



Kształtowanie struktury i własności materiałów inżynierskich z wykorzystaniem symulatora obróbki cieplno-plastycznej Gleeble 3800

M. Czaja, W. Borek^a

^a Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Technologii Procesów Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie
email: malgorzata.czaja@polsl.pl, wojciech.borek@polsl.pl,

Streszczenie: W artykule przedstawiono możliwości zastosowania symulatora obróbki cieplno-plastycznej Gleeble 3800 do kształtowania struktury i własności mechanicznych wybranych materiałów inżynierskich. W pracy omówiono ogólne obszary zastosowania symulatora Gleeble na podstawie, których można opracować szczegółowe warunki procesu technologicznego w tym np. kucia na gorąco, ściskania, walcowania, obróbki cieplnej, cieplno-plastycznej itp. Wyjaśniono również potrzebę zastosowania symulacji fizycznych procesów w warunkach laboratoryjnych oraz ich przełożenie na projektowanie procesu technologicznego w warunkach przemysłowych. W części badawczej przedstawiono przykładowe wyniki badań strukturalnych oraz krzywe naprężenie-odkształcenie po jedno i kilku etapowym ścisnaniu na gorąco wysokomanganowych stali austenitycznych. Obróbkę cieplno-plastyczną na symulatorze Gleeble 3800 wykonano w zmiennych warunkach temperaturowych oraz z różnymi szybkościami odkształcenia.

Abstract: In this paper there is presented the appliance possibility of Gleeble 3800 thermo-mechanical simulator concerning modelling of the structure and mechanical properties of selected engineering materials. This work discusses the general application possibilities of the Gleeble simulator, which can be used for developing of a specific process conditions including, e.g., hot forging, compression, rolling, heat treatment, thermo-mechanical treatment, etc. There was also explained the need for simulation of physical processes in laboratory conditions and their impact on the design process of the technological process in industrial conditions. In research part there are examples of the structure investigation results and stress-strain curves after single-stage compression of high manganese austenitic steels. The thermo-plastic deformation on the Gleeble 3800 simulator was performed under chosen temperature conditions as well as at different strain rates.

Słowa kluczowe: Gleeble 3800, symulacja, obróbka cieplno-plastyczna, struktura, własności

1. WPROWADZENIE

Symulator obróbki cieplno-plastycznej GLEELE 3800 wyprodukowany w Stanach Zjednoczonych przez Dynamic Systems Inc. pozwala na wykonywanie fizycznych symulacji

procesów metalurgicznych, w tym przede wszystkim symulacji takich procesów jak: ciągle odlewanie stali, kucie, ściskanie, walcowanie, ciągnięcie, zgrzewanie itp. Symulacje fizycznych procesów metalurgicznych realizowane przy użyciu w/w symulatora wykonane w warunkach laboratoryjnych pozwalają na wierne odwzorowanie rzeczywistych procesów technologicznych w warunkach przemysłowych. Wyniki badań, oraz parametry siłowo-energetyczne uzyskane podczas symulacji fizycznych dają dokładny obraz procesów zachodzących podczas kształtowania materiałów inżynierskich oraz pozwalają zidentyfikować niektóre problemy, jakie możemy napotkać w trakcie rzeczywistego procesu technologicznego, a tym samym na podstawie uzyskanych wyników badań jesteśmy w stanie zweryfikować warunki/parametry takiego procesu tak, aby uzyskać pożądany efekt końcowy.

Badania eksperymentalne wykonane na małych próbkach wyciętych z rzeczywistego materiału, pozwalają również zaoszczędzić zarówno pieniądze jak i materiał. Otrzymane próbki w kolejnym etapie mogą być poddane szczegółowym badaniom w celu określenia wpływu poszczególnych parametrów zastosowanego procesu technologicznego na strukturę i własności mechaniczne badanych materiałów inżynierskich.

2. SYMULATOR OBRÓBKI CIEPLNO-PLASTYCZNEJ GLEEBLE 3800

Symulator obróbki cieplno-plastycznej Gleeble 3800 firmy Dynamics Systems Inc. jest unikatowym urządzeniem do badań własności mechanicznych materiałów inżynierskich i szeroko pojmowanych symulacji fizycznych procesów metalurgicznych (rys. 1).

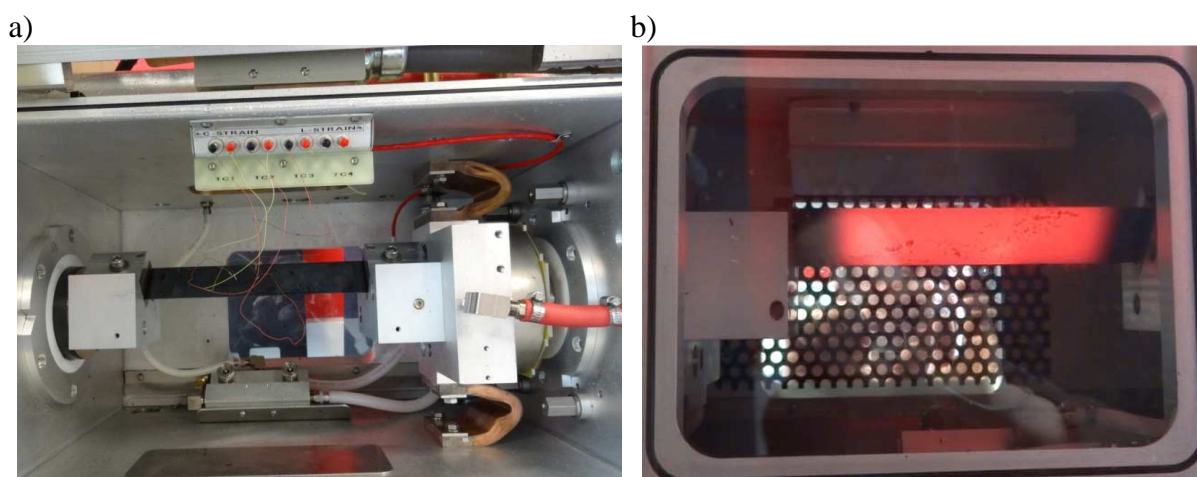


Rysunek 1. Symulator obróbki cieplno-plastycznej Gleeble 3800 wraz z modułem Hydrawedge
Figure 1. Gleeble 3800 thermo-mechanical simulator with Hydrawedge unit

Symulator obróbki cieplno-plastycznej Gleeble 3800 składa się z:

- podstawowej jednostki obciążającej (rys. 1a),
- jednostki sterującej (rys. 1b),
- stacji roboczej (komputer),

- mobilnego modułu Packet Jaw (rys. 2, 3),
- mobilnego modułu Hydrawedge (rys. 1c) - który umożliwia zaprogramowanie wartości odkształcenia, prędkości odkształcenia, czasu przerw pomiędzy odkształceniami dla każdego pojedynczego uderzenia oraz wprowadzenie dowolnych czasów wygrzewania próbki przed i po odkształceniu,
- mobilnego modułu MAXStrain - który pozwala na osiągnięcie ekstremalnie dużych wartości odkształcenia plastycznego z precyzyjnie sterowaną temperaturą próbki oraz odkształceniem sumarycznym na drodze bardzo szybkiego, wielokrotnego i wielokierunkowego ściskania materiału (rys. 4, 5).



Rysunek 2. a) Widok komory roboczej modułu Packet Jaw z zamontowanymi szczękami do wyżarzania blach, b) proces wyżarzania blachy

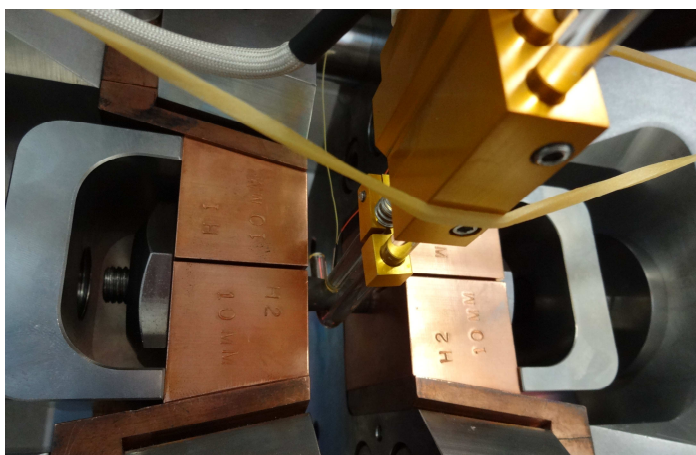
Figure 2. View the vacuum chamber of Jaw Packet unit with mounted jaws to strip annealing, b) strip annealing process

Urządzenie to umożliwia wykonywanie m. in. symulacji procesów [1,2,5]:

- ciągłego odlewania,
- procesów spawalniczych, strefy wpływu ciepła (HAZ),
- wieloetapowej obróbki cieplnej,
- kucia, walcowania, ciągnięcia, wytłaczania,
- zgrzewania,
- badania wytrzymałości i kruchości na gorąco,
- zmęczenia cieplnego i/lub cieplno-mechanicznego,
- wyżarzania blach (rys. 2),
- obróbki cieplnej, cieplno-plastycznej,
- hartowania,
- topnienia i kontrolowanego krzepnięcia.

