

Plastyczne kształtowanie stopów magnezu (kucie precyzyjne, tłoczenie, wyciskanie, itd.)

Politechnika Śląska, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Lubelska, Instytut Lotnictwa w Warszawie

Wyniki badań

Modelowanie procesu wyciskania i jego praktyczna weryfikacja

Dokładność wyników symulacji numerycznych procesów przeróbki plastycznej metali w dużej mierze zależy od dokładnego opisu naprężenia uplastyczniającego w szczególnych warunkach kształtowania. Dedykowane oprogramowanie do symulacji metodą MES oferuje różnorodne funkcje naprężenia uplastyczniającego. Jedną z najczęściej stosowanych funkcji jest równanie Hansla-Spittla (1), która została zaaplikowana w takich programach jak FORGE czy FormFEM. Te stosunkowo proste funkcje pozwalają opisać początkowy wzrost naprężenia uplastyczniającego, a następnie jego spadek do osiągnięcia stanu ustalonego. Taki przebieg naprężenia uplastyczniającego jest charakterystyczny dla wielu metali w warunkach odkształcania na gorąco - także dla stopów magnezu. Badania ściskania na gorąco stopu magnezu AZ31, wykonywane na symulatorze termomechanicznych GLEEBLE udowodniły, że można wyróżnić dwa różne rodzaje krzywej płynięcia dla badanego materiału. W warunkach, w których dominującym mechanizmem odkształcenia plastycznego jest bliźniakowanie (wyższe prędkości odkształcenia i niższe temperatury) krzywe płynięcia wykazują wyraźne maksimum naprężenia uplastyczniającego, a następnie spadek do wartości ustalonej. W warunkach, w których dominującym mechanizmem odkształcenia plastycznego jest poślizg (niższe prędkości odkształcenia i wyższe temperatury) wartości naprężenia uplastyczniającego nie wykazują gwałtownych zmian. To sprawia, że trudno wyznaczyć jedną funkcję opisującą zależność naprężenie-odkształcenie dla stopu magnezu AZ31 w szerokim zakresie warunków odkształcania (rys. 1). W celu weryfikacji przygotowanych funkcji naprężenia uplastyczniającego dla stopu magnezu AZ31 przeprowadzono symulacje numeryczne procesu wyciskania współbieżnego w programie FORGE2009 (rys. 2). Uzyskane wyniki symulacji były porównywane z danymi doświadczalnymi uzyskanymi w trakcie wyciskania próbek w zakresie temperatur od 200 do 400°C i na pionowej prasie hydraulicznej o nacisku 1500kN. W modelu numerycznym wykorzystano różne postacie funkcji naprężenia uplastyczniającego, m.in. Hansla-Spittla oraz Hollomona. Współczynniki funkcji zostały obliczone zarówno dla całego zakresu kształtowania jak i parametrów właściwych dla przeprowadzonych prób wyciskania. Na podstawie wartości siły wyciskania oceniano poprawność wyników symulacji numerycznych i zapropionowano funkcje naprężenia uplastyczniającego, która najdokładniej opisuje zachowanie się stopu magnezu AZ31 dla założonych warunków kształtowania (rys. 3).

Opracowanie równań opisujących statyczne procesy odbudowy struktury odkształcanego na gorąco stopu magnezu

Metoda relaksacji naprężeń polega na wykonaniu pojedynczego odkształcenia, po którym próbka jest utrzymywana pomiędzy kowadłami z bieżącą rejestracją spadku siły. Podczas wyciskania w materiale zachodzi proces rekrytalizacji, w wyniku którego następuje zmniejszenie wartości naprężenia. Zaletą tej metody polega na uzyskaniu pełnego przebiegu krzywej kinetyki rekrytalizacji wykonując tylko jedną próbę dla wybranych warunków odkształcenia. Badania przeprowadzono metodą osiowosymetrycznego ściskania na symulatorze Gleeble w szerokim zakresie zmienności parametrów odkształcania, temperatura od 250 do 400 °C i prędkości odkształcania od 0,1 do 10 s⁻¹. W celu wyznaczenia kinetyki wykorzystuje się wykres zależności naprężenia w funkcji czasu w skali logarytmicznej. Początkowy oraz końcowy liniowy zakres spadku naprężenia aproksymowany jest zależnościami (2) (rys. 4a). Znajając współczynniki wyznaczonego ułamka zrekrystalizowanego (rys. 4b). Po opracowaniu krzywej zmiany ułamka zrekrystalizowanego wyznaczany jest czas t_{0,95}, dla którego ułamek osłabienia osiąga wartości 0,95. Wykonuje się dodatkowo pojedyncze odkształcenie z wyciskaniem próbki w temperaturze odkształcania przez czas t_{0,95}, po którym następuje zamrożenie struktury i badanie metalograficzne w celu określenia wielkości ziarna. Kolejnym etapem jest zapisanie uzyskanych krzywych dla 30 punktów pomiarowych i dopasowanie współczynników w modelu opisującym kinetykę rekrytalizacji i wielkości ziarna z wykorzystaniem metod optymalizacji, arkusza kalkulacyjnego. Średnią średnicę zastępczą ziarna zrekrystalizowanego wyznaczono w programie komputerowym do analizy obrazu „Metllo”. Mikrostrukturę próbek stopu po rekrytalizacji statycznej pokazano na rysunku 5 a i b. Mikrostruktura stopu składa się z ze zrekrystalizowanych ziarn o rozmiarze uzależniony od parametrów procesu, tj. wyjściowej mikrostruktury, temperatury, prędkości i wielkości odkształcenia. W mikrostrukturze próbek zrekrystalizowanych nie obserwuje się praktycznie bliźniaków odkształcenia. Przebieg krzywych uzyskanych z obliczeń jest zgodny z obliczonym na podstawie dopasowania i optymalizacji współczynników. Poniższe równania 3 - 5 po optymalizacji współczynników opisują proces rekrytalizacji statycznej stopu. Ułamek objętości zrekrystalizowanej statycznie X przedstawia równanie (3), czas połowkowej rekrytalizacji czas połowkowej rekrytalizacji równanie (4) i wielkość ziarna po rekrytalizacji statycznej równanie (5).

