



Wpływ parametrów i schematu odkształcenia na zmiany naprężenia uplastyczniającego trudno odkształcalnego stopu aluminium 5XXX

The effect of deformation parameters and the deformation scheme on the variations in the yield stress of the hard deformable aluminium alloy 5XXX

(1) Konrad Laber^{1*}, (2) Henryk Dyja¹, (3) Anna Kawalek¹, (4) Sylwester Sawicki¹,
(5) Jacek Borowski²

¹ Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów, Instytut Przeróbki Plastycznej i Inżynierii Bezpieczeństwa, al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa, Poland

² Instytut Obróbki Plastycznej, ul. Jana Pawła II 14, 61-139 Poznań, Poland

Informacje o artykule

Data przyjęcia: 27.10.2016

Data recenzji: 13.12.2016

Data akceptacji: 31.03.2017

Wkład autorów

- (1) Koncepcja badań, wykonawca badań w próbie skręcania, analiza wyników badań
- (2) Nadzór nad wykonaniem zadań, analizą wyników i przygotowaniem artykułu
- (3) Opracowanie wyników badań
- (4) Autor i wykonawca badań w próbie ściskania
- (5) Opracowanie założeń badań

Streszczenie

Prawidłowe wyznaczenie własności reologicznych badanego materiału w postaci wykresów naprężenie-odkształcenie, uwzględniających wpływ zastosowanego schematu odkształcenia, wartości odkształcenia, temperatury materiału oraz prędkości odkształcenia, pozwala na zwiększenie dokładności wykonywanych obliczeń, zarówno podczas korzystania z wzorów analitycznych, jak również podczas modelowania numerycznego. Wyznaczenie własności reologicznych, a głównie naprężenia uplastyczniającego jest szczególnie trudne dla procesów przeróbki plastycznej na gorąco, gdyż w strukturze materiału zachodzą złożone procesy, wynikające z mechanizmu odkształcenia plastycznego oraz procesy umocnienia, jak również aktywowane cieplnie, zależne od czasu zjawiska prowadzące do osłabienia materiału. Problem komplikuje dodatkowo zmienność temperatury, wynikająca z równoczesnego oddawania ciepła przez promieniowanie, konwekcję i przewodzenie oraz generowana w wyniku pracy odkształcenia plastycznego [1]. W literaturze technicznej można znaleźć opis wielu metod badawczych służących do określenia wartości naprężenia uplastyczniającego, wśród których należy wymienić: próbę rozciągania, ściskania oraz skręcania. W pracy określono wpływ parametrów i schematu odkształcenia na wartość i charakter zmian naprężenia uplastyczniającego trudno odkształcalnego stopu aluminium w gatunku 5XXX o ograniczonej odkształcalności. Badania plastometryczne przeprowadzono metodą jednoosiowego ściskania z zastosowaniem symulatora procesów metalurgicznych GLEEBLE 3800 oraz skręcania przy użyciu plastometru skrętnego STD 812. Określono dla obu metod wpływ zastosowanego odkształcenia, prędkości odkształcenia i temperatury początkowej próbek na zmiany naprężenia uplastyczniającego badanego materiału. Przedstawione w pracy badania stanowiły podstawę wyznaczenia własności reologicznych analizowanego stopu (łącznie z opracowaniem modeli matematycznych) pod kątem zastosowania ich do numerycznego modelowania procesu wyciskania.

Słowa kluczowe: schemat odkształcenia, próba jednoosiowego ściskania, próba skręcania, badania plastometryczne, naprężenie uplastyczniające, trudno odkształcalne stopy aluminium

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 34 325 06 62; e-mail: laber@wip.pcz.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 34 325 06 62; e-mail: laber@wip.pcz.pl

Article info

Received: 27.10.2016

Reviewed: 13.12.2016

Accepted: 31.03.2017

Authors' contribution

- (1) Research concept, torsion test research, analysis of test results
- (2) Supervision of tasks, analysis of the results and preparation of the article
- (3) Development of the test results
- (4) The author and researcher in the compression test
- (5) Development of testing assumptions

Abstract

The correct determination of the rheological properties of investigated material in the form of stress-strain diagrams allowing for the effect of the employed deformation scheme, the deformation value, material temperature and strain rate, enables the enhancement of the accuracy of performed calculations, both when using analytical formulae, as well as during numerical modelling. Determining the rheological properties, especially the yield stress, is particularly difficult for hot plastic working processes, because of complex processes occurring in the material structure due to the plastic deformation mechanism, strain hardening processes, as well as thermally activated and time-dependent phenomena leading to a weakening of the material. The problem is additionally complicated by the temperature variation resulting from giving up the heat simultaneously by radiation, convection and conduction and being generated by the plastic deformation work [1]. Technical literature provides the description of many research methods designed for determining the yield stress magnitude, which include the tensile, compression and torsion tests. The present work has determined the effect of deformation parameters and the deformation scheme on the magnitude and behaviour of variations in the yield stress of the 5XXX grade hard deformable aluminium alloy with limited deformability. Plastometric tests were carried out by the uniaxial compression method using the GLEEBLE 3800 metallurgical process simulator and the torsion method using an STD 812 torsion plastometer. For the both methods, the effect of the employed deformation, strain rate and initial specimen temperature on the variations in the yield stress of the investigated materials was determined. The investigations presented in the paper provided the basis for the determination of the rheological properties of the examined alloy (including the development of mathematical models) to be used for the numerical modelling of the extrusion process.

Keywords: *deformation scheme, uniaxial compression test, torsion test, plastometric test, yield stress, hard deformable aluminium alloys*

1. WPROWADZENIE

Podstawą analizy procesów obróbki plastycznej na gorąco są badania plastometryczne, które służą do określania między innymi zmiany wartości naprężenia uplastyczniającego w warunkach kontrolowanego i zmiennego w czasie odkształcenia. Warunki prowadzenia tych badań powinny odpowiadać warunkom występującym w rzeczywistych procesach technologicznych [2].

