocena plastyczności stali Orvar Supreme w podwyższonej temperaturze pod kątem możliwości wykonania wykroju w matrycy z tej stali metodą wgłębiania na gorąco. Na wytoczonych próbkach typu Rastigajewa zrealizowano próby ściskania przy temperaturach od 800°C do 1040°C. W celu zminimalizowania wpływu tarcia pomiędzy próbką a kowadłami zastosowano specjalną mieszaninę proszków PbO + 5% B₂O₃. Badania przeprowadzono ze stałą prędkością ruchu trawersy maszyny wytrzymałościowej (30 mm/min) do wartości odkształcenia logarytmicznego ok. $\epsilon = 0,6$. W efekcie wykazano istnienie minimum oporu plastycznego przy temperaturze 840°C. Badania za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego pozwoliły określić mikrostrukturę stali, którą tworzył ferryt przy temperaturze 840°C oraz martenzyt w przypadku próbek ścisanych przy temperaturze 1040°C. Wykonano pomiary twardości na przekrojach próbek po ścisaniu oraz próbek poddanych wgłębianiu na gorąco. Na podstawie otrzymanych wyników badań stwierdzono, że możliwe jest wykonanie matryc kuźniczych o wymaganej twardości metodą wgłębiania na gorąco, także z bezpośrednim hartowaniem w oleju po wgłębianiu.

Słowa kluczowe: naprężenie uplastyczniające, opór plastyczny, spękanie kuźnicze, wgłębianie, pomiary twardości HV 1

Article info

Received: 7.07.2017

Reviewed: 7.08.2017

Accepted: 29.09.2017

Authors' contribution

- (1) Concept, assumptions and methodology, compression tests with determination of hardening curves, test results
- (2) Coauthor of concept, assumptions and methodology, metallographic studies, test results

Abstract

Determined rheological properties of the tested material, in the form of stress-strain curves, are a rich source of information about processes arising from the mechanism of plastic deformation, hardening processes, as well as thermally activated phenomena such as recovery and dynamic recrystallization. The knowledge stemming from proper interpretation of flow curves is the basis for optimal design of warm and hot metal forming processes. The goal of this study was to assess the plasticity of Orvar Supreme steel at elevated temperature from the perspective of the possibility of making an impression in a die made from this steel using the hot hobbing method. Compression tests were conducted on rolled Rastigaiev samples at temperatures from 800°C to 1040°C. In order to minimize the influence of friction between the sample and anvils, a special mixture of powders, PbO + 5% B₂O₃, was applied. Tests were conducted at a constant speed of the testing machine's crosshead (30 mm/min), up to a logarithmic strain value of approx. $\epsilon = 0.6$. In consequence, minimum plastic resistance was demon-

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 61 657 05 55; fax: +48 61 657 07 21; e-mail: grzegorz.placzek@inop.poznan.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 61 657 05 55; fax: +48 61 657 07 21; e-mail: grzegorz.placzek@inop.poznan.pl

strated at 840°C. Scanning electron microscope examinations allowed for identification of the steel's microstructure, which formed ferrite at 840°C, and martensite in the case of samples compressed at 1040°C. Hardness measurements were performed on cross-sections of samples after compression and of hot-hobbed samples. Based on obtained test results, it was determined that it is possible to produce forging dies of the required hardness by hot hobbing, including with direct quenching in oil after hobbing.

Keywords: yield strength, plastic resistance, upset forging, hobbing, hardness tests HV 1

1. WSTĘP

Obróbką plastyczną w podwyższonej temperaturze nazywa się operację kształtowania, w której materiał wyjściowy podgrzewany jest przed odkształceniem, a warunki procesu prowadzą do pewnego umocnienia kształtowanego materiału. Wykorzystywanie technik komputerowych do analizy procesów przeróbki plastycznej stwarza zapotrzebowanie na charakterystyki opisujące zachowanie się odkształcanego plastycznie materiału [1–3]. W próbach ściskania można określić zarówno podstawowe wskaźniki właściwości mechanicznych (wytrzymałość na ściskanie, granicę plastyczności, skrócenie względne), jak i uzyskać krzywe zależności naprężenia uplastyczniającego (naprężenie wymagane do zainicjowania i kontynuowania plastycznego odkształcenia materiału) od odkształcenia [4–7]. Próby ściskania można prowadzić w temperaturach podwyższonych przy zastosowaniu urządzeń grzewczych mocowanych bezpośrednio na maszynie wytrzymałościowej lub przy użyciu specjalnych termosów [7 i 8]. Na podstawie zależności naprężenia uplastyczniającego od temperatury ściskania badanej stali można określić temperaturę, w której występuje najmniejszy opór plastyczny. Spęczanie stali przy temperaturze obniżonego oporu plastycznego zapewnia otrzymanie wyrobu bez wad zewnętrznych, szczególnie pęknięć [9]. W publikacji poddano próbie ściskania stal Orvar Supreme w zakresie temperatury od 800°C do 1040°C, który obejmował zarówno zakres temperatury początku i końca przemiany eutektoidalnej A_{c1} , jak i temperatury hartowania tej stali. Następnie przeprowadzono próby wgłębiania, przy temperaturach obniżonego oporu plastycznego, w celu ukształtowania wykroju matrycy kuźniczej. Próby wgłębiania na gorąco prowadzono w przyrządzie zaprojektowanym w Instytucie Obróbki Plastycz-

1. INTRODUCTION

Forming processes at elevated temperature applies to forming operations in which the starting material is heated prior to deformation, and process conditions lead to a certain hardening of the material being formed. The application of computer techniques for analysis of forming processes creates a need for characteristics describing the behavior of the material being subjected to plastic deformation [1–3]. Both basic indicators of mechanical properties (compressive strength, yield point, unit shortening) and flow stress (stress required to initiate and continue plastic deformation of the material) – strain curves can be determined in compression tests [4–7]. Compression tests can be performed at elevated temperatures with the use of heating devices fastened directly on the testing machine, or special thermoses [7 and 8]. Based on the dependency of flow stress and compression temperature of the tested steel, the temperature of the lowest plastic resistance can be determined. Upset forging of steel at a temperature of reduced plastic resistance guarantees a product without exterior defects, particularly cracks [9]. In the publication, Orvar Supreme steel was compression tested within the temperature range from 800°C to 1040°C, which covered both the range between the beginning and end of eutectoid transformation A_{c1} , and the hardening temperature of this steel. Next, hobbing tests were performed at temperatures of reduced plastic resistance in order to form the forging die's impression. Hot hobbing tests were performed in a machine designed at the Metal Forming Institute [10]. Swedish Orvar Supreme steel (counterpart of WCLV and AISI H13 steel) was selected for the dies. Orvar