Technologia kształtowania plastycznego stopu magnezu WE43

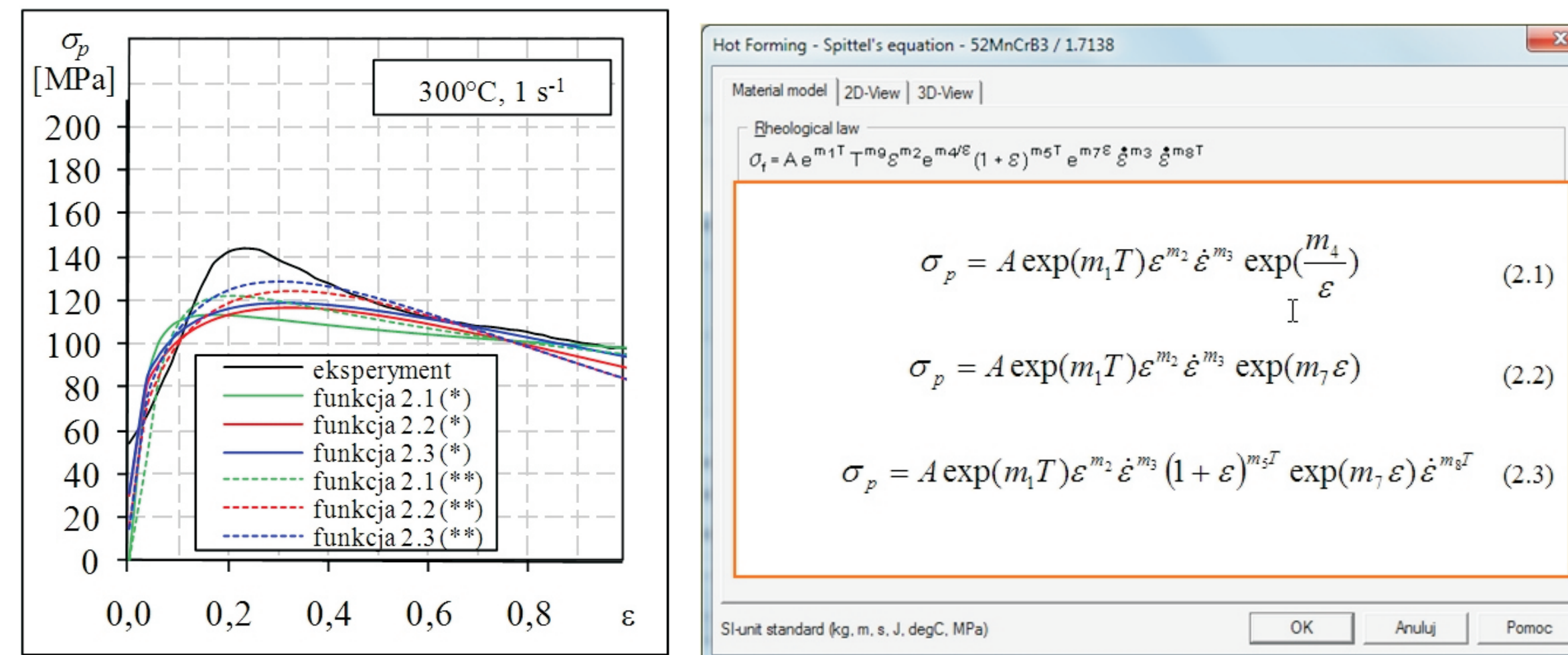
Stop WE43 należy do grupy stopów Mg-Y-RE-Zr. Podstawowymi dodatkami stopowymi są itry i pierwiastki ziem rzadkich (RE), w stopie WE43 głównym składnikiem mieszaniny RE jest neodym (tablica 2). Stopy typu WE43 stosuje się jako odlewnicze ale kształtuje się również metodami przeróbki plastycznej, przeważnie wyciskania. Po wyciskaniu i obróbce cieplnej stop może uzyskać znacznie wyższe właściwości mechaniczne w porównaniu do stanu po odlewaniu (wytrzymałość na rozciąganie R_m=270MPa, granicę plastyczności Re=195MPa i wydłużenie A=15%). Stop odznacza się dobrą odpornością na pęcznienie w podwyższonych temperaturach, Stop jest perspektywnym materiałem do zastosowań w lotnictwie ze względu na korzystne właściwości mechaniczne, wysoką stabilność temperaturową (do 200°C) właściwości mechanicznych. W Politechnice Śląskiej podjęto badania zmierzające do opracowania technologii wyciskania i kucia tego stopu. W pierwszej kolejności przeprowadzono próby jednoosiowego ściskania w zakresie temperatury 200 + 450°C i prędkości odkształcenia 0,01 + 10 s⁻¹. Wykazano ograniczoną odkształcalność stopu w zakresie temperatury 200+300°C (rys. 6).

