MECHANIKA
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
MECHANICS
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
9-M/2012
ZESZYT 26
ROK 109
ISSUE 26
YEAR 109

SZYMON GĄDEK, MAREK HEBDA, JAN KAZIOR*

ZASTOSOWANIE DYLATOMETRII W BADANIACH PRZEMYSŁOWYCH NA PRZYKŁADZIE PROSZKU FERRYTYCZNEJ STALI NIERDZEWNEJ AISI 434L

ADVANTAGE OF DILATOMETRIC RESEARCH IN INDUSTRY PRESENTED FOR FERRITIC STAINLESS STEEL AISI 434L POWDER

Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono zarys i rozwój stali nierdzewnych oraz jej podział. Omówiono metody i urządzenia do przeprowadzenia badań dylatometrycznych. Zaprezentowano również wyniki badań, które mogą znaleźć szerokie zastosowanie przemysłowe. Koncentrują się one na analizie procesu spiekania ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L modyfikowanej zaprawą mikroproszku zawierającego bor.

Słowa kluczowe: analiza termiczna, ferrytyczna stal nierdzewna, dylatometria, spiekanie aktywowane

Abstract

This article presents the scope and development of stainless steel. Moreover, paper also presents the results of researches that can find wide industrial applications. They focus on the analysis of the sintering process of ferritic stainless steel AISI 434L modified with addition of boron containing master alloy.

Keywords: thermal analysis, ferritic stainless steel, dilatometric, activating sintering

* Mgr inż. Szymon Gądek, dr inż. Marek Hebda, prof. dr hab. inż. Jan Kazior, Instytut Inżynierii Materiałowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

1. Stale nierdzewne

1.1. Zakres i rozwój stali nierdzewnych

Stal nierdzewna stosowana jest w powszechnym użyciu stosunkowo od niedawna. Pionierami w dziedzinie wytwarzania stopów metali byli Micheael Faraday oraz James Stoddart, którzy w 1820 r. przedstawili jedne z pierwszych badań na ten temat. W swojej pracy opublikowali informację, że stop stali z 10% dodatkiem niklu jest najbardziej odporny na matowienie na powietrzu. Stwierdzili również, że najlepszą odpornością na korozję charakteryzuje się stop stali z platyną i rodem zawierający 50% pierwiastków stopowych. Uniemożliwiało to jednak masową ich produkcję ze względu na znaczne koszty. Badany przez nich stop stali z najwyższą zawartością chromu (3%) charakteryzował się podwyższoną skrawalnością, ale nie wykazywał zwiększonej odporności korozyjnej [1, 2].

Rok później Francuz Pierre Berthier odkrył, że stop żelaza z chromem jest bardziej odporny na korozję niż samo żelazo. Ponadto dowiódł, że odporność ta wzrasta wraz ze wzrostem ilości chromu w stopie. Niedługo potem rozpoczął produkcję żelazo-chromu, który dodawany był później do stali w celu polepszenia jej własności antykorozyjnych. Niestety nie zdawano sobie jeszcze wtedy sprawy z niekorzystnego wpływu węgla. W 1895 r. niemiecki chemik Hans Goldschmidt odkrył metodę produkcji żelazo-chromu, która pozwoliła na obniżenie zawartości węgla w stalach chromowych. Chociaż jego ilość nie była jeszcze na wystarczająco niskim poziomie, dało to możliwość rozwoju masowej produkcji stali nierdzewnej. W 1904 r. francuski profesor metalurgii Léon Guillet opublikował serię prac, w której przedstawił proces produkcji niskowęglowej stali nierdzewnej z ilością węgla odpowiadającą współczesnym produktom. Opracowane przez niego stopy miały struktury ferrytyczne oraz martenzytyczne. Dwa lata później przedstawił również badania nad stopami żelazo-chrom-nikiel, dając tym samym podwaliny do produkcji stali austenitycznych. Jego badania zostały wykorzystane przez Eduarda Maurera i Benno Straussa, którzy opracowali w laboratoriach badawczych Kruppa komercyjne metody produkcji austenitycznej stali nierdzewnej [2].

W 1913 roku Anglik, Harry Brearly, wykorzystał po raz pierwszy nierdzewną stal martenzytyczną do produkcji ostrzy noży. W 1924 r. American Society for Testing Materials (ASTM) zorganizowało w Atlantic City pierwsze sympozjum poświęcone korozji, żaroodporności oraz oporności elektrycznej stopów. Spotkanie to cieszyło się bardzo dużym powodzeniem, gdyż wówczas to stale odporne na korozję na stałe wkroczyły do przemysłu. Silniki parowe były w tych czasach bardzo powszechne, jednak używane stale nie wykazywały wystarczającej odporności. Powodowało to częste awarie, a w niektórych przypadkach nawet wybuchy kotłów parowych, co generowało dodatkowe koszty. Dlatego też rozwojem stali nierdzewnych zainteresowanie były szerokie rzesze przemysłowców [2].

