



Zmiany właściwości reologicznych wybranych stopów AlMg w próbie ściskania

Changes of the rheological properties of selected AlMg alloys in compression test

(1) Sylwester Sawicki^{1*}, (2) Henryk Dyja¹, (3) Anna Kawalek¹, (4) Konrad Laber¹,
(5) Hanna Wiśniewska-Weinert²

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

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

Informacje o artykule

Zgłoszenie: 19.12.2016

Recenzja: 31.01.2017

Akceptacja: 31.03.2017

Wkład autorów

(1) Autor przeprowadzonych badań

(2) Autor koncepcji

(3) Autor założeń

(4) Autor metod

(5) Nadzór merytoryczny

Streszczenie

W pracy zaprezentowano metodę wyznaczania krzywych umocnienia stopów AlMg: 5754, 5083, 5019 oraz 5XXX w oparciu o próbę ściskania cylindrycznych próbek o średnicy 10 mm i wysokości 12 mm. Badania przeprowadzono za pomocą fizycznego symulatora procesów metalurgicznych GLEEBLE 3800 w Instytucie Przeróbki Plastycznej i Inżynierii Bezpieczeństwa Politechniki Częstochowskiej. Urządzenie to umożliwia przeprowadzenie badań przy temperaturach odpowiadających rzeczywistym warunkom przeróbki plastycznej. Określono podatność badanych stopów do kształtowania plastycznego w zakresie temperatur 360–560°C oraz prędkości odkształceń z przedziału 0,05–1,0 s⁻¹. Naprężenie uplastyczniające σ_p , czyli naprężenie niezbędne do zainicjowania i kontynuacji plastycznego płynięcia metalu, w warunkach jednoosiowego stanu naprężenia jest funkcją odkształcenia (ϵ), prędkości odkształcenia ($\dot{\epsilon}$), temperatury (T) i historii przebiegu odkształcenia. Wyznaczenie charakterystyk technologicznej plastyczności jest szczególnie trudne dla warunków przeróbki plastycznej na gorąco, gdyż w strukturze materiału zachodzą jednocześnie procesy wynikające z mechanizmu odkształcenia plastycznego oraz procesy umocnienia, jak i aktywowane cieplnie, zależne od czasu, zjawiska prowadzące do osłabienia materiału. Określenie wartości σ_p badanych stopów AlMg ma duże znaczenie podczas projektowania procesów przeróbki plastycznej na gorąco. W oparciu o rejestrowane w czasie eksperymentu parametry odkształcenia plastycznego możliwe było poddanie danych obróbce matematycznej, filtracji cyfrowej oraz aproksymacji. Następnie za pomocą metody odwrotnej określono rzeczywiste wartości współczynników występujących w modelach numerycznych do własności reologicznych badanych materiałów.

Słowa kluczowe: badania plastometryczne, naprężenie uplastyczniające, stop AlMg 5754, stop AlMg 5083, stop AlMg 5019, stop AlMg 5XXX, próba ściskania

Article info

Received: 19.12.2016

Reviewed: 31.01.2017

Accepted: 31.03.2017

Authors' contribution

(1) Author of conducted tests

(2) Author of concept

(3) Author of assumptions

(4) Author of methods

(5) Substantive supervision

Abstract

This paper presents a method for determining hardening curves of AlMg alloys: 5754, 5083, 5019 and 5XXX based on a compression test of cylindrical specimens with a diameter of 10 mm and height of 12 mm. Tests were conducted by means of the GLEEBLE 3800 physical simulator of metallurgical processes at the Institute of Metalworking and Safety Engineering of Częstochowa University of Technology. This machine makes it possible to conduct tests at temperatures corresponding to actual metalworking conditions. The formability of the studied alloys was determined within the temperature range of 360–560°C and for strain rates within the range of 0.05–1.0 s⁻¹. Flow stress σ_p , or the stress required to initiate and continue plastic flow of metal in a uniaxial stress state, is a function of strain (ϵ), strain rate ($\dot{\epsilon}$), temperature (T) and the history of strain. Deter-

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 34 325 07 78; e-mail: sylsaw@wip.pcz.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 34 325 07 78; e-mail: sylsaw@wip.pcz.pl

mination of technological plasticity curves is particularly difficult for hot working conditions, since processes resulting from the plastic strain mechanism and hardening processes, as well as thermally activated, time-dependent phenomena leading to weakening of the material occur simultaneously in the material's structure. Determination of the σ_p value of tested AlMg alloys is of great significance when designing hot plastic working processes. Based on the plastic strain parameters registered during the experiment, it was possible to mathematically process data, filter it digitally and conduct approximation. Next, actual values of coefficients present in numerical models of the rheological properties of the studied materials were determined by means of the inverse method.

Keywords: *plastometric tests, flow stress, AlMg 5754 alloy, AlMg 5083 alloy, AlMg 5019 alloy, AlMg 5XXX alloy, compression test*

1. WSTĘP

Podstawą prawidłowej symulacji i projektowania procesów technologicznych jest znajomość charakterystyk opisujących właściwości technologiczne materiału. Dla procesów przeróbki plastycznej podstawową cechą charakteryzującą podatność materiału do kształtowania plastycznego jest naprężenie uplastyczniające σ_p i odkształcenie graniczne ε_g [1–8]. Poprzez prawidłowe wyznaczenie właściwości stopów AlMg w postaci wykresów naprężenie–odkształcenie, uwzględniających wpływ temperatury materiału i prędkości odkształcenia, można zwiększyć dokładność wyników zarówno podczas korzystania z wzorów empirycznych, jak również podczas obliczeń numerycznych, w których wykorzystuje się metodę elementów skończonych [3, 6].

Właściwości reologiczne badanych stopów aluminium zostały określone w próbach śpęczenia wykonanych w symulatorze Gleeble 3800 (rys. 1).

1. INTRODUCTION

Familiarity with curves describing a material's technological properties is the foundation of proper simulation and designing of technological processes. In metalworking processes, flow stress σ_p and limit strain ε_g are basic attributes characterizing the material's formability [1–8]. By properly determining the properties of AlMg alloys in the form of stress-strain curves accounting for the influence of the material's temperature and strain rate, the accuracy of results can be improved when using empirical formulas as well as during numerical simulations utilizing the finite element method [3, 6].

Rheological properties of the studied aluminum alloys were determined in upset forging tests performed in the Gleeble 3800 simulator (Fig. 1).

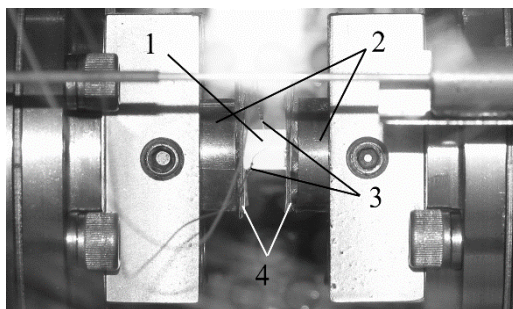


Rys. 1. Symulator fizyczny Gleeble 3800

Fig. 1. Gleeble 3800 physical simulator

Ogólny widok próbki podczas badań oraz komory urządzenia Gleeble 3800 pokazano na rys. 2.

A general view of a specimen during the test and of the chamber of the Gleeble 3800 simulator is shown in Fig. 2.