Podsumowanie

Na podstawie przygotowanych funkcji naprężenia uplastyczniającego dla stopu magnezu AZ31 przeprowadzono symulacje numeryczne procesu wyciskania współbieżnego w programie FORGE2009

Opracowano model zmian struktury w warunkach nieciągłego odkształcania dla stopu magnezu AZ31. Uzyskano dobrą zgodność danych eksperymentalnych, wyznaczonych krzywych relaksacji z obliczonymi na podstawie optymalizowanego modelu. Opracowany model poprawnie przewiduje kinetykę rekrytalizacji statycznej stali, co potwierdza poprawność zaproponowanej metodyki. Opracowane równania będą wykorzystane do symulacji i optymalizacji procesu walcowania blach ze stopu AZ31.

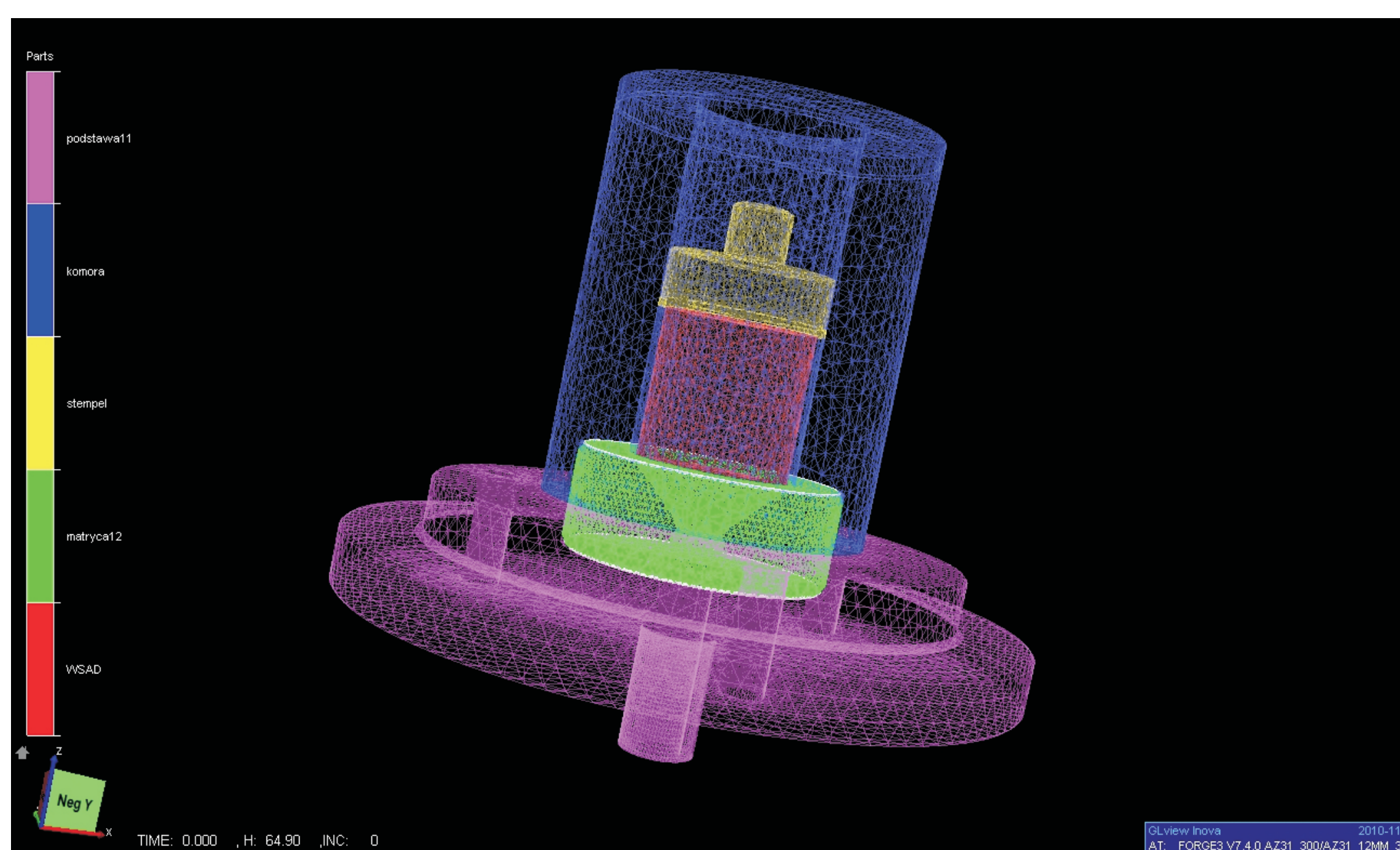
Badany stop WE43 odznacza się dobrą odkształcalnością w temperaturze powyżej 350°C. Może być w tych temperaturach kształtowany drogą wyciskania i kucia na gorąco. Obniżenie temperatury odkształcania poniżej 300°C powoduje pękanie próbek stopu przy odkształceniach poniżej 0,6.