W dzisiejszych czasach stal nierdzewna jest wszechobecna. Można ją spotkać w każdym domu, ponieważ wykorzystywana jest m.in. do produkcji artykułów gospodarstwa domowego, armatury kuchennej oraz łazienkowej. Wyroby domowego użytku w styczniu 2012 roku stanowiły 38% światowej produkcji stali nierdzewnej. Od lat 70. XX wieku znalazła ona również szerokie zastosowanie w branży budowlanej (obecnie około 17% światowej produkcji jest tam wykorzystywana). Szacuje się, że dla dobrze dobranych warunków konstrukcje wykonane ze stali nierdzewnej mogą mieć trwałość sięgającą nawet kilkuset lat. Trzecim największym odbiorcą stali nierdzewnej (którego zapotrzebowanie na tę stal w 2012 r. wynosiło około 12%) jest przemysł motoryzacyjny. Znalazła ona zastosowanie m.in. do wytwarzania

takich elementów, jak układ wydechowy, ozdobne listwy wykończeniowe, a także elementy karoserii dla pojazdów transportu publicznego [3, 4].

1.2. Podział stali odpornych na korozję

Obecnie stalą nierdzewną nazywamy stop żelaza z węglem zawierający ≥ 10,5% chromu i ≤ 1,2% węgla oraz inne składniki stopowe [3]. Duża zawartość chromu (przy ograniczonym udziale węgla) przyczynia się do powstania pasywnej warstwy wierzchniej, jaką tworzą tlenki chromu, która ma skłonności do samoczynnej odbudowy. Mechanizm ten zapewnia odporność na korozję wżerową wytworzonej stali.

Główny podział stali nierdzewnych odnosi się do struktury, jaki ma dany stop. Wyróżnić możemy stale:
- ferrytyczne,
- austenityczne,
- martenzytyczne,
- ferrytyczno-martenzytyczne (tzw. stale typu Duplex).

Stale ferrytyczne ze względu na swoją budowę krystalograficzną mają właściwości magnetyczne. Głównym składnikiem stopowym w tym przypadku jest Cr, którego udział objętościowy mieści się w zakresie od 10 do 30%. Cechują się one lepszą odpornością na korozję niż stale martenzytyczne [4].

Stale ferrytyczne możemy dodatkowo podzielić na pięć grup, których głównym kryterium jest zawartość chromu. Zwiększenie ilości chromu w stali powoduje wzrost właściwości antykorozyjnych. Dodatkowo grupy III i IV zawierają molibden oraz inne dodatki stopowe. Podział głównych grup ferrytycznych stali nierdzewnych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Główne grupy ferrytycznych stali nierdzewnych wg [3]

Grupa	I	II	III	IV	V
Zawartość chromu [% cięż.]	10–15	14–18	14–18	18–30	18–30
Ilość dodatków	–	–	Ti, Nb	Mo (do 0,5%)	–
Przykładowy typ stali wg normy American Iron and Steel Institute (AISI)	409, 410, 410L, 420	430	430Ti, 439, 441	434, 436, 444	446, 445

Stale austenityczne w odróżnieniu do ferrytycznych nie mają właściwości magnetycznych. Głównym składnikiem stopowym oprócz chromu (najczęściej o zawartości 18%) jest również nikiel (o zawartości ≥ 8%). Dzięki temu stop ten może osiągnąć strukturę austenityczną w temperaturze otoczenia. Powoduje to zwiększenie odporności elektrochemicznej. Zawartość węgla jest na poziomie 0,08%. W niektórych gatunkach stali, dla podwyższenia odporności na korozję, oprócz głównych pierwiastków stopowych dodaje się również molibden (2–4%). Do utwardzenia tego typu stopu stosuje się obróbkę plastyczną. Stal ta cechuje się dobrą odpornością na korozję (szczególnie w środowisku agresywnym), plastycznością oraz spawalnością.

Stale martenzytyczne zawartość chromu w tego typu stalach waha się między 12 a 18%. Możliwa jest ich obróbka cieplna, taka sama jak w przypadku zwykłych stali węglowych. Jej odporność korozyjna jest ograniczona, ponadto cechuje się złą spawalnością i stosunkowo małą podatnością na obróbkę plastyczną.