Rys. 2. Próbkę podczas badań w komorze symulatora Gleeble 3800:
1 – próbka, 2 – kowadła, 3 – termopary, 4 – podkładki tantalowe lub grafitowe

Fig. 2. Specimen during testing in the chamber of the Gleeble 3800 simulator:
1 – specimen, 2 – anvils, 3 – thermocouples, 4 – tantalum or graphite plates

Próba jednoosiowego ściskania (rys. 2) polega na ściskaniu cylindrycznych próbek pomiędzy dwiema dobrze nasmarowanymi płaszczyznami. Biorąc pod uwagę idealne warunki, ściskanie próbek powinno odbywać się izotermicznie. Obszar wzajemnego oddziaływania pomiędzy płaszczyznami a próbkami powinien posiadać zerowy współczynnik tarcia. Ponadto podczas odkształcania próbki nie powinny ulegać deformacji kształtu polegającej na utracie cylindrycznego kształtu. Biorąc pod uwagę te warunki oraz przyjmując założenie niezmienności objętości podczas ściskania, może być wyznaczona krzywa zależności rzeczywistego naprężenia od rzeczywistego odkształcenia. Zaletą testu jednoosiowego ściskania w podwyższonej temperaturze jest to, że dane dotyczące rzeczywistego naprężenia w stosunku do rzeczywistego odkształcenia mogą być uzyskane w znacznie szerszym zakresie odkształceń w stosunku do badanych np. niż w teście rozciągania. Prawie w każdym przypadku podczas testu jednoosiowego ściskania tarcie jest różne od zera oraz narzędzie spęczające ulega nieznacznemu ochłodzeniu. Używając systemów Gleeble'a, można zminimalizować tarcie przy użyciu smarowania oraz dogrzewać narzędzia. Kiedy beczkowatość próbki spowodowana tarcie jest minimalizowana, wówczas różnica między efektywnie zmierzoną zależnością naprężenie–odkształcenie i rzeczywistą zależnością naprężenie–odkształcenie jest minimalna. Jednakże w większości przypadków, w celu utrzymania spójności danych eksperymentalnych, jako wyniki testu jednoosiowego ściskania podawana jest efektywna zależność naprężenie–odkształcenie.

The uniaxial compression test (Fig. 2) is based on compressing cylindrical specimens between two well-lubricated surfaces. Under ideal conditions, compression of specimens should take place isothermally. The area of mutual interaction between the surfaces and specimens should have a friction coefficient equal to zero. Moreover, over the course of deformation, specimens should not undergo shape deformation involving loss of their cylindrical shape. Considering these conditions and under the assumption of unchanging volume during compression, the actual stress-strain curve can be determined. An advantage of the uniaxial compression test at elevated temperature is that data concerning actual stress relative to actual strain can be obtained within a much wider range of strains compared to the range tested in e.g. the tensile test. In nearly every case, friction is not equal to zero during the uniaxial compression test, and the upset forging tool undergoes slight cooling. Using Gleeble's systems, friction can be minimized by applying lubrication and heating of the tool. When the specimen's barreling due to friction is minimized, the difference between the effectively measured stress-strain curve and actual stress-strain curve is minimal. However, in the majority of cases, the effective stress-strain curve is given as the result of the uniaxial compression test for the purpose of maintaining cohesion of experimental data.

Próba jednoosiowego ściskania i test ściskania w płaskim stanie odkształcenia mogą być wykorzystane do badań warunków odkształcenia związanych np. z walcowaniem. Próba ściskania w płaskim stanie odkształcenia jest symulacją odkształcenia masy, podczas gdy próba jednoosiowego ściskania symuluje tylko elementy odkształcenia masy.

Poprzez sprzężenie komputera klasy PC z siłownikami i czujnikami w komorze odkształcenia można było w sposób ciągły rejestrować badane parametry podczas prowadzonych prób plastometrycznych. Oprogramowanie komputerowe współpracujące z urządzeniem było wykorzystywane do wyznaczenia naprężenia uplastyczniającego badanych stopów w zależności od wartości zadawanego odkształcenia i występującej „beczkowatości” próbki. W poszczególnych próbach plastometrycznych można zadawać różne temperatury próbek, gnioty, prędkości odkształceń i czas przerwy pomiędzy odkształceniami, co pozwala modelować przebieg rzeczywistego procesu technologicznego. Ze względu na znaczne prędkości odkształceń stosowane w procesach przemysłowych, nieosiągalnych w laboratorium, do wyznaczenia wartości σ_p dla warunków spotykanych w praktyce przemysłowej wykorzystywano odpowiednie zależności [2, 6].

2. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Właściwości stopów AlMg zostały określone na podstawie badań zrealizowanych przy temperaturach próbek odpowiadających rzeczywistym warunkom przeróbki plastycznej. Próby prowadzono w komorze próżniowej, przy stałej temperaturze odkształcanej próbki. Do badań plastometrycznych zastosowano próbki cylindryczne o średnicy 10 mm i długości 12 mm. W celu zminimalizowania wpływu zjawiska tarcia („beczkowatości” próbki) pomiędzy powierzchnie czołowe próbek a powierzchnie narzędzi wprowadzono podkładki grafitowe i specjalny smar na bazie grafitu. W celu zarejestrowania i kontrolowania zmian temperatury do powierzchni bocznej próbek podłącza-

The uniaxial compression test and compression test in a flat strain state can be used for testing strain conditions related e.g. to rolling. The compression test in a flat strain state simulates mass deformation, while the uniaxial compression test simulates only elements of mass deformation.

By coupling a PC-class computer to actuators and sensors in the deformation chamber, it was possible to continuously register the parameters tested during conducted plastometric tests. Computer software inter-operating with the machine was used to determine flow stress of the studied alloys depending on the set value of strain and “barreling” of the specimen. Different temperatures, drafts, strain rates and break times between deformations can be set for specimens in individual plastometric tests, which makes it possible to model the progression of an actual technological process. Due to the high strain rates applied in industrial processes, which are unattainable in a laboratory, the appropriate dependencies were used to determine σ_p values for conditions encountered in industrial practice [2, 6].

2. RESEARCH MATERIAL AND METHODOLOGY

The properties of AlMg alloys were determined on the basis of tests conducted at specimen temperatures corresponding to actual metalworking conditions. Tests were conducted in a vacuum chamber, at a constant temperature of the specimen undergoing deformation. Cylindrical specimens with a diameter of 10 mm and length of 12 mm were applied for plastometric tests. In order to minimize the influence of friction (“barreling” of the specimen), graphite plates and a special, graphite-based lubricant were applied between the face surfaces of specimens and tool surfaces. Two K-type thermocouples (NiCr-NiAl) were connected to the side surface of specimens for the purpose of registering and con-

no dwie termopary typu K (NiCr-NiAl). Próbkę cylindryczną nagrzewano metodą oporową za pomocą kowadeł roboczych. Chłodzenie próbek odbywało się poprzez nadmuchiwanie powietrza lub rozpylany nie agresywny czynnik ciekły.

Celem badań było określenie wpływu odkształcenia, prędkości odkształcenia i temperatury na zmiany wartości naprężenia uplastyczniającego dla czterech stopów AlMg, dla warunków przeróbki plastycznej występujących w praktyce przemysłowej. Skład chemiczny badanych stopów przedstawiono w tab. 1.

trolling temperature changes. The cylindrical specimens were heated using the resistance method by means of the working anvils. Specimens were cooled by air blowing or spraying of a non-aggressive liquid agent.