Metodyka wyznaczania naprężenia uplastyczniającego w funkcji odkształcenia, prędkości odkształcenia oraz temperatury jest przedmiotem badań w wielu ośrodkach badawczych [2–16]. Powodem tego jest zarówno rozwój bazy laboratoryjnej, umożliwiającej badanie materiałów w coraz szerszym zakresie parametrów odkształcenia, jak również intensywne wprowadzanie nowych, bardziej wydajnych (dynamicznych) procesów technologicznych. Rozwój nowych technologii wymaga posiadania wiedzy na temat zachowania się materiałów w zmienionych warunkach kształtowania plastycznego.

Najczęściej stosowane metody oceny plastyczności materiałów to próby ściskania oraz skrę-

1. INTRODUCTION

A basis for the analysis of hot plastic working processes are plastometric tests that are used for the determination of, inter alia, the variation in the magnitude of yield stress under the conditions of controlled and time-variable deformation. The conditions of conducting these tests should correspond to the conditions prevailing during real technological processes [2].

The methodology for determining the yield stress as a function of strain, strain rate and temperature has been the subject of investigations undertaken in numerous research centres [2–16]. This is due to both the development of the laboratory basis that enables materials to be tested within an increasingly wide range of deformation parameters, as well as the introduction of new, more efficient (dynamic) technological processes. The development of new technologies requires the knowledge on the behaviour of the materials under the changed plastic forming conditions.

The most often used methods of assessing the plasticity of materials include the hot compression

cania na gorąco [1], a urządzeniami umożliwiającymi prowadzenie badań są:

- dylatometr z możliwością odkształcania DIL805A/D firmy Bähr Thermoanalyse GmbH, obecnie TA Instruments,
- symulator ciepłno mechaniczny GLEEBLE 3800 produkcji Dynamic Systems Inc.,
- plastometr skrętny STD 812 firmy Bähr Thermoanalyse GmbH, obecnie TA Instruments.

Stosowanie różnych metod pomiarowych i urządzeń badawczych wpływa na zróżnicowanie otrzymanych wyników badań. Spowodowane jest to między innymi różnymi schematami odkształcania występującymi w próbie ściskania i skręcania. W związku z tym uzasadnione staje się przeprowadzenie badań, w celu poznania wpływu zastosowanej metodyki badawczej na przebieg i charakter zmian naprężenia uplastyczniającego, co potwierdzają wyniki opublikowane między innymi w pracach [2, 17].

2. CEL I ZAKRES PRACY

Celem przeprowadzonych w pracy badań było określenie wpływu zastosowanego schematu odkształcania oraz parametrów odkształcania (prędkości odkształcania oraz temperatury badanej próbki) na wartość i charakter zmian naprężenia uplastyczniającego trudno odkształcalnego stopu aluminium w gatunku 5XXX. Badania przeprowadzono w próżni, stosując dwa schematy odkształceń: próbę jednoosiowego ściskania oraz próbę skręcania. Badania jednoosiowego ściskania przeprowadzono z wykorzystaniem symulatora procesów metalurgicznych GLEEBLE 3800. Do badań zastosowano próbki okrągłe o średnicy $d = 10$ mm i wysokości $h = 12$ mm. Badania skręcania przeprowadzono przy zastosowaniu plastometru skrętnego STD 812. Do badań zastosowano próbki okrągłe o średnicy $d = 8$ mm i długości bazy pomiarowej $L = 20$ mm. Do rejestracji i kontroli zmian temperatury w obu przypadkach stosowano termopary typu K (NiCrNiAl).

Ogólny widok próbek podczas badań przedstawiono na rys. 1 i 2.

and torsion tests [1], and the devices enabling these tests to be carried out are:

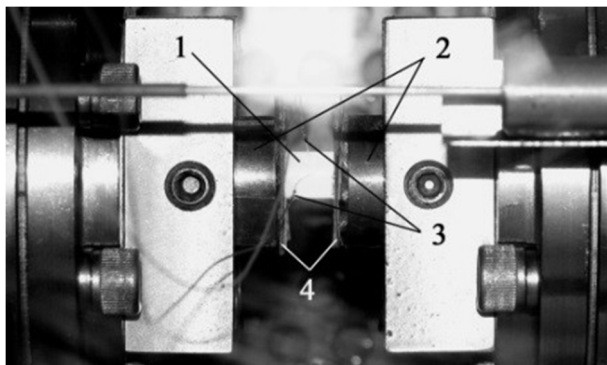
- the DIL805A/D dilatometer with a deformation capability, manufactured by Bähr Thermoanalyse GmbH, now TA Instruments,
- the GLEEBLE 3800 thermomechanical simulator manufactured by Dynamic Systems Inc.,
- the STD 812 torsion plastometer manufactured by Bähr Thermoanalyse GmbH, now TA Instruments.

Employing different measurement methods and testing methods has the effect of differentiating the testing results. This is caused by, inter alia, different deformation schemes occurring in the compression and torsion tests. It, therefore, becomes justifiable to undertake investigations with the aim of understanding the influence of the employed research methodology on the mode and behaviour of yield stress variations, as confirmed by results published elsewhere, including studies [2, 17].

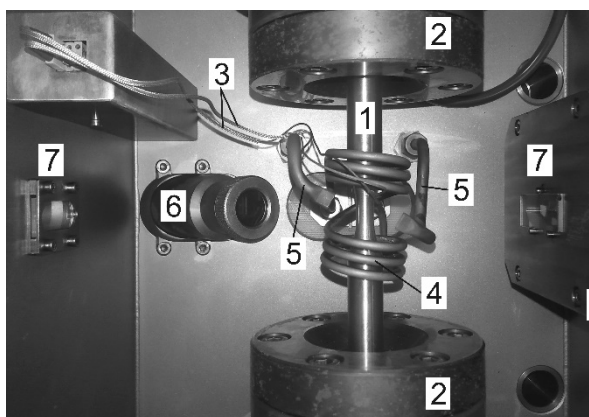
2. PURPOSE AND SCOPE OF THE STUDY

The purpose of the investigation undertaken within the study was to determine the effect of the employed deformation scheme and deformation parameters (strain rate and test specimen temperature) on the magnitude and behaviour of variations in the yield stress of a hard deformable aluminium alloy in grade 5XXX. The tests were conducted in vacuum, using two deformation schemes: an uniaxial compression test and a torsion test. Uniaxial compression tests were carried out using the GLEEBLE 3800 metallurgical process simulator. Round specimens with a diameter of $d = 10$ mm and a height of $h = 12$ mm were used for the tests. The torsion tests were carried out using an STD 812 torsion plastometer. Round specimens with a diameter of $d = 8$ mm and a measurement base length of $L = 20$ mm were used for the tests. For the recording and control of temperature variations, a K-type (NiCr-NiAl) thermocouple was employed in both cases.