Stal Duplex – można scharakteryzować jako połączenie stali austenitycznej i ferrytycznej. Jako pierwiastki stopowe w tym przypadku stosuje się chrom (w zakresie od 18 do 28%), nikiel (od 4 do 7%), molibden (1–7,5%), a także azot, który stabilizuje strukturę austenityczną, co również poprawia odporność na korozję, np. wżerową. Ponadto stale te są dobrze spawalne i odporne na pękanie w warunkach korozji naprężeniowej w środowisku chlorków.

2. Właściwości spiekanych nierdzewnych stali ferrytycznych

2.1. Metalurgia proszków

Produkcja spiekanych części w ostatnich latach stała się coraz częściej wykorzystywaną techniką do wytwarzania najróżniejszych wyrobów. Największym odbiorcą wytworzonych tą technologią materiałów jest przemysł motoryzacyjny. Inne gałęzie przemysłu, takie jak np. maszynowy, energetyczny i budowlany również korzystają z zalet, jakie oferuje technologia metalurgii proszków. Technikę tę coraz częściej stosuje się ze względu na możliwość praktycznie nieograniczonego sterowania właściwościami wytworzonego wyrobu (np. struktury oraz udziału objętościowego porowatości) m.in. poprzez modyfikację i kontrolę składu chemicznego oraz parametrów wytwarzania. Do ekonomicznych zalet takiego typu produkcji należy również zaliczyć wysoką materiało- i energooszczędność, zwłaszcza w odniesieniu do drobnych elementów o skomplikowanych kształtach produkowanych wielkoseryjnie [5, 6].

2.2. Spiekana nierdzewna stal ferrytyczna

Skład chemiczny proszków stali nierdzewnej używanych do produkcji spieków jest zbliżony do składu chemicznego materiałów litych o tym samym oznaczeniu. Symbol „L" umieszczony na końcu nazwy/oznaczenia proszku oznacza obniżoną zawartość węgla, która nie może przekraczać 0,03%. Aby materiał w temperaturze otoczenia miał strukturę ferrytyczną w stopie, należy ograniczyć zawartość takich pierwiastków, jak m.in. węgiel, azot i nikiel, które stabilizują austenit. Szczególną uwagę należy zwrócić na węgiel i azot, gdyż te składniki bardzo trudno jest usunąć ze stopu ze względu na ich silne powinowactwo do chromu. Ponadto rozszerzają one zakres dwufazowy występowania austenitu i ferrytu. Dodatkowo ich niewielkie ilości, bo już dodatek w setnych procentach, działają na zmiany struktury materiału. Informacje te mogą mieć szczególne znaczenie dla materiałów spiekanych, gdyż niejednokrotnie do prasowania proszków dodaje się środki poślizgowe w celach polepszenia ich prasowalności, uzyskania homogenicznego rozkładu gęstości oraz wydłużenia czasu użytkowania urządzeń prasujących. Najczęściej środki te zawierają w sobie dużo węgla. Należy, więc pamiętać o dokładnym ich wypaleniu przed procesem spiekania. Jeżeli proces ten nie będzie przeprowadzony właściwie można zaobserwować w strukturze materiału spiekanego austenit, który podczas chłodzenia przemieni się w martenzyt i spowoduje znaczne zmiany wymiarowe. Należy również unikać jako atmosfery ochronnej azotu. Dlatego zazwyczaj stosowany jest czysty wodór, wysoka próżnia lub też argon [7].

2.3. Kierunki rozwoju spiekanych stali nierdzewnych

Najnowsze badania koncentrują się nad opracowaniem materiałów i procesów technologicznych, tak aby materiały spiekane miały coraz lepsze właściwości wytrzymałościowe. W tym celu stosowane są m.in. różne techniki prasowania/spiekania oraz różne dodatki stopowe. Mają one zapewnić wzrost gęstości i zmniejszenie udziału objętościowego porowatości, a co za tym idzie znacząco podwyższyć właściwości wytrzymałościowe. Dodatki stopowe powodują aktywowane spiekanie, co generuje proces intensyfikujący transport materii w materiale [8].

Badania wykazały, że na intensyfikację procesu spiekania ma wpływ wiele czynników. Jednym z nich jest liczba atomowa pierwiastka dodanego jako aktywator. Stwierdzono, że pierwiastki o małej liczbie atomowej, takie jak bor, azot, węgiel oraz trudnotopliwe, jak molibden, wolfram czy tantal są dobrymi aktywatorami przy spiekaniu proszków żelaza [8].

Badania spieków z ferytycznej stali nierdzewnej AISI 434L modyfikowanej borem, w postaci zaprawy mikroproszku, mogą w znaczący sposób przyczynić się do zwiększenia zastosowania spiekanych stali nierdzewnych w przemyśle. Wstępna analiza tego tematu wykazała, że bor dodawany w postaci zaprawy do proszku stali nierdzewnej powoduje znaczny wzrost gęstości spiekanych materiałów, a tym samym znaczącą poprawę właściwości wytrzymałościowych.