nej [10]. Na matryce wybrano stal szwedzką Orvar Supreme (odpowiednik stali WCLV i AISI H13). Stal Orvar Supreme posiada dużą odporność na odpuszczające działanie wysokiej temperatury, zużycie ściernie oraz zmęczenie cieplno-mechaniczne. Dzięki tym właściwościom stal ta znalazła szerokie zastosowanie jako materiał na narzędzia wielokrotnie podgrzewane do wysokiej temperatury i obciążane mechanicznie podczas eksploatacji (np. narzędzia do walcowania, wyciskania, kucia na gorąco oraz na formy odlewnicze [11–14]). Za dużą wytrzymałość stali odpowiedzialny jest martenzyt i węgliki. Głównymi wydzieleniami pojawiającymi się podczas odpuszczania stali Orvar Supreme są węgliki MC (bogate w wanad), M_6C (bogate w molibden) oraz $M_{23}C_6$ (bogate w chrom). Przede wszystkim węgliki MC i M_6C , ze względu na swoją morfologię (wydzielenia mniejsze, o bardziej regularnych kształtach niż wydzielenia węglików $M_{23}C_6$), odpowiadają za umocnienie wydzieleniowe stali [15]. Narzędzia ze stali Orvar Supreme mogą być stosowane przy nieco większych twardościach (od 1 do 2 HRC), bez utraty ciągliwości [16].

Celem badań było określenie, na podstawie krzywych umocnienia, temperatury obniżonego oporu plastycznego stali Orvar Supreme; optymalnej temperatury wglębiania w pobliżu przemiany α - γ . W niniejszej publikacji przedstawiono ponadto wyniki badań struktury i rozkładów twardości Vickersa na matrycach poddanych wglębianiu na gorąco przy temperaturze 850°C i 1050°C, chłodzonych w oleju po wglębianiu.

2. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Badaniom poddano stal narzędziową do pracy na gorąco Orvar Supreme o składzie chemicznym podanym w tab. 1.

Supreme steel has high resistance to the tempering action of high temperature, abrasive wear and thermomechanical fatigue. Thanks to these properties, this steel has found broad applications as a material for tools heated to high temperatures multiple times and mechanically loaded during operation (e.g. tools for rolling, extrusion, hot forging and for casting molds [11–14]). Martensite and carbides are responsible for the steel's high strength. The primary precipitates appearing during tempering of Orvar Supreme steel are MC carbides (vanadium-rich), M_6C (molybdenum-rich) and $M_{23}C_6$ (chromium-rich). Due to their morphology (smaller precipitates, with more regular shapes than $M_{23}C_6$ carbide precipitates), MC and M_6C carbides are responsible for the steel's precipitation hardening, above all [15]. Tools made from Orvar Supreme steel can be applied at slightly higher hardnesses (from 1 to 2 HRC) without loss of ductility [16].

The goal of tests was to determine, on the basis of hardening curves, the temperature of reduced plastic resistance of Orvar Supreme steel; the optimal hobbing temperature near the α - γ transformation. Moreover, this article presents the results of structure test results and Vickers hardness distributions on dies subjected to hot hobbing at 850°C and 1050°C; cooled in oil after hobbing.

2. RESEARCH MATERIAL AND METHODOLOGY

Orvar Supreme hot-work tool steel was tested, with the chemical composition given in Tab. 1.

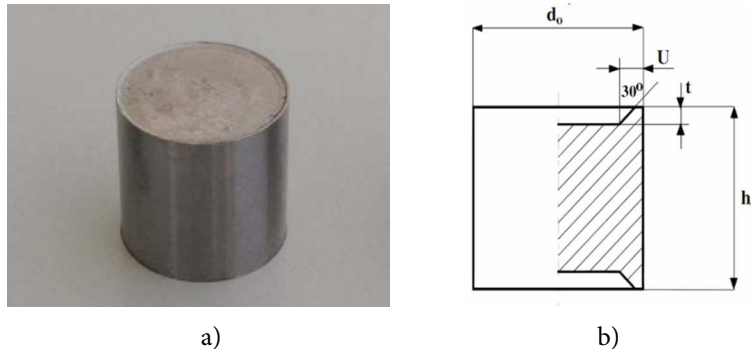
Tab. 1. Skład chemiczny stali Orvar Supreme

Tab. 1. Chemical composition of Orvar Supreme steel

Orvar Supreme	Zawartość pierwiastka, % wag. / Element content, % wt.				
	C	Mn	Si	P	S
	0,428	0,421	1,06	0,0119	0,0035
	Cr	Ni	Mo	V	Cu
	5,33	0,119	1,48	1,0	0,0717

2.1. Wyznaczanie krzywych umocnienia

Materiał wyjściowy dostarczono w postaci pręta o średnicy $\phi 40$ mm, z którego wykonano próbki walcowe typu Rastigajewa, z czołowymi wytoczeniami o wymiarach $d_o = h_o = 14$ mm, $t = 0,2$ mm. Zdjęcie oraz rysunek próbki zamieszczono na rys. 1



Rys. 1. Zdjęcie (a) oraz rysunek (b) próbki Rastigajewa

Fig. 1. Photograph (a) and drawing (b) of Rastigaiev sample

Próbkę ściskania przeprowadzono za pomocą maszyny wytrzymałościowej ZD-100 (WPM). Próbki nagrzewano do wymaganej temperatury w piecu laboratoryjnym w specjalnych termosach wyposażonych w kowadła. Przed umieszczeniem próbek w rozgrzanym termosie smarowano ich powierzchnie czołowe mieszaniną $PbO + 5\% B_2O_3$. Próbkę ściskania prowadzono do wartości odkształcenia wynoszącego ok. $\epsilon = 0,6$; z prędkością ruchu trawersy maszyny wytrzymałościowej 30 mm/min przy temperaturach wynoszących: 800, 840, 880, 920, 960, 1000 i 1040°C. Początkowa prędkość odkształcenia wynosiła $0,037 \text{ s}^{-1}$, a końcowa $0,073 \text{ s}^{-1}$.

2.2. Obserwacje mikroskopowe – skaningowy mikroskop elektronowy (SEM)

Badania te wykonano zgodnie z instrukcją badawczą Z-IB/3-08 – *Badania morfologii powierzchni tworzyw metalicznych i niemetalicznych, wydanie II, data wydania 18.11.2013*, za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego Inspect S (FEI). W badaniach stosowano: napięcie 25 kV, detektor elektronów wtórnych (SE) oraz powiększenia obrazu 5000x i 10000x.