A general view of test specimens is shown in Fig. 1 and 2.



Rys. 1. Próbką podczas badań w komorze symulatora GLEEBLE 3800: 1 – próbka, 2 - kowadła, 3 – termopary typu K, 4 – warstwy podkładek tantalowych, grafitowych, oddzielone smarem na bazie grafitu
 Fig. 1. A specimen during testing in the GLEEBLE 3800 simulator chamber: 1 – specimen, 2 – anvils, 3 – K-type thermocouples, 4 – layers of tantalum graphite washers separated by graphite-based grease



Rys. 2. Próbką podczas badań w komorze plastomeru skrętnego STD 812: 1 – próbka, 2 – uchwyty mocujące, 3 – termopary typu S, 4 – cewka indukcyjna, 5 – dysze systemu chłodzenia, 6 – pirometr, 7 – czujniki laserowego pomiaru średnicy próbki

Fig. 2. A specimen during testing in the STD 812 torsion plastometer chamber: 1 – specimen, 2 – fixing clamps, 3 – S-type thermocouples, 4 – induction coil, 5 – cooling system nozzles, 6 – pyrometer, 7 – laser specimen diameter measuring sensors

Przedstawione w pracy badania przeprowadzono dla prędkości odkształcenia: 0,05 i 0,5 s⁻¹ przy temperaturach początkowych próbek: 360; 400; 440 oraz 480°C.

Próbki do badań nagrzewano ze stałą prędkością 5°C/s do zadanej temperatury, wytrzymywano przy tej temperaturze przez 10 s, a następnie odkształcano.

Po przeprowadzeniu badań sporządzono wykresy odkształcenie – naprężenie i określono wpływ zastosowanego schematu odkształcenia na wartość oraz charakter zmian naprężenia uplastyczniającego badanego stopu, w zależności od prędkości odkształcenia i temperatury.

The tests described herein were carried out for strain rates of 0.05 and 0.5 s⁻¹ and at initial specimen temperatures of 360; 400; 440 and 480°C, respectively.

The test specimens were heated at a constant heating rate of 5°C/s up to a preset temperature, held at that temperature for 10 s, and then deformed.

After completion of the tests, stress-strain diagrams were plotted and then the effect of the employed deformation scheme on the magnitude and mode of variations in the yield stress of the investigated alloy was determined, as dependant on the strain rate and temperature.

3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Wartości odkształceń rzeczywistych, ε prędkości odkształceń $\dot{\varepsilon}$ oraz naprężenia uplastyczniającego σ_p podczas ściskania obliczono na podstawie następujących zależności [18]:

$$\varepsilon = \ln \left| \frac{h_1}{h_0} \right| \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\Delta t} \quad (2)$$

$$\sigma_p = \frac{4 \cdot F \cdot h}{h_0 \cdot \pi \cdot d_0^2} \quad (3)$$

gdzie: h_0 i h_1 - początkowa i końcowa wysokość próbki, Δt - czas odkształcenia, F - wartość siły mierzona podczas testu, h - chwilowa wysokość próbki, d_0 - początkowa średnica próbki.

Do wyznaczenia odkształcenia rzeczywistego podczas skręcania zastosowano zależność (4), natomiast rzeczywistą prędkość odkształcenia określono z wzoru (5). Wartość naprężenia uplastyczniającego obliczono z zależności (6) [1]:

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot \dot{N}}{\sqrt{3} \cdot L} \quad (4)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot \dot{N}}{\sqrt{3} \cdot 60 \cdot L} \quad (5)$$

$$\sigma_p = \frac{\sqrt{3} \cdot 3M}{2\pi r^3} \quad (6)$$

gdzie: r - promień próbki [mm], L - długość próbki [mm], N - liczba skręceń (obrotów) próbki [obr], \dot{N} - prędkość skręcania (obrotowa) [obr/min], M - moment skręcający [Nm].

Na rys. 3 przedstawiono zmiany naprężenia stopu aluminium 5XXX, odkształcanego z prędkością $0,05 \text{ s}^{-1}$, dla badanego zakresu temperatur dla różnych metod badawczych.

3. ANALYSIS OF THE INVESTIGATION RESULTS

The magnitudes of true strains ε , strain rates $\dot{\varepsilon}$ and yield stress σ_p during compression were calculated from the following relationships [18]:

$$\varepsilon = \ln \left| \frac{h_1}{h_0} \right| \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\Delta t} \quad (2)$$

$$\sigma_p = \frac{4 \cdot F \cdot h}{h_0 \cdot \pi \cdot d_0^2} \quad (3)$$

where: h_0 and h_1 - initial and final specimen height, Δt - deformation time, F - force magnitude as measured during the test, h - momentary specimen height, d_0 - initial specimen diameter.

For the determination of the true strain in torsion, relationship (4) was used, whereas the actual strain rate was determined from formula (5). The yield stress value was calculated from relationship (6) [1]:

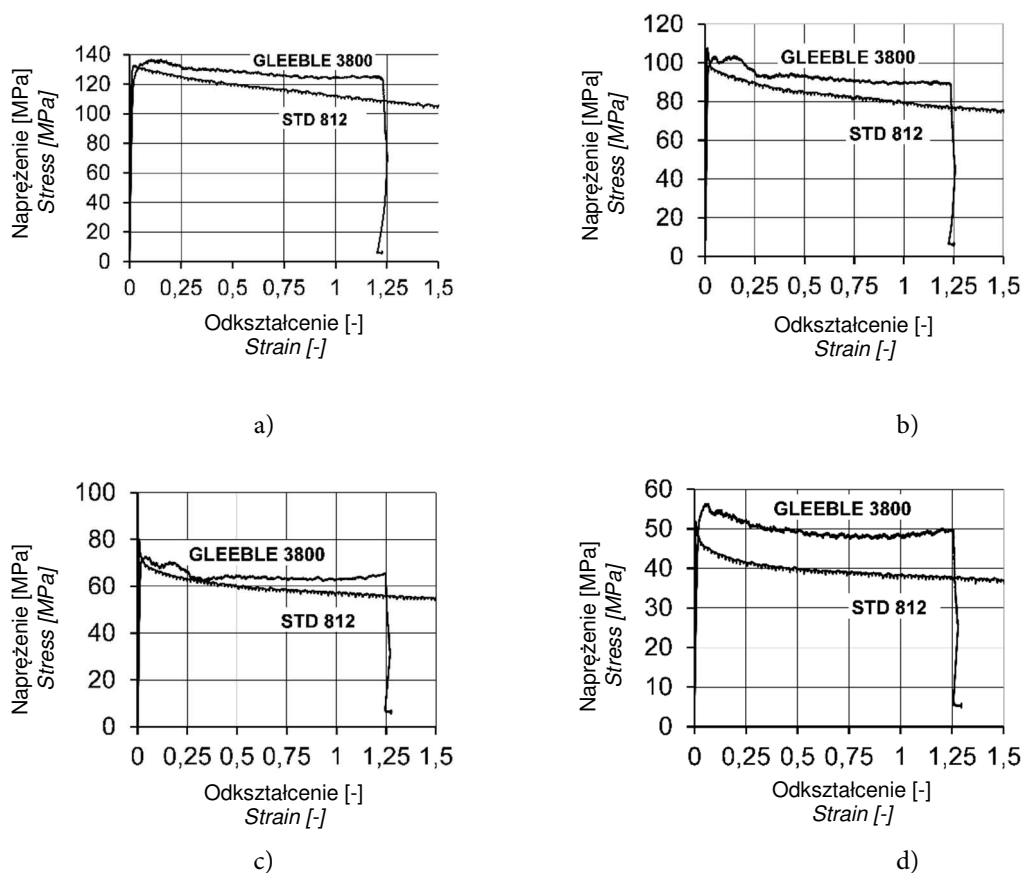
$$\varepsilon = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot \dot{N}}{\sqrt{3} \cdot L} \quad (4)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot \dot{N}}{\sqrt{3} \cdot 60 \cdot L} \quad (5)$$

$$\sigma_p = \frac{\sqrt{3} \cdot 3M}{2\pi r^3} \quad (6)$$

where: r - specimen radius [mm], L - specimen length [mm], N - number of specimen twists (rotations) [rot.], \dot{N} - torsional (rotational) speed [rpm], M - torque moment [Nm].

Fig. 3 illustrates variations in the stress of aluminium alloy 5XXX deformed at a strain rate of 0.05 s^{-1} , for the investigated temperature range and for different testing methods.



Rys. 3. Przebieg krzywych plastycznego płynięcia stopu aluminium 5XXX odkształcanego z prędkością odkształcenia $0,05 \text{ s}^{-1}$, przy temperaturach: a) 360°C , b) 400°C , c) 440°C , d) 480°C

Fig. 3. The behaviour of the plastic flow curves for aluminium alloy 5XXX, as deformed at a strain rate of 0.05 s^{-1} , and at a temperature of a) 360°C , b) 400°C , c) 440°C and d) 480°C

Analizując zmiany naprężenia stopu aluminium 5XXX, odkształcanego z prędkością $0,05 \text{ s}^{-1}$ przy temperaturach 360°C , 400°C i 440°C (rys. 3 a, b, c) można zaobserwować dużą zbieżność otrzymanych wyników, szczególnie dla początkowego etapu procesu odkształcania. Różnice w wartościach naprężenia badanego stopu, otrzymane w próbie ściskania i skręcania na gorąco zwiększają się wraz ze wzrostem wartości odkształcenia i największa rozbieżność w wartościach naprężenia wystąpiła przy odkształceniu rzeczywistym wynoszącym 1,25. Ze względu na specyfikę próby ściskania zastosowanie odkształceń większych nie było możliwe. Podczas odkształcania stopu aluminium z prędkością $0,05 \text{ s}^{-1}$ przy temperaturze 360°C różnice w wartościach naprężenia dla $\epsilon = 1,25$ wynosiły około 14%, przy temperaturze 400°C – około 13% oraz około 15%, przy temperaturze 440°C .

When analyzing the variations in the stress of aluminium alloy 5XXX deformed at a strain rate of 0.05 s^{-1} and at a temperature of, respectively, 360°C , 400°C and 440°C (Fig. 3 a, b, c), a high concurrence of the obtained results can be observed, especially for the initial stage of the deformation process. The differences in the stress magnitudes of the investigated alloy, obtained from the compression and hot torsion tests, increase with the increase in the strain magnitude, with the largest deviation in stress values occurring for a true strain of 1.25. Due to the specificity of the compression test, employing larger strains was not possible. During deforming the aluminium alloy at a strain rate of 0.05 s^{-1} , the differences in stress magnitudes for $\epsilon = 1.25$ were approx. 14% at a temperature of 360°C , approx. 13% at a temperature of 400°C , and approx. 15% at a temperature of 440°C .

Na podstawie rozkładów naprężenia badanego stopu aluminium, odkształcanego z prędkością $0,05 \text{ s}^{-1}$ przy temperaturze 480°C (rys. 3 d) można stwierdzić, że wartości naprężenia otrzymane na podstawie próby ściskania oraz skręcania różnią się o około 20%. Ogólny charakter przebiegu naprężenia w tych warunkach jest podobny, tzn. widoczny jest niewielki spadek wartości naprężenia wraz ze wzrostem odkształcenia.