3. Analiza termiczna

3.1. Badania dylatometryczne

Główną cechą badań dylatometrycznych jest pomiar liniowych wymiarów badanej próbki w funkcji zmian temperatury. Kiedy następuje wzrost temperatury zwiększa się objętość dowolnej substancji. W sposób ilościowy zmianę wymiarów opisuje współczynnik rozszerzalności termicznej dzięki czemu dostarcza informacji, jak poszczególna substancja reaguje na zmianę temperatury. W czasie gdy atomy zaczynają otrzymywać dodatkową porcję energii w postaci ciepła, wzrasta ich ruch oscylacyjny wokół średnich położeń. Dzięki temu rośnie średnia odległość pomiędzy atomami. Wartość tego wzrostu jest na poziomie około 7%, od temperatury zera bezwzględnego, do temperatury topnienia [9].

Wymiary mogą ulec zmianie również poprzez występowanie przemiany fazowej. Jako przykład może posłużyć przemiana fazowa występująca podczas hartowania. Przyjmijmy, że objętość komórki elementarnej ferrytu wynosi 100%. Kiedy pod wpływem ciepła dostarczonego następuje przebudowa sieci krystalograficznej ferryt → austenit, objętość zmniejsza się do ok. 90%. Natomiast, jeśli doprowadzimy do przemiany austenit → martenzyt, objętość rośnie i osiąga poziom ok. 110%. Badania dylatometryczne pozwalają na precyzyjne wyznaczenie m.in. takich zależności (jak np. obliczenie współczynnika rozszerzalności cieplnej, wyznaczenia temperatur zachodzących przemian, porównania procesów spiekania badanych materiałów).

3.2. Podział dylatometrów

Dylatometry możemy podzielić na różne rodzaje. Pod względem sposobu pomiaru wyróżniamy dylatometry różnicowe oraz dylatometry bezwzględne. Urządzenia różnicowe, jak wskazuje na to ich nazwa, wykonują równoczesny pomiar zmiany długości w próbce wzor-

cowej (referencyjnej) oraz próbce badanej. Jako przykład może posłużyć dylatometr Chevenarda [9]. Dylatometry bezwzględne natomiast mierzą długość bezpośrednio na próbce badanej. Możemy również dokonać podziału dylatometrów ze względu na sposób rejestracji danych. Wyróżniamy dylatometry: mechaniczne, optyczne i elektryczne. Pozyskiwanie danych w dylatometrach mechanicznych polega na ich zapisie na bębnie przy zastosowaniu przełożenia mechanicznego. Optyczna metoda pozwala mierzyć wymiar próbki bezpośrednio przez mikroskop. Wraz ze zmianą długości próbki następuje odchylenie zwierciadła, które odbija plamkę świetlną i zmienia jej położenie. Wymienione metody są już obecnie rzadko stosowane. Działanie nowoczesnych dylatometrów oparte jest na metodzie elektrycznej. Urządzenie wyposażone jest w rejestrator otrzymujący informację od czujnika w postaci impulsów elektrycznych. Również poprzez położenie badanej próbki można dokonać podziału dylatometrów. W takim wypadku mamy do czynienia z dylatometrami poziomymi lub pionowymi.

Wynikiem pomiarów dylatometrycznych jest wykres (tzw. dylatogram), pokazujący zmianę wymiaru badanej próbki w funkcji temperatury i/lub czasu. Aby zminimalizować wpływ atmosfery zewnętrznej większość dylatometrów ma możliwość prowadzenia badań w atmosferach kontrolowanych.

4. Badania własne

4.1. Metodyka badań

Do badań zastosowano rozpylany wodą proszek ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L dostarczony przez firmę Höganäs oraz mikroproszek zaprawy za bazie Fe zawierającej dodatek boru.

W tabeli 2 zaprezentowano skład chemiczny oraz główne właściwości technologiczne proszku ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L.

