

Wojciech Moćko

Instytut Transportu Samochodowego

**WPLYW SZYBKOSCI ORAZ TEMPERATURY ODKSZTAŁCANIA
NA LEPKO-PLASTYCZNE WŁAŚCIWOŚCI
TYTANU ORAZ STOPU TiAl6V4**

W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących lepko-plastycznych właściwości komercyjnie czystego tytanu oraz stopu TiAl6V4. Analiza została przeprowadzona dla szerokiego zakresu szybkości odkształcania od $2 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ do $2 \times 10^3 \text{s}^{-1}$ z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej oraz pręta Hopkinsona, odpowiednio w quasi-statycznym i dynamicznym zakresie obciążeń. Wpływ temperatury na krzywe ściskania został wyznaczony w zakresie od 23°C do 400°C , przy wykorzystaniu pręta Hopkinsona wyposażonego w piec. Na podstawie otrzymanych wyników przeprowadzono kalibrację współczynników modelu Johnsona-Cooka opisującego lepko-plastyczne właściwości badanych materiałów.

***EFFECT OF STRAIN RATE AND TEMPERATURE
ON THE VISCO-PLASTIC COMMERCIAL PROPERTIES OF
PURE TITANIUM AND TiAl6V4 ALLOY***

The paper presents result of the analysis of the visco-plastic properties of commercially pure titanium and TiAl6V4 titanium alloy. The investigation were carried out for the wide range of strain rates from $2 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ do $2 \times 10^3 \text{s}^{-1}$ using servo-hydraulic testing machine and Hopkinson bar for the quasi-static and dynamic loading regime, respectively. The influence of the temperature on the compressive curves was determined within range of temperatures from 23°C do 400°C using Hopkinson bar equipped with furnace. Calibration of the Johnson-Cook's constitutive relation taking into account visco-plastic properties of tested materials was carried out on the basis of experimental results.

1. Wprowadzenie

Stopy lekkie zawierające aluminium, magnez czy tytan są szeroko stosowane w konstrukcjach wymagających zapewnienia dużej wytrzymałości, przy jednoczesnym obniżeniu masy danego elementu. Przykłady wykorzystania tego typu materiałów można znaleźć w branży lotniczej, sportowej, samochodowej czy zbrojeniowej. Na szczególną uwagę zasługują stopy tytanu, które wykazują nie tylko znakomite właściwości mechaniczne, ale także dobrą odporność chemiczną. W związku z coraz bardziej restrykcyjnymi wymaganiami dotyczącymi emisji szkodliwych substancji przez pojazdy [4], co wymusza zwiększenie temperatury spalania, jest to bardzo pożądana cecha, gdyż pozwala na wytwarzanie lekkich i odpornych na korozję wysokotemperaturową elementów silnika. Jednym z najbardziej narażonych na agresywne środowisko elementów głowicy są zawory [9]. Są to elementy pracujące w temperaturze rzędu 1000°C [1], przy dużych gradientach temperatury i jednocześnie narażone na działanie agresywnych chemicznie produktów spalania. Dodatkowo elementy te są poddawane obciążeniom cyklicznym powstającym w trakcie rozruchu i chłodzenia silnika. Problem intensywnej korozji elementów silnika powodowanej przez spaliny jest coraz bardziej istotny, w związku ze zwiększaniem się udziału biokomponentów w paliwach. Przeprowadzone badania pokazują, że stosowane dotychczas stale zaworowe, po zastosowaniu paliwa z dużym udziałem biokomponentów, ulegają przyspieszonemu zużyciu i przestają spełniać swoje zadanie [1]. Zatem poszukiwanie nowych typów materiałów takich, jak stopy tytanu, przeznaczonych do konstrukcji zaworów nowoczesnych silników spalinowych, wydaje się uzasadnioną koniecznością. Opracowanie konstrukcji zaworu silnikowego oraz analiza jego pracy z wykorzystaniem narzędzi CAD oraz MES wymaga wyznaczenia charakterystyk materiałowych w szerokim zakresie szybkości odkształcania i temperatury oraz następnie kalibracji zależności konstytutywnej opisującej lepko-plastyczne właściwości materiału. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki analizy lepko-plastycznych właściwości:

- komercyjnie czystego tytanu, określanego w literaturze jako Grade 2 (Gr2);
- typowego dla konstrukcji inżynierskich stopu TiAl6V4, określanego jako Grade 5 (Gr5).

Na podstawie otrzymanych charakterystyk ściskania wyznaczono współczynniki modelu konstytutywnego Johnsona-Cooka [2].

2. Metodyka badawcza

2.1. Próba ściskania w szerokim zakresie szybkości deformacji

Zarówno w badaniach quasi-statycznych jak i dynamicznych zastosowano wycięte za pomocą obróbki elektroiskrowej próbki, których wysokość jak i średnica wynosiła 5 mm. Zdjęcia próbek po badaniach zostały wykonane za pomocą mikroskopu skaningowego JEOL JSM-6360LA.