The goal of tests was to determine the effect of strain, strain rate and temperature on changes of flow stress values for four AlMg alloys, under metalworking conditions occurring in industrial practice. The chemical composition of the tested alloys is presented in Tab. 1.

Tab. 1. Skład chemiczny badanych stopów AlMg, %; R – zawartość Al

Tab. 1. Chemical composition of tested AlMg alloys, %; R – Al content

Stop AlMg AlMg alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
5019	0,246	0,146	0,004	0,567	5,54	0,002	0,026	0,019	R
5083	0,229	0,145	0,004	0,553	4,44	0,120	0,024	0,018	R
5754	0,224	0,140	0,007	0,465	3,44	0,002	0,022	0,018	R
5xxx	0,246	0,146	0,004	0,567	5,54	0,002	0,026	0,019	R

Warunki badań plastometrycznych dobrane w taki sposób, aby po ich zrealizowaniu możliwe było wyznaczenie funkcji służących do określenia wartości naprężenia uplastyczniającego oraz ich współczynników, dla określonych warunków odkształcania podczas procesu wyciskania.

Próby plastometryczne prowadzono dla następujących parametrów technologicznych:

- temperatura próbki: 360 C, 400 C, 420 C, 440 C, 480 C, 500 C, 520 C i 560 C,
- prędkość odkształcenia: 0,05 s⁻¹; 0,1 s⁻¹, 0,25 s⁻¹, 0,5 s⁻¹ i 1,0 s⁻¹,
- odkształcenie rzeczywiste: do 1,2.

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

3. WYNIKI BADAŃ

Rzeczywiste oraz aproksymowane przebiegi zmian naprężenia uplastyczniającego w zależności od odkształcenia rzeczywistego, dla badanego zakresu temperatur i prędkości odkształ-

The conditions of plastometric tests were selected in such a manner, so that it would be possible to determine functions serving for determination of flow stress values and their coefficients for specific deformation conditions during the extrusion process on their basis.

Plastometric tests were conducted for the following technological parameters:

- specimen temperature: 360 C, 400 C, 420 C, 440°C, 480 C, 500 C, 520 C and 560 C,
- strain rate: 0.05 s⁻¹; 0.1 s⁻¹, 0.25 s⁻¹, 0.5 s⁻¹ and 1.0 s⁻¹,
- actual strain: up to 1.2.

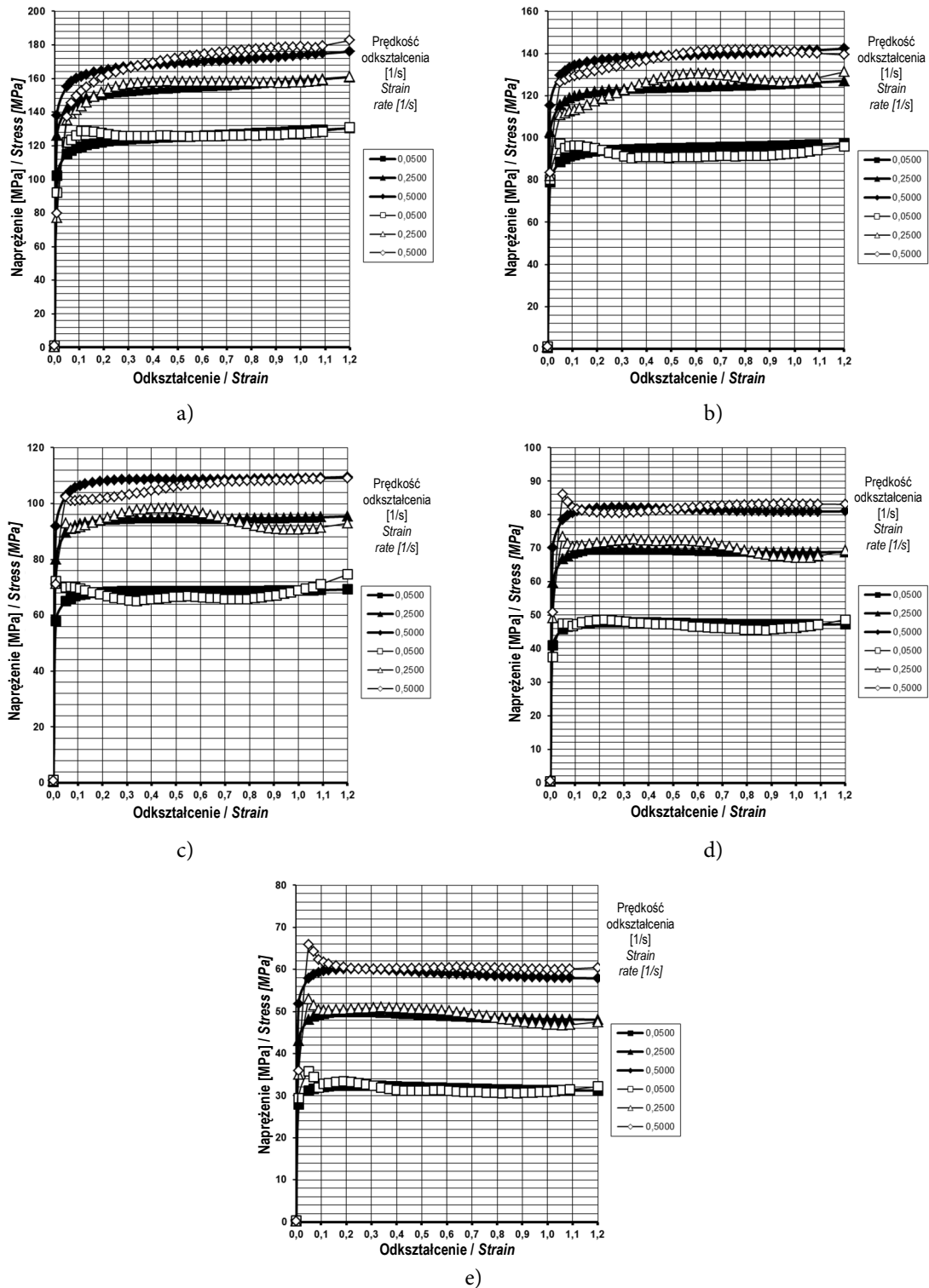
Specimens were heated at a constant rate of 5°C/s to the set temperature, held at this temperature for 10 s, and then subjected to strain.