Tabela 2

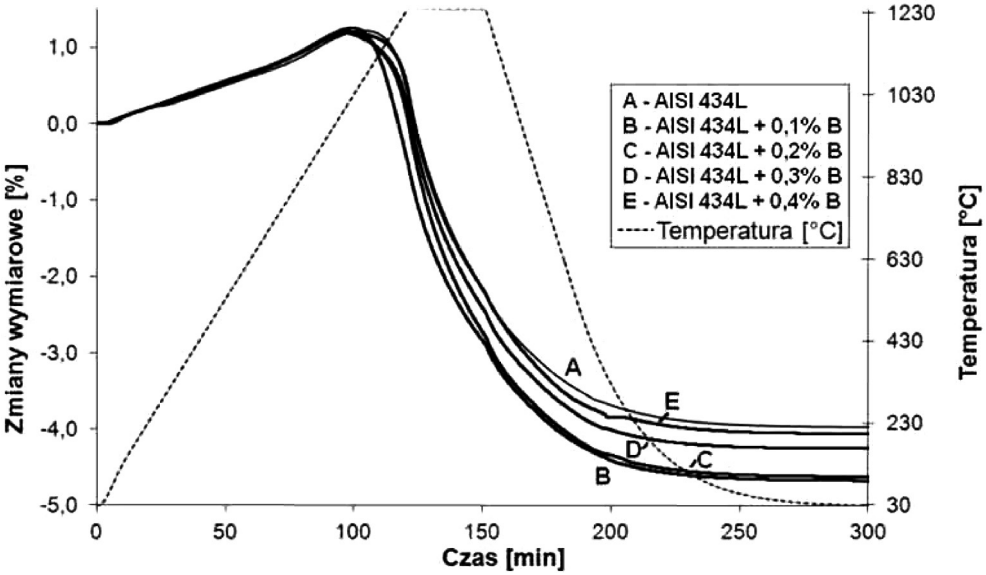
Skład chemiczny rozpylanego wodą proszku AISI 434L

Nazwa proszku	Gęstość nasypowa [g/cm^3]	Sypkość [s/50g]	Skład chemiczny [% cież.]						
			Fe	C	Cr	Si	O	N	Mo
AISI 434L	2,78	33	81,07	0,02	16,8	0,8	0,27	0,04	1

Skład badanych mieszanek proszków został tak dobrany, aby zawierały one odpowiednio 0,1; 0,2; 0,3; i 0,4% cięż. boru. Następnie próbki otrzymane z mieszaniny proszku AISI 434L oraz zaprawy boru mieszano w mieszalniku Turbula przez 24 godziny. Tak przygotowane mieszanki dwustronnie prasowano pod ciśnieniem 600 MPa. Otrzymano prostopadłościenne próbki o wymiarach 4 × 4 × 15 mm. Następnie spieczono je w dylatometrze poziomym DIL 402C firmy Netzsch w temperaturze 1240ºC przez 30 minut w atmosferze suchego wodoru (5.0). Szybkość nagrzewania do temperatury izotermicznego spiekania wynosiła 10ºC/min, natomiast szybkość chłodzenia do temperatury otoczenia wynosiła 20ºC/min.

4.2. Analiza dylatometryczna procesu spiekania stali AISI 434L modyfikowanej dodatkiem zaprawy zawierającej bor

Na rysunku 1 przedstawiono zarejestrowane zmiany wymiarowe spiekanych kształtek wykonanych z proszku ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L (bez wprowadzanych dodatków oraz modyfikowanych zaprawą zawierającą bor odpowiednio w ilości 0,1; 0,2; 0,3; i 0,4% cięż.). Krzywa przerywana prezentuje zadany profil temperaturowy.

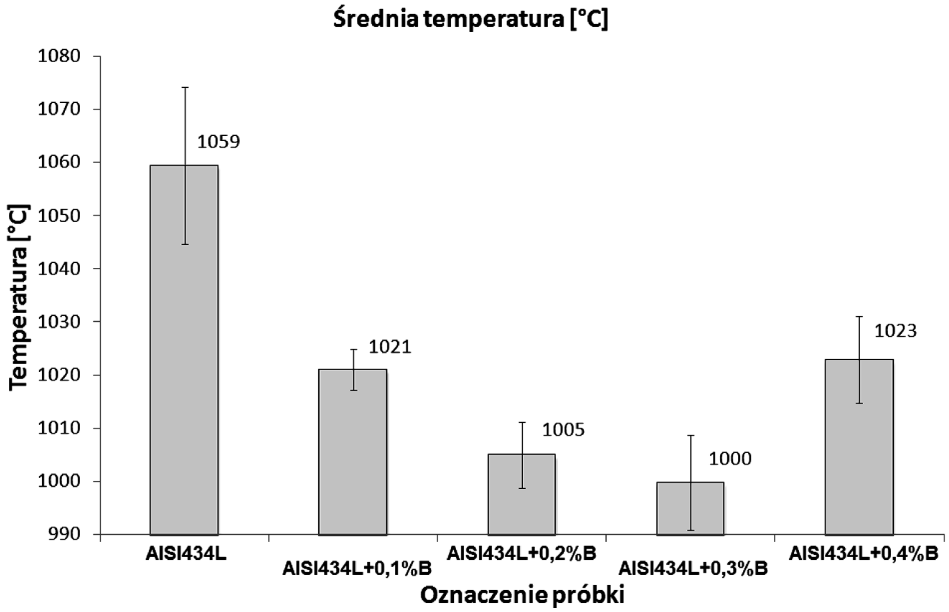


Rys. 1. Zmiany wymiarowe spiekanych kształtek wykonanych z proszku ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L modyfikowanej borem