Badania quasi-statyczne zostały przeprowadzone z wykorzystaniem serwohydraulicznej maszyny wytrzymałościowej Instron typu 8802. Do pomiaru odkształcenia w próbie ściskania zastosowano ekstensometr elektromechaniczny o długości bazowej 10 mm. Maszyna pracowała w trybie sterowania przemieszczeniem, w celu zapewnienia stałej szybkości deformacji. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem wykonanych z utwardzonej stali talerzy, pomiędzy którymi umieszczano badaną próbkę. W celu zmniejszenia efektów tarcia na powierzchnię próbki naniesiono smar teflonowy. W celu

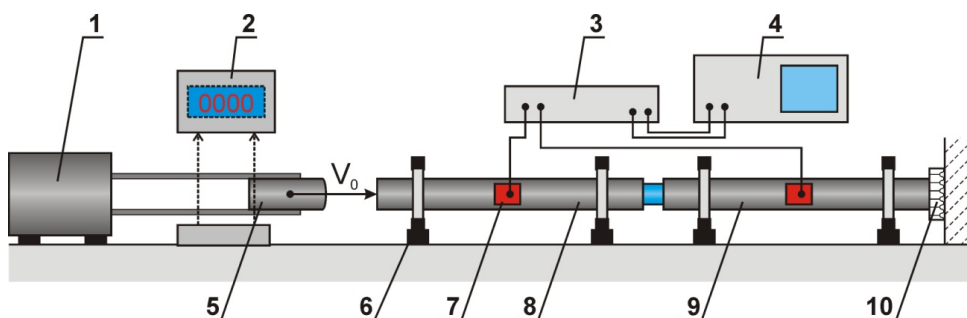
wyznaczenia wrażliwości charakterystyki naprężenia uplastyczniającego na szybkość odkształcania zastosowano szeroki zakres jej wartości.

Do badań w zakresie dużych szybkości odkształcania zastosowano metodę zmodyfikowanego pręta Hopkinsona [3]. Schemat stanowiska umożliwiającego badania z wykorzystaniem tej metody przedstawiono na rys. 1. Badana próbka o cylindrycznym kształcie była umieszczana pomiędzy dwoma prętami o długości 2 m i średnicy 20 mm wykonanymi ze stali o dużym naprężeniu uplastyczniającym (stal maraging) i zamocowanymi w teflonowych łożyskach (6). Pręt – pocisk (5) był rozpędzany w pneumatycznej wyrzutni (1) i uderzał z prędkością V_0 w pręt inicjujący (8) generując falę sprężystą, która propagowała się wzdłuż pręta. Kiedy fala docierała do czoła pręta, powodowała jego przemieszczenie odkształcające plastycznie próbkę. Część fali była odbijana w przeciwnym kierunku w pręcie inicjującym, a pozostała część przechodziła przez próbkę do pręta transmisyjnego (9), wzdłuż którego przemieszczała się, aż dotarła do zamocowanego w tłumiku (10) końca, gdzie została pochłonięta. Prędkość początkowa pocisku była mierzona za pomocą oscyloskopu (2), który rejestrował czas pokonania przez pocisk drogi na odcinku 100 mm. Pomiar czasu był wyzwany za pomocą optoelektronicznego układu, składającego się z dwóch par dioda-fotodioda. Przebieg fali mechanicznej był rejestrowany za pomocą układu mostka tensometrycznego Vishay (3). Cztery naklejone symetrycznie, w połowie długości prętów, tensometry (7) połączone były w układ szeregowo-równoległy, w celu uśrednienia przebiegu fali mechanicznej i wyeliminowania efektów związanych z wyboczeniem pręta. Na podstawie zarejestrowanych za pomocą cyfrowego oscyloskopu (4) przebiegów fali przechodzącej $\varepsilon_T(t)$ i odbitej $\varepsilon_R(t)$, powierzchni przekroju poprzecznego prętów A i próbki A_S , prędkości rozchodzenia fali sprężystej w materiale prętów C_0 oraz długości próbki L, można było wyznaczyć przebiegi czasowe naprężenia $\sigma(t)$, odkształcenia $\varepsilon(t)$ i szybkości odkształcenia $\dot{\varepsilon}(t)$ w próbce korzystając z zależności:

$$\delta(t) = E \left(\frac{A}{A_S} \right) \varepsilon_T(t) \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = -\frac{2C_0}{L} \int \varepsilon_R(t) dt \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{d\varepsilon(t)}{dt} = -\frac{2C_0}{L} \varepsilon_R(t) \quad (3)$$



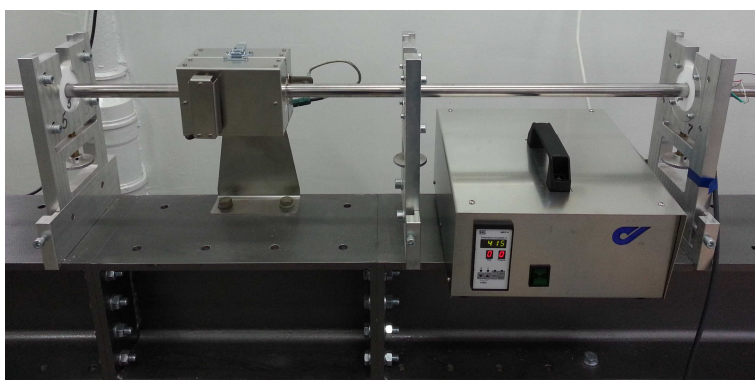
Rys. 1. Schemat stanowiska zmodyfikowanego pręta Hopkinsona (opis w tekście)