Za pomocą symulatora obróbki cieplno-plastycznej Gleeble 3800 można wykonać dynamiczną symulację wielostopniowego kucia i walcowania oraz wszelkiego rodzaju związanej z tymi procesami obróbki cieplnej lub cieplno-plastycznej oraz kontrolowanego chłodzenia. Zastosowane rozwiązania konstrukcyjne oraz systemowe pozwalają również wykonywać badania plastyczności materiałów dla procesów przeróbki plastycznej, badania strukturalne mechanizmów odkształcenia plastycznego oraz określanie charakterystyk

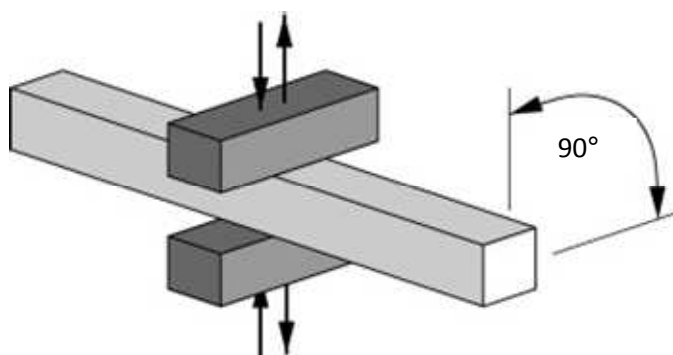
materiałowych. Unikalne wyposażenie w/w urządzenia pozwala na realizację unikatowych w skali świata badań mających na celu opracowanie nowych technologii walcowania w układach ciągłych, technologii walcowania normalizującego, technologii walcowania termomechanicznego, technologii ciągłego odlewania stali, określanie wpływu przeróbki plastycznej i cieplno-plastycznej na strukturę i własności wytrzymałościowe i plastyczne materiałów inżynierskich oraz opracowanie komputerowych modeli rzeczywistych procesów metalurgicznych.



Rysunek 3. Widok zainstalowanej próbki do badań dylatometrycznych z wykorzystaniem symulatora Gleeble 3800

Figure 3. View of installed specimen for dilatometry/phase transformation testing using a Gleeble 3800 simulator

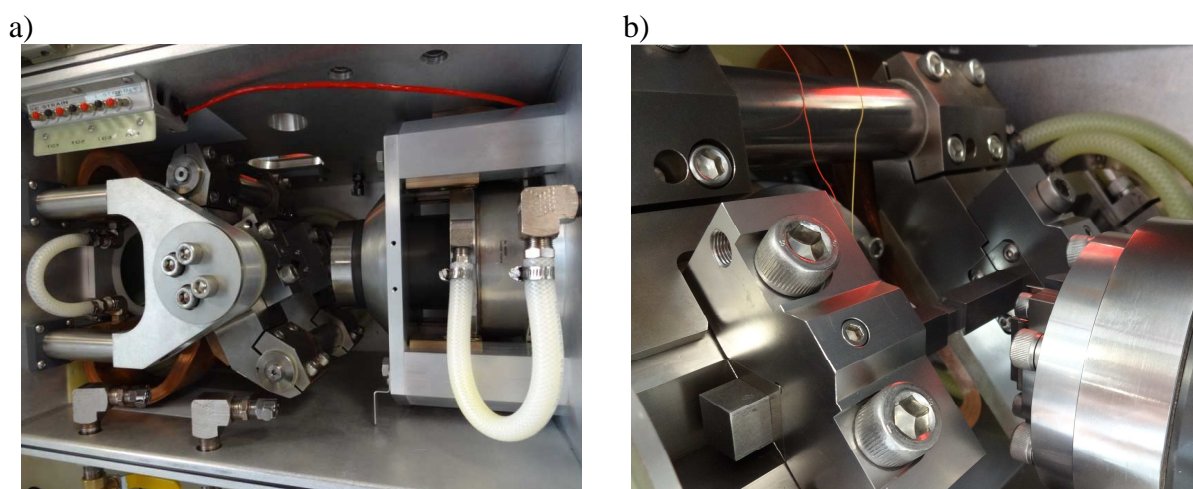
Ponadto w skład całego systemu Gleeble 3800 wchodzi tak zwany moduł ruchomy MAXStrain, do wytwarzania materiałów o strukturze nanokrystalicznej (rys. 4). Zastosowane rozwiązania technologiczne w urządzeniu MAXStrain pozwalają na osiągnięcie ekstremalnie dużych wartości odkształcenia plastycznego z precyzyjnie sterowaną temperaturą próbki oraz odkształceniem sumarycznym w wyniku bardzo szybkiego, wielokrotnego i wielokierunkowego ściskania badanych materiałów inżynierskich, między innymi takich jak stal, aluminium, magnez, tytan i inne stopy metali.