3. TESTS RESULTS

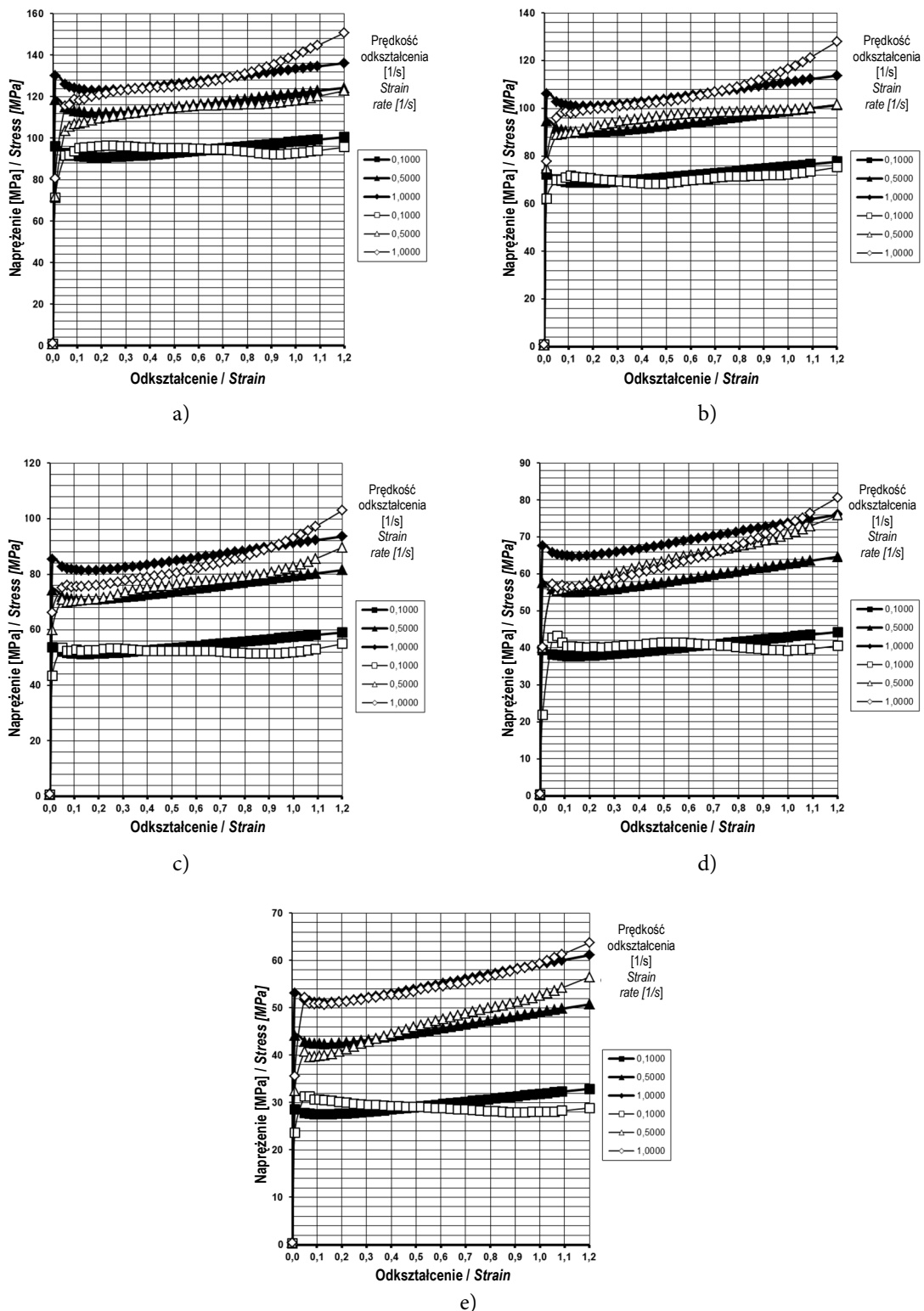
Actual and approximated progressions of flow stress as a function of actual strain for the tested range of temperatures and strain rates of AlMg 5019 alloy are presented in Fig. 3, for AlMg

czenia stopu AlMg 5019, przedstawiono na rys. 3, stopu AlMg 5083 – na rys. 4, stopu AlMg 5754 – na rys. 5, a stopu AlMg 5xxx – na rys. 6.

5083 alloy in Fig. 4, for AlMg 5754 alloy in Fig. 5, and for AlMg 5xxx alloy in Fig. 6.

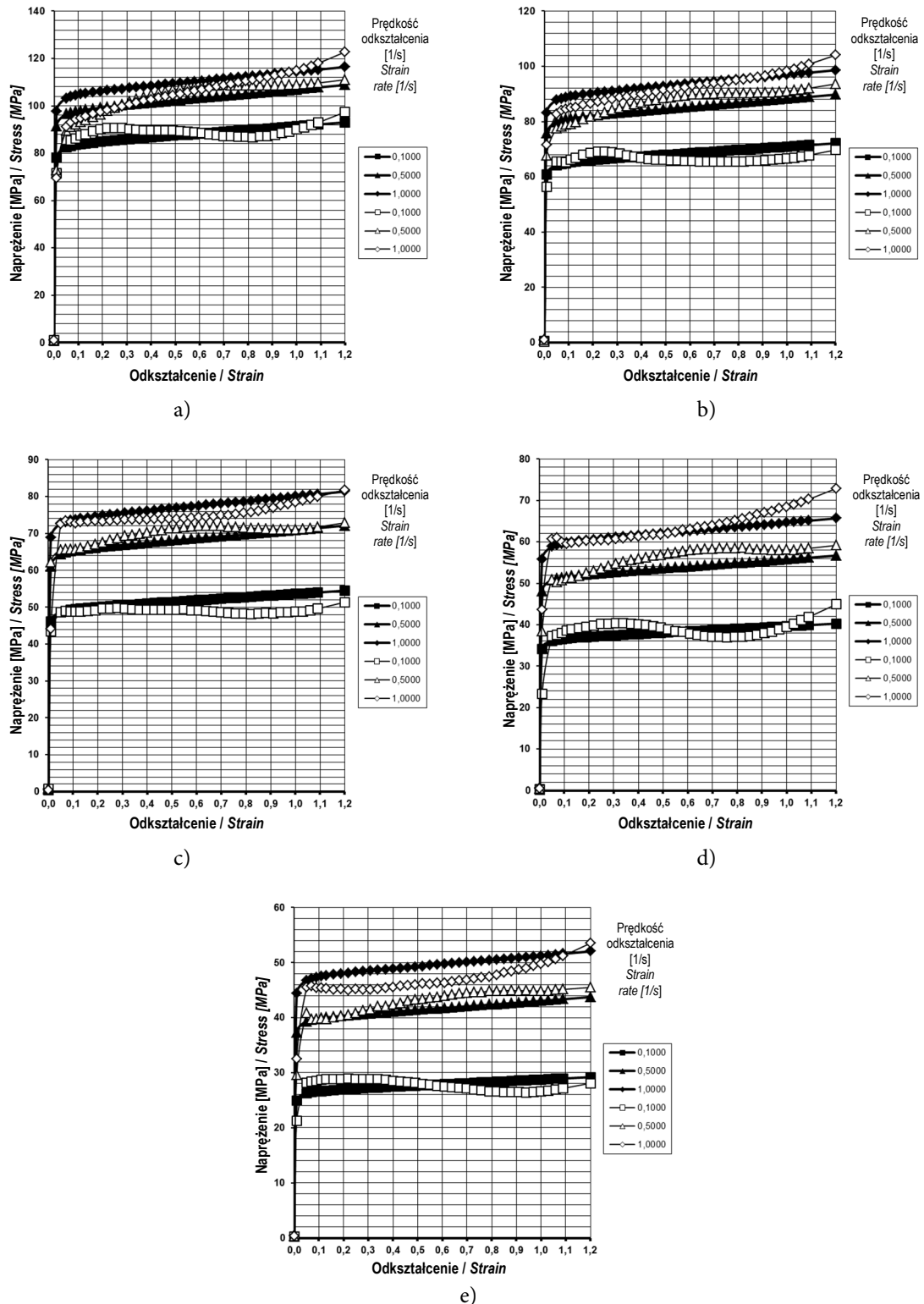


Rys. 3. Krzywe płynięcia plastycznego stopu AlMg 5019 uzyskane przy temperaturach: a) 360°C, b) 400°C, c) 440°C, d) 480°C, e) 520°C; symbole puste – dane z badań plastometrycznych; symbole pełne – dane po aproksymacji
Fig. 3. Plastic flow curves for AlMg 5019 alloys obtained at temperatures: a) 360°C, b) 400°C, c) 440°C, d) 480°C, e) 520°C; empty symbols – data from plastometric tests; full symbols – data after approximation