Fig.1. Scheme of the split Hopkinson pressure bar

Widok pręta Hopkinsona wraz z urządzeniami rejestrującymi wyniki badania, tj. oscyloskopem do pomiaru prędkości pocisku, oscyloskopem do rejestracji przebiegu fal mechanicznych, mostkiem pomiarowym oraz kamerą przedstawiono na rys. 2. Dodatkowo urządzenie wyposażone jest w piec przedstawiony na rys. 3, umożliwiający nagrzewanie badanych próbek do temperatury 1000°C. Dzięki temu możliwe jest wyznaczenie pełnej rodziny charakterystyk ściskania w zakresie różnych szybkości odkształcania, jak i temperatury.



Rys. 2. Pręt Hopkinsona znajdujący się w laboratorium ITS
Fig. 2. Hopkinson bar in the ITS laboratory



Rys. 3. Piec zamontowany na pręcie Hopkinsona
Fig. 3. The furnace mounted in the Hopkinson bar

2.2. Model konstytutywny Johnsona Cooka

Zależność naprężenia plastycznego płynięcia można przedstawić wykorzystując iloczynową postać równania konstytutywnego zaproponowanego przez Johnsona i Cooka (JC) [2], która jest funkcją odkształcenia, szybkości odkształcania i temperatury [5]:

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = \left(A + B\varepsilon^n \right) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_R}{T_m - T_R} \right)^m \right) \quad (4)$$

gdzie:

A – granica plastyczności dla parametrów odniesienia: temperatury T_R i szybkości odkształcania $\dot{\epsilon}_0$,

B, n – współczynniki umocnienia odkształceniowego,

C – wrażliwość na szybkość odkształcania,

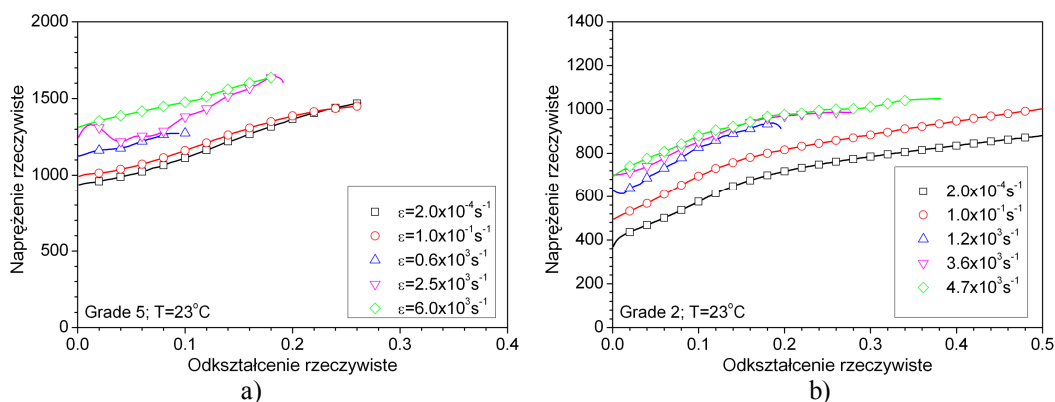
T_m – temperatura topnienia,

m – współczynnik osłabienia temperaturowego.

3. Analiza lepko-plastycznych właściwości tytanu i jego stopu

3.1. Charakterystyki naprężenie-odkształcenie wyznaczone eksperymentalnie

Rodzinę charakterystyk naprężenie-odkształcenie tytanu Gr2 oraz stopu Gr5 przedstawiono na rys. 4. Zakres szybkości odkształcania wynosił od $2 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ do $4.7 \times 10^3 \text{s}^{-1}$ oraz od $2 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ do $6.0 \times 10^3 \text{s}^{-1}$, odpowiednio dla tytanu Gr2 oraz stopu Gr5. Analizując krzywe przedstawione na rys. 4a, można stwierdzić wyraźnie widoczny efekt umocnienia plastycznego, który przy wzroście odkształcenia do 0.5 powoduje wzrost naprężenia plastycznego płynięcia dla materiału Gr2 od 400 MPa do 800 MPa. Podobną charakterystykę mechaniczną posiada stop Gr5, tzn. ze wzrostem stopnia odkształcenia do 0.3 zwiększa się także naprężenie plastycznego płynięcia od 1000 MPa do 1500 MPa. Zmiany wykładnika umocnienia plastycznego obserwowane dla tytanu Gr2 (Rys. 4a) w kolejnych etapach deformacji są spowodowane efektem dynamicznego starzenia odkształceniowego, co zostało szczegółowo opisane w pracy [10]. Dla żadnego z badanych materiałów nie stwierdzono wyraźnego wpływu szybkości odkształcania na umocnienie plastyczne (Rys. 4). Początkowe umocnienie materiału obserwowane na rys. 4 i rys. 5 dla wartości stopnia odkształcenia mniejszych od 0.02 jest często obserwowane w trakcie badań dynamicznych z wykorzystaniem pręta Hopkinsona. Przyczyną powstawania tego zjawiska jest dyspersja fal sprężystych w prętach roboczych, która jest cechą metody badawczej, a nie charakterystyką badanego materiału.