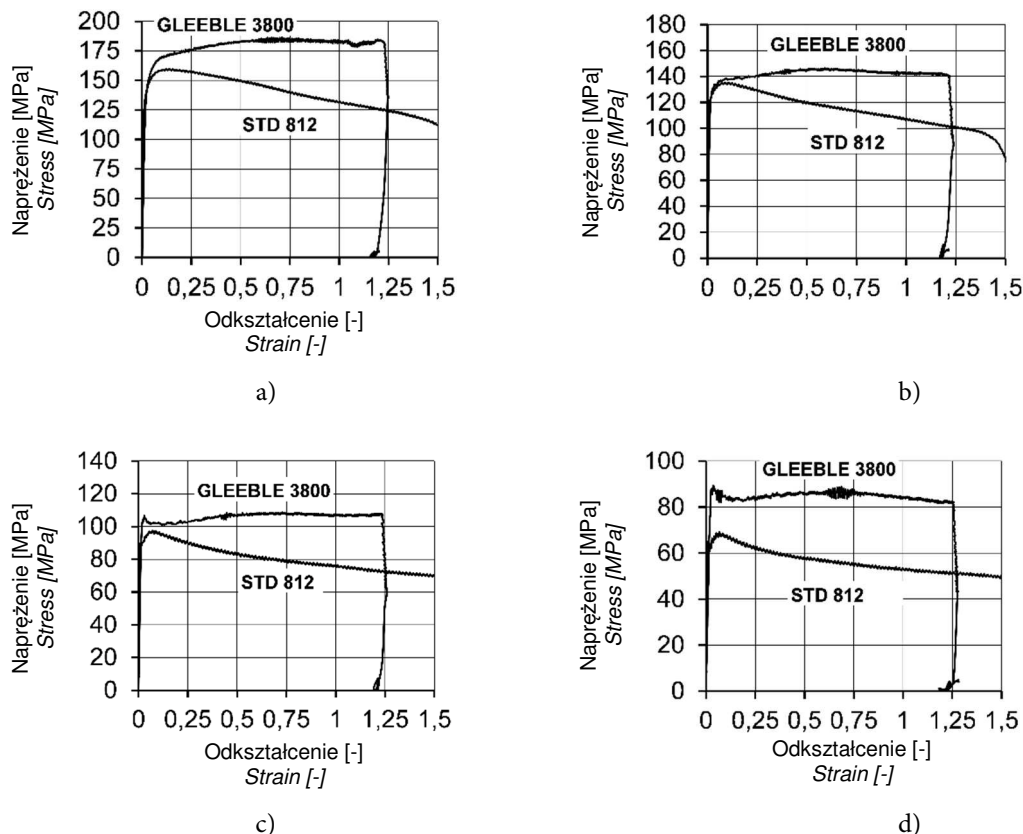
Wzrost wartości naprężenia badanego materiału, obserwowany na rys. 3c i 3d w końcowym etapie ściskania nie jest spowodowany charakterystyką (właściwościami) samego stopu aluminium, a tarciem występującym na styku materiału z kowadłami i zmianą stanu odkształcenia w zewnętrznych obszarach próbki.

Zmiany naprężenia badanego stopu aluminium odkształcanego z prędkością $0,5 \text{ s}^{-1}$ dla tych samych temperatur początkowych próbek przedstawiono na rys. 4.

From the distributions of the stress of the investigated aluminium alloy deformed at a strain rate of 0.05 s^{-1} at a temperature of 480°C (Fig. 3 d), it can be found that the stress magnitudes obtained from the compression and torsion tests differ by approx. 20%. The general behaviour of the stress variation in these conditions is similar, that is a slight decrease in stress magnitude is visible with the increase in strain.

The increase in the investigated alloy stress magnitude at the final compression stage, as observed in Fig. 3c and 3d, is not caused by the characteristics (properties) of the aluminium alloy itself, but instead by the friction occurring at the contact between the material and the anvils and the change in the strain state in the outer specimen regions.

The changes in the stress of the investigated aluminium alloy deformed at a strain rate of 0.5 s^{-1} for the same initial specimen temperatures are shown in Fig. 4.



Rys. 4. Przebieg krzywych plastycznego płynięcia stopu aluminium 5XXX odkształcanego z prędkością odkształcenia $0,5 \text{ s}^{-1}$, przy temperaturach: a) 360°C , b) 400°C , c) 440°C , d) 480°C

Fig. 4. The behaviour of the plastic flow curves for aluminium alloy 5XXX, as deformed at a strain rate of 0.5 s^{-1} , and at a temperature of a) 360°C , b) 400°C , c) 440°C and d) 480°C , respectively

Obserwując przebieg zmian naprężenia dla tych warunków odkształcenia można stwierdzić, że przy skręcaniu próbek występuje stały spadek wartości naprężenia wraz ze wzrostem odkształcenia rzeczywistego. Krzywe zmian naprężenia badanego stopu uzyskane w próbach ściskania mają nieco inny przebieg niż przy mniejszych prędkościach odkształcenia, tzn. nie wykazują tak wyraźnego spadku wartości naprężenia, a w niektórych przypadkach (rys. 4a i 4c) naprężenie uplastyczniające analizowanego materiału praktycznie jest stałe dla całego zakresu zmian odkształcenia.

Największe różnice w wartościach naprężenia uplastyczniającego uzyskano podczas prób ściskania i skręcania wynosiły one 29–30% (przy odkształceniu około 1,25) przy temperaturze początkowej próbek 360°C, 400°C i 440°C (rys. 4a, 4b, 4c). Podczas odkształcania próbek przy temperaturze 480°C różnica w wartościach naprężenia wynosiła 35% (przy odkształceniu około 0,75)

Podsumowując dane przedstawione na rys. 3 oraz 4 można stwierdzić, że przebiegi zmian naprężenia badanego stopu aluminium 5XXX, określone w próbie ściskania oraz w próbie skręcania na gorąco różnią się od siebie i zależą także od parametrów samego procesu odkształcania (prędkość odkształcenia, temperatura).

Główną przyczyną wystąpienia różnych wartości naprężenia jest różny stan odkształcenia, wywołujący inny stan naprężenia w odkształcanym materiale. W procesie skręcania występuje płaski stan naprężenia, natomiast w próbie ściskania występuje jednoosiowy stan naprężenia, ale tylko wtedy, gdy na powierzchni kontaktu materiału z kowadłami nie występują naprężenia styczne. Pomimo zastosowania podczas próby ściskania specjalnych podkładek oraz smaru na powierzchniach styku próbki z kowadłami w próbie tej występuje tarcie, które wpływa na wartość naprężenia. Z danych przedstawionych na rys. 3 i 4 wynika, że różnice w wartościach naprężenia uzyskane w próbie ściskania oraz w próbie skręcania, w przeważającej liczbie przypadków zwiększają się wraz z wartością zadawanego odkształcenia.