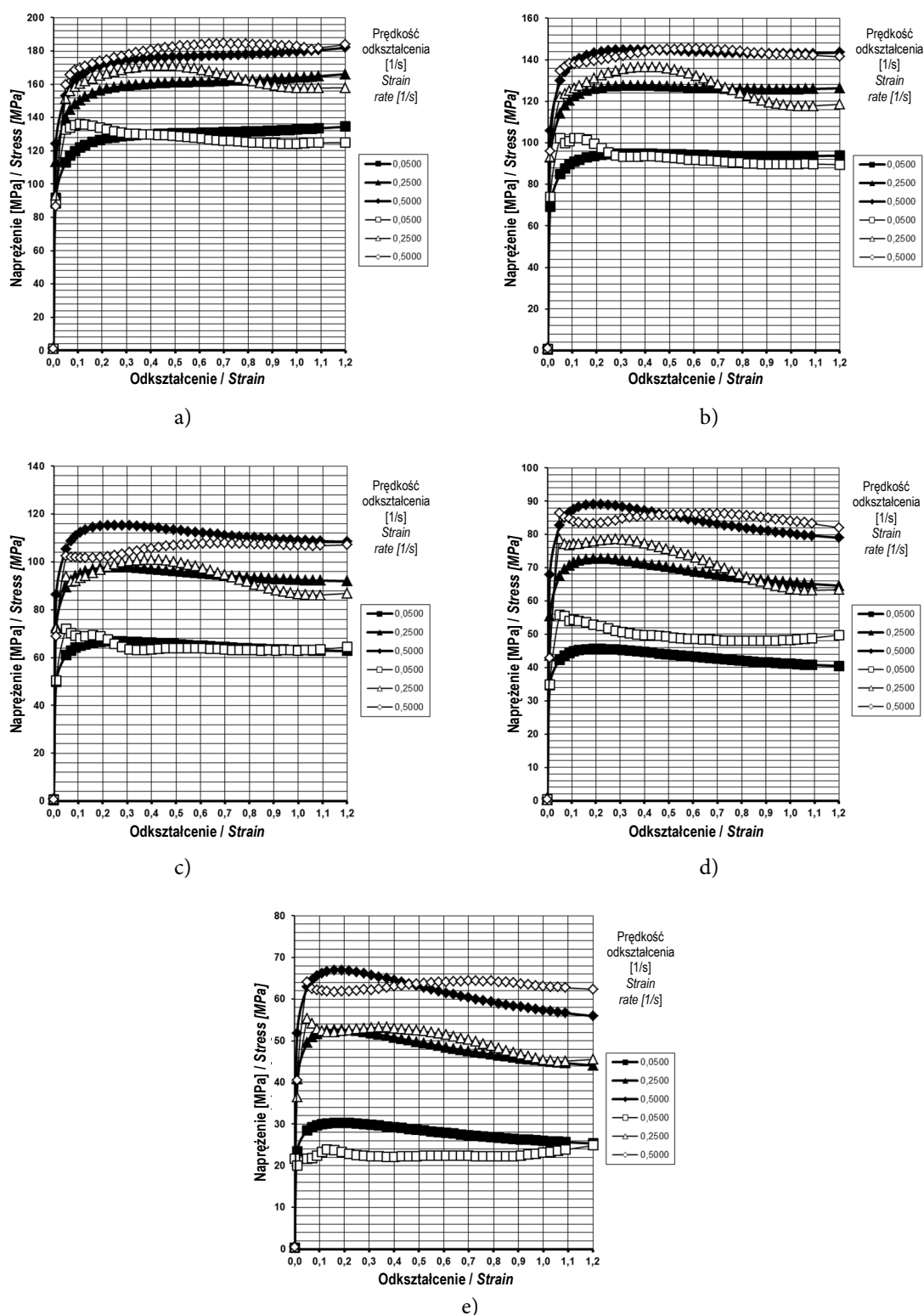
Rys. 4. Krzywe płynięcia plastycznego stopu AlMg 5083 uzyskane przy temperaturach: a) 400°C, b) 440°C, c) 480°C, d) 520°C, e) 560°C; symbole puste – dane z badań plastometrycznych; symbole pełne – dane po aproksymacji

Fig. 4. Plastic flow curves for AlMg 5083 alloys obtained at temperatures: a) 400°C, b) 440°C, c) 480°C, d) 520°C, e) 560°C; empty symbols – data from plastometric tests; full symbols – data after approximation



Rys. 5. Krzywe płynięcia plastycznego stopu AlMg 5754 uzyskane przy temperaturach: a) 400°C, b) 440°C, c) 480°C, d) 520°C, e) 560°C; symbole puste – dane z badań plastometrycznych; symbole pełne – dane po aproksymacji

Fig. 5. Plastic flow curves for AlMg 5754 alloys obtained at temperatures: a) 400°C, b) 440°C, c) 480°C, d) 520°C, e) 560°C; empty symbols – data from plastometric tests; full symbols – data after approximation



Rys. 6. Krzywe płynięcia plastycznego stopu AlMg 5xxx uzyskane przy temperaturach: a) 360°C, b) 400°C, c) 440°C, d) 480°C, e) 520°C; symbole puste – dane z badań plastometrycznych; symbole pełne – dane po aproksymacji

Fig. 6. Plastic flow curves for AlMg 5xxx alloys obtained at temperatures: a) 360°C, b) 400°C, c) 440°C, d) 480°C, e) 520°C; empty symbols – data from plastometric tests; full symbols – data after approximation

Na podstawie danych zamieszczonych na rys. 3 można stwierdzić, że na wartość naprężenia uplastyczniającego badanego stopu AlMg 5019 wpływa prędkość odkształcenia i temperatury, dla badanego zakresu tych zmiennych. Przy temperaturach w zakresie 440–520°C oraz prędkościach odkształcenia (0,05–0,5 s⁻¹) następuje spadek naprężenia uplastyczniającego wraz ze wzrostem stosowanego gniotu, co jest spowodowane prawdopodobnie występowaniem rekrytalizacji dynamicznej. Przy niższych temperaturach w zakresie 360–400°C oraz prędkościach odkształcenia (0,05–0,5 s⁻¹) krzywe umocnienia mają charakter rosnący lub naprężenie uplastyczniające stabilizuje się na stałym poziomie.

Dla badanego stopu aluminium 5083 przy analizowanym zakresie temperatur oraz prędkości odkształcenia, krzywa σ_p (rys. 4) wykazuje umocnienie. Jedynie podczas odkształcania z prędkością 0,1 s⁻¹ dla zakresu temperatur 400–560°C w materiale zachodzi prawdopodobnie rekrytalizacja dynamiczna, której efektem jest spadek wartości naprężenia uplastyczniającego wraz ze wzrostem gniotu. Najmniejsze osłabienie stopu 5083 podczas odkształcania zaobserwowano dla najniższych badanych temperatur 400°C oraz 440°C.