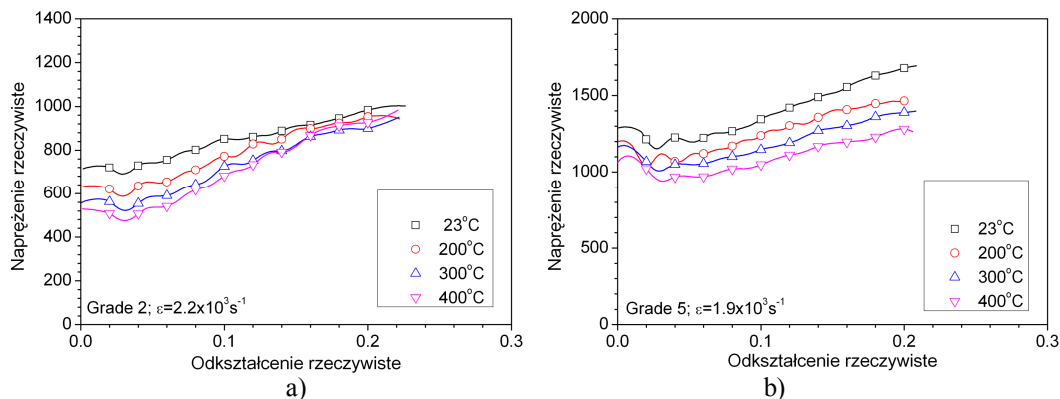


Rys. 4. Krzywe naprężenie-odkształcenie komercyjnie czystego tytanu - Gr2 a) oraz stopu TiAl6V4 - Gr5 b) wyznaczone dla różnych szybkości odkształcania

Fig. 4. Stress-strain curves of the commercially pure titanium – Gr2 a) and TiAl6V4 titanium alloy b) determined at various strain rates

Analiza wpływu temperatury na lepko-plastyczne właściwości badanych materiałów została przeprowadzona w warunkach obciążeń dynamicznych, przy wykorzystaniu pręta Hopkinsona wyposażonego w piec [6-8]. Zakres zastosowanej temperatury wynosił od

23°C (temperatura pokojowa) do 400°C. Otrzymane charakterystyki plastycznego płynięcia zaprezentowano na rys. 5. Oba materiały wykazują wyraźnie widoczne osłabienie ze wzrostem temperatury. Dla tytanu Gr2 można zauważyć zmianę kąta nachylenia krzywych naprężenie-odkształcenie ze wzrostem temperatury. Natomiast dla stopu Gr5 taki efekt nie występuje.



Rys. 5. Krzywe naprężenie-odkształcenie a) komercyjnie czystego tytanu – Gr2 oraz b) stopu TiAl6V4 – Gr 5 wyznaczone dla różnych wartości temperatury odkształcania
 Fig. 5. Stress-strain curves of the commercially pure titanium – Gr2 a) and TiAl6V4 titanium alloy b) determined at various temperatures

3.2. Kalibracja modelu konstytutywnego

Do kalibracji modelu niezbędne jest wyznaczenie rodziny charakterystyk naprężenie-odkształcenie w szerokim zakresie szybkości odkształcania oraz temperatur. Pierwszy człon równania (4) jest wyznaczany na podstawie krzywej ściskania zmierzonej w warunkach odniesieniowych. Zarówno w przypadku tytanu Gr2 jak i stopu Gr5, temperatura oraz szybkość odniesienia były równe odpowiednio 23°C oraz $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. Aproksymacji danych pomiarowych dokonano za pomocą programu Origin wykorzystując wbudowaną funkcję potęgową typu Allometric2. Zaimplementowany w programie Origin algorytm jest oparty na metodzie najmniejszych kwadratów. Do wyznaczenia wrażliwości danego materiału na szybkość odkształcania (drugi człon równania) potrzebne jest przeprowadzenie testów w szerokim zakresie szybkości odkształcania, z wykorzystaniem quasi-statycznych i dynamicznych obciążeń. Następnie dla danego odkształcenia wyznaczane jest naprężenie plastycznego płynięcia, które pozwala wykreślić zależność w funkcji szybkości odkształcania. W trakcie analizy należy uwzględnić fakt, że podczas badania z wykorzystaniem pręta Hopkinsona deformacja zachodzi w warunkach adiabatycznych. Dzieje się tak, ponieważ czas trwania deformacji jest bardzo krótki, rzędu kilkudziesięciu mikrosekund i nie ma możliwości odprowadzenia ciepła wytwarzanego na skutek deformacji plastycznej na zewnątrz próbki w postaci konwekcji, promieniowania czy przewodnictwa. Rozwiązaniem tego problemu jest wykorzystanie danych dla niewielkich stopni odkształcenia rzędu 0,05 – 0,10, kiedy to wzrost temperatury jest niewielki (około kilkunastu stopni Celsjusza) i nie ma znaczącego wpływu na wartość naprężenia plastycznego płynięcia. Problem zamiany krzywych ściskania uzyskanych w warunkach adiabatycznych na izotermiczne można również pokonać w wykorzystaniem deformacji krokowej bądź analitycznej korekty krzywych. Pierwszy sposób polega na ograniczeniu wartości stopnia odkształcenia do zadanej wielkości, np. 0,1, następnie

stabilizacji warunków termicznych i powtórzeniu próby ściskania. Kroki są powtarzane, aż do uzyskania żądanej wartości stopnia odkształcenia. Druga metoda wykorzystuje analityczną zależność w postaci:

$$\Delta T = \frac{\beta}{\rho(T_0) C_v(T_0)} \int_0^{\varepsilon_{pm}} \delta[\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p(\varepsilon_p), T_0] d\varepsilon_p \quad (5)$$

gdzie β – współczynnik Taylora-Quinneya, ρ – gęstość materiału, C_v – ciepło właściwe, T_0 – temperatura początkowa.

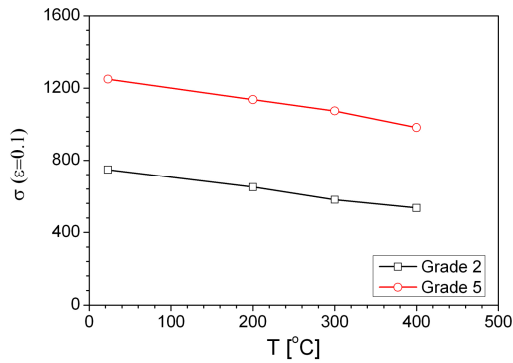
Wykorzystując zależność (5) można przeliczyć krzywą uzyskaną w warunkach adiabatycznych na warunki izotermiczne, jednak wymaga to znajomości charakterystyki określającej wpływ temperatury na naprężenie plastycznego płynięcia wyznaczonej np. w warunkach quasi-statycznych.

Wpływ temperatury na charakterystykę naprężenie-odkształcenie opisywany jest w modelu Johnsona-Cooka za pomocą ostatniego członu równania (4). Do wyznaczenia tej zależności niezbędne jest przeprowadzenie eksperymentów w zakresie obniżonej oraz podwyższonej temperatury. W tym przypadku również należy wziąć pod uwagę fakt, iż w trakcie badań dynamicznych z wykorzystaniem metody pręta Hopkinsona deformacja zachodzi w warunkach adiabatycznych i wymagana jest korekta wyników. W niniejszej publikacji zastosowano metodę przeliczania krzywych uzyskanych w warunkach adiabatycznych na izotermiczne wykorzystującą zależność analityczną (5).

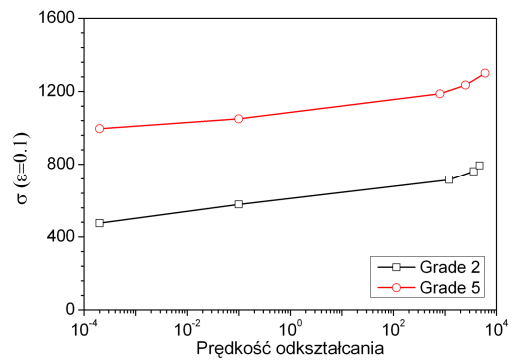
Wrażliwość naprężenia plastycznego płynięcia badanych materiałów na temperaturę przedstawiono na rys. 6a. W badanym zakresie temperatury, tzn. od 23°C do 400°C, charakterystyka dla obu badanych materiałów jest zbliżona do liniowej. W związku z tym w zastosowanym modelu konstytutywnym (równanie 4) przyjęto liniowy współczynnik osłabienia temperaturowego $m=1$. Wpływ szybkości odkształcania na naprężenie zaprezentowano na rys. 6b. Oba materiały charakteryzują się liniowym wzrostem naprężenia w zakresie wzrostu szybkości odkształcania od $2 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ do $1.0 \times 10^3 \text{s}^{-1}$. Powyżej prędkości $1.0 \times 10^3 \text{s}^{-1}$ następuje zwiększenie wrażliwości na szybkość odkształcania. Procedura obliczeniowa była następująca [5]:

- wyznaczenie współczynników A, B oraz n na podstawie quasi-statycznej krzywej ściskania;
- normalizacja krzywej wrażliwości na szybkość odkształcania;
- wyznaczenie współczynnika C;
- normalizacja krzywej wrażliwości na temperaturę;
- wyznaczenie współczynnika m.

Otrzymane wartości współczynników przedstawiono w tabeli 1. Obliczone na podstawie modelu J-C oraz wyznaczone eksperymentalnie krzywe naprężenie-odkształcenie przedstawiono na rys. 7. Analizując wykresy dla obu materiałów można stwierdzić pewne rozbieżności w zakresie dużej szybkości odkształcania deformacji. Wynika to z faktu, że model J-C nie uwzględnia nieliniowego w skali logarytmicznej wzrostu wrażliwości na szybkość odkształcania w zakresie dużych jej wartości.



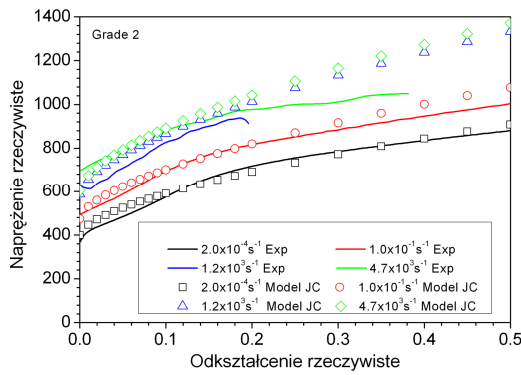
a)



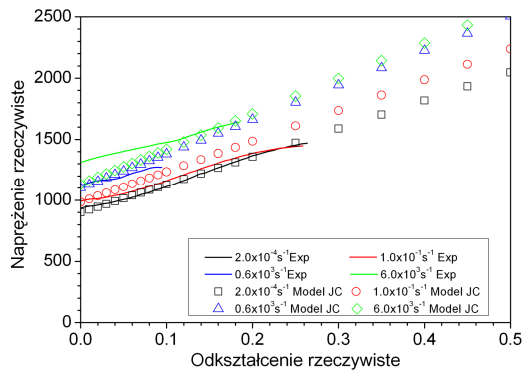
b)

Rys. 6. Wrażliwość naprężenia plastycznego płynięcia badanych materiałów na temperaturę (a) oraz szybkość odkształcania (b)

Fig. 6. Sensitivity of flow stress of tested materials on the temperature (a) and strain rate (b)



a)



b)

Rys. 7. Porównanie danych eksperymentalnych oraz obliczonych na podstawie modelu dla tytanu – Gr2 (a) oraz stopu TiAl6V4 - Gr5 (b)

Fig. 7. Comparison of experimental and model based data for commercially pure titanium – Gr2 (a) and TiAl6V4 titanium alloy (b)

Wartość współczynników równania Johnsona-Cooka

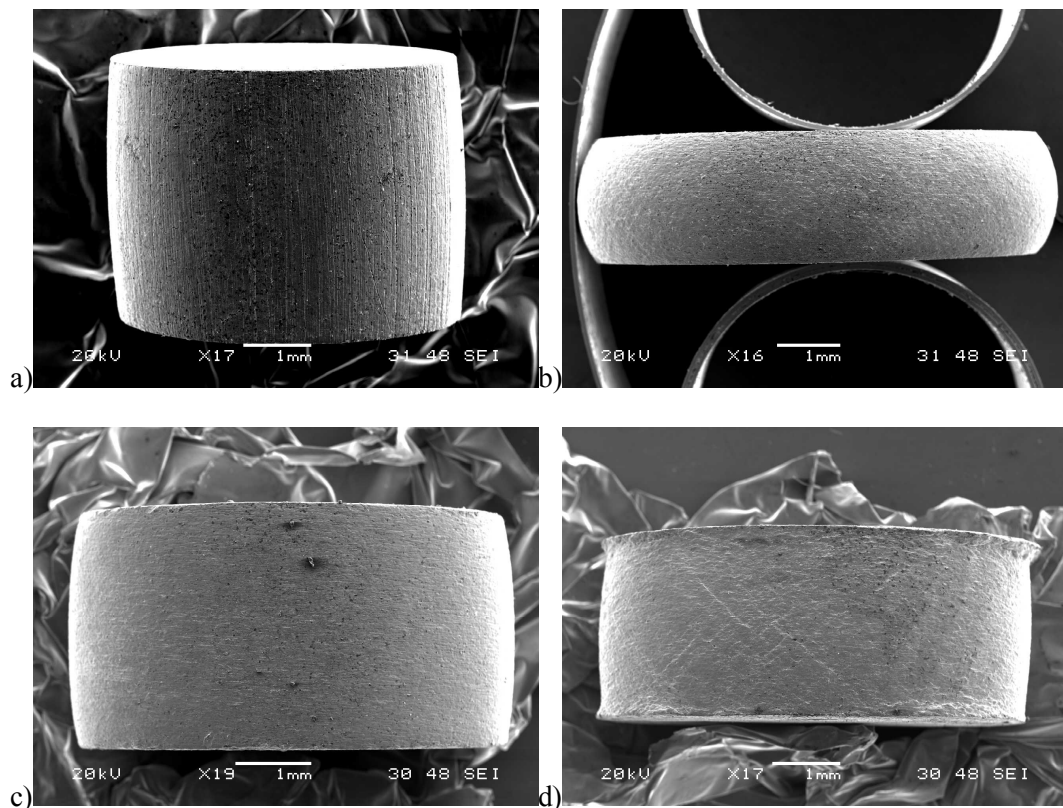
Tabela 1

Value of the Johnson-Cook equation coefficients

Table 1

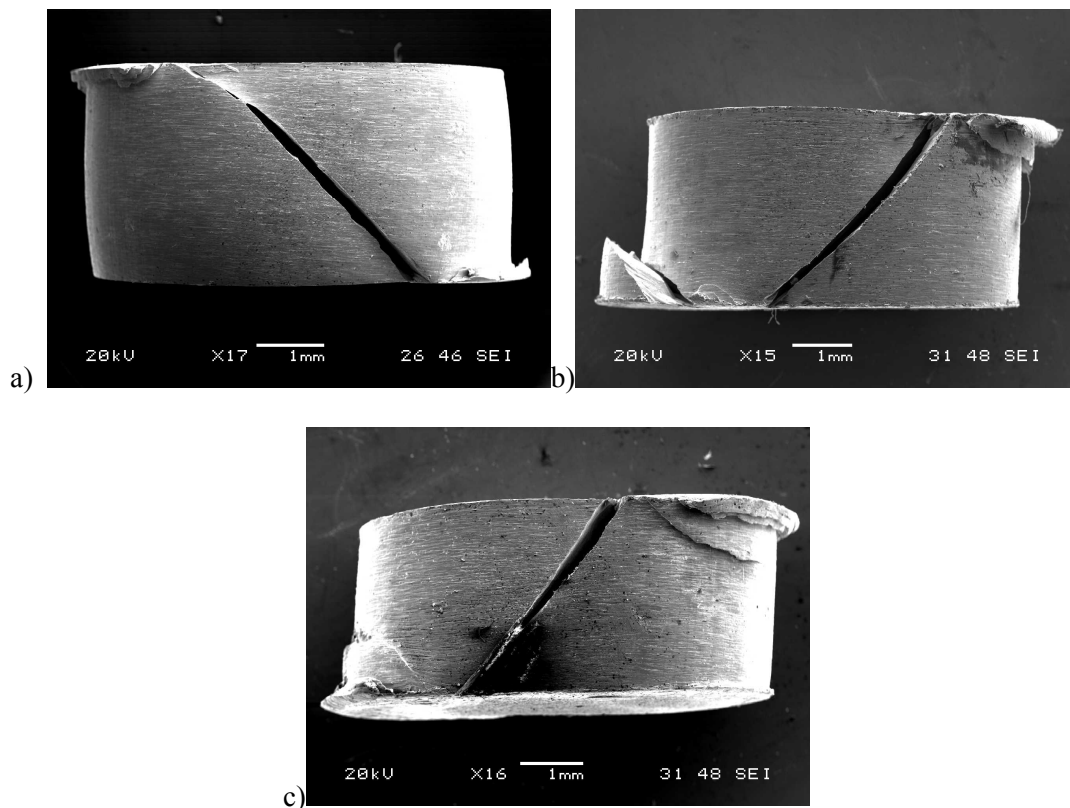
Material	A [MPa]	B [MPa]	n	C	m	ϵ_0^+	T_0 [K]	T_m [K]
Grade 2	400	775	0,609	0,030	1	2×10^{-4}	296	1870
Grade 5	900	2295	1,000	0,015	1	2×10^{-4}	296	1870

Uzyskany za pomocą SEM widok próbek z tytanu Gr2 i stopu Gr5 po próbie ściskania w warunkach quasi-statycznych i dynamicznych, przedstawiono odpowiednio na rys. 8 i rys. 9.



Rys. 8. Widok próbek wykonanych ze komercyjnie czystego tytanu - Gr2 po próbie ściskania: a) $\epsilon = 0.1; T=23^{\circ}\text{C}; \dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$; b) $\epsilon = 0.4; T=23^{\circ}\text{C}; \dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$; c) $T=23^{\circ}\text{C}; \dot{\epsilon} = 2.2 \times 10^3 \text{s}^{-1}$; d) $T=400^{\circ}\text{C}; \dot{\epsilon} = 2.2 \times 10^3 \text{s}^{-1}$

Fig. 8. SEM view of the specimens made of commercially pure titanium – Gr2 after compression test at: a) $\epsilon = 0.1; T=23^{\circ}\text{C}; \dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$; b) $\epsilon = 0.4; T=23^{\circ}\text{C}; \dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$; c) $T=23^{\circ}\text{C}; \dot{\epsilon} = 2.2 \times 10^3 \text{s}^{-1}$; d) $T=400^{\circ}\text{C}; \dot{\epsilon} = 2.2 \times 10^3 \text{s}^{-1}$



Rys. 9. Widok próbek wykonanych ze stopu TiAl6V4 – Gr5 po próbie ściskania: a) $T=23^{\circ}\text{C}$; $\dot{\epsilon}=2 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$; b) $T=23^{\circ}\text{C}$; $\dot{\epsilon}=1.9 \times 10^3 \text{s}^{-1}$; c) $T=400^{\circ}\text{C}$; $\dot{\epsilon}=1.9 \times 10^3 \text{s}^{-1}$.