Stopy aluminium serii 5XXX należą do materiałów trudno odkształcalnych i podczas ich

When observing the course of stress variations for these deformation conditions it can be found that a constant decrease in stress value with the increase in true strain occurs in the torsion of specimens. The curves of variations in the stress of the investigated alloy, obtained from the compression tests, have a slightly different behaviour than those for lower strain rates in that they do not show so distinct decrease in stress magnitude, and in some cases (Figs. 4a and 4c), the yield stress of the examined material is practically constant for the entire range of deformation variations.

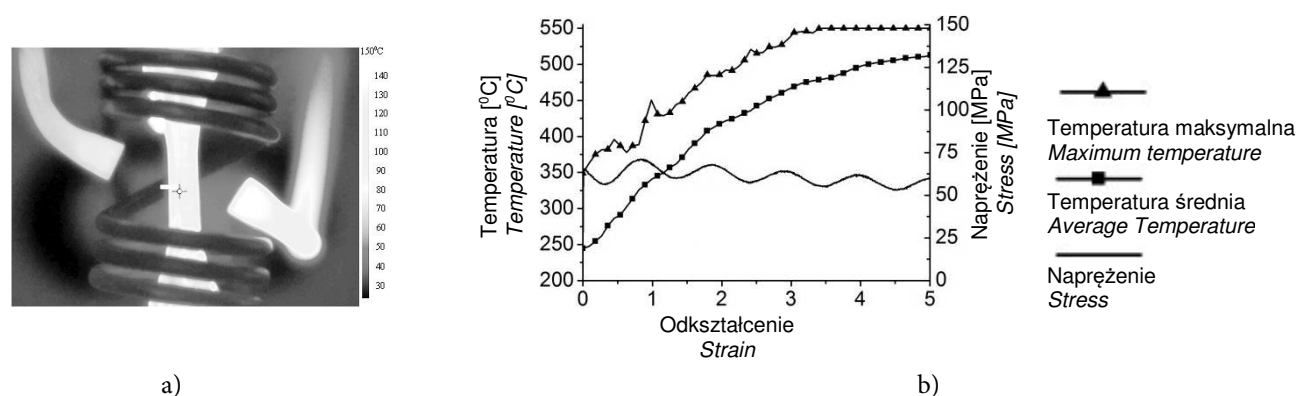
The largest differences in yield stress values were obtained during compression and torsion tests, which amounted to 29–30% (at a strain of approx. 1.25) at an initial specimen temperature of, respectively, 360°C, 400°C and 440°C (Fig. 4a, 4b, 4c). During deforming specimens at a temperature of 480°C, the difference in stress values was 35% (at a strain of about 0.75).

Summing up the data represented in Fig. 3 and 4 it can be stated that the characteristics of the stress variations of the examined aluminium alloy 5XXX, as determined from the compression test and the hot torsion test, differ from one another and depend also on the parameters of the deformation process itself (such as strain rate and temperature).

The main cause of the occurrence of the different stress values is the different state of strain, causing a different stress state in the deformed material. In the torsion process, a plane strain state exists, while in the compression test, a uniaxial stress state occurs, but only when no tangential stresses occur on the surface of contact between the material and the anvils. In spite of special washers and lubricant being used on the surfaces of contact between the specimens and the anvils during the compression test, friction does occur in this test, which affects the stress magnitude. The data represented in Fig. 3 and 4 show that the differences in stress magnitudes obtained from the compression test and from the torsion test, in the majority of cases, increase with increasing preset strain value.

Aluminium alloys of the 5XXX series belong to hard deformable materials, during the deforma-

ich odkształcania występuje silny efekt cieplny odkształcania plastycznego, który wpływa na obniżenie wartości naprężenia uplastyczniającego podczas przeprowadzania próby skręcania. Badania tego typu były prowadzone w Instytucie Przeróbki Plastycznej i Inżynierii Bezpieczeństwa Politechniki Częstochowskiej dla innego stopu aluminium. Przykładowe wyniki przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Przebieg zmiany temperatury oraz naprężenia uplastyczniającego stopu aluminium odkształcanego z prędkością odkształcania $0,1 \text{ s}^{-1}$, przy temperaturze 350°C : a) termogram, b) wykres zmian temperatury oraz naprężenia uplastyczniającego
 Fig. 5. The behaviour of the variation in the temperature and yield stress of the aluminium alloy deformed at a strain rate of 0.1 s^{-1} and at a temperature of 350°C : a) a thermogram, b) a diagram of variations in temperature and yield stress

Jak wynika z danych przedstawionych na rys. 5b wraz ze wzrostem zadawanego odkształcenia widoczny jest znaczny wzrost temperatury odkształcanej próbki ze stopu aluminium oraz niewielki spadek wartości naprężenia uplastyczniającego. Jak wykazały przeprowadzone dotychczas w Instytucie Przeróbki Plastycznej i Inżynierii Bezpieczeństwa Politechniki Częstochowskiej badania, efekt cieplny wywołany odkształceniem plastycznym zależy przede wszystkim od warunków odkształcania oraz stanu wyjściowego badanego materiału (zastosowanej obróbki cieplnej wsadu, a tym samym struktury początkowej).

W celu poznania przyczyn występowania różnic pomiędzy wartościami naprężenia uplastyczniającego badanego materiału, uzyskanych w próbach ściskania oraz skręcania na gorąco należy przeprowadzić badania metalograficzne. Pozwoliłyby one ujawnić procesy zachodzące w materiale w konkretnych warunkach odkształcania, które bezpośrednio wpływają na zmiany wartości naprężenia uplastyczniającego.

Analiza uzyskanych wyników badań umożliwiła wybór metodyki wyznaczania własności

of which a strong thermal effect occurs, which reduces the yield stress magnitude during the torsion test. Tests of this type have been carried out at the Institute for Plastic Working and Safety Engineering of the Czestochowa University of Technology for a different aluminium alloy. Sample results are shown in Figure 5.

As indicated by the data in Fig. 5b, a significant increase in the temperature of the deformed aluminium specimen and a slight decrease in yield stress magnitude are visible with the increase in the preset strain. As has been demonstrated by studies carried out so far at the Czestochowa University of Technology's Institute for Plastic Working and Safety Engineering, the thermal effect caused by plastic deformation depends primarily on the deformation conditions and the initial state of the investigated material (the employed heat treatment of the stock, and thus the initial structure).

To understand the causes of the occurring differences in the yield stress of the investigated material between the compression tests and the hot torsion tests, metallographic examinations need to be performed. They would help to disclose the processes occurring in the material under specific deformation conditions, which directly influence the variations in yield stress magnitudes.