2.1. Determination of hardening curves

The starting material was supplied in the form of a rod $\phi 40$ mm in diameter, from which cylindrical Rastigaiev samples were made, with face openings with dimensions $d_o = h_o = 14$ mm, $t = 0.2$ mm. A photograph and drawing of the sample is given in Fig. 1.

The compression test was performed using a ZD-100 (WPM) testing machines. Samples were heated to the required temperature in a laboratory furnace in special thermoses equipped with anvils. Before samples were placed in a hot thermos, their face surfaces were lubricated with a $PbO + 5\% B_2O_3$ mixture. The compression test was performed up to a strain value equal to approx. $\epsilon = 0.6$; at a crosshead advance of the testing machine equal to 30 mm/min at temperatures: 800, 840, 880, 920, 960, 1000 and 1040°C. The initial strain rate was 0.037 s^{-1} , and the final strain rate was 0.073 s^{-1} .

2.2. Examinations under microscope – scanning electron microscope (SEM)

These examinations were conducted in accordance with test instructions Z-IB/3-08 – *Tests of the surface morphology of metallic and non-metallic materials, edition II, date published 18.11.2013*, using an Inspect S (FEI) scanning electron microscope. The following settings were applied in tests: 25 kV voltage, secondary electron (SE) detector and 5000x and 10000x image magnifications.

2.3. Pomiary twardości metodą Vickersa

Pomiary twardości metodą Vickersa wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1:2007 – *Metale -- Pomiar twardości sposobem Vickersa -- Część 1: Metoda badań*, przy sile obciążającej 9,807 N, za pomocą twardościomierza FM-800 (Future Tech. Corp.), na przekrojach wzdłużnych próbek poddanych ścisnaniu oraz próbek poddanych wgłębianiu na gorąco.

2.3. Vickers hardness measurements

Vickers hardness measurements were performed according to standard PN-EN ISO 6507-1:2007 *Metallic materials – Vickers hardness test – Part 1: Test method*, at a loading force of 9.807 N using an FM-800 hardness tester (Future Tech. Corp.) on longitudinal sections of samples subjected to compression and samples subjected to hot hobbing.

3. WYNIKI BADAŃ

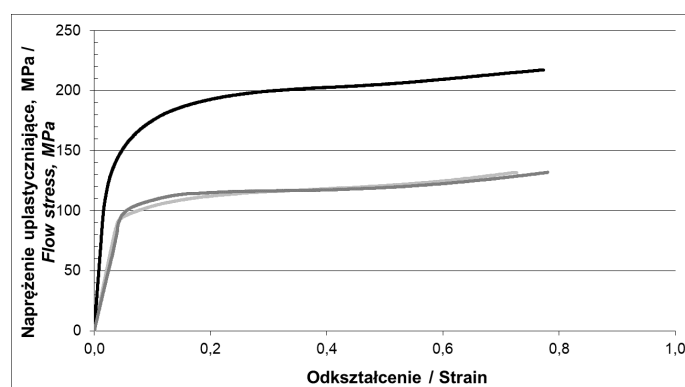
3. TEST RESULTS

3.1. Wyznaczanie krzywych umocnienia

Na rys. 2 zamieszczono przykładowe krzywe zależności naprężenia uplastyczniającego od odkształcenia logarytmicznego ϵ .

3.1. Determination of hardening curves

Fig. 2 contains examples of flow stress – logarithmic strain ϵ curves.

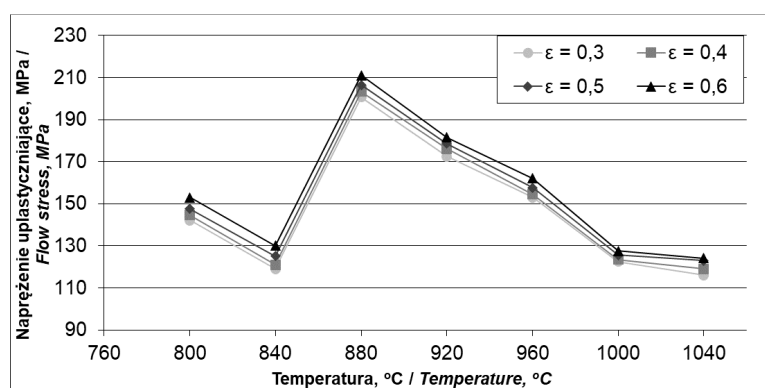


Rys. 2. Przykładowe krzywe zależności naprężenia uplastyczniającego od odkształcenia dla stali Orvar Supreme; temperatura od 840°C do 1040°C

Fig. 2. Examples of flow stress – strain curves for Orvar Supreme steel; temperature from 840°C to 1040°C

Zależności naprężenia uplastyczniającego od temperatury odkształcenia przedstawiono na rys. 3.

Dependencies of flow stress to deformation temperature are presented in Fig. 3.



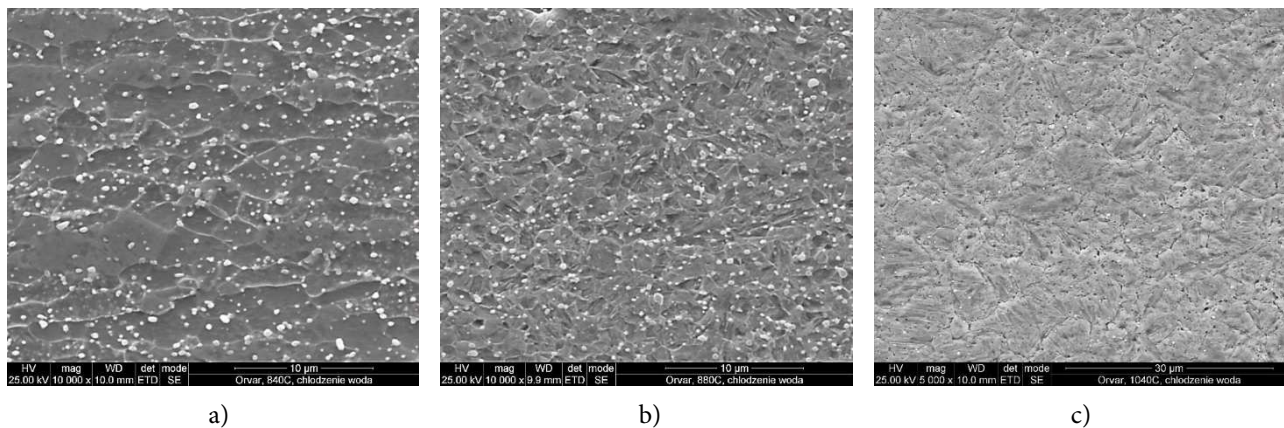
Rys. 3. Wpływ temperatury na naprężenie uplastyczniające dla różnych odkształceń ϵ stali Orvar Supreme

Fig. 3. Influence of temperature on flow stress at various strains ϵ of Orvar Supreme steel

Na podstawie rys. 3 stwierdzono, że w stali narzędziowej do pracy na gorąco Orvar Supreme występuje minimum oporu plastycznego, które zaobserwowano w temperaturze 840°C. Po przekroczeniu tej temperatury następuje wzrost naprężenia uplastyczniającego, a powyżej temperatury 880°C ciągły spadek naprężenia do temperatury 1040°C; proporcjonalny do temperatury 1000°C.

3.2. Obserwacje mikroskopowe próbek poddanych ścisnaniu – SEM

Wyniki obserwacji struktury próbek poddanych ścisnaniu przy temperaturze 840°C, 880°C i 1040°C pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Mikrostruktura na przekrojach wzdłużnych próbek ze stali Orvar Supreme; SEM: temperatura ścisnania a – 840°C, powiększenie 2600x, b – 880°C, powiększenie 2600x, c – 1040°C, powiększenie 1300x

Fig. 4. Microstructure on longitudinal sections of Orvar Supreme steel samples; SEM: compression temperature a – 840°C, magnification 2600x, b – 880°C, magnification 2600x, c – 1040°C, magnification 1300x

Po próbie ścisnania próbki ze stali Orvar Supreme przy temperaturze 840°C zaobserwowano drobne zrekrytalizowane i częściowo zrekrytalizowane ziarna w strefie środkowej próbki (rys. 4a). Chłodzenie w wodzie próbek, które poddano próbie ścisnania przy temperaturze wyższej od 880°C spowodowało ich utwardzenie. W mikrostrukturze tej próbki widoczne są drobne iglaste wydzielenia bainitu oraz węgliki stopowe, które nie uległy rozpuszczeniu w osnowie podczas wygrzewania (rys. 4b). Mikrostrukturę próbki po ścisnaniu przy temperaturze 1040°C i chłodzeniu w wodzie tworzył martenzyt (rys. 4c). W mikrostrukturze tej próbki widoczne są granice ziaren byłego austenitu oraz węgliki stopowe, które nie uległy rozpuszczeniu w austenicie podczas wygrzewania.

Based on Fig. 3, it was determined that a minimum of plastic resistance exists for Orvar Supreme hot-work tool steel at a temperature of 840°C. After this temperature is exceeded, there is an increase in flow stress, and above 880°C, a constant decrease in stress up to 1040°C; proportionally up to 1000°C.

3.2. Examinations under microscope of compressed samples –SEM

The results of examinations of the structure of specimens compressed at temperatures 840°C, 880°C and 1040°C are shown in Fig. 4.

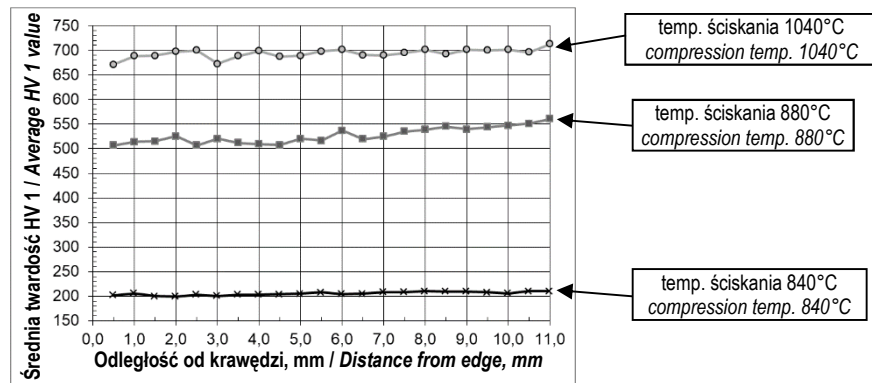
After compression of the Orvar Supreme steel sample at 840°C, fine recrystallization was observed, along with partially recrystallized grains in the sample's central area (Fig. 4a). Water-cooling of samples compressed at temperatures higher than 880°C caused them to harden. Fine, aciform bainite precipitates and alloy carbides, undissolved in the matrix during austenitizing, are visible in the microstructure (Fig. 4b). Martensite made up the sample's microstructure after compression at 1040°C and water-cooling (Fig. 4c). Grain boundaries of former austenite and alloy carbides not dissolved in austenite during soaking are visible in this sample's microstructure.

3.3. Pomiary twardości metodą Vickersa próbek poddanych ścisnaniu

Wyniki badań średniej twardości wybranych próbek po próbie ścisnania pokazano na rys. 5.

3.3. Vickers hardness measurements of compressed samples

Average hardness test results of selected samples after the compression test are shown in Fig. 5.



Rys. 5. Profile twardości HV 1 próbek ze stali Orvar Supreme; temperatura ścisnania: 840°C, 880°C i 1040°C

Fig. 5. HV1 hardness profiles of Orvar Supreme steel samples; compression temperature: 840°C, 880°C and 1040°C

Na podstawie wyników przedstawionych na rys. 5 stwierdzono, że próbka ze stali Orvar Supreme poddana ścisnaniu przy temperaturze 840°C nie ulega umocnieniu, a jej średnia twardość zmieniała się od 200 do 211 HV 1. W wyniku chłodzenia w wodzie próbek po ścisnaniu przy temperaturze 880°C nastąpiło ich utwardzenie do największej średniej twardości wynoszącej 561 HV 1. Próbki spęcone przy temperaturze 1040°C i chłodzone w wodzie uległy zahartowaniu do największej średniej twardości wynoszącej 713 HV 1.

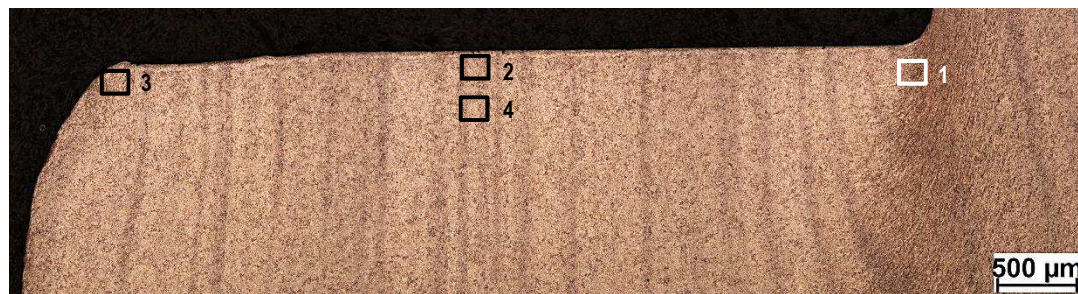
Based on the results presented in Fig. 5, it was determined that the Orvar Supreme steel sample did not harden when compressed at 840°C, and its mean hardness changed from 200 to 211 HV 1. As a result of water-cooling of samples after compression at 880°C, they were hardened to a maximum mean hardness equal to 561 HV 1. Samples upset forged at 1040°C and cooled in water were quenched to a maximum mean hardness of 713 HV 1.

3.4. Obserwacje mikroskopowe próbek poddanych próbie wgłębiania – SEM

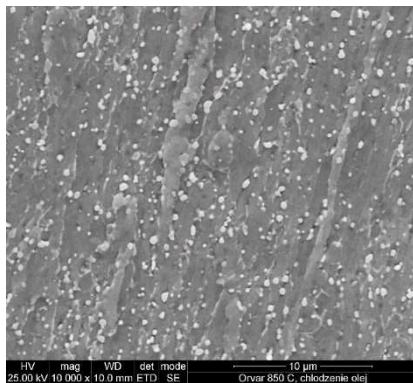
Badania wykonano na próbkach metalograficznych pobranych z matryc o wymiarach $\phi 64 \times 35$ mm z otworem $\phi 14$ mm, które podgrzewano do temperatury $850 \pm 10^\circ\text{C}$ oraz $1050 \pm 10^\circ\text{C}$ i poddano próbie wgłębiania, a następnie chłodzono w oleju. Próbę wgłębiania przy temperaturze 1050°C prowadzono ze stemplem podgrzanym do temperatury 300°C . Średnica stempla wynosiła 25,8 mm, a głębokość wgłębiania ok. 6 mm. Wyniki obserwacji struktury pokazano na rys. 6 i 7. W celu pokazania miejsca obserwacji SEM wykonano zdjęcie przekroju próbki za pomocą mikroskopu świetlnego (LM) – rys. 6a i 7a.

3.4. Examinations under microscope of samples subjected to the hobbing test –SEM

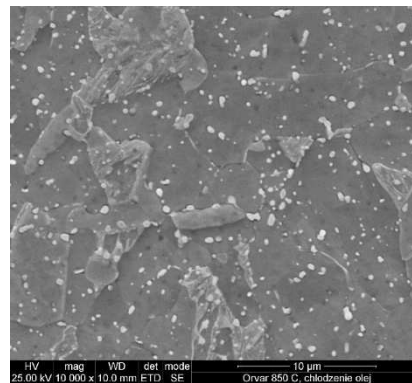
Examinations were conducted on metallographic samples collected from dies with dimensions $\phi 64 \times 35$ mm, with a $\phi 14$ mm hole, which were heated to a temperature of $850 \pm 10^\circ\text{C}$ and $1050 \pm 10^\circ\text{C}$, and subjected to the hobbing test, then cooled in oil. The hobbing test at 1050°C was performed with a punch heated to 300°C . Punch diameter was 25.8 mm and hobbing depth approx. 6 mm. The results of structural examinations are shown in Fig. 6 and 7. To show the point of SEM observation, a photograph of the sample's cross-section was taken by LM – Fig. 6a and 7a.



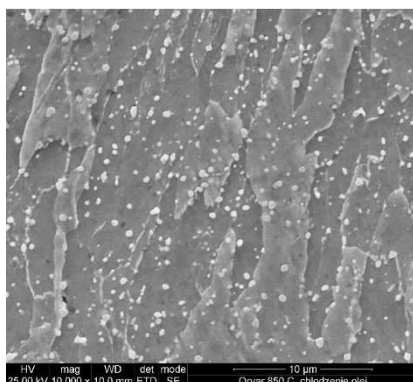
a)



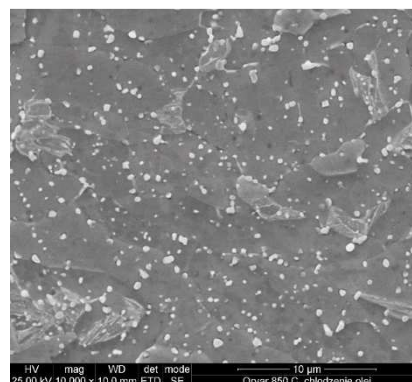
b)



c)



d)



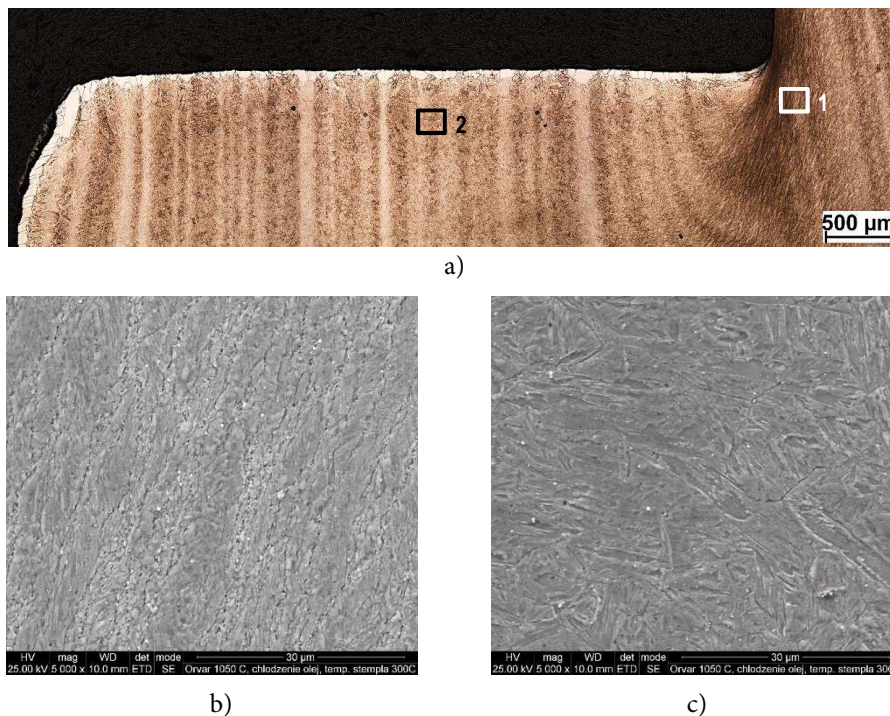
e)

Rys. 6. Mikrostruktura na przekroju próbki metalograficznej pobranej z matrycy ze stali Orvar Supreme po wglębieniu; temperatura wglębienia 850°C, chłodzenie w oleju; LM: a – przekrój wzdłużny z zaznaczonymi obszarami badań, SEM: b – obszar 1 przy promieniu otworu $\phi 25,4$ mm, c – obszar 2 w okolicy środka w odległości 0,1 mm od powierzchni, d – obszar 3 przy promieniu otworu $\phi 14$ mm, e – obszar 4 w okolicy środka w odległości 0,5 mm od powierzchni; powiększenie 2600x

Fig. 6. Microstructure on the cross-section of the metallographic specimen acquired from an Orvar Supreme steel die after hobbing; hobbing temperature 850°C, cooling in oil; LM: a – longitudinal section with marked test areas, SEM: b – area 1 for $\phi 25,4$ mm hole radius, c – area 2 near center at a distance of 0.1 mm from the surface, d – area 3 with $\phi 14$ mm hole radius, e – area 4 near center at a distance of 0.5 mm from the surface; magnification 2600x

W mikrostrukturze próbki wglębianej przy temperaturze 840°C widoczne są ziarna ferrytu, węgliki stopowe i wyspowe wydzielania bainitu (rys. 6c i 6e). Wydłużone ziarna ferrytu zaobserwowano w okolicach promieni otworów $\phi 25,4$ mm oraz $\phi 14$ mm.

Grains of ferrite, alloy carbides and islands of bainite precipitates are visible in the microstructure of a sample hobbled at 840°C (Fig. 6c and 6e). Elongated ferrite grains were observed near hole radii $\phi 25.4$ mm and $\phi 14$ mm.



Rys. 7. Mikrostruktura na przekroju próbki metalograficznej pobranej z matrycy ze stali Orvar Supreme po wglębianiu; temperatura wglębiania 1050°C, chłodzenie w oleju; LM: a – przekrój wzdłużny z zaznaczonymi obszarami badań, SEM: b – obszar 1 przy promieniu otworu $\phi 25,6$ mm, c – obszar 2 w okolicy środka w odległości 0,5 mm od powierzchni; powiększenie 1300x

Fig. 7. Microstructure on the cross-section of the metallographic specimen acquired from an Orvar Supreme steel die after hobbing; hobbing temperature 1050°C, cooling in oil; LM: a – longitudinal section with marked test areas, SEM: b – area 1 for $\phi 25.6$ mm hole radius, c – area 2 near center at a distance of 0.5 mm from the surface; magnification 1300x

W okolicy promienia otworu $\phi 25,4$ mm zaobserwowano wydłużone, silnie odkształcone plastycznie ziarna byłego austenitu oraz węgliki stopowe, które nie uległy rozpuszczeniu w austenicie wskutek wygrzewania przy temperaturze 1050°C (rys. 7b). W odległości 0,5 mm od powierzchni próbki, poza strefą odwęgloną, występuje martenzyt oraz węgliki stopowe. Widoczne są też granice ziaren byłego austenitu (rys. 7c).

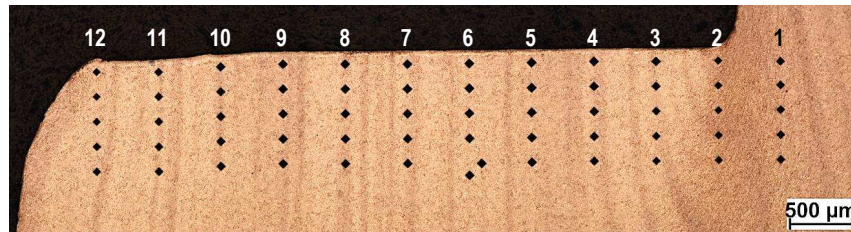
3.5. Badania rozkładów twardości na przekrojach próbek po wglębianiu na gorąco

Pomiary twardości metodą Vickersa HV 1 na próbkach poddanych próbom wglębiania na gorąco wykonano po przeprowadzeniu obserwacji mikrostruktury. Pomiary prowadzono w odległości 0,1 mm od powierzchni próbki do głębokości 0,9 mm. Odległość między poszczególnymi rozkładami twardości HV 1 wynosiła ok. 0,5 mm. Wyniki badań rozkładów twardości na przekrojach próbek metalograficznych pokazano na rys. 8 i 9.

Elongated grains of former austenite, subjected to strong plastic deformation, as well as alloy carbides that were not dissolved in austenite as a result of soaking at a temperature of 1050°C are visible near the radius of a $\phi 25.4$ mm hole (Fig. 7b). Martensite and alloy carbides are present at a distance of 0.5 mm from the sample's surface, outside of the decarbonized zone. The grains of former austenite are also visible (Fig. 7c).

3.5. Hardness distribution tests on cross-sections of hot-hobbed samples

Vickers HV 1 hardness measurements were performed on samples subjected to hot hobbing tests after microstructural examinations were complete. Measurements were performed at a distance of 0.1 mm from the sample's surface up to a depth of 0.9 mm. The distance between individual HV 1 hardness distributions amounted to approx. 0.5 mm. The results of hardness distribution tests on cross-sections of metallographic specimens are given in Fig. 8 and 9.

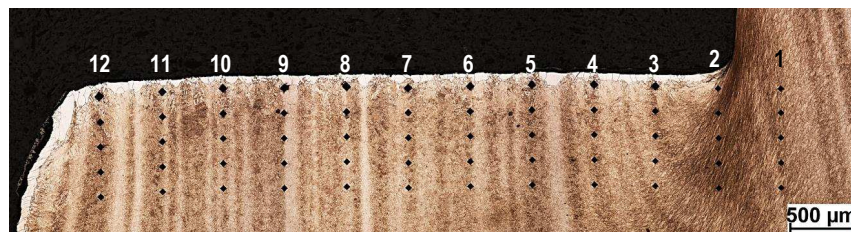


a) przekrój wzdłużny z zaznaczonymi miejscami rozkładów twardości HV 1
 a) longitudinal section with marked points of HV 1 hardness distributions

Odległość od powierzchni, mm Distance from surface, mm	Twardość HV 1 / HV 1 hardness											
	Numer rozkładu twardości HV 1 / Number of HV 1 hardness distribution											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,1	280	314	254	244	236	237	246	249	259	262	291	337
0,3	283	317	262	247	232	231	237	249	265	272	287	343
0,5	281	315	276	249	236	228	237	248	261	265	285	328
0,7	280	311	289	253	240	231	246	257	258	266	285	314
0,9	272	309	293	256	240	236	246	247	257	265	285	304

b) tabela z wynikami pomiarów twardości HV 1
 b) table with HV 1 hardness measurement results