Fig. 9. SEM view of the specimens made of TiAl6V4 titanium alloy – Gr5 after compression test at: a) $T=23^{\circ}\text{C}$; $\dot{\epsilon}=2 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$; b) $T=23^{\circ}\text{C}$; $\dot{\epsilon}=1.9 \times 10^3 \text{s}^{-1}$; c) $T=400^{\circ}\text{C}$; $\dot{\epsilon}=1.9 \times 10^3 \text{s}^{-1}$.

4. Podsumowanie

Czysty komercyjnie tytan (Gr2) posiada granicę plastyczności rzędu 400 MPa wyznaczoną w warunkach quasi-statycznych. Materiał charakteryzuje się dodatnią wrażliwością na szybkość odkształcania oraz wyraźnym umocnieniem odkształceniowym. Badania stopu tytanu TiAl6V4 (Gr5) wykazały znaczne zwiększenie granicy plastyczności, do około 900 MPa, w porównaniu do komercyjnie czystego tytanu, przy jednoczesnym niewielkim ograniczeniu wrażliwości na szybkość odkształcania.

Na podstawie danych eksperymentalnych dokonano kalibracji modelu konstytutywnego Johnsona-Cooka. Obliczone i zmierzone krzywe ściskania wykazały dobrą zgodność w zakresie quasi-statycznym. Natomiast przyczyna rozbieżności obserwowanych w zakresie dużych szybkości odkształcania została wyjaśniona poniżej. Kształt krzywej naprężenie-odkształcenie, zgodnie z opisaną procedurą, był wyznaczany dla prędkości odniesienia w quasi-statycznych warunkach deformacji. W tym przypadku wynosiła ona $2 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$. Zatem można przyjąć, że w zakresie quasi-statycznym dane eksperymentalne są zgodne z obliczonymi, oczywiście w ramach założonego prostego modelu opisanego krzywą typu $(A + B\epsilon^n)$. Ze wzrostem szybkości odkształcania istotne znaczenie z punktu widzenia dokładności modelu zaczyna mieć kolejny czynnik, jakim jest rozbieżność

pomiędzy rzeczywistością a obliczoną na podstawie drugiego członu modelu J-C wrażliwością na szybkość odkształcania. Dla obu badanych materiałów (Gr1 i Gr5) wrażliwość naprężenia plastycznego płynięcia na szybkość odkształcania zaczyna wyraźnie rosnać w zakresie prędkości powyżej 10^3s^{-1} . W związku z tym model J-C, w którym wrażliwość na szybkość odkształcania jest opisana jako funkcja logarytmiczna, zaczyna w tych warunkach mocno odbiegać od danych eksperymentalnych.

Finansowanie:

Badania przedstawione w niniejszej publikacji zostały przeprowadzone w ramach projektu sfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (GRAF-TECH/NCBR/14/26/2013).

LITERATURA

- [1] A. Choudhury, M. Blum, *Economical production of titanium-aluminide automotive valves using cold wall induction melting and centrifugal casting in a permanent mold*, Vacuum, 47, 1996, 829-831.
- [2] G. R. Johnson, W. H. Cook, *A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures*, Proceedings of Seventh International Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherlands 1983, 541–547.
- [3] H. Kolsky, *An Investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of deformation of loading*, Proc. Phys. Soc., 62B, 1949, 647-700.
- [4] W. Moćko, A. Wojciechowski, M. Ornowski, *Perspektywy rozwoju rynku samochodów elektrycznych w najbliższych latach*, Transport Samochodowy, 1/2011, 2011, 63-71.
- [5] W. Moćko, Z. L. Kowalewski, *Zastosowanie wybranych równań konstytutywnych do opisu właściwości mechanicznych stali wysokoazotowej typu VP159*, Modelowanie Inżynierskie, 42, 2012, 203-210.
- [6] W. Moćko, L. Kruszka, *Results of strain rate and temperature on mechanical properties of selected structural steels*, Procedia Engineering, 27, 2013, 789-797.
- [7] W. Moćko, *Analysis of the impact of the frequency range of the tensometer bridge and projectile geometry on the results of the measurement by the split Hopkinson pressure bar method*, Metrology and Measurement Systems, 20, 2013, 555–564.
- [8] W. Moćko, J. Janiszewski, J. Radziejewska, M. Grązka, *Analysis of deformation history and damage initiation for 6082-T6 aluminium alloy loaded at classic and symmetric Taylor impact test conditions*, International Journal of Impact Engineering, 75, 2015, 203-213.
- [9] Z. Nagórski, *Gradienty temperatury w zaworach wylotowych podczas symulacji „zimnego” rozruchu silnika spalinowego*, Journal of KONES Powertrain and Transport, 13/3, 2006, 233-244.
- [10] S. Nemat-Nasser, W. G. Guo, J. Y. Cheng, *Mechanical properties and deformation mechanisms of a commercially pure titanium*, Acta Mater., 47, 1999, 3705-3720.