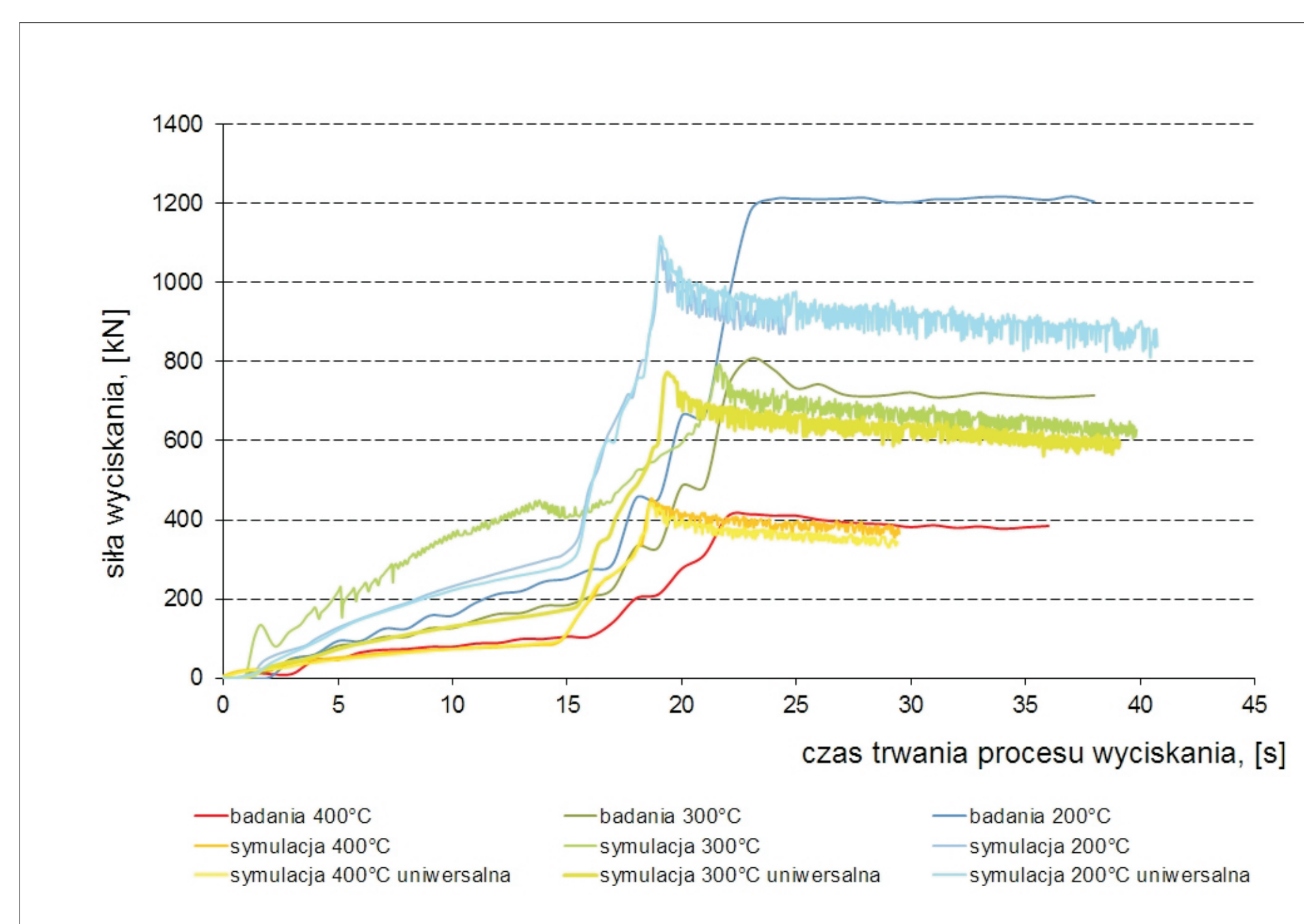
Rys. 1. Dopasowanie krzywych płynięcia w szerokim zakresie parametrów odkształcania (200+450°C oraz 0,01+10 s⁻¹) dla różnych postaci funkcji Hansla-Spittla oraz kryterium oceny funkcji, parametrów odkształcania (200+450°C oraz 0,01+10 s⁻¹) dla różnych postaci funkcji Hansla-Spittla