Rys. 8. Rozkłady twardości HV 1 na przekroju próbki metalograficznej pobranej z matrycy ze stali Orvar Supreme po wglębieniu; temperatura wglębienia 850°C, chłodzenie w oleju
 Fig. 8. HV1 hardness distributions on the cross-section of the metallographic specimen acquired from a die made of Orvar Supreme steel after hobbing; hobbing temperature 850°C, cooling in oil



a) przekrój wzdłużny z zaznaczonymi miejscami rozkładów twardości HV 1
 a) longitudinal section with marked points of HV 1 hardness distributions

Odległość od powierzchni, mm Distance from surface, mm	Twardość HV 1 / HV 1 hardness											
	Numer rozkładu twardości HV 1 / Number of HV 1 hardness distribution											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,1	672	645	401	385	371	377	403	356	367	368	386	332
0,3	664	700	550	531	516	518	524	525	532	493	510	491
0,5	662	682	631	600	587	600	587	600	604	586	583	553
0,7	669	682	672	637	624	634	637	633	635	620	617	591
0,9	665	676	680	652	641	650	665	639	645	635	636	607

b) tabela z wynikami pomiarów twardości HV 1
 b) table with HV 1 hardness measurement results

Rys. 9. Rozkłady twardości HV 1 na przekroju próbki metalograficznej pobranej z matrycy ze stali Orvar Supreme po wglębieniu; temperatura wglębienia 1050°C, chłodzenie w oleju; temperatura stempla 300°C
 Fig. 9. HV1 hardness distributions on the cross-section of the metallographic specimen acquired from a die made of Orvar Supreme steel after hobbing; hobbing temperature 1050°C, cooling in oil; punch temperature 300°C

Średnia twardość próbki ze stali Orvar Supreme poddanej wgłębianiu przy temperaturze 850°C i chłodzonej w oleju wyniosła 268 HV 1 (rys. 8). Uzyskanie twardości odpowiedniej dla matryc kuźniczych ze stali Orvar Supreme po kształtowaniu wykroju matrycy metodą wgłębiania w tych warunkach wymagałoby przeprowadzenia dodatkowych zabiegów hartowania i odpuszczania. Natomiast średnia twardość próbki po wgłębianiu przy temperaturze 1050°C i chłodzeniu w oleju wynosiła poniżej strefy odwęglonej o grubości ok. 0,3 mm, 631 HV 1 (ok. 57 HRC) i jest odpowiednia dla zahartowanych matryc do kucia na gorąco (rys. 9).

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie wyników próby ściskania w podwyższonych temperaturach stali Orvar Supreme oraz obserwacji mikrostrukturalnych stwierdzono, że:

1. w stali Orvar Supreme występuje minimum oporu plastycznego w okolicy temperatury 840°C;
2. przyczyną pojawienia się minimum oporu plastycznego są najprawdopodobniej zachodzące w okolicy tej temperatury procesy odbudowy struktury takie, jak zdrowienie dynamiczne i rekrytalizacja dynamiczna, których skutki potwierdzono w badaniach struktury na SEM (obecność tych zjawisk w temperaturze minimum oporu plastycznego dowodzą publikacje [4–6]);
3. chłodzenie w wodzie lub w oleju stali Orvar Supreme z temperatury 1040°C lub 1050°C spowodowało największe utwardzenie stali;
4. próbki spęczane w podwyższonej temperaturze i chłodzone w wodzie charakteryzowały się jednorodną twardością w całym przekroju;
5. możliwe jest prowadzenie technologicznych prób kształtowania wykroju w matrycy kuźniczej w temperaturze minimum oporu plastycznego, przy temperaturze 840°C metodą wgłębiania. Niemniej w celu zapewnienia odpowiedniej twardości narzędzia wymagane jest przeprowadzenie ulepszenia cieplnego po wgłębianiu. Podwyższenie temperatury wgłębiania

The mean hardness of an Orvar Supreme steel sample subjected to hobbing at 850°C and cooled in oil amounted to 268 HV 1 (Fig. 8). Obtaining hardness appropriate for forging dies made from Orvar Supreme steel after forming of the die impression by hobbing under these conditions would require additional quenching and tempering operations. The mean sample hardness after hobbing at 1050°C and cooling in oil amounted to 631 HV 1 (approx. 57 HRC) below the decarbonized zone, which had a thickness of approx. 0.3 mm, and is appropriate for quenched hot forging dies (Fig. 9).

4. CONCLUSIONS

Based on the results of the compression test of Orvar Supreme steel at elevated temperatures and microstructural observations, the following were determined:

1. *a minimum of plastic resistance of around 840°C exists in Orvar Supreme steel;*
2. *this plastic resistance minimum is most probably due to the structural recovery processes occurring around this temperature, such as dynamic recovery and dynamic recrystallization, the effects of which were confirmed in structural examinations under SEM (the presence of these phenomena at the temperature of minimum plastic resistance is demonstrated in publications [4–6]).*
3. *water- or oil-cooling of Orvar Supreme steel from 1040°C or 1050°C resulted in the greatest hardening;*
4. *samples upset forged at elevated temperature and cooled in water were characterized by uniform hardness throughout their entire cross-section.*
5. *it is possible to conduct technological trials of forming an impression in a forging die at minimum plastic resistance temperature, 840°C, by hot hobbing. Nevertheless, in order to ensure proper tool hardness, heat treatment is required after hobbing. Increasing hobbing temperature to the austenitization temperature range, as recommended by the manufac-*

do zakresu temperatury austenitowania, którą zaleca producent stali Orvar Supreme oraz bezpośrednio chłodzenie matrycy w oleju po wglębieniu pozwoliło uzyskać średnią twardość ok. 57 HRC odpowiednią dla zahartowanych narzędzi do pracy na gorąco.

PODZIĘKOWANIA

Badania zrealizowano w ramach pracy statutowej BB.901.0055 pt. „Badania nad technologią wytwarzania matryc kuźniczych metodą wglębienia na gorąco”.