Z wyników badań zamieszczonych na rys. 5 wynika, że wartości naprężenia uplastyczniającego badanego stopu aluminium 5754 są zbliżone do wartości σ_p uzyskanych dla stopu 5083. Można stwierdzić, że stop 5754 jest również czuły na zmiany prędkości odkształcenia i temperatury, dla badanego zakresu tych parametrów technologicznych. Dla analizowanego zakresu temperatur oraz prędkości odkształcenia stop 5754 również wykazuje umocnienie. Podczas odkształcania z prędkością 0,1 s⁻¹ dla zakresu temperatur 400–560°C stop ten podczas odkształcenia ulega umocnieniu, jednak wraz ze wzrostem odkształcenia występuje spadek wartości naprężenia uplastyczniającego, a następnie powtórny jego wzrost.

Na podstawie danych zamieszczonych na rys. 6 można stwierdzić, że stop aluminium 5xxx jest czuły na zmiany prędkości odkształcenia i temperatury, dla badanego zakresu tych parametrów. Krzywe umocnienia mają charakter

Based on the data shown in Fig. 3, it can be stated that the flow stress value of AlMg 5019 alloy is affected by strain rate and temperature, within the tested range of these variables. At temperatures within the range of 440–520°C and strain rates (0.05–0.5 s⁻¹), there is a drop in flow stress and an increase in applied draft, which is probably caused by the occurrence of dynamic recrystallization. At lower temperatures, within the range of 360–400°C, and strain rates (0.05–0.5 s⁻¹), hardening curves have an increasing tendency or flow stress stabilizes at a constant level.

For the 5083 aluminum alloy, the σ_p curve (Fig. 4) exhibits hardening within the analyzed range of temperatures and strain rates. Only during strain at a rate of 0.1 s⁻¹ within the temperature range of 400–560°C does probable dynamic recrystallization occur in the material, resulting in a decrease of the flow stress value and an increase of draft. The lowest weakening of 5083 alloy during deformation is observed for the lowest tested temperatures of 400°C and 440°C.

The test results given in Fig. 5 also show that flow stress values of 5754 aluminum alloy are similar to the σ_p values obtained for 5083 alloy. It can be said that 5754 alloy is also sensitive to changes of strain rate and temperature within the tested range of these technological parameters. 5754 alloy also exhibits hardening within the analyzed range of temperatures and strain rates. During strain at a rate of 0.1 s⁻¹ within the temperature range of 400–560°C, this alloy is hardened during deformation, however as strain grows, the value of flow stress decreases, and then increases again.

Based on the data shown in Fig. 6, it can be stated that 5xxx aluminum alloy is sensitive to changes of strain rate and temperature, within the tested range of these variables. Hardening curves have an increasing tendency or flow stress σ_p stabilizes at a constant level. A slight drop in

rosnący lub naprężenie uplastyczniające σ_p stabilizuje się na stałym poziomie. W materiale można zaobserwować niewielki spadek wartości naprężenia uplastyczniającego wraz ze wzrostem gniotu, co jest prawdopodobnie skutkiem występowania rekrytalizacji dynamicznej.

Analizując przebieg rzeczywistych oraz aproksymowanych krzywych umocnienia stopów AlMg dla badanego zakresu parametrów, można zaobserwować dużą zgodność pomiędzy rzeczywistymi wartościami naprężenia uplastyczniającego analizowanych stopów a wartościami otrzymanymi w wyniku aproksymacji.

W dostępnych programach komputerowych, przeznaczonych do rozwiązywania zagadnień z zakresu plastycznego płynięcia metalu lub do obliczeń sił i momentów walcowania metodą elementów skończonych, wartości naprężenia uplastyczniającego σ_p zależą od przyjętej funkcji naprężenia uplastyczniającego. Najczęściej naprężenie uplastyczniające opisywane jest zależnością w postaci:

$$\sigma_p = (\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T).$$

Do matematycznego opisu zmian wartości σ_p w zależności od odkształcenia, temperatury i prędkości odkształcenia wykorzystuje się wiele funkcji.

Do opisu zmian wartości σ_p dla badanych stopów przyjęto funkcję:

$$\sigma_p = \alpha_1 \varepsilon^{\alpha_2} \exp\left(\frac{\alpha_3}{\dot{\varepsilon}}\right) \exp(\alpha_4 \varepsilon) (1 + \varepsilon)^{\alpha_5} \dot{\varepsilon}^{\alpha_6} \dot{\varepsilon}^{\alpha_7} T^{\alpha_8} \exp(\alpha_9 T) \quad (1)$$

która może być przekształcona do postaci:

$$\sigma_p = A * e^{m_1 T} * T^{m_2} * \varepsilon^{m_3} * e^{\frac{m_4}{\dot{\varepsilon}}} * (1 + \varepsilon)^{m_5} * e^{m_6 \varepsilon} * \dot{\varepsilon}^{m_7} * \varepsilon^{m_8} * e^{m_9 T} \quad (2)$$

gdzie: σ_p – naprężenie uplastyczniające, T – temperatura pasma, ε – odkształcenie rzeczywiste, $\dot{\varepsilon}$ – prędkość odkształcenia, A , m_1 – m_9 – współczynniki funkcji.

Zależność (1) jest często stosowana do wyznaczenia wartości σ_p w programach komputerowych przy numerycznym modelowaniu procesów przeróbki plastycznej. Po aproksymacji wyników badań plastometrycznych wyznaczono współczynniki równania (2). Wartości tych współczynników zamieszczono w tab. 2.

the value of flow stress and an increase of draft can be observed in the material, which is probably due to the occurrence of dynamic recrystallization.

Through analysis of the progression of actual and approximated hardening curves of AlMg alloys within the tested parameter ranges, high consistency between actual and approximated flow stress values of the analyzed alloys can be observed.

In available software intended for solving problems concerning plastic flow of metal or for calculating rolling forces and torques using the finite element method, flow stress σ_p values depend on the accepted flow stress function. Flow stress is most frequently described by a dependency in the form of

$$\sigma_p = (\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T).$$

Many functions are used to mathematically describe changes of σ_p values depending on strain, temperature and strain rate.

The following function was adopted to describe the σ_p values of the tested alloys:

$$\sigma_p = \alpha_1 \varepsilon^{\alpha_2} \exp\left(\frac{\alpha_3}{\dot{\varepsilon}}\right) \exp(\alpha_4 \varepsilon) (1 + \varepsilon)^{\alpha_5} \dot{\varepsilon}^{\alpha_6} \dot{\varepsilon}^{\alpha_7} T^{\alpha_8} \exp(\alpha_9 T) \quad (1)$$

which can be transformed into the form of:

$$\sigma_p = A * e^{m_1 T} * T^{m_2} * \varepsilon^{m_3} * e^{\frac{m_4}{\dot{\varepsilon}}} * (1 + \varepsilon)^{m_5} * e^{m_6 \varepsilon} * \dot{\varepsilon}^{m_7} * \varepsilon^{m_8} * e^{m_9 T} \quad (2)$$

where: σ_p – flow stress, T – band temperature, ε – actual strain, $\dot{\varepsilon}$ – strain rate, A , m_1 – m_9 – coefficients in the function.

Dependency (1) is often used to determine σ_p values in computer software during numerical modeling of metalworking processes. The coefficients of equation (2) were determined after approximation of the results of plastometric tests. The values of these coefficients are given in Tab. 2.