The analysis of the obtained results has enabled the selection of the methodology of deter-

reologicznych trudno odkształcalnych stopów aluminium serii 5XXX, pod kątem wykorzystania ich podczas analiz numerycznych procesu wyciskania.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Po przeprowadzeniu badań nad wpływem parametrów oraz schematu odkształcenia na wartość naprężenia uplastyczniającego trudno odkształcalnego stopu aluminium 5XXX oraz po analizie otrzymanych wyników stwierdzono, że:

- występuje istotny wpływ parametrów odkształcenia na wartość naprężenia uplastyczniającego stopu aluminium 5XXX,
- na przebieg i charakter zmian naprężenia uplastyczniającego badanego stopu istotnie wpływa zastosowany schemat odkształcenia,
- różnice w wartościach naprężenia uplastyczniającego badanego stopu aluminium, uzyskane podczas prób ściskania i skręcania, zwiększają się wraz z wartością zadawanego odkształcenia rzeczywistego,
- stop aluminium w gatunku 5XXX charakteryzuje się występowaniem silnego efektu cieplnego podczas jego odkształcenia plastycznego.

PODZĘKOWANIA

Projekt finansowany z Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach grantu nr: UOS-DEM-1-335/001 „Rozwój innowacyjnej technologii wyciskania stopów trudno odkształcalnych AlMg” (program Demonstrator +).

LITERATURA

- [1] Grosman Franciszek, Eugeniusz Hadasik. 2005. *Technologiczna plastyczność metali. Badania plastometryczne*, Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [2] Hadasik Eugeniusz, Marek Tkocz, Rudolf Kawalla, Stan T Mandziej. 2000. „Comparison of the results of hot torsion and hot compression tests”. W mat.

determining the rheological properties of hard deformable aluminium alloys of series 5XXX to be used in numerical analyses of the extrusion process.

4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

Upon carrying out the investigations into the effect of deformation parameters and the deformation scheme on the magnitude of the yield stress of the hard deformable aluminium alloy 5XXX and upon the analysis of the obtained results thereof, it has been found that:

- *there occurs a significant effect of deformation parameters on the magnitude of the yield stress of aluminium alloy 5XXX,*
- *the mode and behaviour of the variations in the yield stress of the investigated alloy are significantly influenced by the employed deformation scheme,*
- *the obtained differences in the magnitudes of the yield stress of the investigated aluminium alloy between compression and torsion tests increase with the increase in the preset true strain,*
- *the 5XXX grade aluminium alloy is distinguished by the occurrence of a strong thermal effect during its plastic deformation.*

ACKNOWLEDGEMENTS

The project is financed from the resources of the National Research and Development Centre under grant no. UOS-DEM-1-335/001 “The development of the innovative technology of extrusion of hard deformable AlMg alloys” (within the Demonstrator + programme).

REFERENCES

- [1] Grosman Franciszek, Eugeniusz Hadasik. 2005. *Technologiczna plastyczność metali. Badania plastometryczne*, Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [2] Hadasik Eugeniusz, Marek Tkocz, Rudolf Kawalla, Stan T Mandziej. 2000. „Comparison of the results of hot torsion and hot compression tests”. In conf.