Rysunek 4. Zasada działania symulatora MaxStrain

Figure 4. The principle of MaxStrain module operation

Moduł MAXStrain wykorzystuje odkształcenie w dwóch osiach, odkształcenie jest zadawane przez dwa poziomo umieszczone kowadłka umożliwiające ściskanie próbki w pojedynczej operacji z odkształceniem od 0.3 do 0.5, po każdej sekwencji odkształcenia próbka jest obracana o kąt 90° i ponownie odkształcana (rys. 4, 5). Sumaryczna wartość odkształcenia może osiągnąć wartość dochodzącą do 30 bez utraty spójności badanej próbki. Moduł MAXStrain zapewnia precyzyjną, dokładną kontrolę wszystkich parametrów, takich jak temperatura odkształcenia, wartości i szybkość odkształcenia, czasy przerw pomiędzy poszczególnymi odkształceniami i innych, a zatem zapewnia wysoki stopień powtarzalności zadań badawczych.



Rysunek 5. a) Komora robocza modułu MaxStrain, b) widok zamontowanej próbki w szczękach
Figure 5. a) Vacuum chamber of MaxStrain unit, b) specimens installed in the MaxStrain jaws

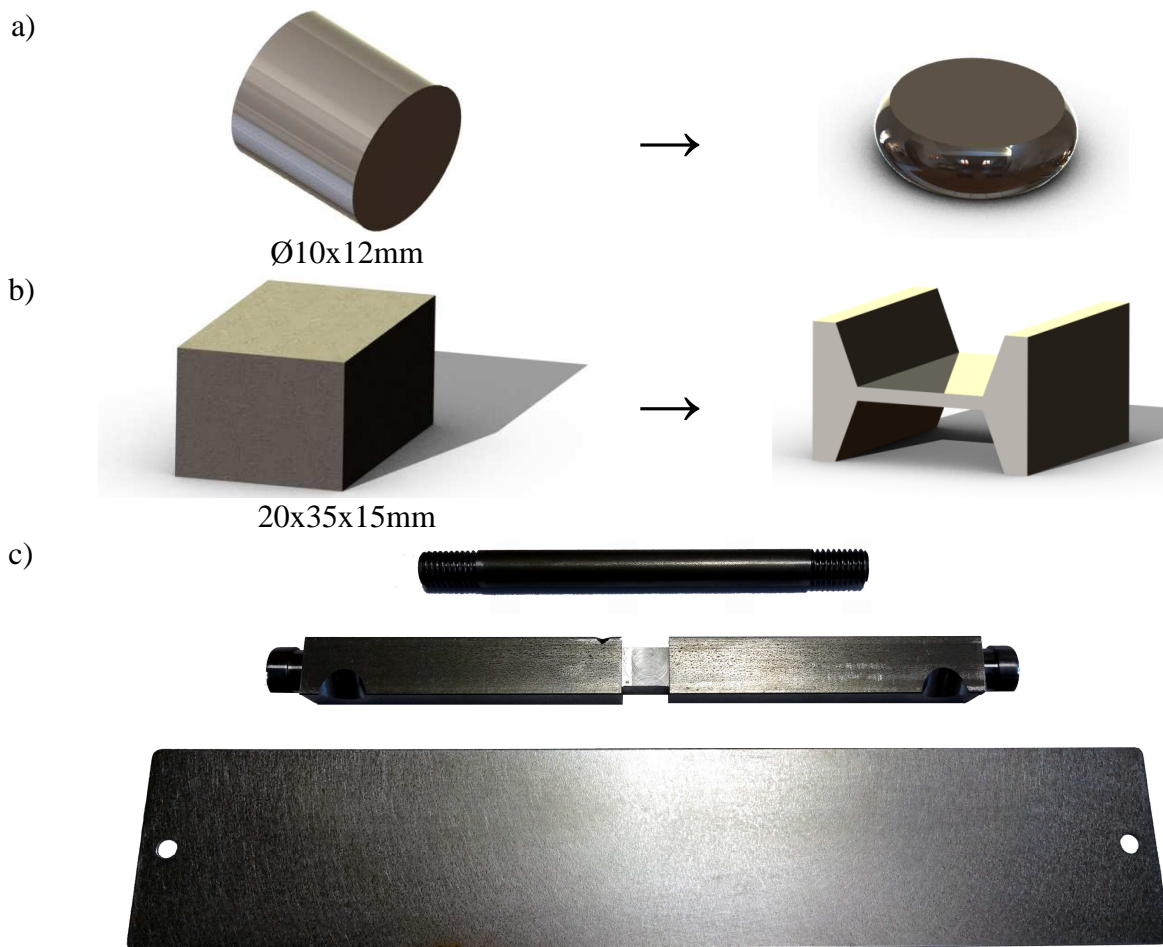
Szybkości nagrzewania i chłodzenia próbek zależą przede wszystkim od zastosowanych wymiarów i kształtów próbek, modułu roboczego, rodzaju szczęk oraz od badanego materiału. System bezpośredniego grzania oporowego może nagrzewać badane próbki z szybkością maksymalną do $10\,000\text{ }^\circ\text{C/s}$, i utrzymywać stałą wartość temperatury. Maksymalna siła nacisku w przypadku zastosowania jednostki Hydrawedge wynosi 200 kN , maksymalna prędkość przemieszczenia szczęki ruchomej: 2000 mm/s (tablica 1). Wszystkie badania wykonywane są w warunkach obniżonego ciśnienia w próżni niskiej (zakres pracy 10^{-1}), lub wysokiej (10^{-5}) lub o ile jest to potrzebne mogą być wykonywane w atmosferze ochronnej (argon, azot, itp.).

Tablica 1. Ogólne dane techniczne symulatora obróbki cieplno-plastycznej Gleeble 3800
Table 1. General specifications of Gleeble 3800 thermo-mechanical simulator

Max szybkość nagrzewania próbek	$10\,000\text{ }^\circ\text{C/s}$	Packet Jaw
Max szybkość chłodzenia próbek	$10\,000\text{ }^\circ\text{C/s}$	Packet Jaw
Max siła docisku	200 kN	Hydrawedge
Max szybkość przemieszczenia szczęki	$2\,000\text{ mm/s}$	Gleeble

Uchwyty posiadające wysoką przewodność cieplną służące do podtrzymywania próbki, jak również zastosowanie chłodzenia zewnętrznego lub wewnętrznego (próbki o odpowiednim

kształcie) np. wodą lub powietrzem, pozwalają na uzyskanie bardzo dużych szybkości chłodzenia. Opcjonalny system hartowania, może osiągnąć prędkość chłodzenia ponad 10 000 °C/s, na powierzchni próbki. Termopary lub pirometr na podczerwień, na bieżąco dostarczają informacji na temat aktualnej temperatury próbki. Dzięki wyjątkowym metodom bardzo szybkiego nagrzewania i chłodzenia, urządzenie Gleeble 3800 pozwala na wykonywanie testów od kilku do nawet kilkunastu razy szybciej niż inne standardowe symulatory obróbki cieplno-plastycznej.



Rysunek 6. Przykładowe kształty próbek przed i po badaniu do: a) ściskania na gorąco, b) walcowania na gorąco, c) próbka do rozciągania, wielokątowego ściskania z wykorzystaniem modułu MaxStrain oraz próbka do wyżarzania blach

Figure 6. Exemplary shapes of the test specimens before and after test to: a) continuous hot compression test b) hot-rolling, c) tension test, MaxStrain test, strip annealing

System Gleeble cechuje elastyczny system szczęk, który umożliwia stosowanie różnych uchwytów dla wielu wymiarów i kształtów próbek. Dla systemu Gleeble 3800 dostępnych jest ponad 20 różnych konfiguracji próbek (rys. 6). Po połączeniu ich z różnymi wymiarami daje to ponad 50 różnych kombinacji kształtu i wielkości próbek, jakie można badać przy wykorzystaniu tego urządzenia. Daje to dowolność wyboru odpowiedniej próbki dla danej symulacji lub testu mechanicznego, co czyni maszynę bardziej elastyczną w zastosowaniach.

Prędkości nagrzewania i chłodzenia próbki limitowane są jedynie własnościami fizycznymi materiału: jego wymiarami i składem chemicznym.

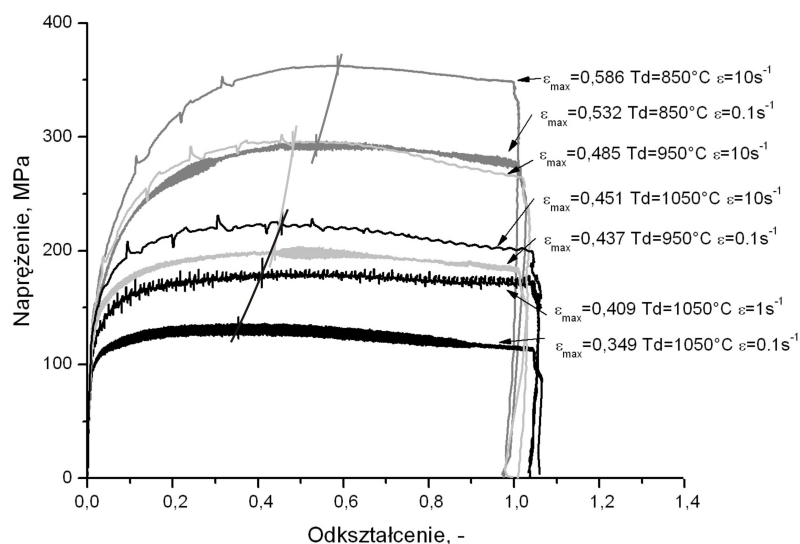
3. BADANIA WŁASNE

Symulator obróbki cieplno-plastycznej Gleeble 3800 wykorzystano w celu wyznaczenia wartości naprężenia uplastyczniającego wysokomanganowych stali austenitycznych. Naprężenie uplastyczniające (σ_p) jest własnością materiału określającą wielkość naprężenia, przy którym materiał obciążony jednoosiowym stanem naprężenia przechodzi w stan plastyczny. Wartość naprężenia uplastyczniającego jest zależna od temperatury i szybkości odkształcenia plastycznego i można ją wyznaczyć w próbie wysokotemperaturowego ściskania [5, 6]. Skład chemiczny badanej stali przedstawiono w tabelicy 2.

Tablica 2. Skład chemiczny badanych wysokomanganowych stali austenitycznych
Table 2. Chemical composition of new-developed high-manganese austenitic steels

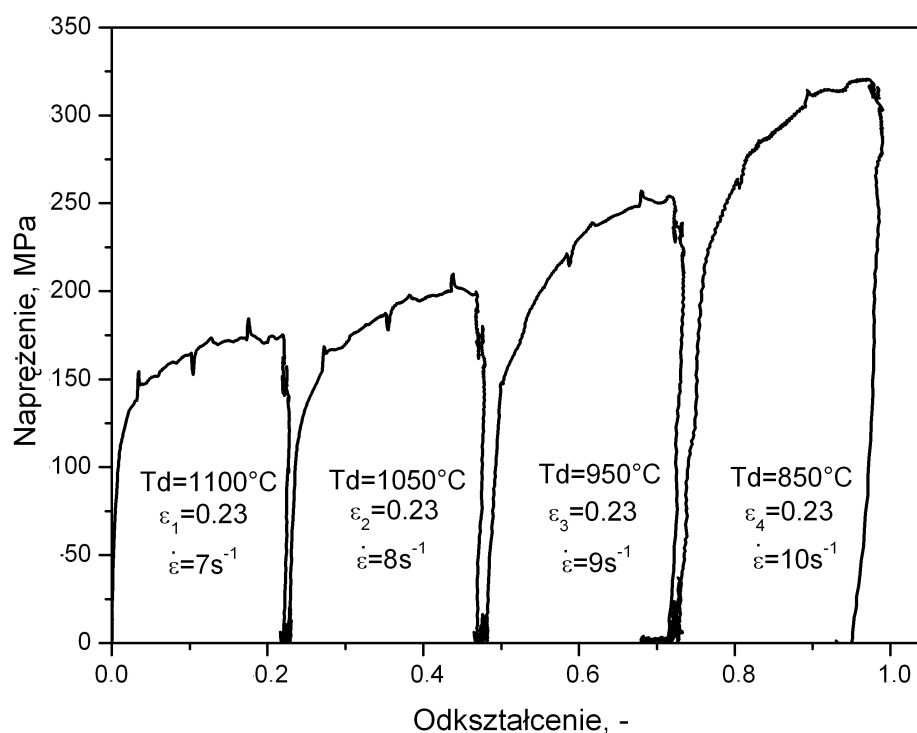
Skład chemiczny badanej stali [%]										
C	Mn	Si	Al	P _{max}	S _{max}	Ce	La	Nd	O	N
0.11	17.55	1.17	3.37	0.002	0.003	0.023	0.007	0.009	0.0003	0.0036

Na rysunku 7 przedstawiono krzywe naprężenie-odkształcenie otrzymane w procesie ciągłego ściskania wysokotemperaturowego badanej stali. Badania przeprowadzono w zakresie temperatur od 850 do 1050 °C, oraz z szybkością odkształcenia plastycznego 0.1, 1 oraz 10 s⁻¹. Wyniki przeprowadzonej analizy zestawiono w tabelicy 3. Rysunek 8 przedstawia reprezentatywną krzywą naprężenie-odkształcenie wysokomanganowej stali austenitycznej otrzymaną w procesie czteroetapowej obróbki cieplno-plastycznej. Na rysunku 9 przedstawiono przykładowe struktury badanej stali uzyskane po różnych etapach odkształcenia plastycznego na gorąco.



Rysunek 7. Wyniki badań wartości naprężenia uplastyczniającego otrzymane w warunkach różnej szybkości odkształcenia i temperatury dla badanej stali

Figure 7. Stress-strain curves obtained for different strain rate and temperature for tested steel



Rysunek 8. Krzywa naprężenie-odkształcenie wysokomanganowej stali austenitycznej otrzymane w procesie czteroetapowej obróbki cieplno-plastycznej w zakresie temperatur 1050 to 850 °C

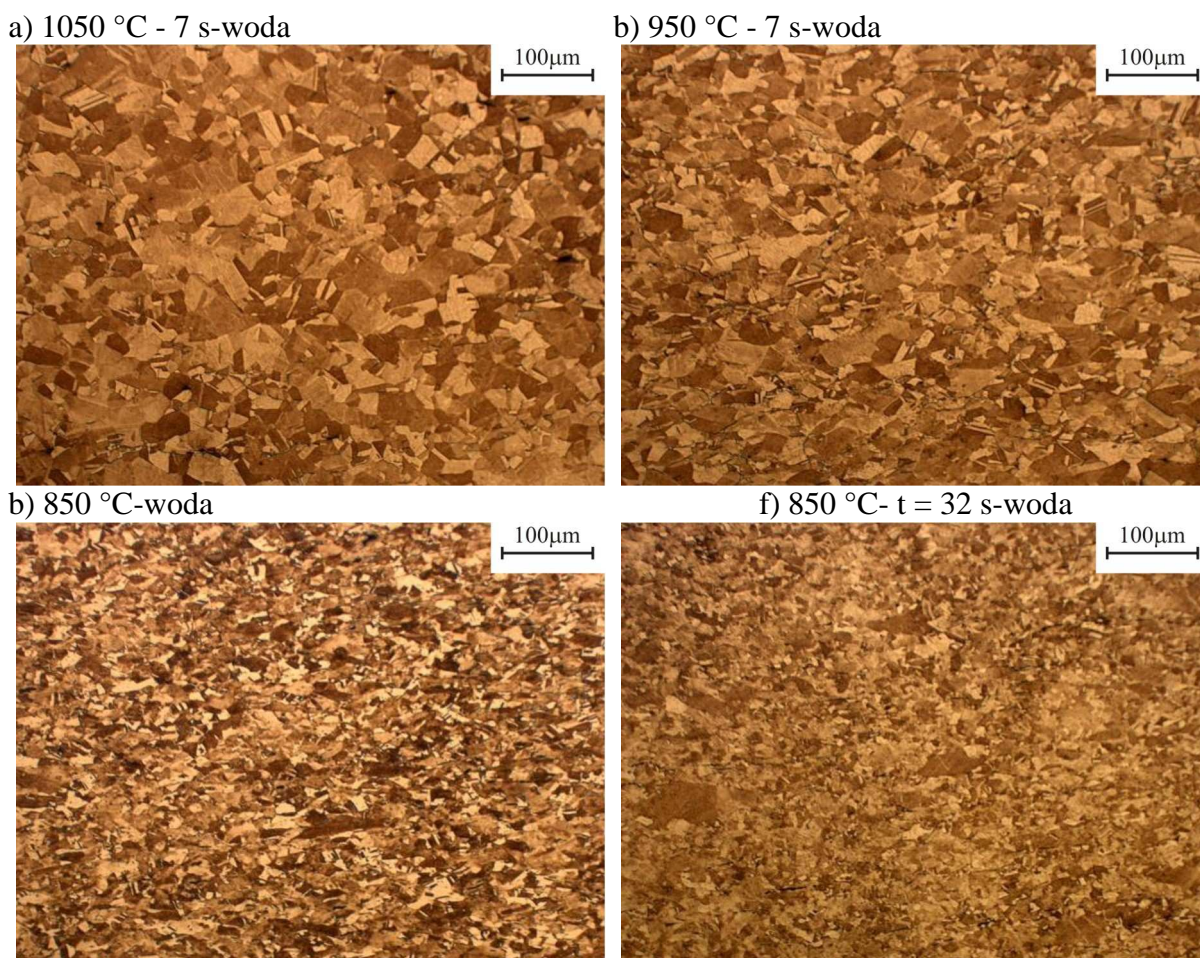
Figure 8. Representative stress-strain curves of high-manganese austenitic steel after multi-stage compression axially symmetrical specimens deformed in a temperature range from 1050 to 850 °C

Tablica 3. Wartość odkształcenia ϵ_{max} i naprężenia uplastyczniającego σ_p badanej stali wysokomanganowej odkształconej z szybkością 0.1, 1, 10 s⁻¹, w temperaturze odpowiednio: 850, 950 i 1050 °C

Table 3. The value of ϵ_{max} and flow stress σ_p of the investigated high-manganese steel deformed with strain rate: 0.1, 1, 10 s⁻¹, and in a temperature: 850, 950 and 1050 °C

Szybkość odkształcenia	0.1 s ⁻¹		1 s ⁻¹		10 s ⁻¹	
	ϵ_{max}	σ_p , MPa	ϵ_{max}	σ_p , MPa	ϵ_{max}	σ_p , MPa
Temperatura						
850 °C	0.532	290	0.561	310	0.586	360
950 °C	0.498	195	0.528	245	0.453	295
1050 °C	0.349	127	0.491	180	0.451	225

Wzrostowi naprężenia uplastyczniającego wraz z obniżeniem temperatury ściskania towarzyszy przesunięcie odkształcenia ϵ_{max} w kierunku wyższych odkształceń plastycznych. Zakres naprężenia uplastyczniającego dla stali zawiera się w przedziale od 120 do 360 MPa. Wzrost szybkości odkształcenia przy stałej temperaturze powoduje również wzrost naprężenie uplastyczniającego. Wysokie wartości σ_p wynikają z umacniającego oddziaływania wysokiego stężenia manganu i aluminium występującego w badanych stalach.



Rys. 8. Struktury wysokomanganowej stali austenitycznej po kilkuetapowym ściskaniu z odkształceniem rzeczywistym $4 \times 0,29$ na symulatorze Gleeble 3800

Fig. 8. Structures of high-manganese austenitic steel after multi-stage compression with reduction rates 4×0.23 in Gleeble 3800 simulator

Zastosowanie odkształcenia rzeczywistego $4 \times 0,23$ dla badanej stali w trakcie cyklicznego ściskania stwarza przede wszystkim możliwość przebiegu rekrytalizacji metadynamicznej lub w przerwach pomiędzy poszczególnymi odkształceniami rekrytalizacji statycznej. Wartość naprężenia uplastyczniającego w zakresie temperatury odkształcenia plastycznego od 1100 do 950 °C są porównywalne z wartościami uzyskanymi w próbie ściskania ciągłego. Wielokrotne odkształcenie plastyczne oraz przebieg częściowej rekrytalizacji metadynamicznej i statycznej pomiędzy poszczególnymi etapami odkształcenia plastycznego powodują uzyskanie wartości naprężenia maksymalnego ϵ_{\max} dla mniejszych wartości odkształcenia na krzywej σ - ϵ dla ostatniego etapu odkształcenia plastycznego w porównaniu z krzywą ściskania ciągłego w temperaturze 850 °C (rys. 7).

4. PODSUMOWANIE

Zaprojektowanie procesu technologicznego metodą symulacji fizycznej pozwala przede wszystkim zmniejszyć koszty związane z ewentualnym zniszczeniem materiału lub

otrzymaniem niezadowalających własności gotowego wyrobu na skutek zastosowania podczas produkcji przemysłowej nieodpowiednich parametrów procesu. Symulacje fizyczne prowadzone na małych próbkach dają możliwość przetestowania różnych szybkości i czasów odkształceń oraz różnej temperatury badania, a następnie na podstawie otrzymanych krzywych, wykresów i danych zarejestrowanych podczas próby wybrania najbardziej optymalnych parametrów.

LITERATURA

1. D. Ferguson, W. Chen, T. Bonesteel, J. Vosburgh, A look at physical simulation of metallurgical processes, past, present and future, *Materials Science and Engineering A* 499 (2009) 329-332.
2. Strona internetowa <http://gleeble.com/>
3. L.A. Dobrzański, W. Borek, M. Czaja, J. Mazurkiewicz, Structure of X11MnSiAl17-1-3 steel after hotrolling and Gleeble simulations, *Archives of Materials Science and Engineering* 61/1 (2013) 13-21.
4. A. Nowotnik, J. Sieniawski, K. Kubiak, Wpływ warunków odkształcania i mikrostruktury na naprężenie uplastyczniające stali niskowęglowej o zawartości 0,156%C, *Inżynieria Materiałowa* 3 (2006) 237-240.
5. L.A. Dobrzański, W. Borek, M. Ondrula, Thermo-mechanical processing and microstructure evolution of high-manganese austenitic TRIP-type steels, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 53/2 (2012) 9-16.
6. M. Głowacki, M. Hojny, R. Kuziak, W. Zalecki, Wyznaczanie naprężenia uplastyczniającego stali w stanie półciekłym, *Prace IMŻ* 1 (2010) 156-160.