Tablica 1. Współczynniki krzywej płynięcia w szerokim zakresie

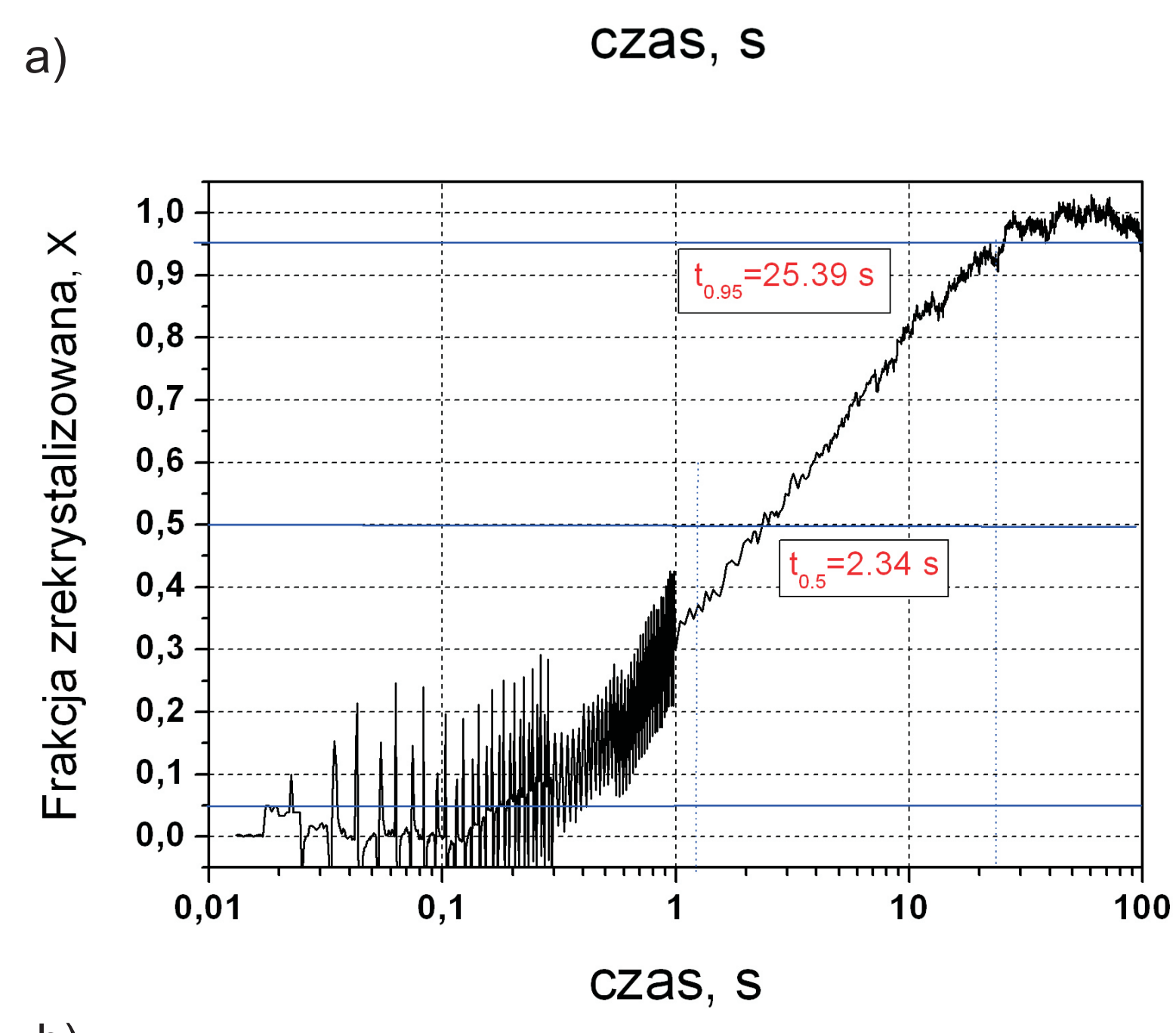
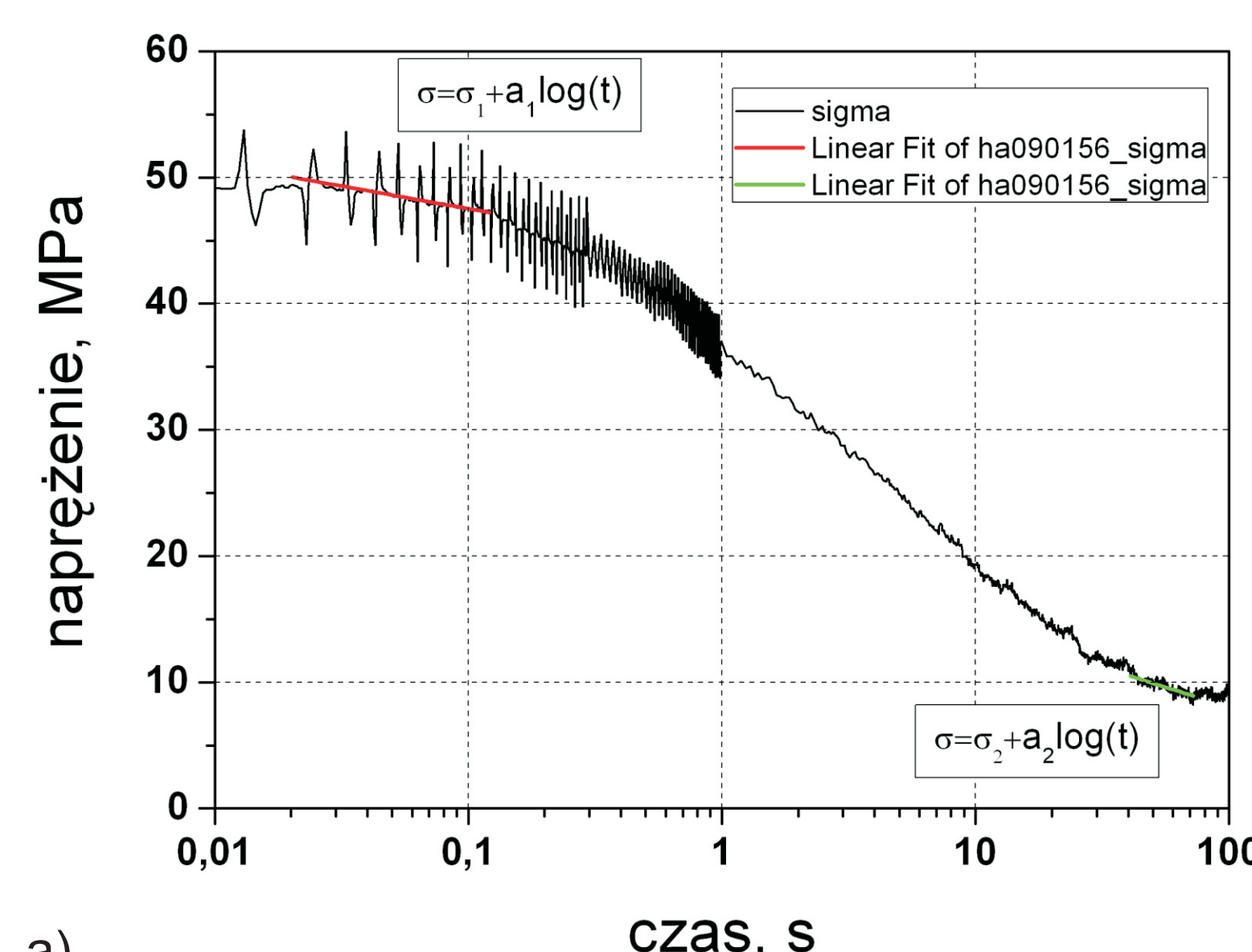
Funkcja	A	m ₁	m ₂	m ₃	m ₄	m ₅	m ₆	m ₇	m ₈	(2,5)
(2.1)	709,36	-0,00647	-0,32002	0,09474	-0,06586	-	-	-	-	13,23
(2.2)	2163,59	-0,00648	0,43350	0,09484	-	-	-1,32094	-	-	12,18
(2.3)	18,06	-0,00902	0,45916	0,04621	-	-0,00262	-0,92565	-	0,04633	12,50