Tab. 2. Wartości współczynników A i m_1 – m_9 funkcji (2) stosowane do określania wartości σ_p badanych stopów AlMg
 Tab. 2. Values of coefficients A and m_1 – m_9 in function (2) used to determine σ_p values of the tested AlMg alloys

Stop AlMg AlMg alloy	A	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_7	m_8	m_9
5019	0,0000000325	-0,0166638	0,053865	-0,180732	-0,000473	-0,001066	0,199842	0,000863	4,851640
5083	0,000066	-0,011584	0,009208	-0,286316	0,101460	-0,000464	-0,000117	0,000959	3,159460
5754	0,086677	-0,009417	-0,052679	-0,210967	0,013087	-0,000506	0,000749	0,000857	1,816680
5xxx	0,0000004697	-0,014386	0,122237	-0,347722	0,372215	-0,000394	-0,002446	0,001330	4,293170

Krzywe płynięcia badanych stopów AlMg, wyznaczone za pomocą równania (2) i współczynników zawartych w tab. 2, przedstawiono na rys. 3–6. Analizując ich przebieg, można zauważyć, że występują tylko niewielkie rozbieżności pomiędzy krzywymi wyznaczonymi podczas badań eksperymentalnych a krzywymi uzyskanymi w wyniku aproksymacji wyników badań plastometrycznych. W celu zmniejszenia rozbieżności pomiędzy wynikami uzyskanymi w wyniku aproksymacji a wynikami rzeczywistymi, posłużono się złożoną metodą polegającą na połączeniu wyznaczonych eksperymentalnie krzywych plastometrycznych z krzywymi uzyskanymi w wyniku aproksymacji. Dane opisujące krzywe płynięcia badanych stopów AlMg podczas modelowania numerycznego wprowadzono w postaci tabel, w których wartości naprężenia uplastyczniającego, podobnie jak w równaniu (2), zależne są od wartości odkształcenia rzeczywistego, prędkości odkształcenia i temperatury odkształcanych stopów AlMg.

Podczas budowy tabel uwzględnia się założenie, że dokładność wartości naprężenia uplastyczniającego po aproksymacji zależy od ilości wprowadzonych danych dla wartości odkształcenia rzeczywistego i naprężenia σ_p . W pracach [8, 9] przedstawiono wyniki badań, podczas których odczytywano wartości naprężenia uplastyczniającego dla przyrostów odkształcenia rzeczywistego równych wartości 0,05. Dla pewnych zakresów odkształcenia przyjęcie takiego kroku obliczeniowego dla zmian odkształcenia rzeczywistego może wpłynąć na uzyskanie заниzonych wartości σ_p , co przedstawiono na rys. 1 – krzywa 3 (szczegóły A).

W niniejszej pracy zwiększono ilość wprowadzanych wartości naprężenia uplastyczniają-

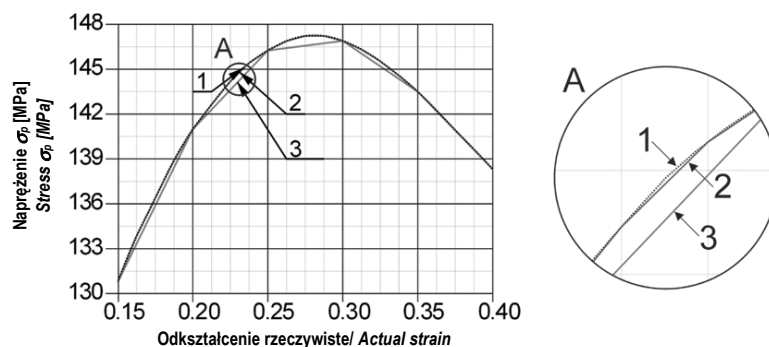
Flow curves of tested AlMg alloys determined by means of equation (2) and the coefficients given in Tab. 2 are presented in Fig. 3–6. By analyzing their progression, it can be observed that there are only slight divergences between curves determined during experimental tests and curves obtained by approximation of plastometric test results. To reduce divergences between results obtained by approximation and actual results, a complex method based on combining experimentally determined plastometric curves with curves obtained by approximation was employed. Data describing flow curves of tested AlMg alloys during numerical modeling were introduced in the form of tables in which flow stress values are dependent on the value of actual strain, strain rate and temperature of AlMg alloys, similarly as in equation (2).

During preparation of these tables, it is assumed that the accuracy of the flow stress value after approximation depends on the amount of input data for actual strain and stress σ_p values. Studies [8, 9] present the results of tests in which flow stress values were registered for increments of actual strain equal to 0.05. For certain ranges of strain, the adoption of such a computational step for actual strain changes may result in underestimated values of σ_p , as presented in Fig. 1 – curve 3 (detail A).

In this paper, the number of input flow stress values was increased through their regist-

cego poprzez odczytywanie ich dla przyrostów odkształcenia rzeczywistego o wartość 0,0125.

Wprowadzając większą ilość odczytów wartości σ_p dla tych samych zakresów odkształcenia, uzyskano mniejszą różnicę między wartościami zmierzonymi i wprowadzonymi – krzywa 2 na rys. 7 (szczegół A).



Rys. 7. Fragment krzywej płynięcia stali BSt500S przy temperaturze 1100°C dla prędkości odkształcenia 1 s⁻¹; 1 – badania doświadczalne, 2 – krzywa otrzymana dla przyrostów odkształcenia rzeczywistego o wartość 0,0125, 3 – krzywa otrzymana dla przyrostów odkształcenia rzeczywistego o wartość 0,05

Fig. 7. Part of the flow curve for BSt500S steel at a temperature of 1100 °C and strain rate 1 s⁻¹; 1 – experimental tests, 2 – curve obtained for increments of actual strain equal to 0.0125, 3 – curve obtained for increments of actual strain equal to 0.05

Zaletą połączenia dwóch metod, polegających na wprowadzaniu do tabel rzeczywistych wartości naprężenia uplastyczniającego wyznaczonego eksperymentalnie oraz w wyniku aproksymacji, jest możliwość jego określenia w szerszym zakresie niż przeprowadzone badania plastometryczne oraz wprowadzania danych tylko z tych badań. Do aproksymacji danych, dla prędkości odkształcenia 0,0001 s⁻¹ i odkształceń rzeczywistych w zakresie 0,0001–0,05, można wykorzystać dowolną postać funkcji aproksymującej. Połączenie opisanej metody pozwala uzyskać wyniki obliczeń numerycznych o większej dokładności na skutek minimalizacji błędów podczas definiowania wartości naprężenia uplastyczniającego. Mało dokładny opis matematyczny wielkości σ_p może być przyczyną powstawania znacznych błędów obliczeń numerycznych zarówno podczas symulacji procesu walcowania, jak i podczas obliczania sił i momentów walcowania.

ration at increments of actual strain equal to 0.0125.

By introducing a greater number of σ_p readings for the same strain ranges, a lower difference between measured and input values was obtained – curve 2 in Fig. 7 (detail A).

The advantage of combining the two methods, based on introducing both experimentally determined and approximated flow stress values into tables of actual values, is that this provides the capability of determining flow stress within a range wider than that applied in conducted plastometric tests while using only data from these tests. Any form of the approximation function can be used to approximate data for a strain rate of 0.0001 s⁻¹ and actual strains within the range of 0.0001–0.05. The method described above makes it possible to obtain results of numerical simulations with greater accuracy as a result error minimization during definition of the flow stress value. An inaccurate mathematical description of σ_p may be the cause of significant errors in numerical computations during simulation of the rolling process as well as during calculation of rolling forces and torques.