Fig. 1. Dimensional changes of the sintered ferritic stainless steel AISI 434L modified with boron master alloy

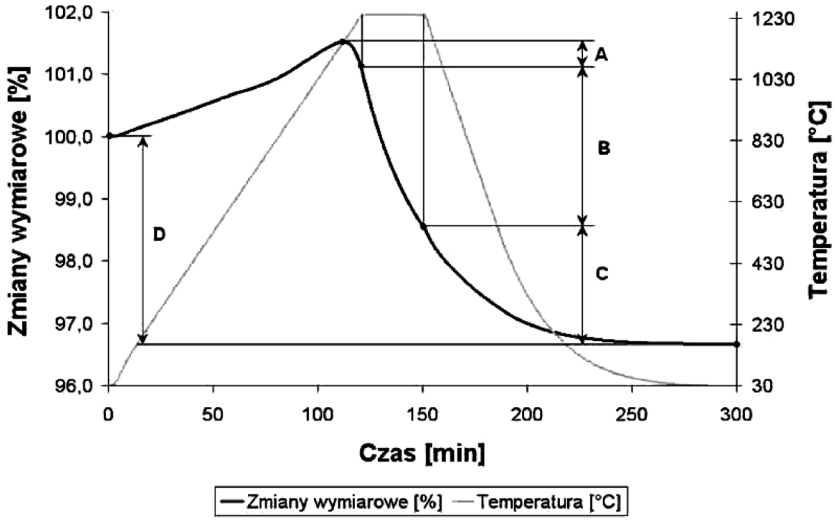
Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że największe zmiany wymiarowe zarejestrowano dla próbki z zawartością 0,1% cięż. boru. Całkowity skurcz próbki wynosi 4,68 ± 0,12%. Temperatura, w której rozpoczyna się proces spiekania ulega znacznej zmianie w zależności od badanego składu chemicznego (rys. 2). Dla niemodyfikowanej stali AISI 434L proces ten rozpoczyna się w temperaturze około 1060°C. Wprowadzenie dodatku zaprawy zawierającej bor w ilościach 0,2% lub 0,3% spowodowało najintensywniejsze obniżenie początku temperatury spiekania materiału do wartości około 1000°C. Efekt ten jest rezultatem tworzącej się fazy ciekłej powstającej w wyniku zachodzącej reakcji eutektycznej pomiędzy żelazem a Fe_2B. Powstała faza ciekła jak również duże powinowactwo chemiczne boru do tlenu znajdującego się na powierzchni cząstek spiekanej ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L to dwa najistotniejsze mechanizmy aktywujące w tym układzie proces spiekania.

Na rysunku 3 przedstawiono schemat wykorzystywany do obliczeń skurczów występujących w poszczególnych etapach spiekania (nagrzewania, izotermicznego spiekania oraz chłodzenia). Prezentuje on również sposób odczytywania całkowitego skurczu próbki.



Rys. 2. Temperatury rozpoczęcia procesu spiekania dla próbek ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L modyfikowanej borem

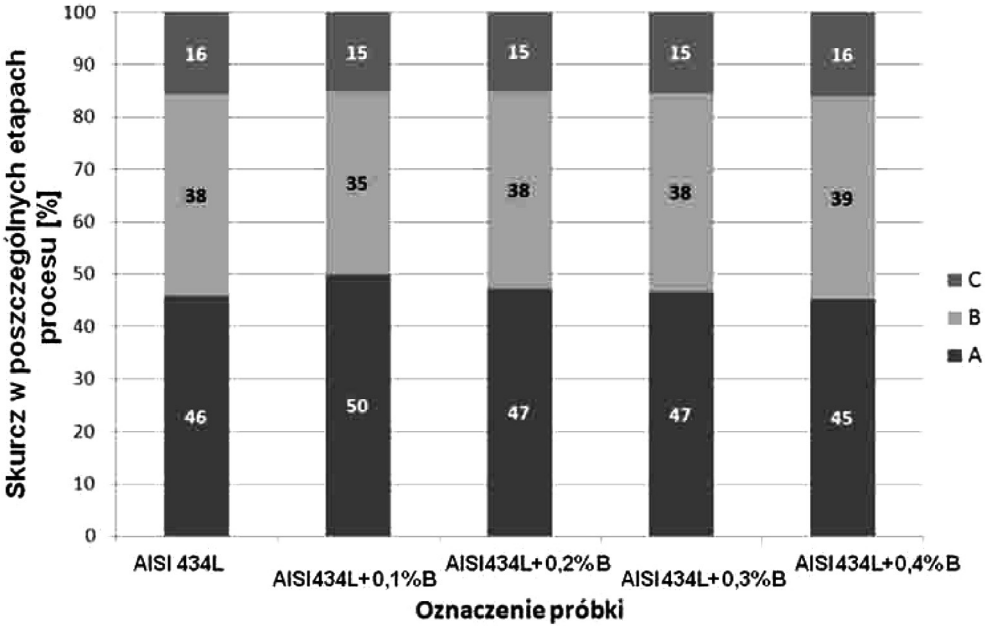
Fig. 2. Start sintering temperature of ferritic stainless steel AISI 434L samples modified with boron