LITERATURA

- [1] Hadasik E. 2006. *Przetwórstwo metali. Plastyczność a struktura*. Gliwice: Wyd. Politechniki Śląskiej.
- [2] Hadasik E., Z. Pater. 2013. *Obróbka plastyczna. Podstawy teoretyczne*. Gliwice: Wyd. Politechniki Śląskiej.
- [3] Lin Y.C., X. Yu-Chi, C. Xiao-Min, Ch. Ming-Song. 2010. „Constitutive descriptions for hot compressed 2124-T851 aluminum alloy over a wide range of temperature and strain rate”. *Computational Materials Science* 50: 227–233.
- [4] Norma PN-H-04320:1957 – Próba statyczna ściskania metali.
- [5] Barbacki A., J. Samolczyk. 2005. „Charakterystyka stanu strukturalnego stali niskowęglowej poddanej odkształceniu w zakresie minimum oporu plastycznego”. *Obróbka Plastyczna Metali XVI* (5): 17–22.
- [6] Samolczyk J., A. Barbacki. 2005. „Wpływ zawartości węgla na naprężenie uplastyczniające i mikrostrukturę niestopowych stali odkształczanych na ciepło”. *Obróbka Plastyczna Metali XVI* (2): 5–14.
- [7] Samolczyk J. 1998. „Wyznaczanie krzywych umocnienia metodą spęczania próbek z czołowymi wytoczeniami”. Praca BM 901 01 0004 INOP, Poznań.
- [8] Dobrzański L.A., R. Nowosielski. 1987. *Badania własności fizycznych*. Warszawa: Wyd. Naukowo-Techniczne.
- [9] Sypniewski R. 1978. *Technologia obróbki plastycznej na gorąco*. Warszawa: Wyd. Politechniki Warszawskiej.
- [10] Pachutko B., S. Szkudelski, B. Czartoryski, M. Chruściński, W. Gronowski. 2017. „Badania nad kształtowaniem wykroju matrycy do kucia zaczepu budowlanego metodą wglębienia na gorąco”. *Obróbka Plastyczna Metali XXVIII* (2): 133–146.
- [11] Doherty R.D., D.A. Hughes, F.J. Humphreys, J.J. Jonas, D. Juul Jensen, M.E. Kassner, W.E. King, T.R. McNelley, H.J. McQueen, A.D. Rollett. 1997.

turer of Orvar Supreme steel, and direct oil-cooling of the die after hobbing made it possible to obtain a mean hardness of approx. 57 HRC, which is appropriate for quenched hot-work tools.

ACKNOWLEDGEMENTS

Research was carried out within the framework of statutory work BB 901.0055 titled “Research of production technology for forging dies using the hot hobbing method”.

REFERENCES

- [1] Hadasik E. 2006. *Przetwórstwo metali. Plastyczność a struktura*. Gliwice: Wyd. Politechniki Śląskiej.
- [2] Hadasik E., Z. Pater. 2013. *Obróbka plastyczna. Podstawy teoretyczne*. Gliwice: Wyd. Politechniki Śląskiej.
- [3] Lin Y.C., X. Yu-Chi, C. Xiao-Min, Ch. Ming-Song. 2010. “Constitutive descriptions for hot compressed 2124-T851 aluminum alloy over a wide range of temperature and strain rate”. *Computational Materials Science* 50: 227–233.
- [4] Norma PN-H-04320:1957 – Próba statyczna ściskania metali.
- [5] Barbacki A., J. Samolczyk. 2005. “Microstructure characterization of the low carbon steel deformed in the range of deformation resistance minimum”. *Obróbka Plastyczna Metali XVI* (5): 17–22.
- [6] Samolczyk J., A. Barbacki. 2005. “Influence of carbon content on plasticity stress and microstructure of warm deformed non-alloyed steels”. *Obróbka Plastyczna Metali XVI* (2): 5–14.
- [7] Samolczyk J. 1998. “Wyznaczanie krzywych umocnienia metodą spęczania próbek z czołowymi wytoczeniami”. Praca BM 901 01 0004 INOP, Poznań.
- [8] Dobrzański L.A., R. Nowosielski. 1987. *Badania własności fizycznych*. Warszawa: Wyd. Naukowo-Techniczne.
- [9] Sypniewski R. 1978. *Technologia obróbki plastycznej na gorąco*. Warszawa: Wyd. Politechniki Warszawskiej.
- [10] Pachutko B., S. Szkudelski, B. Czartoryski, M. Chruściński, W. Gronowski. 2017. “Studies on shaping a die impression for forging of a construction anchor using the hot hobbing method”. *Obróbka Plastyczna Metali XXVIII* (2): 133–146.
- [11] Doherty R.D., D.A. Hughes, F.J. Humphreys, J.J. Jonas, D. Juul Jensen, M.E. Kassner, W.E. King, T.R. McNelley, H.J. McQueen, A.D. Rollett. 1997.

- „Current issues in recrystallization: a review”. *Materials Science and Engineering A238*: 219–274.
- [12] Sjöström, J., J. Bergström. 2004. „Thermal fatigue testing of chromium martensitic hot-work tool steel after different austenitizing treatments”. *J. Mater. Process. Technol.* 153–154: 1089–1096.
- [13] Pan X.H., Z.C. Zhu. 2006. „The study of chemical composition and improvement and development for the H13 hot work die & mold steel”. *Mold Manuf.* 4: 78–85.
- [14] Fuchs K.D. 2002. „Hot-work tool steels with improved properties for die casting applications, The use of tool steels: Experience research”. W mat. konf. *6th International Tooling Conference, Karlstad, Sweden, 10–13 September 2002*, 15–22.
- [15] Angang N., M. Wenwen, Ch. Xichun, G. Hanjie, G. Jing. 2017. „Precipitation Behavior of Carbides in H13 Hot Work Die Steel and Its Strengthening during Tempering”. *Metals* 2017, 7 (3), 70. DOI: 10.3390/met7030070.
- [16] https://www.uddeholm.pl/polish/files/Orvar_Supreme.pl.pdf
- “Current issues in recrystallization: a review”. *Materials Science and Engineering A238*: 219–274.
- [12] Sjöström, J., J. Bergström. 2004. “Thermal fatigue testing of chromium martensitic hot-work tool steel after different austenitizing treatments”. *J. Mater. Process. Technol.* 153–154: 1089–1096.
- [13] Pan X.H., Z.C. Zhu. 2006. “The study of chemical composition and improvement and development for the H13 hot work die & mold steel”. *Mold Manuf.* 4: 78–85.
- [14] Fuchs K.D. 2002. “Hot-work tool steels with improved properties for die casting applications, The use of tool steels: Experience research”. W mat. konf. *6th International Tooling Conference, Karlstad, Sweden, 10–13 September 2002*, 15–22.
- [15] Angang N., M. Wenwen, Ch. Xichun, G. Hanjie, G. Jing. 2017. “Precipitation Behavior of Carbides in H13 Hot Work Die Steel and Its Strengthening during Tempering”. *Metals* 2017, 7 (3), 70. DOI: 10.3390/met7030070.
- [16] https://www.uddeholm.pl/polish/files/Orvar_Supreme.pl.pdf