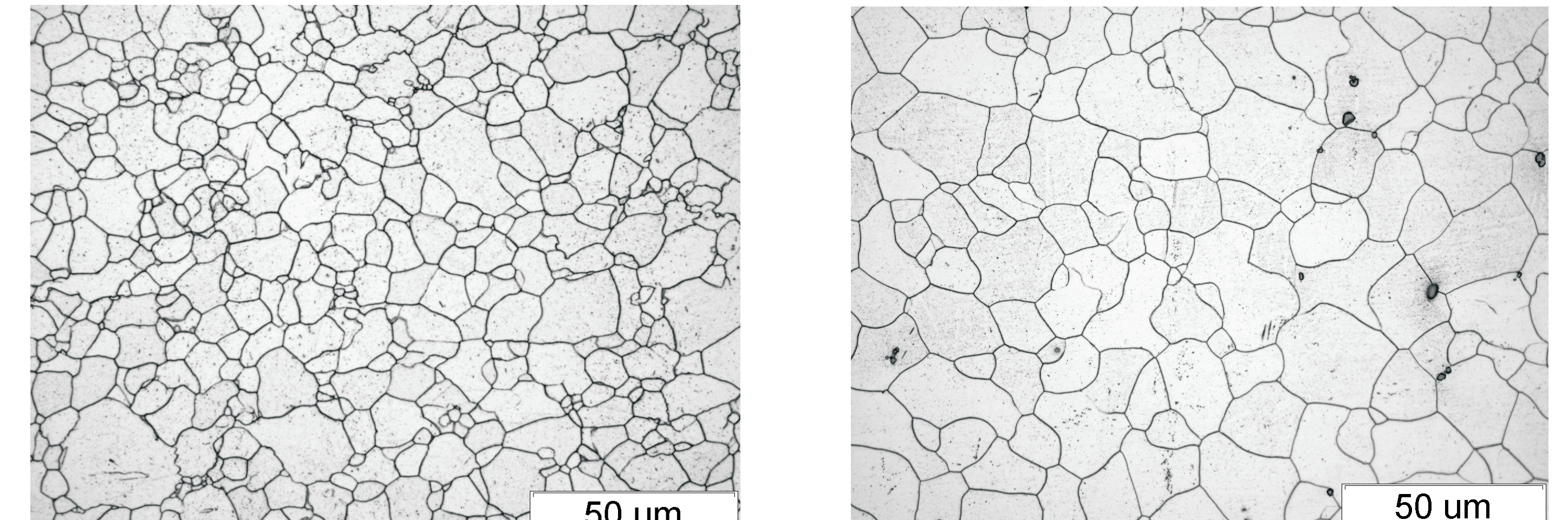
Rys. 2. Model geometryczny procesu wyciskania współbieżnego stopu AZ31