- konf. Mezinárodní metalurgická konference, Ostrava, 16-18.5.2000, 58.
- [3] Grosman Franciszek, Eugeniusz Hadasik. 1994. „Problems of Application of the Technological Plasticity Description of Metals in Computer Programmes for Analysis and Design of Mechanical Working Processes”. *Archives of Metallurgy* 39 (3): 264–276.
- [4] Grosman Franciszek, Eugeniusz Hadasik, Czesław Sajdak. 1994. „Rozwój metodyki i zastosowań plastometrycznej próby skręcania”. *Inżynieria Materiałowa* 3–4: 77–79.
- [5] Schindler Ivo, Hadasik, Eugeniusz. 1997. „Description of Deformation Behaviour as a Base of Metal Forming Process Design”. *Challenges to Civil and Mechanical Engineering in 2000 and Beyond* III: 395–404.
- [6] Schindler Ivo, Josef Bořuta. 1998. *Utilization Potentialities of Torsion Plastometer*. Katowice: Dept. of Mechanics and Metal Forming, Silesian Technical University.
- [7] Płachta Adam. 1998. „Metodyka wyznaczania funkcji naprężenia uplastyczniającego”. W mat. konf. *Plastyczność materiałów*. Ustroń, 1998, 129–136.
- [8] Hadasik Eugeniusz, Bolesław Machulec, Andrzej Płachta, Marek Tkocz. 1999. „System komputerowego sterowania i rejestracji wyników plastometru skrętnego”. W mat. konf. *Nowe technologie i materiały w metalurgii i inżynierii materiałowej*. Katowice, 257–260.
- [9] Hadasik Eugeniusz, Andrzej Płachta, Dariusz Kuc, Grzegorz Niewielski, Marek Tkocz. 2016. „Badania plastyczności stali przeznaczonych do walcowania walcówki”. *Hutnik-Wiadomości Hutnicze* 83 (8): 334–336.
- [10] Laber Konrad, Anna Kawałek, Sylwester Sawicki, Henryk Dyja, Jacek Borowski, Dariusz Leśniak, Henryk Jurczak. 2016. „Application of torsion test for determination of rheological properties of 5019 aluminium alloy”. *Key Engineering Materials* 682: 356–361.
- [11] Laber Konrad. 2015. „Określenie własności reologicznych wybranych gatunków stali do spęczania na zimno w próbie skręcania”. *Hutnik-Wiadomości Hutnicze*, 82 (5): 338–342.
- [12] Laber Konrad, Henryk Dyja, Anna Kawałek, Sylwester Sawicki. 2014. „Determination of characteristics of plasticity of selected medium and high carbon steel grades in hot torsion test”. *Metalurgija* 55 (4): 635–638.
- [13] Sawicki Sylwester, Anna Kawałek, Konrad Laber, Henryk Dyja, Jacek Borowski, Dariusz Leśniak, Henryk Jurczak. 2016. „Plastometric testing of rheological properties of 5083 and 5754 aluminium alloy”. *Key Engineering Materials* 682: 362–366.
- [14] Paczyński Piotr, Grzegorz Stradomski, Sylwester Sawicki. 2015. „Badania plastometryczne stali duplex 1.4462”. W mat. konf. *XXXIX Studencka Kon-*
- proceed. of Mezinárodní metalurgická konference, Ostrava, 16-18.5.2000, 58.
- [3] Grosman Franciszek, Eugeniusz Hadasik. 1994. „Problems of Application of the Technological Plasticity Description of Metals in Computer Programmes for Analysis and Design of Mechanical Working Processes”. *Archives of Metallurgy* 39 (3): 264–276.
- [4] Grosman Franciszek, Eugeniusz Hadasik, Czesław Sajdak. 1994. „Rozwój metodyki i zastosowań plastometrycznej próby skręcania”. *Inżynieria Materiałowa* 3–4: 77–79.
- [5] Schindler Ivo, Hadasik, Eugeniusz. 1997. „Description of Deformation Behaviour as a Base of Metal Forming Process Design”. *Challenges to Civil and Mechanical Engineering in 2000 and Beyond* III: 395–404.
- [6] Schindler Ivo, Josef Bořuta. 1998. *Utilization Potentialities of Torsion Plastometer*. Katowice: Dept. of Mechanics and Metal Forming, Silesian Technical University.
- [7] Płachta Adam. 1998. „Metodyka wyznaczania funkcji naprężenia uplastyczniającego”. W mat. konf. *Plastyczność materiałów*. Ustroń, 1998, 129–136.
- [8] Hadasik Eugeniusz, Bolesław Machulec, Andrzej Płachta, Marek Tkocz. 1999. „System komputerowego sterowania i rejestracji wyników plastometru skrętnego”. W mat. konf. *Nowe technologie i materiały w metalurgii i inżynierii materiałowej*. Katowice, 257–260.
- [9] Hadasik Eugeniusz, Andrzej Płachta, Dariusz Kuc, Grzegorz Niewielski, Marek Tkocz. 2016. „Badania plastyczności stali przeznaczonych do walcowania walcówki”. *Hutnik-Wiadomości Hutnicze* 83 (8): 334–336.
- [10] Laber Konrad, Anna Kawałek, Sylwester Sawicki, Henryk Dyja, Jacek Borowski, Dariusz Leśniak, Henryk Jurczak. 2016. „Application of torsion test for determination of rheological properties of 5019 aluminium alloy”. *Key Engineering Materials* 682: 356–361.
- [11] Laber Konrad. 2015. „Określenie własności reologicznych wybranych gatunków stali do spęczania na zimno w próbie skręcania”. *Hutnik-Wiadomości Hutnicze*, 82 (5): 338–342.
- [12] Laber Konrad, Henryk Dyja, Anna Kawałek, Sylwester Sawicki. 2014. „Determination of characteristics of plasticity of selected medium and high carbon steel grades in hot torsion test”. *Metalurgija* 55 (4): 635–638.
- [13] Sawicki Sylwester, Anna Kawałek, Konrad Laber, Henryk Dyja, Jacek Borowski, Dariusz Leśniak, Henryk Jurczak. 2016. „Plastometric testing of rheological properties of 5083 and 5754 aluminium alloy”. *Key Engineering Materials* 682: 362–366.
- [14] Paczyński Piotr, Grzegorz Stradomski, Sylwester Sawicki. 2015. „Badania plastometryczne stali duplex 1.4462”. W mat. konf. *XXXIX Studencka Kon-*

- ferencja Naukowa Innowacje w Inżynierii Produkcji, Technologii Materiałów i Bezpieczeństwie*. Częstochowa, 28 maj 2015, 208–211.
- [15] Sawicki Sylwester, Henryk Dyja, Anna Kawałek. 2014. „Plastometric testing of rheological property of 20MnB4 and 30MnB4 micro-addition cold upsetting steels and C45 and C70 highcarbon-steels”. *Izvestija Tulskogo Gosudarstvennogo Universiteta, Tekhnicheskie Nauki* 10 (2): 103–111.
- [16] Sawicki Sylwester, Konrad Laber, Henryk Dyja, Anna Kawałek. 2016. „Vysokotemperaturnye kharakteristiki stalej C45 i C70”. W mat. konf. 74-ja Mezhdunarodnaja nauchno-tekhnicheskaja konferencija „Aktualnye Problemy Sovremennoj Nauki, Tekhniki i Obrazovanija”, Magnitogorsk, 18-22 kwiecień 2016.
- [17] Tkocz Marek, Eugeniusz Hadasik. 1998. „Porównanie metod badań plastyczności na gorąco”. W mat. konf. *Plastyczność materiałów*. Ustroń, 141–149.
- [18] Dyja Henryk, Aleksander Gałkin, Marcin Knapieński. 2010. „Reologia metali odkształczanych plastycznie”. W *Monografie* 190, 298–318. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej.
- ferencja Naukowa Innowacje w Inżynierii Produkcji, Technologii Materiałów i Bezpieczeństwie*. Częstochowa, 28 maj 2015, 208–211.
- [15] Sawicki Sylwester, Henryk Dyja, Anna Kawałek. 2014. „Plastometric testing of rheological property of 20MnB4 and 30MnB4 micro-addition cold upsetting steels and C45 and C70 highcarbon-steels”. *Izvestija Tulskogo Gosudarstvennogo Universiteta, Tekhnicheskie Nauki* 10 (2): 103–111.
- [16] Sawicki Sylwester, Konrad Laber, Henryk Dyja, Anna Kawałek. 2016. „Vysokotemperaturnye kharakteristiki stalej C45 i C70”. W mat. konf. 74-ja Mezhdunarodnaja nauchno-tekhnicheskaja konferencija „Aktualnye Problemy Sovremennoj Nauki, Tekhniki i Obrazovanija”, Magnitogorsk, 18-22 kwiecień 2016.
- [17] Tkocz Marek, Eugeniusz Hadasik. 1998. „Porównanie metod badań plastyczności na gorąco”. W mat. konf. *Plastyczność materiałów*. Ustroń, 141–149.
- [18] Dyja Henryk, Aleksander Gałkin, Marcin Knapieński. 2010. „Reologia metali odkształczanych plastycznie”. W *Monografie* 190, 298–318. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej.