

Symulacja obróbki plastycznej materiałów inżynierskich z wykorzystaniem symulatora Gleeble 3800

Wojciech Borek*

Eksperymentalne metody wyznaczania podstawowych charakterystyk nowych materiałów inżynierskich pociągają za sobą konieczność rozwijania technik komputerowych i fizycznych symulacji procesów metalurgicznych. Programy komputerowe umożliwiające symulacje procesów fizycznych bazują m.in. na metodzie elementów skończonych. Pokazują jak istotne i potrzebne są szczegółowe wyniki badań uzyskane na precyzyjnych urządzeniach, dających możliwość rzeczywistego odwzorowania procesów obróbki plastycznej i cieplno-plastycznej nowo opracowanych materiałów inżynierskich.

Sposoby wyznaczania podstawowych charakterystyk materiałowych podlegają ciągłemu rozwojowi. Przyczyniają się do tego wzrost świadomości i wiedzy na temat wpływu poszczególnych parametrów odkształcania plastycznego na strukturę i własności badanych materiałów inżynierskich oraz rozwój nowoczesnych urządzeń do badań plastometrycznych.

Dążenie do optymalizacji procesów technologicznych i produkcyjnych, jak również dobór najlepszego pod względem ekonomicznym materiału konstrukcyjnego pociąga za sobą konieczność zintensyfikowania badań w zakresie fizycznych symulacji procesów obróbki cieplnej i cieplno-plastycznej nowych materiałów inżynierskich. Uzyskanie najlepszych rozwiązań technologicznych oraz optymalizacja procesów produkcyjnych wiąże się z dostępem do najnowocześniejszych rozwiązań i urządzeń technologicznych, które pozwalają na wykonanie symulacji fizycznych procesów takich jak: ciągłe odlewanie, walcowanie, ściskanie, ciągnięcie, kucie, wyciskanie, zgrzewanie,

walcowanie, procesy spawalnicze, w tym badania strefy wpływu ciepła, zmęczenia cieplnego i/lub cieplno-mechanicznego, wieloetapowej obróbki cieplnej, cieplno-plastycznej i wielu innych. Zintegrowanym systemem pozwalającym na wykonywanie tego typu eksperymentów jest symulator obróbki cieplno-plastycznej Gleeble 3800, znajdujący się na wyposażeniu laboratorium Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach (rys. 1).

W niniejszej publikacji zestawiono wybrane wyniki badań stali austenitycznych wysokomanganowych uzyskane

z wykorzystaniem symulatora obróbki cieplno-plastycznej Gleeble 3800. Własności mechaniczne wysokomanganowych stali austenitycznych można kształtować poprzez odpowiednio dobraną obróbkę cieplną i/lub cieplno-plastyczną, która pod względem ekonomicznym jest korzystną metodą wytwarzania produktów masowych. Obróbka cieplno-plastyczna pozwala na zwiększenie wytrzymałości materiału bez obniżenia jego ciągliwości. Wprowadzenie metod obróbki cieplno-plastycznej umożliwia integrację linii technologicznych materiałów metalowych, począwszy od przygotowania materiałów wsadowych, wytapianie i oczyszczanie cie-

kiego metalu wraz z ciągłym odlewaniem wlewków oraz ich obróbkę plastyczną na gorąco z regulowanym chłodzeniem z temperatury końca tej obróbki.

Obróbka plastyczna na gorąco stosowana jest w celu uzyskania produktów metalowych o wymaganej postaci geometrycznej, gładkości powierzchni i tolerancji wymiarowej, a przede wszystkim w celu opracowania struktury, zapewniającej pożądane własności mechaniczne i technologiczne. Obróbka cieplno-plastyczna stali jest procesem łączącym obróbkę plastyczną na gorąco z regulowanym chłodzeniem produktów bezpośrednio z temperatury końca tej obróbki. Proces ten

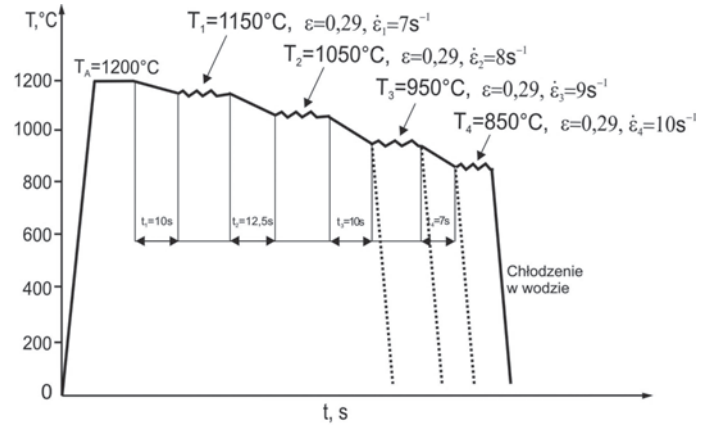


Rys. 1. Symulator obróbki cieplno-plastycznej Gleeble 3800, będący na wyposażeniu Laboratorium Naukowo-Dydaktycznego Nanotechnologii i Technologii Materiałowych Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych Politechniki Śląskiej

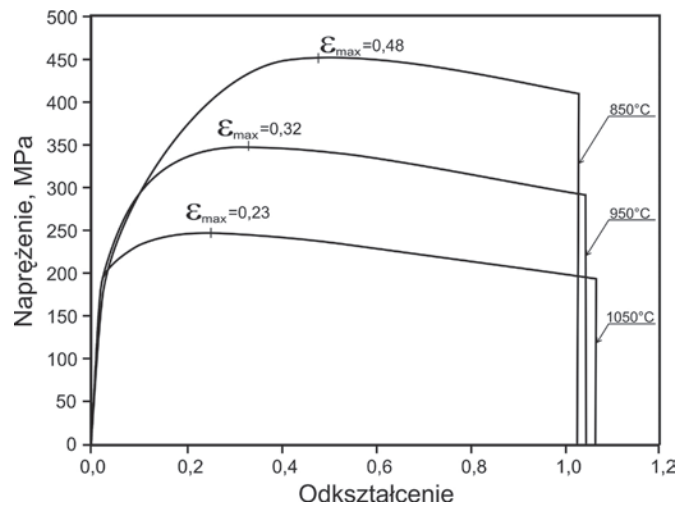
umożliwia wykorzystanie zachodzących w stalach przemian fazowych do nadania im pożądanych własności użytkowych, a w szczególności do wytwarzania materiałów metalowych o regulowanej wielkości ziarn. Istotą obróbki cieplno-plastycznej jest utworzenie dostatecznie drobnoziarnistej struktury, która zapewnia istotny wzrost granicy plastyczności, polepszenie podatności na kształtowanie technologiczne oraz odporności na pęknięcie.

Zastosowanie symulatora obróbki cieplno-plastycznej Gleeble 3800 umożliwiło zaprojektowanie jednoetapowego procesu ściskania na gorąco w celu wyznaczenia krzywych umocnienia badanej stali oraz wpływu takich parametrów jak temperatura i szybkość odkształcenia na mechanizmy kontrolujące przebieg umocnienia odkształceniowego opracowanych stali. W kolejnym etapie badań plastometrycznych zaprojektowano

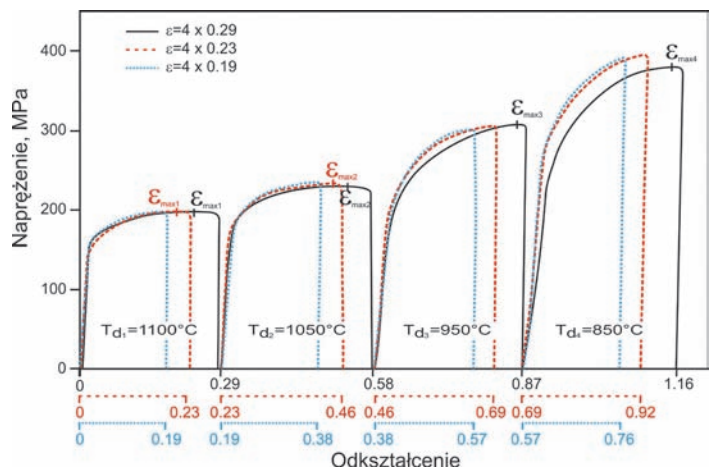
kilkuetapowy proces ściskania na gorąco próbek osiowo-symetrycznych, symulujący rzeczywiste warunki odkształcenia plastycznego badanej grupy stali. Eksperyment ten także wykonano przy użyciu symulatora obróbki cieplno-plastycznej Gleeble. Stopnie gniotu, szybkości odkształcenia plastycznego oraz czasy przerw pomiędzy kolejnymi odkształceniami plastycznymi (rys. 2) dobrano z uwzględnieniem warunków planowanego w najbliższej przyszłości walcowania na gorąco płaskowników o początkowej grubości 4,5 mm na blachy o grubości 2 mm. Zróżnicowany stopień gniotu ma na celu wyznaczenie parametrów siłowo-energetycznych obróbki plastycznej na gorąco oraz zbadanie zmian struktury stali w kolejnych stadiach odkształcenia plastycznego. Po ostatnim odkształceniu plastycznym w temperaturze 850°C część próbek przesyłano w wodzie, a pozostałą



Rys. 2. Parametry procesu obróbki cieplno-plastycznej próbek ze stali X4MnSiAl27-4-2 odkształczanych plastycznie w symulatorze Gleeble 3800



Rys. 3. Wpływ temperatury odkształcenia na kształt krzywych naprężenie-odkształcenie stali X4MnSiAl27-4-2 po odkształceniu rzeczywistym: $e = 0,29$, szybkość odkształcenia: 10s^{-1}



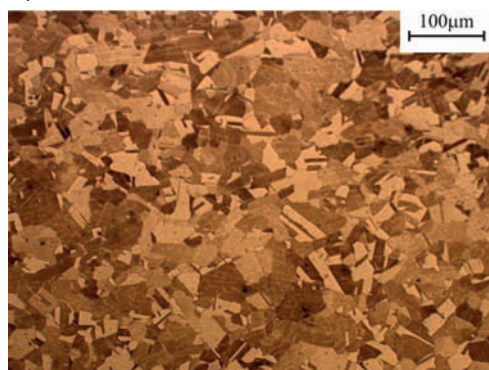
Rys. 4. Krzywe naprężenie-odkształcenie kilkuetapowego ściskania na gorąco z odkształceniem rzeczywistym $4 \times 0,29$; $4 \times 0,23$ i $4 \times 0,19$ próbek osiowo-symetrycznych ze stali X4MnSiAl27-4-2

przesycano po wygrzewaniu izotermicznym w temperaturze 850°C od 0 do 32 s.

Wyniki badań wstępnych badanej stali odkształconej plastycznie na gorąco z wykorzystaniem symulatora Gleeble 3800 z jednoetapowego ściskania na gorąco umożliwiły określenie zakresu naprężenia uplastyczniającego zawartych w przedziale od 230 do 450 MPa nowo opracowanej stali w zakresie temperatury od 1050 do 850°C (rys. 3). Wartości te są zdecydowanie wyższe niż dla konwencjonalnych stali C-Mn, a także stali austenitycznych Cr-Ni i Cr-Mn.

Analizy krzywych naprężenie rzeczywiste-odkształcenie rzeczywiste (rys. 4), jak również analiza wyników badań strukturalnych (rys. 5) pozwala wnioskować, iż odkształcenie rzeczywiste 0,19 i 0,23 jest zbyt małe do zapoczątkowania rekrytalizacji dynamicznej. W tych warunkach procesem kontrolującym umocnienie odkształceniowe jest zdrowienie dynamiczne. Do zapoczątkowania rekrytalizacji dynamicznej dochodzi już w przypadku odkształcenia rzeczywistego 0,29. Wydłużenie czasu wygrzewania izotermicznego po ostatnim odkształceniu w temperaturze 850°C od 0 do 32 s skutkuje uzyskaniem dużego udziału ziarn zrekrytalizowanych dynamicznie (rys. 5). Zmiany strukturalne świadczą o przebiegu rekrytalizacji metadynamicznej oraz rekrytalizacji statycznej. Wygrzewanie izotermiczne badanych stali w temperaturze 850°C od 0 do 32 s powoduje uzyskanie

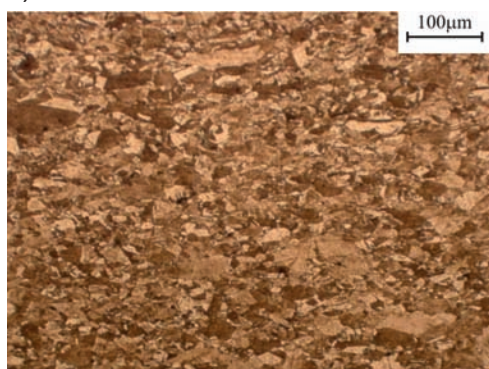
a) 950°C-7s-woda



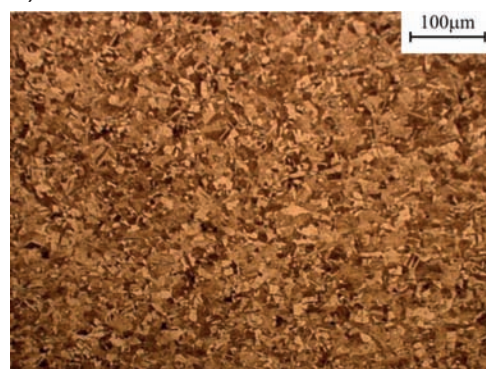
b) 850°C-woda



c) 850°C-16s-woda



d) 850°C-32s-woda



Rys. 5. Struktury stali X4MnSiAl27-4-2 po kilkietapowym ścisnaniu z odkształceniem rzeczywistym 4x0,29, przesycanych po kolejnych stadiach obróbki cieplno-plastycznej: a) częściowo zrekrytalizowane metadynamicznie ziarna przed odkształceniem w temperaturze 850°C, b) częściowo zrekrytalizowane dynamicznie i metadynamicznie ziarna po odkształceniu w temperaturze 850°C, c), częściowo zrekrytalizowane metadynamicznie i statycznie ziarna austenitu, d) całkowicie zrekrytalizowane ziarna austenitu

struktury drobnoziarnistej o wielkości ziarn około 10 µm. Dalsze wydłużenie czasu wygrzewania do 64s jest niepożądane, gdyż prowadzi do wzrostu ziarn fazy g, a w konsekwencji do obniżenia własności mechanicznych. Zmniejszenie odkształcenia rzeczywistego do 0,23 i 0,19 powoduje zmianę kształtu krzywych s-e dla badanej stali X4MnSiAl27-4-2 (rys. 4). Brak wartości maksymalnych naprężenia uplastyczniającego na krzywej s-e wskazuje, że procesem kontrolującym umocnienie odkształceniowe jest zdrowienie dynamiczne. Uzyskanie drobnoziarnistej struktury austenitu wymaga

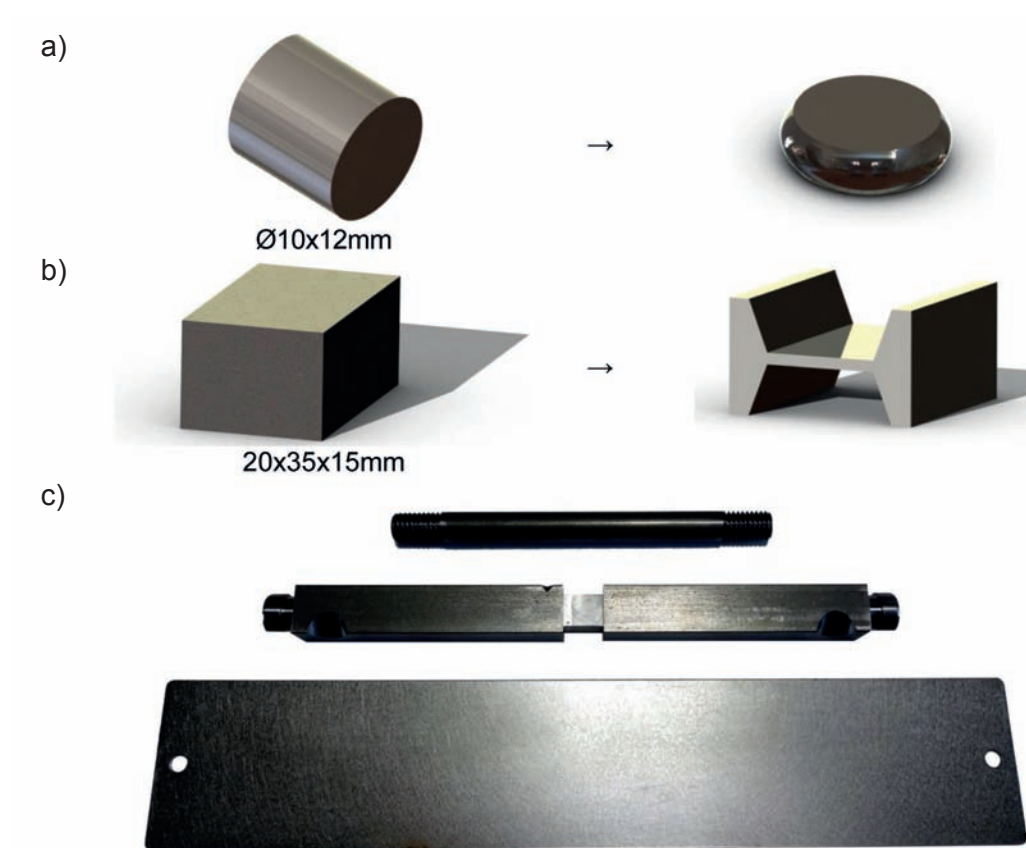
wygrzewania izotermicznego badanych stali po odkształceniu rzeczywistym 0,23 przez 32 s, w trakcie którego dochodzi do przebiegu rekrytalizacji statycznej w około 50%. Niezależnie od zastosowanych warunków odkształcenia plastycznego na gorąco, stal X4MnSiAl27-4-2 zachowuje jednofazową strukturę austenitu. W przypadku badanej stali wysokomanganowej, sterując warunkami obróbki plastycznej na gorąco można wytworzyć strukturę austenitu zdrowionego dynamicznie, zrekrytalizowanego dynamicznie lub częściowo zrekrytalizowanego statycznie,

w wyniku czego zastosowanie odkształcenia plastycznego na gorąco i regulowanego chłodzenia stwarza możliwość znacznego rozdrobnienia struktury austenitu wysokomanganowego. Zastosowanie obróbki cieplno-plastycznej do wytwarzania stali o strukturze austenitycznej powoduje rozdrobnienie ziarn austenitu, a tym samym – zgodnie z zależnością Halla-Petcha – wpływa na podwyższenie umownej granicy plastyczności badanej stali austenitycznej wysokomanganowej. Nowo opracowana stal, będąca przedmiotem niniejszego artykułu, w wyniku zastosowania odpowiedniej obróbki



cieplnej lub cieplno-plastycznej może charakteryzować się zróżnicowaną strukturą, zapewniającą korzystne połączenie własności wytrzymałościowych i plastycznych.

Zbadanie wzajemnych zależności pomiędzy mechanizmami strukturalnymi i przemianami fazowymi, zachodzącymi podczas odkształcenia plastycznego na zimno a stanem strukturalnym tych stali – spowodowanym pożądanym rozdrobnieniem ziarn austenitu w wyniku kontrolowanego przebiegu rekrytalizacji (głównie dynamicznej, ale również metadynamicznej lub statycznej) podczas uprzedniej obróbki cieplno-plastycznej lub (i) cieplnej – ma istotne znaczenie na ewentualną możliwość wdrożenia tej grupy materiałów do produkcji masowej na elementy konstrukcyjne pojazdów, w tym zwłaszcza samochodów osobowych i ciężarowych, co może znacząco wpłynąć na zwiększenie bezpieczeństwa biernego pasażerów tych pojazdów. Do tego rodzaju symulacji i zaawansowanych badań niezbędny jest dostęp do najnowszego i najbardziej nowoczesnego urządzenia, które pozwala na wykonywanie różnorodnych symulacji fizycznych procesów metalurgicznych, jakim jest właśnie symulator Gleeble 3800, który został wyprodukowany przez amerykańską firmę Dynamic Systems Inc. Podstawową zaletą tego urządzenia jest uniwersalność i możliwość wykorzystania go do różnych badań z zakresu szeroko pojętej metalurgii. Symulacje fizycznych procesów metalurgicznych



Rys. 6. Przykładowe kształty i wymiary próbek przed i po badaniu do: a) ściskania na gorąco, b) ściskania na gorąco w płaskim układzie odkształcenia, c) próbka do rozciągania, wieloosobowego ściskania z wykorzystaniem modułu MaxStrain oraz próbka do wyżarzania blach

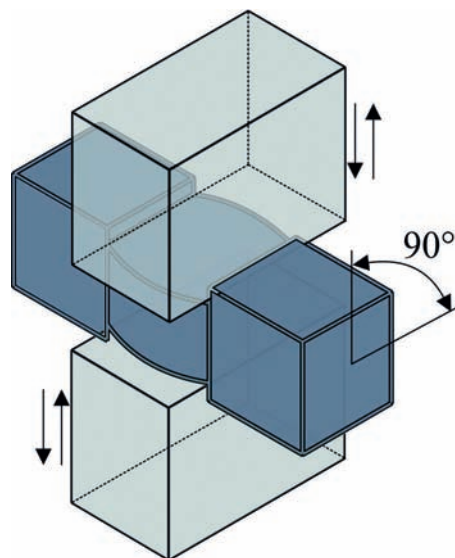
realizowane przy użyciu ww. symulatora Gleeble 3800 wykonane w warunkach laboratoryjnych pozwalają na wierne odwzorowanie rzeczywistych procesów technologicznych w warunkach przemysłowych. Wyniki badań oraz parametry siłowo-energetyczne uzyskane podczas symulacji fizycznych dają dokładny obraz procesów zachodzących podczas kształtowania materiałów inżynierskich oraz pozwalają zidentyfikować niektóre problemy, jakie można napotkać podczas rzeczywistego procesu technologicznego, a tym samym – na podstawie uzyskanych wyników badań – można zweryfikować warunki/para-

metry takiego procesu tak, aby uzyskać pożądaną końcową. Jednostki obciążające symulatora Gleeble 3800 są urządzeniami typu serwohydraulicznego. Opracowane rozwiązanie technologiczne polegające na zastosowaniu dwóch niezależnych systemów hydraulicznych stwarza możliwość uniknięcia momentów przyspieszenia oraz opóźnienia ruchu elementów ściskających podczas odkształcenia próbki. Istotną zaletą systemu Gleeble 3800 jest również możliwość uzyskiwania bardzo precyzyjnych wielkości zadanych odkształceń, zarówno tych cząstkowych, jak i sumarycznych, nawet przy bardzo dużych szybko-

ściach odkształcenia. Urządzenie Gleeble 3800 wyposażone jest w układ bezpośredniego nagrzewania oporowego: system ten umożliwia uzyskanie bardzo jednorodnego rozkładu temperatury w objętości próbki, zaś maksymalna prędkość nagrzewania może dochodzić do 10 000°C/s (szybkości nagrzewania i chłodzenia próbek zależne są przede wszystkim od zastosowanych wymiarów i kształtów próbek, szczęk oraz od badanego materiału). System bezpośredniego grzania oporowego umożliwia ponadto utrzymywanie stałej wartości temperatury z dokładnością do 1°C, a pomiar temperatury może być realizowany za

pomocą przyspawanych do powierzchni próbki termopar lub za pomocą pirometru. Maksymalna siła nacisku w przypadku jednostki Hydrowedge II wynosi 200 kN, prędkość odkształcenia próbki mieści się w zakresie od 0,0001 do 500 s⁻¹. Eksperymenty mogą być wykonywane w próżni niskiej (zakres pracy 10⁻¹), wysokiej (10⁻⁵) lub w atmosferze ochronnej (argon, azot itp.); możliwe jest również zastosowanie atmosfery w postaci mieszaniny argonu i wodoru, ale o maksymalnym stężeniu wodoru do 5%. 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 do 10000°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. System Gleeble cechuje ponadto elastyczny system szczęk, który umożliwia stosowanie różnych uchwytów dla wielu wymiarów i kształtów próbek; próbka w symulatorze instalowana jest w ukła-

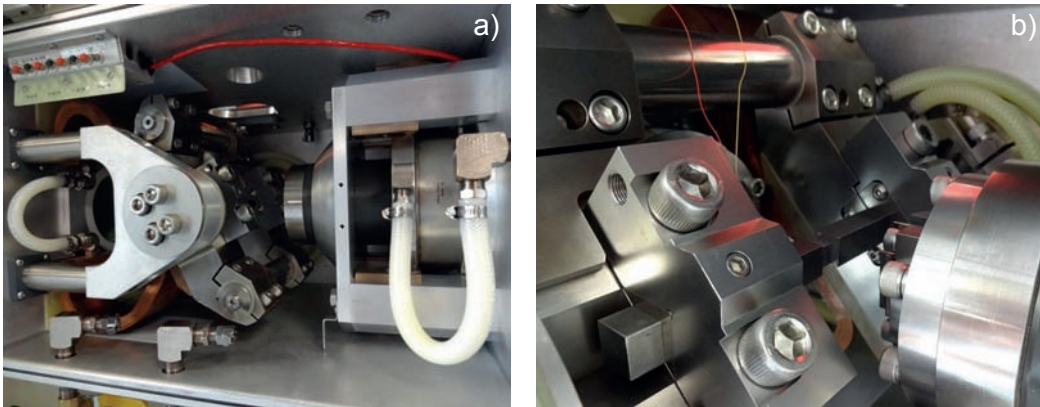
dzie poziomym, co zapobiega powstawaniu efektu kominowego w trakcie nagrzewania i wygrzewania próbki. Dla systemu Gleeble 3800 dostępnych jest ponad 20 różnych konfiguracji próbek – przykładowe zdjęcia i wymiary próbek przedstawiono na rysunku 6. Po połączeniu ich z różnymi wymiarami próbek daje to ponad 50 różnych kombinacji kształtu i wielkości próbek, jakie można badać przy wykorzystaniu tego urządzenia, co z kolei daje dowolność wyboru odpowiedniej próbki dla danej symulacji lub testu badawczego, czyniąc maszynę bardziej elastyczną w zastosowaniach. Prędkości nagrzewania i chłodzenia próbki limitowane są jedynie własnościami fizycznymi materiału, jego wymiarami i składem chemicznym. W skład systemu Gleeble 3800 wchodzi mobilny moduł roboczy MAXStrain. Urządzenie MAXStrain zaliczane jest do generacji nowego typu symulatorów. Urządzenie MAXStrain, ściśle współpracujące z urządzeniem Gleeble 3800, pozwala na uzyskanie struktur ultradrobnoziarnistych i nanokrystalicznych w próbkach metali i ich stopów metodą akumulacji dużych odkształceń plastycznych w połączeniu z obróbką cieplną. W odróżnieniu od powszechnie znanych metod, technologia MAXStrain wykorzystuje odkształcenie w dwóch osiach, podczas gdy płynięcie materiału w trzecim kierunku jest całkowicie zablokowane. Schemat przedstawiający zasadę działania systemu MAXStrain przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Zasada działania systemu MAXStrain

Odształcenie zadawane jest poprzez dwa przeciwbieżne kowadła z węgla wolframu, które ściskają jednocześnie próbkę z zadaną siłą, w kierunku zaznaczonym na rysunku 7. Mimo że dla pojedynczej operacji ściskania, odkształcenie wynosi od około 0,3 do 0,6, w procesie tym można zaprogramować sekwencję obejmującą do 80 odkształceń, co pozwala uzyskać całkowite odkształcenie skumulowane w strukturze obrabianego materiału wynoszące około 50, bez utraty spójności materiału. Kumulacja odkształcenia plastycznego w urządzeniu MAXStrain następuje dzięki sterowanemu elektronicznie obrotowi próbki pomiędzy poszczególnymi odkształceniami o kąt 90° wokół dłuższej osi próbki. Zablokowane płynięcie materiału w kierunku dłuższej osi próbki zapewnia utrzymanie prawie stałej objętości materiału w strefie intensywnego odkształcenia. Odształcenia mogą być wykonywane na zimno i na

gorąco. Zaletą metody kumulacji odkształcenia plastycznego w próbce odkształconej za pomocą systemu MAXStrain jest precyzyjna kontrola odkształcenia, szybkości odkształcenia, temperatury poszczególnych odkształceń, a także możliwości połączenia odkształcenia plastycznego z obróbką cieplną, obejmującą nagrzewanie i wygrzewanie próbki oraz kontrolowane chłodzenie próbki do temperatury otoczenia. Parametry doświadczenia kontrolowane są komputerowo w systemie zamkniętej pętli. System MAXStrain zapewnia wysoki stopień powtarzalności wykonywanych zadań badawczych. Urządzenie składa się z obrotowego rewolwera (rotator), sztywnej ramy, w której montuje się próbkę tak, aby obracała się wokół swojej dłuższej osi. Próbka utrzymywana jest poprzez zaciski, które są elektrycznie izolowane od siebie, co pozwala na przepływ prądu przez próbkę. Natężenie prądu kontrolowane kompu-



Rys. 8. a) Komora robocza modułu MaxStrain, b) widok zamontowanej próbki w szczękach

terowo przez system pozwala na szybką i dokładną kontrolę temperatury w obszarze próbki poddawanej intensywnemu odkształceniu. System termomechaniczny zapewnia dokładną, serwo-hydrauliczną kontrolę dwóch niezależnych kowadeł umieszczonych po przeciwległych stronach próbki, tak jak zaznaczono strzałkami na rysunku 7, określającymi jednocześnie kierunek działania odkształcenia. Ponieważ oba końce próbki są zablokowane, odkształcenie w środkowej części próbki nie powoduje jej wydłużenia.

Podczas ściskania, materiał płynie jedynie w kierunku bocznym: po pierwszym odkształceniu próbka jest szersza i cieńsza, po obróceniu jej o 90°, zadawane jest kolejne odkształcenie powodujące ponownie płynięcie materiału w kierunku bocznym tym razem prostopadle w stosunku do pierwszego odkształcenia. Kolejne odkształcenia powodują zwiększenie się szerokości próbki w strefie odkształcenia, natomiast nie zwiększa się jej całkowita długość. Minimalny czas przerwy pomiędzy kolejnymi odkształceniami

wynosi 0,2 s. Odkształcenie może być prowadzone w dowolnej temperaturze. Prędkość nagrzewania i chłodzenia materiału także może być ściśle kontrolowana; zakres prędkości odkształcenia wynosi od 0,01 do 100 s⁻¹. Na rysunku 8 przedstawiono widok komory roboczej wraz z zainstalowaną próbką w symulatorze Gleeble 3800 – moduł MAXStrain.

Podsumowanie

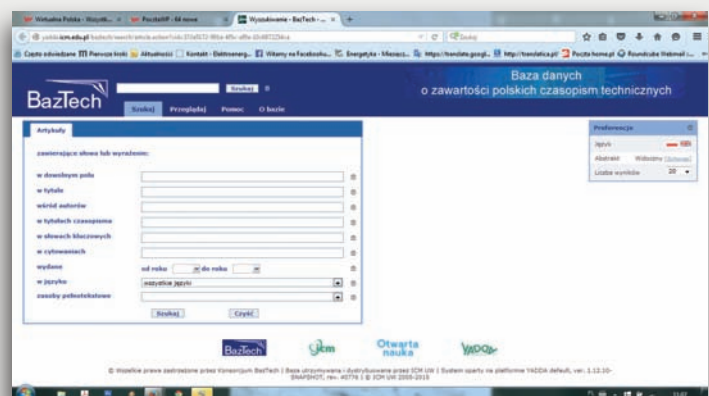
Zaprojektowanie procesu technologicznego metodą symulacji fizycznej pozwala

przede wszystkim na zmniejszenie kosztów związanych z ewentualnym zniszczeniem materiału lub otrzymaniem niezadowolających własności gotowego wyrobu na skutek zastosowania podczas procesu produkcyjnego nieodpowiednich parametrów. Symulacje fizyczne prowadzone na małych próbkach dają możliwość przeanalizowania wpływu poszczególnych parametrów takich jak szybkość odkształcenia, czasy poszczególnych odkształceń i przerw pomiędzy nimi, czy wpływu temperatury badania na otrzymane wyniki, wykresy, strukturę i własności badanych materiałów inżynierskich, a tym samym na zoptymalizowanie rzeczywistego procesu produkcyjnego.

* Zakład Technologii Procesów Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska w Gliwicach, e-mail: wojciech.borek@polsl.pl

BazTech – kopalnia wiedzy

Baza danych o zawartości polskich czasopism technicznych BazTech jest bibliograficzno-abstraktową bazą danych rejestrującą od 1998 r. artykuły z 645 polskich czasopism z zakresu nauk technicznych, ścisłych i ochrony środowiska. BazTech rozwija się w kierunku pełnotekstowej bazy cytaowań. Do opisów artykułów dodawane są bibliografie załącznikowe (od 2006 r.), a na podstawie odrębnych umów z wydawcami rekordy uzupełniane są o pełne teksty artykułów. Tymi działaniami baza wpisuje się w ruch otwartej nauki.



W bazie zamieszczone są również artykuły z archiwalnych numerów LAB.
Szukaj pod adresem: yadda.icm.edu.pl/baztech/