Rys. 3. Porównanie wartości siły wyciskania zarejestrowanej w trakcie prób laboratoryjnych oraz symulacji numerycznych.



Rys. 4. Zarejestrowane dane pomiarowe z symulatora Gleeble metodą relaksacji naprężeń (a) oraz obliczone wartości ułamka osłabienia na podstawie równań (a) i (b).



Rys. 5. Mikrostruktury stopu magnezu po rekrytalizacji statycznej a - temperatura 250°C, prędkość odkształcenia 0,1 s⁻¹, odkształcenie 0,2, czas wytrzymywania t = 50s (średnia średnica zastępcza bliskiego przekroju ziarna D=8,7µm), b - 350°C, prędkość odkształcenia 0,1 s⁻¹, odkształcenie 0,15, czas wytrzymywania t = 4 s (średnia średnica zastępcza bliskiego przekroju ziarna D = 22,3µm.)

$$X = 1 - \exp\left(-\ln 2 \frac{t}{t_{0,5}^{rec}}\right) = 1 - \exp\left(-\ln 2 \frac{t}{t_{0,5}^{0,60}}\right) \quad (3)$$

$$t_{0,5}^{st} = A \cdot n \cdot n \cdot D_0^{n_0} \exp\left(\frac{Q_{st}}{RT}\right) = 10^9 \cdot 0,1 \cdot 0,3 \cdot D_0^{0,23} \exp\left(\frac{100000}{RT}\right) \quad (4)$$

$$D_{rec}^{st} = B \cdot k \cdot w \cdot k \cdot D_0^k \exp\left(\frac{Q_{rec}}{RT}\right) = 276 \cdot 0,17 \cdot 0,1 \cdot D_0^{0,1} \exp\left(\frac{161000}{RT}\right) \quad (5)$$

gdzie :

D₀ – wyjściowa wielkość ziarna, µm;

– odkształcenie rzeczywiste;

– prędkości odkształcenia;

– temperatura, K

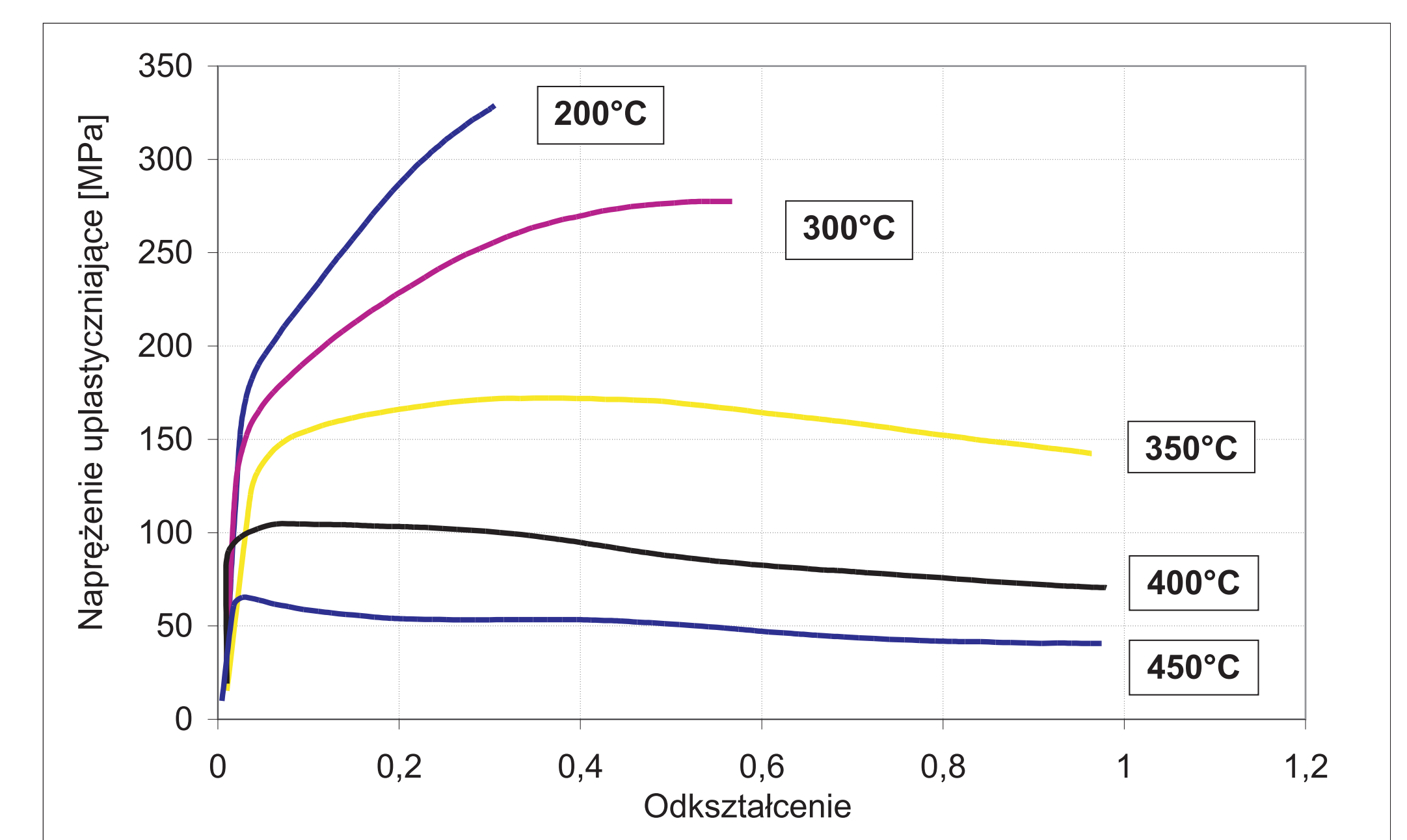
Q_{st}, Q_{rec} – energia aktywacji, odpowiednio rekrytalizacji statycznej i zrodzenia

dynamicznego

A, B, r, n, n, n, k, k, k – optymalizowane współczynniki.

Tablica 2. Skład chemiczny stopu WE43, % mas.

Stop	Mg	Y	Nd	RE	Zr	Mn	Cu	Ni	Zn
						max.	max.	max.	max.
WE43	reszta	4	-	3,4	min. 0,4	0,15	0,03	0,005	0,2



Rys. 6. Krzywe płynięcia stopu WE43 odkształcanego w temperaturze 200+450°C z prędkością 0,1 s⁻¹.

Wskaźniki realizacji celów projektu

Referaty

Kuc D., Hadasik E., Śliwa R.: *Wpływ parametrów odkształcania plastycznego na gorąco na zmiany mikrostruktury stopu magnezu Mg-Al-Zn*. VII Seminarium Naukowe Zintegrowane studia podstaw deformacji plastycznej metali, Plastmet 2010, Łańcut 30.11-3.12. 2010, streszczenie referatów.

Cyganek Z., Tkocz M.: *Wpływ funkcji naprężenia uplastyczniającego na wyniki symulacji numerycznej procesu wyciskania współbieżnego stopu AZ31*. VII Seminarium Naukowe Zintegrowane studia podstaw deformacji plastycznej metali, Plastmet 2010, Łańcut 30.11-3.12. 2010, streszczenie referatów.

M. Tkocz.: *Forming of magnesium alloys*. Internationaler Workshop des Europäischen Zentrums für hochfeste und duktile Magnesiumwerkstoffe, Freiberg, TU Bergakademie Freiberg, 2010

Szula A., Przdondziona J., Walke W., Hadasik E., Jasiński B.: *Koroza elektrochemiczna odlewanych i przerobionych plastycznie stopów magnezu AZ31 w roztworach NaCl*. XXXVIII. Szkoła Inżynierii Materiałowej (SIM), Kraków – Krynica 28.09-01.10.2010, Monografia pod red. J. Pacyny, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie. Wydział Inżynierii

Metali i Informatyki Przemysłowej, s.292-296

Przdondziona J., Szula A., Walke W., Szula J., Hadasik E.: *Resistance to corrosion of magnesium alloy AZ31 after plastic working*. Poster na 9th International Symposium of Croatian Metallurgical Society „Materials and Metallurgy” SHMD 2010, Sibenik, Chorwacja, 2010.

Przdondziona J., Walke W., Hadasik E., Jasiński B.: *Electrochemical corrosion of magnesium alloy AZ31, after casting and metal forming, in NaCl solutions*. Referat wygłoszony na 5th International Conference “Theoretical and Technological Problems of Steels and Nonferrous Metal Forming” TherTechForm 2010, Tale – Słowacja, 04-07.10.2010

Publikacje

Kuc D., Hadasik E., Pidvyotsky V.: *Opracowanie równań opisujących statyczne procesy odbudowy struktury odkształcanego na gorąco stopu magnezu*. Hutnik-Wiadomości Hutnicze, nr 8, 2010, s. 410 - 414.

Kuc D., Hadasik E., Kur A.: *Wpływ parametrów odkształcania na procesy odbudowy struktury odkształcanego na gorąco stopu Mg - Al - Zn*. Hutnik-Wiadomości Hutnicze, nr 8, 2010, s. 406 - 410.

Prace mgr, dr, hab.

Prace inżynierskie obronione

Tomasz Paprotny : *Badanie właściwości stopów magnezu w procesie wyciskania na gorąco* .

Promotor: dr hab. inż.Eugeniusz Hadasik