

ANALIZA METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH PLASTOMETRYCZNEJ PRÓBY SKRĘCANIA

ZBIGNIEW GRONOSTAJSKI

ANALYSIS OF TORSION TEST BY THE FINITE ELEMENT METHOD

Abstract

Various conversion methods of torque and angle of rotation to flow stress and strain are presented in the paper. These methods were verified in mathematical modelling using the finite element method. Performed investigations show that the coefficient of strain rate is the most important parameter, which is not properly implemented in currently used methods. The paper presents the results of thermo-mechanical modelling of torsion test. It is concluded on the basis of the results that temperature of the sample rises very fast when strains rate is above $1 s^{-1}$. Determined temperature distribution in cross section and in longitudinal section indicates that heat is transferred mainly into handles.

1. WSTĘP

Szybki w ostatnich latach rozwój nowych technik obliczeniowych umożliwia kompleksową symulację procesów kształtowania plastycznego metodami numerycznymi (Pietrzyk i Lenard, 1991). Metody te umożliwiają nieosiągalne dotychczas zbliżenie modelu matematycznego procesu do jego rzeczywistego przebiegu. O poprawności i dokładności modelu matematycznego procesu decyduje między innymi model materiału, który opisuje naprężenie uplastyczniające w zależności od warunków odkształcania (Pietrzyk i Hodgson, 1998). Do budowy takich modeli niezbędna jest znajomość eksperymentalnych przebiegów naprężenia uplastyczniającego. Nowe, doskonalsze konstrukcje, urządzeń takich jak plastometry skręca-

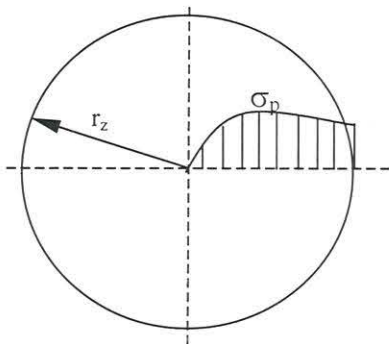
jące i krzywkowe, rozszerzają znacznie możliwości uzyskiwania tych przebiegów (Grosman i in., 1994) w coraz bardziej złożonych warunkach odkształcania. Najczęściej do wyznaczenia zależności naprężenia uplastyczniającego od odkształcania stosuje się plastometryczne próby rozciągania, ściskania i skręcania (Venugopal i in., 1989). Pomimo bezdyskusyjnej przydatności metod plastometrycznych, należy pamiętać zarówno o ich potencjalnych możliwościach, jak też o ograniczeniach. Okazuje się, że wyznaczone w różnych próbach plastometrycznych zależności naprężenia uplastyczniającego od odkształcania dla tego samego materiału różnią się między sobą. Wynika to nie tylko z oddziaływania stanu naprężenia na krzywe umocnienia, ale także z uproszczeń stosowanych podczas opracowywania wyników badań.

Z. Gronostajski, Politechnika Wroclawska



W ostatnich latach do opisu zachowania się materiałów na gorąco stosuje się głównie badania na plastometrze skręcającym. W próbie skręcania wyznaczany jest przebieg momentu skręcającego w funkcji kąta skręcenia próbki, następnie wielkości te przeliczane są na naprężenie i odkształcenie zastępcze (Grosman i Hadasik, 1994).

Zalety tej metody to możliwość uzyskania krzywych naprężenie – odkształcenie w dużym zakresie odkształceń i dla dużych prędkości odkształcania (Choquet i in., 1988) oraz dużych odkształceń granicznych, bez wcześniejszej utraty stateczności (Kliber i in., 1989). Podstawowym ograniczeniem natomiast jest niejednorodny rozkład odkształcenia, prędkości odkształcania i naprężeń w poprzecznym przekroju próbki, co prowadzi do błędów w interpretacji wyników. W przypadku odkształcania próbek w podwyższonych temperaturach może dojść do takiej sytuacji, kiedy w warstwach zewnętrznych, w których odkształcenie jest największe, występuje osłabienie, a w warstwach bliższych osi próbki, w których odkształcenia są mniejsze, materiał nadal się jeszcze umacnia (rysunek 1). Wówczas o wartości momentu skręcającego w istotnym stopniu decydują naprężenia pochodzące od warstw wewnętrznych. Niestety stosowane obecnie metody wyznaczania naprężenia uplastyczniającego w funkcji odkształcenia z przebiegu momentu skręcającego w funkcji kąta obrotu nie uwzględniają tego poprawnie, podobnie jak nie uwzględniają one odpowiednio czułości na prędkość odkształcania.



Rysunek 1. Rozkład naprężenia wzdłuż promienia próbki, w której występuje osłabienie w warstwach zewnętrznych.

Innym bardzo istotnym czynnikiem, który może zakłócać badania plastometryczne jest zamiana pracy odkształcania plastycznego na ciepło, które powoduje wzrost rzeczywistej temperatury odkształcanej próbki (Lahoti i Altan, 1975). Temperatura ta zmienia się wraz z naprężeniem uplastyczniającym, odkształceniem i prędkością odkształcania, a także zależy od właściwości fizycznych skręcanego materiału, takich jak przewodność i pojemność cieplna. Dlatego ważnym problemem, utrudniającym bezpośrednio zasto-

sowanie badań plastometrycznych, jest poprawne określenie przyrostu temperatury dla większych prędkości odkształcania. Poza tym pole temperatury wewnątrz odkształcanego plastycznie ośrodka jest zwykle nierównomierne i stosowanie uśrednionej temperatury w obliczeniach właściwości materiału może prowadzić do znacznych błędów. Nierównomierność temperatury wynika nie tylko z różnej prędkości generowania ciepła w poszczególnych obszarach odkształcanego ośrodka, ale także z różnych warunków brzegowych obejmujących przewodzenie ciepła do zwykle chłodniejszych narzędzi, a także promieniowanie oraz konwekcję ciepła na powierzchniach swobodnych. Izotermiczne zależności pomiędzy naprężeniem a odkształceniem można otrzymać stosując małą prędkość odkształcania, przerywając odkształcanie bądź chłodząc próbkę. Można także dokonać korekty zmian temperatury, jeśli te zmiany rejestruje się w sposób ciągły i znany jest wpływ temperatury na naprężenie uplastyczniające ustalony w innym eksperymencie. Metoda ta jest jednak mało dokładna. Pomiaru przeprowadza się na ogół w próbkach odkształcanych z dużymi prędkościami, gdy prędkość generowania ciepła jest bardzo duża. Zmiany temperatur zachodzą wówczas tak szybko w całej objętości odkształcanego materiału, że nie można ich dokładnie zarejestrować.

Jak wynika z przeprowadzonej analizy próby skręcania występują w niej dwa czynniki, które istotnie wpływają na poprawność otrzymanych wyników. Ponieważ obecnie stosowane metody interpretacji próby skręcania nie pozwalają w pełni uwzględnić w próbie skręcania nierównomierności odkształcenia i prędkości odkształcania w próbce oraz wzrostu jej temperatury w trakcie odkształcania, poszukuje się nowych lepszych metod. Duże nadzieje wiąże się z wykorzystaniem do analizy próby skręcania metody elementów skończonych (MES) i ocena tych możliwości była głównym celem niniejszych badań.

W pracy dokonano przeglądu najczęściej stosowanych metod wyznaczania naprężenia uplastyczniającego w funkcji odkształcenia z przebiegu momentu skręcającego w funkcji kąta obrotu oraz przeprowadzono ich weryfikację w oparciu o modelowanie metodą elementów skończonych, a także przedstawiono uzyskane w symulacji metodą elementów skończonych rozkłady temperatur w skręcanych próbkach.

2. METODY WYZNACZANIA NAPRĘŻENIA UPLASTYCZNIĄCEGO

W pracy przeanalizowano trzy następujące metody wyznaczania naprężenia uplastyczniającego w funkcji odkształcenia z przebiegu momentu skręcają-

cego w funkcji liczby obrotów (Gronostajski, i in., 2002):

1. Metoda klasyczna

Naprężenie uplastyczniające wyznacza się z zależności:

$$\sigma_p = \sqrt{3} \frac{3M}{2\pi R^3} \quad (1)$$

a odkształcenie plastyczne ze wzoru:

$$\varepsilon = \frac{2\pi RN}{\sqrt{3}L} \quad (2)$$

gdzie: M – moment skręcający, L – długość próbki, R – promień próbki, N – liczba obrotów.

2. Metoda stosowana w Katedrze Mechaniki i Technologii Przeróbki Plastycznej Politechniki Śląskiej w Katowicach

Naprężenie uplastyczniające określa równanie:

$$\sigma_p = \sqrt{3} \frac{(3+p+m)M}{2\pi R^3} \quad (3)$$

a odkształcenie plastyczne zależność:

$$\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \arcsin h \left(\frac{\pi \bar{R} N}{L} \right) \quad (4)$$

gdzie:

$$p = \frac{N}{M} \frac{\delta M}{\delta N} \quad \text{– współczynnik umocnienia,}$$

$$m = \frac{\dot{N}}{M} \frac{\delta M}{\delta \dot{N}} \quad \text{– czułość na prędkość odkształcania,}$$

L – długość próbki,

$$\bar{R} \quad \text{– promień ekwiwalentny, przyjęto jako } \bar{R} = \frac{2}{3} R .$$

3. Metoda opracowana w Instytucie Technologii Maszyn i Automatykacji Politechniki Wrocławskiej

Metoda ta wymaga przyjęcia odpowiedniej funkcji, opisującej styczne naprężenie uplastyczniające, uwzględniającej umocnienie i osłabienie materiału (Gronostajski, 2000a). Funkcję tę przyjęto w postaci:

$$\tau = C_1 \gamma^n - C_2 \gamma^m \quad (5)$$

gdzie: C_1, C_2, n, m – stałe materiałowe.

Człon pierwszy równania (5) opisuje wpływ umocnienia odkształceniowego na naprężenia styczne badanego materiału, natomiast człon drugi opisuje wpływ zmiękczenia materiału. Różnica obu członów daje aktualny poziom uplastyczniającego naprężenia stycz-

nego. Funkcja (5) jest więc na tyle uniwersalna, że w zależności od odkształcenia może opisywać umocnienie bądź osłabienie materiału, co jest tak bardzo istotne w próbie skręcania.

Odształcenie postaciowe opisuje zależność:

$$\gamma = \frac{2\pi RN}{L} \quad (6)$$

Po podstawieniu zależności (5) do równania opisującego moment skręcający:

$$M = 2\pi \int_0^R \tau(r) r^2 dr \quad (7)$$

otrzymano następujące równanie:

$$M = \frac{C_1 2\pi r^3}{n+3} \gamma^n - \frac{C_2 2\pi r^3}{m+3} \gamma^m \quad (8)$$

Stałe C_1, C_2, n, m występujące w tym równaniu wyznaczane są metodą regresji nieliniowej na podstawie wyników eksperymentalnych uzyskanych w próbie skręcania. Wstawiając następnie te stałe do równania (5) oraz uwzględniając, że dla próby skręcania

$$\sigma_p = \sqrt{3}\tau, \quad \varepsilon = \frac{1}{\sqrt{3}}\gamma \quad \text{otrzymuje się końcowe równa-$$

nie opisujące przebieg naprężenia uplastyczniającego.

Metoda nr 1 jest najbardziej popularną, gdyż stosuje się w niej najprostsze równania, które niestety nie uwzględniają współczynników umocnienia materiału i czułości na prędkość odkształcania. Metoda nr 2 uwzględnia te współczynniki i dlatego należy się spodziewać, że wyniki uzyskane za pomocą tej metody są poprawniejsze niż uzyskane z metody nr 1. Również metoda nr 3, dzięki przyjęciu wstępnej funkcji na naprężenie styczne uwzględniającej umocnienie i osłabienie, powinna być lepsza niż metoda klasyczna. Metoda ta jest jednak czasochłonna ze względu na długi czas obliczeń regresji, który jest zależny od wielu parametrów takich jak: wartości startowe wyznaczanych parametrów, sposoby obliczania zastosowanej regresji itp.

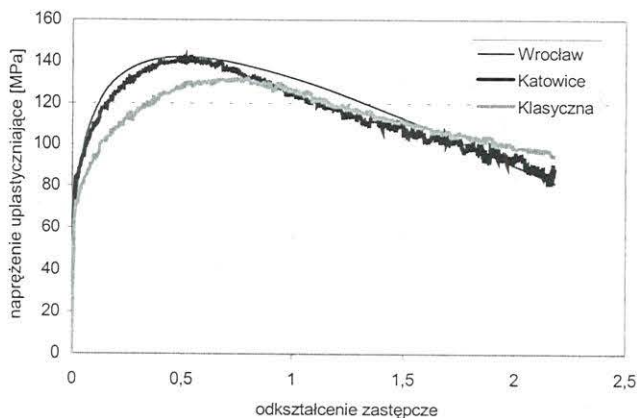
Przedstawione metody zostały zastosowane do wyznaczenia krzywej umocnienia w próbie skręcania wybranych stopów miedzi o składzie chemicznym podanym w tabelicy 1. Badania plastometryczne przeprowadzono na plastometrze skręcającym w Instytucie Technologii Maszyn i Automatykacji Politechniki Wrocławskiej.

Podczas eksperymentu rejestrowano moment skręcający M , liczbę skręceń N i temperaturę T w funkcji czasu t . Do badań użyto próbki o długości części pomiarowej 18 mm i średnicy 6 mm. Pliki z zarejestrowanymi danymi dla różnych warunków odkształcania były następnie przeliczone na naprężenia

Tablica 1. Skład chemiczny badanych materiałów.

Materiał	Skład chemiczny w % wagowych									
	Cu	Si	Zn	Fe	Al	Bi	Pb	Ni	Sn	Mn
CuZn35,3	64,4	0,004	35,39	0,03	0,001	0,002	0,10	0,01	0,002	0,002
CuAl8,1Fe2,9	87,47	0,03	0,04	2,88	8,11	0,001	0,009	0,79	0,001	0,66
CuSi3,9	95,6	3,86	–	0,50	ślad,	–	–	–	–	–
CuSi4,6	94,8	4,63	–	0,45	ślad,	–	–	–	–	–

uplastyczniające w funkcji odkształcenia przy zastosowaniu przedstawionych trzech metod. Na rysunku 2 pokazano przykładowe przebiegi dla brązu CuSi3,9 uzyskane w temperaturze 773 K dla prędkości odkształcania 0,01 s⁻¹.



Rysunek 2. Przykładowe przebiegi naprężenia uplastyczniającego dla brązu CuSi3,9 wyznaczone różnymi metodami w temperaturze 773 K dla prędkości odkształcania 0,01 s⁻¹.

3. WERYFIKACJA UZYSKANYCH PRZEBIEGÓW NAPRĘŻENIA UPLASTYCZNIĄCEGO METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

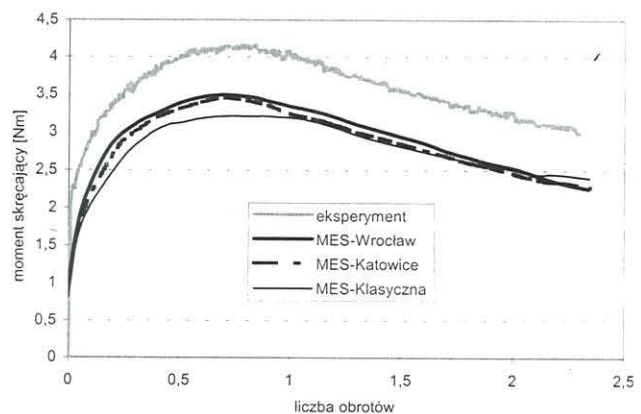
W celu weryfikacji przedstawionych powyżej metod przeliczania momentu skręcającego i liczby obrotów na naprężenie uplastyczniające i odkształcenie plastyczne przeprowadzono modelowanie próby skręcania metodą elementów skończonych. Weryfikacji dokonano na podstawie porównania, przebiegów momentu skręcającego w funkcji liczby obrotów uzyskanych z modelowania matematycznego dla krzywych naprężenie uplastyczniające – odkształcenie wyznaczonych powyżej przedstawionymi metodami, z przebiegami momentu skręcającego uzyskanymi w rzeczywistym procesie skręcania. Analizę procesu skręcania metodą elementów skończonych przeprowadzono przy użyciu programu MARC. W celu wyeliminowania wpływu wzrostu rzeczywistej temperatury odkształcanej próbki, spowodowanego zamianą pracy odkształcania plastycznego na ciepło, na naprężenie upla-

styczniające, weryfikację przeprowadzono dla przebiegów uzyskanych dla najmniejszej zastosowanej prędkości odkształcania 0,01 s⁻¹, dla której można było przyjąć, że temperatura próbki w trakcie eksperymentu była stała.

Do analizy próby skręcania przyjęto następujące założenia:

- Obliczenia przeprowadzono dla krzywych naprężenie uplastyczniające – odkształcenie wyznaczonych różnymi metodami przedstawionym powyżej. Dla zwiększenia dokładności obliczeń krzywe były wprowadzane do programu w postaci numerycznej.
- W programie uwzględniono czułość materiału na prędkość odkształcania, wyznaczoną w oparciu o przebiegi naprężenia uplastyczniającego dla różnych prędkości odkształcania.
- Mechaniczne warunki brzegowe symulacji procesu skręcania odpowiadały rzeczywistemu procesowi: jeden koniec próbki umocowany w uchwycie obracał się z określoną prędkością obrotową, drugi był utwierdzony.
- Dyskretyzację próbki przeprowadzono stosując elementy w kształcie graniastosłupa o podstawie trójkątnej z węzłami w każdym wierzchołku, zastosowano 2704 elementów.

Analiza próby skręcania metodą elementów skończonych wykazała, że przy użyciu, wyznaczonych

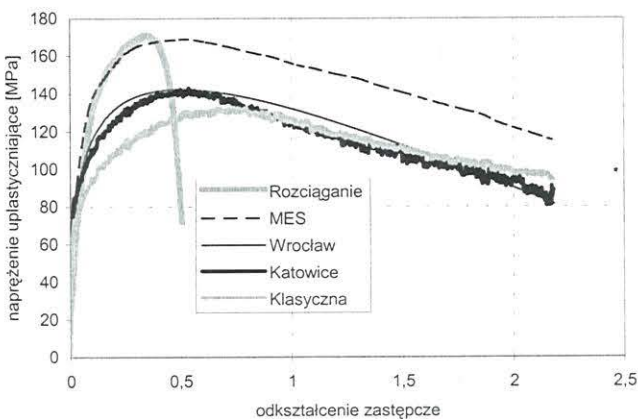


Rysunek 3. Przebiegi momentu skręcającego w funkcji liczby obrotów ustalone eksperymentalnie oraz uzyskane z modelowania matematycznego dla brązu CuSi3,9 w temperaturze 773 K dla prędkości odkształcania 0,01 s⁻¹. W modelowaniu użyte zostały krzywe naprężenie uplastyczniające – odkształcenie wyznaczone różnymi metodami.

różnymi metodami krzywych naprężenie uplastyczniające – odkształcenie, uzyskuje się przebiegi momentu skręcającego w funkcji liczby obrotów, które znacznie różnią się od przebiegów rzeczywistych. Na rysunku 3 przedstawiono przebiegi momentu skręcającego w funkcji liczby obrotów uzyskane eksperymentalnie oraz uzyskane z modelowania matematycznego, w którym użyte zostały krzywe naprężenie uplastyczniające – odkształcenie wyznaczone poszczególnymi metodami.

Następnie, w oparciu o modelowanie matematyczne, tak skorygowano przebieg naprężenia uplastyczniającego w danych warunkach odkształcania, aby eksperymentalny moment skręcający pokrywał się z momentem z modelowania matematycznego. Na rysunku 4 przedstawiono taki przebieg naprężenia oraz przebiegi wyznaczone zależnościami omawianymi w pierwszej części pracy. Przy założeniu, że modelowanie matematyczne zostało przeprowadzone poprawnie, otrzymane duże różnice w poziomie naprężenia między przebiegiem wyznaczonym metodą elementów skończonych a metodami nr 1, 2 i 3 świadczą o niedoskonałości stosowanych zależności do wyznaczania naprężenia uplastyczniającego i odkształcenia w próbie skręcania. Metodami tymi otrzymujemy przebiegi naprężenia uplastyczniającego na znacznie niższym poziomie niż przy wykorzystaniu metody elementów skończonych. Przebiegi te porównano również z przebiegiem naprężenia uplastyczniającego uzyskanym w próbie rozciągania dla takich samych warunków odkształcania (rysunek 4). Pomijając fakt, że w próbie rozciągania szybciej dochodzi do zniszczenia próbki, to uzyskano w niej naprężenie uplastyczniające na znacznie wyższym poziomie niż w próbie skręcania przy wykorzystaniu trzech omówionych metod przeliczania momentu skręcającego na naprężenie uplastyczniające.

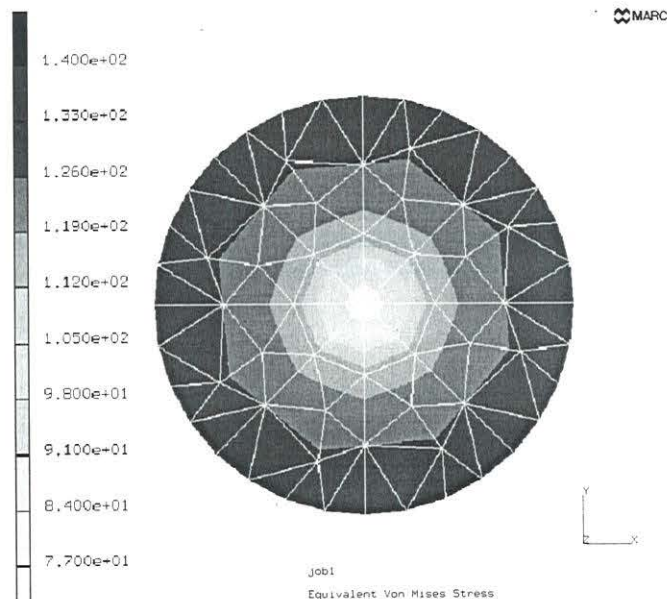
Pomimo, że w metodzie nr 2 i 3 wprowadza się współczynniki, które powinny uwzględnić umacnia-



Rysunek 4. Przebiegi naprężenia uplastyczniającego w funkcji odkształcenia wyznaczone różnymi metodami oraz przebieg obliczony metodą elementów skończonych dla brązu CuSi_{3.9} w temperaturze 773 K dla prędkości odkształcania 0,01 s⁻¹.

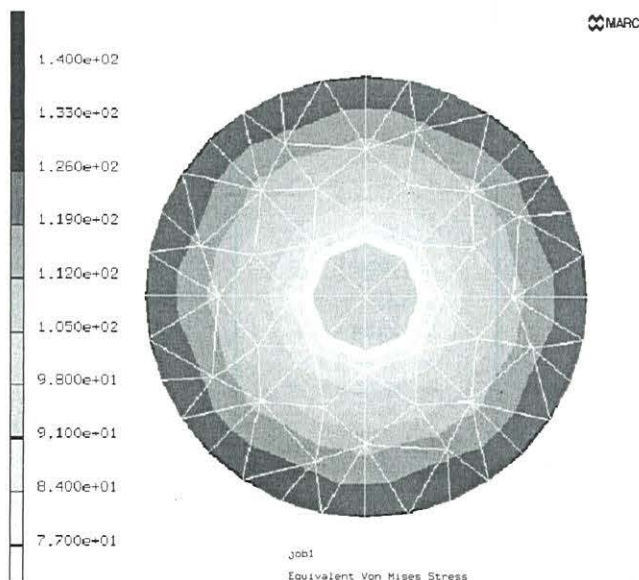
nie i osłabianie się materiału oraz czułość na prędkość odkształcania to tylko w niewielkim stopniu lepiej wyznaczają one krzywe naprężenie uplastyczniające – odkształcenie w próbie skręcania, niż metoda klasyczna.

W przypadku odkształcania próbek na gorąco powyższe różnice w poziomach naprężenia uplastyczniającego mogą być spowodowane zjawiskiem omówionym w rozdziale 1 i pokazanym na rysunku 1, powodującym że w warstwach zewnętrznych występuje osłabienie, a warstwach bliższych osi próbki umocnienie materiału. W konsekwencji o wartości momentu skręcającego w istotnym stopniu decydują naprężenia pochodzące od warstw wewnętrznych. Jednakże różnice te występują również przy małych wartościach odkształcenia, gdy nie dochodzi jeszcze do osłabienia w warstwach zewnętrznych. Należy, więc przypuszczać, że główną przyczyną błędów w obecnie stosowanych metodach analizy próby skręcania jest nieuwzględnianie lub niedokładne uwzględnienie czułości na prędkość odkształcania.



Rysunek 5. Rozkład naprężenia uplastyczniającego w przekroju poprzecznym próbki odkształconej do $\epsilon = 0,3$ dla CuSi_{3.9} w temperaturze 773 K dla prędkości odkształcania 0,01 s⁻¹ bez uwzględnienia czułości na prędkość odkształcania.

O tym jak istotne jest poprawne uwzględnienie czułości na prędkość odkształcania mogą świadczyć różnice w rozkładach naprężenia w przekroju poprzecznym próbki uzyskane z numerycznego modelowania dla CuSi_{3.9} w temperaturze 773 K dla prędkości odkształcania 0,01 s⁻¹ z uwzględnieniem czułości na prędkość odkształcania (rysunek 6) i bez uwzględnienia czułości (rysunek 5). W obszarach leżących blisko osi próbki różnice w poziomie naprężenia dochodzą nawet do 50%.



Rysunek 6. Rozkład naprężenia uplastyczniającego w przekroju poprzecznym próbki odkształconej do $\epsilon = 0,3$ dla CuSi3,9 w temperatury 773 K dla prędkości odkształcania $0,01 \text{ s}^{-1}$ z uwzględnieniem czułości na prędkość odkształcanie.

4. SYMULACJA ROZKŁADU TEMPERATURY W SKRĘCANEJ PRÓBCE

Drugim bardzo istotnym parametrem zakłócającym próbę skręcania jest zamiana pracy odkształcania plastycznego na ciepło. Prowadzi to do wzrostu temperatury odkształcanej próbki. Ponieważ przy dużych prędkościach odkształcania trudno jest mierzyć temperaturę próbki, w pracy zaproponowano zastosowanie metody elementów skończonych do jej określania (Gronostajski, 2000b).

Do wyznaczenia pola temperatur zastosowano profesjonalny program MARC. W programie użyto równanie Fouriera opisujące przepływ ciepła z wewnętrznym źródłem ciepła:

$$\nabla^T(k_c \nabla T) + q_c = \rho_m c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (8)$$

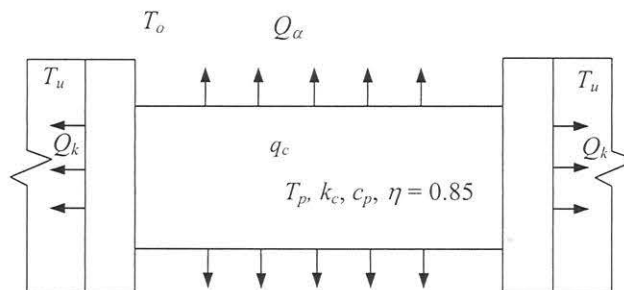
gdzie: k_c – współczynnik przewodzenia ciepła, c_p – ciepło właściwe, ρ_m – gęstość, T – temperatura, t – czas.

Poprawne wyznaczenia pól temperatur w próbie skręcania za pomocą programu MARC wymagało przyjęcia następujących warunków brzegowych przedstawionych na rysunku 7:

– ilość ciepła wygenerowanego odkształceniem plastycznym jest opisana równaniem

$$q_c = \eta \int_0^{\epsilon_i} \sigma_p d\epsilon \quad (9)$$

gdzie: η – stała materiałowa wynosi zwykle 0,85–0,95, w obliczeniach przyjęto η równe 0,85, σ_p – naprężenie uplastyczniające, ϵ – odkształcenia.



Rysunek 7. Schemat warunków brzegowych w modelowanym procesie wymiany ciepła

– ciepło z próbki jest odprowadzane poprzez konwekcję i promieniowanie do otoczenia o stałej temperaturze. Do opisu ilości tego ciepła odprowadzonego w ciągu jednostki czasu zostało zastosowane równanie zwane prawem Newtona następującej postaci

$$Q_\alpha = F_p \alpha_c \Delta T = F_p \alpha_c (T_o - T_p) \quad (10)$$

gdzie: F_p – powierzchnia zewnętrzna próbki, ΔT – różnica między temperaturą powierzchni próbki T_p i temperaturą otoczenia T_o , α_c – współczynnik przejmowania ciepła przez otoczenie obejmujący współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie oraz konwekcję. Współczynnik ten zależy między innymi od ośrodka otaczającego próbkę i od kształtu powierzchni zewnętrznej próbki. Przyjęto stałą jego wartość dla analizowanych materiałów w całym zakresie temperatur równą $13 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

– ilość ciepła odprowadzona do uchwytów w ciągu jednostki czasu przez powierzchnię F wynosi (przyjęto stałą temperaturę uchwytów T_u):

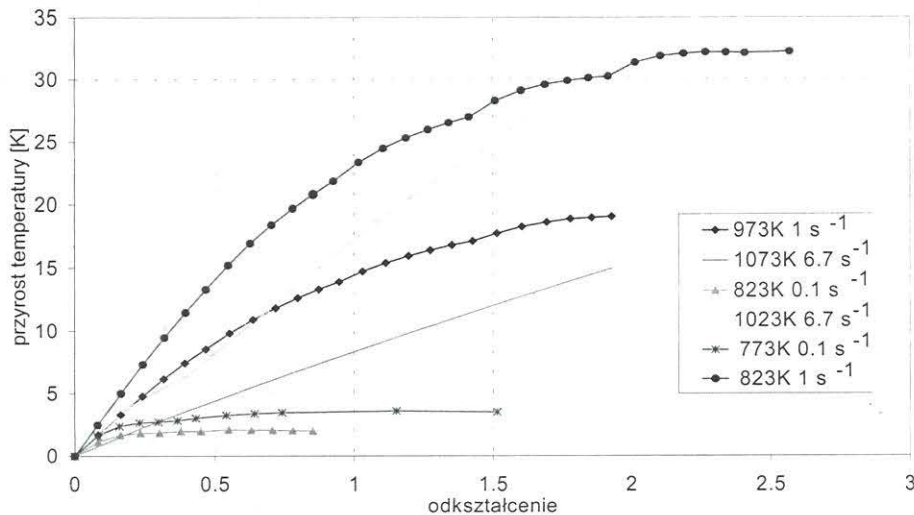
$$Q_k = k_c F \frac{\partial T}{\partial x} \quad (11)$$

gdzie: x – kierunek przepływu ciepła.

O bilansie cieplnym próbki decydowały, oprócz właściwości plastycznych obejmujących naprężenie uplastyczniające i prędkość odkształcania, również właściwości fizyczne materiału: współczynnik przewodzenia ciepła oraz ciepło właściwe. Dobrano je na podstawie literatury (Smithells, 1955; Kuzman, 1964) oraz w oparciu o badania własne. Ponieważ w nieznanym tylko stopniu zmieniały się one wraz z temperaturą, przyjęto ich stałą wartość w całym zakresie stosowanych temperatur. Wartości współczynników dla poszczególnych materiałów zebrano w tabelicy 2.

Tablica 2. Ciepło właściwe oraz współczynnik przewodzenia ciepła badanych materiałów.

Rodzaj materiału	c_p [J/(kg K)]	k_c [W/(m K)]
CuZn35,3	380	110
CuAl8,1Fe2,9	380	85
CuSi3,9	450	45
CuSi4,6	450	45



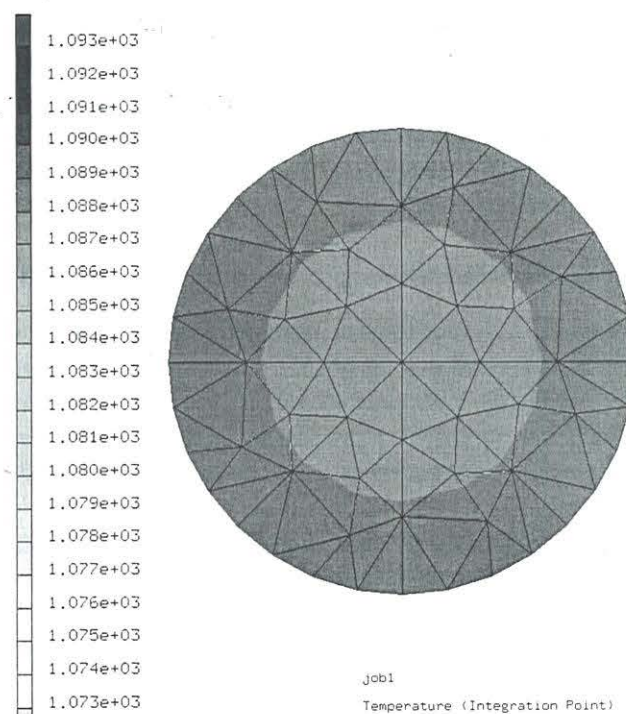
Rysunek 8. Przyrost temperatury powierzchni próbki z brązu aluminiowego CuAl_{8,1}Fe_{2,9} skręcanej w różnych temperaturach z różnymi prędkościami odkształcania.

Na rysunku 8 przedstawiono, otrzymane z symulacji próby skręcania za pomocą programu MARC, zależności między odkształceniem a przyrostem temperatury brązu CuAl_{8,1}Fe_{2,9} odkształcanego z różnymi prędkościami w różnych temperaturach. Można zauważyć, że przy prędkości odkształcania 6,7 s⁻¹ szybkość generowania ciepła jest większa od szybkości odprowadzania ciepła do uchwytów i otoczenia w całym zakresie odkształceń. Świadczy o tym uzyskanie niemalże liniowej zależności między odkształceniem a przyrostem temperatury. Przy mniejszych prędkościach skręcania temperatura asymptotycznie dążyła do ustalonej wartości.

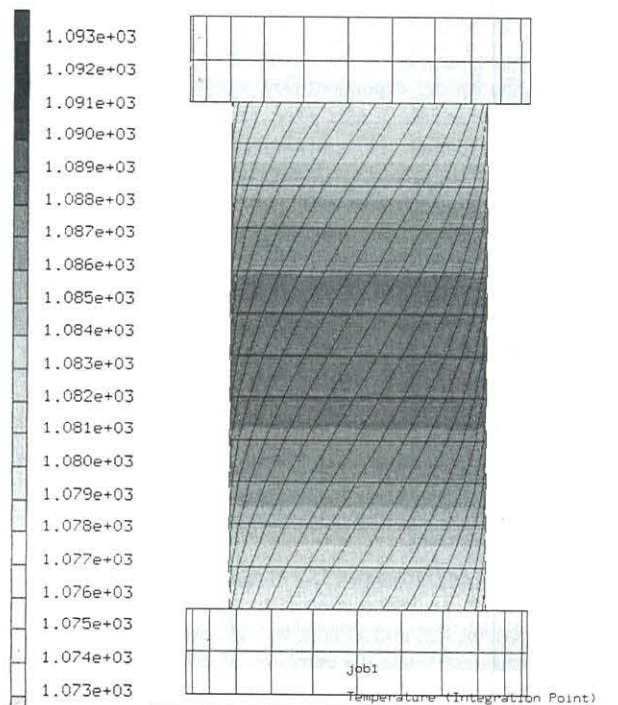
Na rysunku 9 przedstawiono rozkład temperatury w przekroju poprzecznym próbki z brązu aluminiowego CuAl_{8,1}Fe_{2,9} odkształcanego w temperaturze 1073 K z największą stosowaną prędkością odkształcania 6,7 s⁻¹. Jak wynika z tego rysunku, różnica temperatury między warstwą zewnętrzną a wewnętrzną nie przekraczała 1 K. Natomiast gradient temperatury na długości próbki, o którym decydował przepływ ciepła do uchwytów, był znacznie większy. Świadczy o tym rozkład temperatury na długości próbki dla tego samego materiału odkształcanego w identycznych warunkach przedstawiony na rysunku 10. Różnica temperatur między warstwami środkowymi a leżącymi w pobliżu uchwytów wynosiła około 5–6 K. Dla mniejszych prędkości odkształcania gradient ten był jeszcze mniejszy. Przeprowadzone modelowanie matematyczne wykazało, że o temperaturze próbki decyduje głównie przepływ ciepła do uchwytów a nie promieniowanie i konwekcja do otoczenia. Dzięki czemu uzyskiwano bardzo równomierne rozkłady temperatury w przekroju poprzecznym próbki.

Stopy miedzi charakteryzują się wysokim współczynnikiem przewodzenia, dlatego uzyskano małe gra-

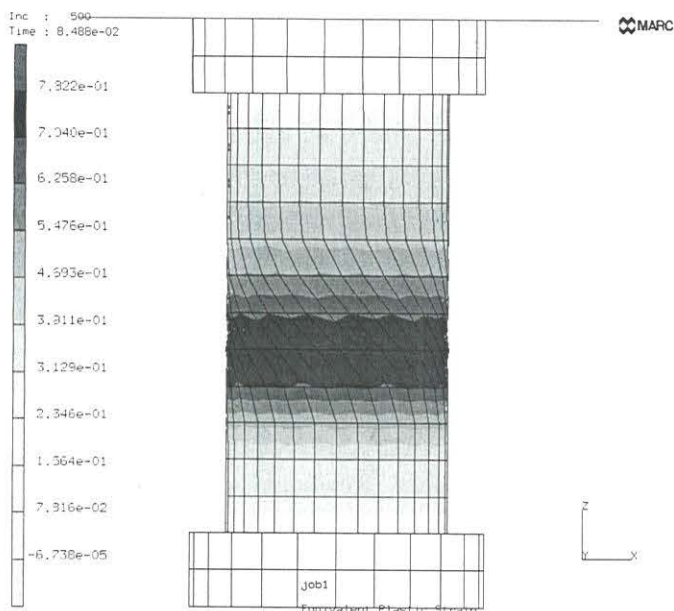
dienty temperatury na długości próbki oraz w przekroju poprzecznym. Należy się spodziewać, że dla innych materiałów o niższym współczynniku przewodzenia ciepła ten gradient może być znacznie większy. Gradient ten może prowadzić do lokalizacji odkształcenia w części środkowej próbki. Taką sytuację zaobserwowano podczas modelowania metodą elementów skończonych próby skręcania w temperaturze 973 K z prędkością 6,7 s⁻¹ brązu krzemowego CuSi_{4,6}, którego współczynnik przewodzenia ciepła jest nieznacznie większy od współczynnik przewodze-



Rysunek 9. Rozkład temperatury w przekroju poprzecznym próbki z brązu aluminiowego CuAl_{8,1}Fe_{2,9} odkształconej do $\epsilon = 2$ z prędkością 6,7 s⁻¹ w temperaturze 1073 K.



Rysunek 10. Rozkład temperatury w przekroju wzdłużnym próbki z brązu aluminiowego CuAl8,1Fe2,9 odkształconej do $\epsilon = 2$ z prędkością odkształcania $6,7 \text{ s}^{-1}$ w temperaturze 1073 K .



Rysunek 11. Rozkład intensywności odkształceń na powierzchni próbki skręcającej w temperaturze 973 K z prędkością $6,7 \text{ s}^{-1}$ brązu krzemowego CuSi4,6 po czasie $0,1035 \text{ s}$.

nia stali (rysunek 11). Gdy próbka odkształca się przede wszystkim w obszarze lokalizacji odkształceń, parametry charakteryzujące tę strefę decydują o wartości naprężenia uplastyczniającego i odkształcenia (Grosman, 1976). Stosowanie wówczas omówionych metod przeliczania momentu skręcającego i liczby obrotów na naprężenie uplastyczniające i odkształcenie odnoszących się do całej długości próbki, prowadzi do bardzo dużych błędów.

5. WNIOSKI

Wszystkie stosowane obecnie metody wyznaczania przebiegów naprężenie uplastyczniające – odkształcenie z momentu skręcającego i liczby obrotów w próbie skręcania są obciążone bardzo dużymi błędami. Przeprowadzone w ramach niniejszej pracy badania wykazały, że bardzo duża niejednorodność odkształcenia i prędkości odkształcania w poprzecznym przekroju odkształcanej próbki powoduje, że nie ma możliwości znalezienia prostych zależności pozwalających poprawnie przeprowadzić takie przeliczenia. Pewnym rozwiązaniem powyżej omawianego problemu może być zastosowanie metody obliczeń odwrotnych (Szeliga i Pietrzyk, 2002).

Modelowanie rozkładu temperatury w próbie skręcania wykazało, że wyraźny wzrost temperatury następuje przy prędkościach odkształcania większych od 1 s^{-1} . Przy mniejszych prędkościach odkształcania prędkość generowania ciepła jest dużo mniejsza i większość tego ciepła odprowadzana jest do uchwytów bądź do otoczenia próbki. Można przyjąć wówczas, że proces skręcania odbywa się w warunkach izotermicznych. Symulacja wykazała, że ciepło odprowadzane jest głównie do uchwytów, natomiast niewielka ilość ciepła odprowadzana jest do otoczenia poprzez konwekcję i promieniowanie. Odprowadzenie ciepła przez konwekcję i promieniowanie z warstw zewnętrznych, w których największa ilość ciepła jest generowana, przyczynia się do ujednorodnienia rozkładu temperatur w przekroju poprzecznym próbki.

Stopy miedzi, dla których przeprowadzono modelowanie, posiadają duże współczynniki przewodności cieplnej. Powodowało to, że uzyskiwano dość równomierne rozkłady temperatury również na długości próbki

Dokładna znajomość współczynników promieniowania, przewodzenia i konwekcji ciepła dla różnych warunków kształtowania plastycznego, z uwzględnieniem warunków przemysłowych, jest obecnie bardzo potrzebna do analizy stanu naprężenia, odkształcenia, struktury i właściwości materiałów po zakończonym procesie. Obecnie konieczne staje się uzupełnienie takich informacji.

Praca została wykonana w ramach projektu KBN nr. K009/T08/2000.

LITERATURA

- Choquet, P., Le Bon, A., Rossard, C., Pedrix, C., Joannes, G., 1988, The hot torsion testing at IRSID, Application to the simulation and modelling of hot forming processes, *THERMEC*, wyd. IRSID, Tokyo, 1988, 1-8.
- Gronostajski, Z., 2000a, Modele konstytutywne opisujące zachowanie się wybranych stopów miedzi w zakresie dużych

- odkształceń plastycznych, *Prace Naukowe ITMiA PWr* Nr 75, Seria Monografie, nr 23, Wrocław.
- Gronostajski, Z., 2000b, Symulacja MES rozkładu temperatury w skręcanych próbkach, *Mat. 7 Konf. KomPlasTech'2000*, ed., Kusiak, J., Pietrzyk, M., Grosman, F., Piela, A., Krynica-Czarny Potok, 247-254.
- Gronostajski, Z., Hadasik, E., Schindler, I., 2002, Analiza próby skręcania na gorąco metodą elementów skończonych, *Mat. 9 Konf. KomPlasTech'2002*, ed., Pietrzyk, M., Kusiak, J., Grosman, F., Piela, A., Szczawnica, 103-108.
- Grosman, F., 1976, Niejednorodność odkształcania na długości skręcanej próbki, *Obróbka Plastyczna Metali*, 15, 203-206.
- Grosman, F., Hadasik, E., 1994, Problems of application of the technological plasticity description of metals in computer programmes for analysis and design of mechanical working processes, *Archiv. Metall.*, 39, 263-276.
- Grosman, F., Hadasik, E., Sajdak, C., 1994, Rozszerzenie możliwości badawczych krajowych plastometrów skrętnych, *Inż. Mater.*, 15, 77-80.
- Kuzman, R., 1964, *Toplinske tablice i dijagrami*, Technicka Knjižga, Zagrzeb.
- Kliber, J., Schindler, J., Kubiński, W., Kuźmiński, Z., 1989, Bestimmung des Grenzumformgrades mit dem Torsionversuch, *Steel Research*, 60, 503-508.
- Kusiak, J., Kawalla, R., Pietrzyk, M., Pircher, H., 1996, Inverse analysis applied to the evaluation of material parameters in the history dependent flow stress equation in hot forming of metals, *J. Mat. Proc. Technol.*, 60, 455-461.
- Lahoti, G.D., Altan, T., 1975, Prediction of temperature distributions in axisymmetric compression and torsion, *J. Eng. Mater. Technol.*, 113-120.
- Pietrzyk, M., Lenard, J.G., 1991, Thermal-mechanical modelling of the flat rolling process, Springer-Verlag, Heidelberg.
- Pietrzyk, M., Hodgson, P.D., 1998, Internal variable model applied to the prediction of grain size during thermomechanical processing of C-Mn steel, *Inż. Mater.*, 19, 645-650.
- Smithells, C. J., 1955, *Metals reference book*, wyd. Butterworths Sc. Publication, London.
- Szeliga, D., Pietrzyk, M., 2002, Identification of Rheological and Tribological Parameters, Metal Forming Science and Practice, A State-of-the-art Volume in Honour of Professor J.A. Schey's 80th Birthday, ed., Lenard J.G., Elsevier, Amsterdam, 227-258.
- Venugopal, S., Sprinivansan, G., Venkadesam, S., Seetharaman, V., 1989, An examination of the relative merits of the compression test and torsion test for the prediction of peak pressure during the extrusion of commercial purity titanium, *J. Mech. Working Technol.*, 19, 151-163.

Artykuł otrzymano 10 stycznia 2003 r.