Rys. 3. Schemat obliczania skurczu w poszczególnych etapach. A – skurcz w trakcie nagrzewania, B – skurcz podczas izotermicznego spiekania; C – skurcz podczas etapu schładzania do temperatury otoczenia, D – całkowity skurcz

Fig. 3. Diagram calculation at various stages of contraction. A – contraction during the heating, B – isothermal contraction, C – contraction during cooling to room temperature, D – total contraction

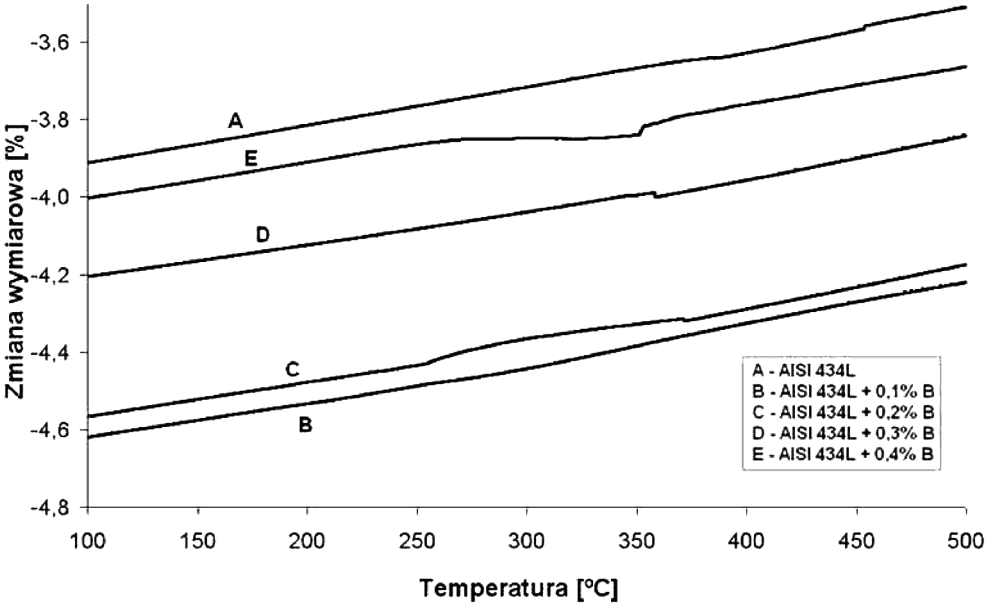
Stosując się do wytycznych zaprezentowanych na rys. 3, obliczono procentowe zmiany skurczu badanych próbek w poszczególnych etapach spiekania. Otrzymane wyniki przedstawione na rys. 4 obliczone zostały w stosunku do zarejestrowanego całkowitego skurczu badanego materiału.



Rys. 4. Procentowy skurcz w poszczególnych etapach procesu spiekaniadla próbek ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L modyfikowanej borem

Fig. 4. Percent contraction at various stages of sintering process of ferritic stainless steel AISI 434L samples modified with boron

Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że dla wszystkich badanych próbek największy procentowy skurcz odnotowano w trakcie etapu nagrzewania (odcinek A na krzywych dylatometrycznych, rys. 3). Dla próbki modyfikowanej 0,1% cięż. boru skurcz ten wynosi najwięcej bo aż 50% całkowitej zmiany wymiarowej. Zaobserwowano również, że wraz ze wzrostem zawartości zaprawy dodatku boru wprowadzanej do ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L rejestrowany w trakcie nagrzewania materiału skurcz był coraz mniejszy. Analizując etap izotermicznego spiekania (odcinek B na krzywych dylatometrycznych, rys. 3), można jednoznacznie zaobserwować, że kinetyka zmian wymiarowych ulega znacznemu spowolnieniu (w porównaniu z etapem nagrzewania). Dla próbki, która wcześniej wykazywała największy procentowy skurcz (0,1% cięż. boru) w etapie izotermicznego spiekania zarejestrowano jej najmniejsze zmiany wymiarowe (wynoszące 38% całkowitego skurczu). Podczas chłodzenia (odcinek C na krzywych dylatometrycznych, rys. 3) można zauważyć, że we wszystkich wypadkach skurcz jest na podobnym poziomie (i wynosi około 15%). Jego wartość jest wyraźnie mniejsza w całym procesie spiekania materiałów.