4. WNIOSKI

Po przeprowadzeniu badań właściwości reologicznych stopów AlMg oraz po analizie otrzymanych wyników badań sformułowano następujące wnioski:

- stopy AlMg wykazują istotny wpływ odkształcenia, temperatury i prędkości odkształcenia na wartości naprężenia uplastyczniającego,
- dla wszystkich analizowanych stopów AlMg wraz ze wzrostem prędkości odkształcenia następuje równoczesny wzrost wartości naprężenia uplastyczniającego,
- wzrost temperatury badanych stopów AlMg podczas ich odkształcania wpływa na spadek wartości naprężenia uplastyczniającego,
- analizując przebieg rzeczywistych oraz aproksymowanych krzywych umocnienia badanych materiałów, w badanym zakresie parametrów, stwierdzono zgodność pomiędzy rzeczywistymi wartościami naprężenia uplastyczniającego a wartościami otrzymanymi w wyniku aproksymacji,
- uwzględnienie rzeczywistych własności reologicznych analizowanych stopów AlMg podczas modelowania numerycznego procesów technologicznych wpłynie na zwiększenie dokładności obliczeń i bardziej wydajne prowadzenie rzeczywistych procesów występujących w warunkach przemysłowych.

PODZIĘKOWANIA

Badania naukowe zostały sfinansowane ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju nr: UOS-EM-1-335/001 „Opracowanie innowacyjnej technologii wyciskania kształtowników z trudno odkształcalnych stopów aluminium” (program DEMONSTRATOR+).

LITERATURA

- [1] Grosman F., E. Hadasik. 2005. *Technologiczna plastyczność metali. Badania plastometryczne*. Gliwice.
- [2] Galkin A.M. 1990. *Badania plastometryczne metali i stopów*. Seria Monografie nr 15. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej.

4. CONCLUSIONS

The following conclusions were formulated after conducting tests of the rheological properties of AlMg alloys and after analysis of obtained test results:

- *AlMg alloys exhibit a significant effect of strain, temperature and strain rate on flow stress values,*
- *for all analyzed AlMg alloys, the flow stress value increases as strain rate increases,*
- *an increase in the temperature of the tested AlMg alloys during their deformation causes reduction of the flow stress value,*
- *through analysis of the progression of actual and approximated hardening curves of the tested material, within the tested parameter ranges, consistency between actual and approximated flow stress values was observed,*
- *accounting for the actual rheological properties of the analyzed AlMg alloys during numerical modeling of technological processes will increase the accuracy of calculations and make performance of actual processes more efficient under industrial conditions.*

ACKNOWLEDGEMENTS

This scientific research was financed with funds from the National Centre for Research and Development No: UOS-EM-1-335/001 “Development of innovative technology for extrusion of shaped sections from hard-deformable aluminum alloys” (DEMONSTRATOR+ program).

REFERENCES

- [1] Grosman F., E. Hadasik. 2005. *Technologiczna plastyczność metali. Badania plastometryczne*. Gliwice.
- [2] Galkin A.M. 1990. *Badania plastometryczne metali i stopów*. Seria Monografie nr 15. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej.

- [3] Danchenko V., H. Dyja, L. Lesik, L. Mashkin, A. Milenin. 2002. *Technologia i modelowanie procesów walcowania w wykrojach*. Częstochowa: Wydaw. Wydz. Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej PCz.
- [4] Nowakowski A., M. Kuźmiński. 1996. „Badania plastometryczne stali konstrukcyjnych w aspekcie procesu walcowania na gorąco”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 7: 243–246.
- [5] Henzel A., T. Spittel. 1982. *Rasciet energosilovykh parametrov v processakh obrobтки metallov davlenijem*. Metalurgija. Moskva.
- [6] Dyja H., A. Gałkin, M. Knapiński. 2010. Reologia metali odkształczanych plastycznie. W *Monografie nr 190*, 217–220. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej.
- [7] Laber K., A. Kawalek, S. Sawicki, H. Dyja, J. Borowski, D. Leśniak, H. Jurczak. 2016. „Application of Torsion Test for Determination of Rheological Properties of 5019 Aluminium Alloy”. *Key Engineering Materials, Volume: Engineering and Technology on Non-Ferrous Metals* 682: 356–361.
- [8] Mróz S., P. Szota, H. Dyja. 2005. „Numerical Modeling of Rolling Process Using Longitudinal Slitting Passes”. W mat. konf. AISTech 2005 Processing of the Iron and Steel Technology Conference Vol. II, May 9–12, Charlotte, USA, 775–783.
- [9] Mróz S., P. Szota, H. Dyja. 2005. „Numerical Modeling of Rolling Process Using Longitudinal Slitting Passes”, *Iron and Steel Technology* 2 (10): 40–49.
- [10] Sawicki S., A. Kawalek, K. Laber, H. Dyja, J. Borowski, D. Leśniak, H. Jurczak. 2016. „Plastometric Testing of Rheological Properties of 5083 and 5754 Aluminium Alloy”. *Key Engineering Materiale, Volume: Engineering and Technology on Non-Ferrous Metals* 682: 362–366.
- [3] Danchenko V., H. Dyja, L. Lesik, L. Mashkin, A. Milenin. 2002. *Technologia i modelowanie procesów walcowania w wykrojach*. Częstochowa: Wydaw. Wydz. Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej PCz.
- [4] Nowakowski A., M. Kuźmiński. 1996. „Badania plastometryczne stali konstrukcyjnych w aspekcie procesu walcowania na gorąco”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 7: 243–246.
- [5] Henzel A., T. Spittel. 1982. *Rasciet energosilovykh parametrov v processakh obrobтки metallov davlenijem*. Metalurgija. Moskva.
- [6] Dyja H., A. Gałkin, M. Knapiński. 2010. Reologia metali odkształczanych plastycznie. W *Monografie nr 190*, 217–220. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej.
- [7] Laber K., A. Kawalek, S. Sawicki, H. Dyja, J. Borowski, D. Leśniak, H. Jurczak. 2016. „Application of Torsion Test for Determination of Rheological Properties of 5019 Aluminium Alloy”. *Key Engineering Materials, Volume: Engineering and Technology on Non-Ferrous Metals* 682: 356–361.
- [8] Mróz S., P. Szota, H. Dyja. 2005. „Numerical Modeling of Rolling Process Using Longitudinal Slitting Passes”. In conf. proceed. of AISTech 2005 Processing of the Iron and Steel Technology Conference Vol. II, May 9–12, Charlotte, USA, 775–783.
- [9] Mróz S., P. Szota, H. Dyja. 2005. „Numerical Modeling of Rolling Process Using Longitudinal Slitting Passes”, *Iron and Steel Technology* 2 (10): 40–49.
- [10] Sawicki S., A. Kawalek, K. Laber, H. Dyja, J. Borowski, D. Leśniak, H. Jurczak. 2016. „Plastometric Testing of Rheological Properties of 5083 and 5754 Aluminium Alloy”. *Key Engineering Materiale, Volume: Engineering and Technology on Non-Ferrous Metals* 682: 362–366.