Rys. 5. Zmiany wymiarowe podczas chłodzenia spiekanych kształtek z proszku ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L modyfikowanej zaprawą zawierającą bor

Fig. 5. Dimensional changes of the sintered ferritic stainless steel AISI 434L modified with boron during cooling

Analizując wykres zmian wymiarowych zarejestrowanych podczas etapu chłodzenia (rys. 1 i 5), można zauważyć, że w próbkach modyfikowanych zaprawą zawierającą bor występuje wyraźne załamanie krzywych dylatometrycznych jednoznacznie świadczące o zachodzącej w materiale przemianie. Stwierdzono, że obserwowany efekt jest tym bardziej wyraźny, im większą zawartość zaprawy zawierającej bor wprowadzono do ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L. Ponieważ przemiana ta powoduje pęcznienie próbki (wzrost wartości rejestrowanych na krzywej dylatometrycznej) oraz występuje ona w stosunkowo niskiej temperaturze (około – 358 °C) ma więc ona charakter przemiany martenzytycznej.

5. Wnioski

W prezentowanym artykule przedstawiono wyniki badań wpływu wprowadzonego dodatku zaprawy w postaci mikroproszku zawierającego bor na właściwości spiekanej ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L. Dokładnie scharakteryzowano przebieg procesu spiekania oraz zmian wymiarowych zarejestrowanych w trakcie badań dylatometrycznych (materiału bazowego i zawierającego różny dodatek boru). Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że największy wpływ na kinetykę zmian wymiarowych ma dodatek boru w ilości 0,3% cięż. Powoduje on rozpoczęcie procesu spiekania w najniższej temperaturze (998°C). Ponadto zaobserwowano, że wartości zmian wymiarowych w poszczególnych etapach procesu spiekania były praktycznie niezależne dla wszystkich badanych próbek. Dodatkowo

stwierdzono, że wraz ze wzrostem zawartości boru wprowadzonego w postaci zaprawy do ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L w trakcie chłodzenia próbek rejestrowano coraz to intensywniejsze efekty związana z przeminą martenzytyczną Uzyskane wyniki mogą mieć duże znaczenie aplikacyjne, gdyż wprowadzenie niewielkiej ilości dodatku boru (0,2% lub 0,3%) w postaci zaprawy do ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L może w znaczącym stopniu obniżyć koszty wytwarzania spiekanych materiałów przez obniżenie temperatury ich spiekania.

Badania były realizowane dzięki wsparciu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach realizowanego projektu badawczego nr PB 4791/T02/2010/38.

Literatura

[1] Stodart J., Faraday M., *Experiments on the alloys of steel, made with a view to its improvement*, The Philosophical Magazine And Journal, London 1820, 26-34.
[2] Cobb H.M., *The History of Stainless steel*, ASM International, 2010.
[3] http://www.worldstainless.org.
[4] http://www.outokumpu.com.
[5] Sekuła M., Nykiel M., Kazior J., *Właściwości mechaniczne spiekanej ferrytycznej stali nierdzewnej AISI 434L modyfikowanej Mn, Ni i Si*, Archiwum Odlewnictwa, rocznik 6, nr 21(2/2), 2006.
[6] Igras Ł., Sułkowski M., Wpływ *temperatury spiekania i składu chemicznego atmosfery na strukturę i właściwości mechaniczne spiekanej stali konstrukcyjnej na bazie proszku Astaloy CrL i CrM*, Metalurgia Proszków, Rudy i Metale, R51 2006, nr 11, 686-694.
[7] Kazior J., Pieczonka T., Nykiel M., W*ybrane właściwości spiekanych stali ferrytycznych*, Rudy i Metale Nieżelazne R. 45, nr 12, 2000, 623-629.
[8] Kazior J., *Bor w spiekanych austenitycznych stalach nierdzewnych*, Politechnika Krakowska, Kraków 2004.
[9] Pieczonka T., *Dylatometryczna metoda wyznaczania liniowego współczynnika rozszerzalności termicznej ciał stałych* (www.kmimp.agh.edu.pl) Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2012.