

Władysław ZALECKI, Zdzisław ŁAPCZYŃSKI

Instytut Metalurgii Żelaza

Jacek RÓŃDA

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Antoni GNÓT

WSK „PZL Rzeszów” S.A.

CHARAKTERYSTYKI WYSOKOTEMPERATUROWE STOPÓW INCONEL 625 I 718

Przeprowadzono doświadczenia pozwalające ocenić wielkość różnicy temperatury pomiędzy środkiem a powierzchnią próbki, a także wartość siły oporu poruszającego się układu mechanicznego symulatora Gleeble 3800 bez założonej próbki. Następnie wyznaczono wysokotemperaturowe charakterystyki (NST, NDT, DRT, SRT i BTR) stopów inconel 625 i 718 w polu „faza stała-ciecz” podczas nagrzewania i chłodzenia.

Słowa kluczowe: nadstopy niklu, inconel 625, inconel 718, NST, NDT, DRT, BTR

HIGH TEMPERATURE PROPERTIES OF INCONEL 625 AND INCONEL 718 ALLOYS

Initial experiments comprised determination of core-surface temperature difference in the specimens heated according to standard procedures, as well as value of force needed to move mechanical system of Gleeble 3800 simulator without mounted specimen. The main aim of the work was to determine high temperature characteristics (NST, NDT, DRT, SRT and BTR) of nickel superalloys Inconel 625 and 718, in mushy zone during heating and cooling.

Keywords: nickel superalloys, Inconel 625, Inconel 718, NST, NDT, DRT, BTR

1. WSTĘP

Superstopa na osnowie niklu, umacniana fazą γ' , z uwagi na ich wyjątkową kombinację znacznej wytrzymałości mechanicznej przy wysokich temperaturach, wytrzymałości na pełzanie i odporności na utlenianie znalazły powszechne zastosowanie przy wytwarzaniu silników lotniczych i nowoczesnych turbin gazowych w energetyce. Do żaroodpornej osnowy Ni-Cr-Co-Mo w celu zwiększenia jej wytrzymałości, w projektowanym zakresie temperatur pracy od ok. 540°C do ok. 900°C, dodawane są typowo tytan, aluminium i niob. Dodatek aluminium podwyższa ponadto odporność na utlenianie. Wymienione wcześniej składniki stopowe wydzielają się w postaci różnych faz w zakresie temperatur zbliżonym do stosowanej w toku produkcyjnym obróbki cieplnej (ok. 590÷980°C), powodując obniżenie plastyczności stopów. To zjawisko określane jest mianem pęknięcia naprężeniowego wywołanego starzeniem (ang. strain-age cracking) [1]. Niebezpieczeństwo tego rodzaju pęknięcia może być zwiększone poprzez rozrost ziarna oraz tworzące siatkę wydzielenia węglików po granicach ziaren, czy utleniające środowisko korozyjne, powodujące korozję międzykrystaliczną [1]. Te czynni-

ki często towarzyszą procesom spawania, np. rozrost ziarna w strefie wpływu ciepła. Dlatego prowadzone są badania podatności stopów do pęknięcia zarówno dla nowych materiałów jak i podczas opracowywania nowych technologii wytwarzania i łączenia. Telejko i wsp. [2, 3] wskazują, że dopóki faza ciekła jest obecna podczas krzepnięcia metalu, dopóty metal będzie pękał w sposób kruchy. Taka sytuacja występuje, gdy metal znajduje się w zakresie temperatur kruchości, w którym wartości właściwości mechanicznych metali są wyjątkowo niskie [3].

WSK „PZL Rzeszów” S.A. od lat prowadzi badania własne jak i uczestniczy w projektach prowadzonych w konsorcjach z instytucjami badawczymi, w celu doskonalenia procesu wytwarzania konstrukcji lotniczych [4].

Przeprowadzono badania mające na celu wyznaczenie parametrów charakteryzujących właściwości mechaniczne stopów Inconel 625 i Inconel 718 przy wysokich temperaturach, w tym w polu „faza stała-ciecz”, podczas nagrzewania i chłodzenia:

– NST (Nil Strength Temperature) – temperatury określającej przejście nagrzewanego metalu lub stopu w stan zerowej wytrzymałości;

- NDT (Strength Recovery Temperature) – temperatura, w której nagrzewany metal lub stop traci całkowicie plastyczność;
- SRT (Nil Ductility Temperature) – temperatury, w której następuje odzyskiwanie wytrzymałości podczas chłodzenia po nagrzewaniu do temperatury NST;
- DRT (Ductility Recovery Temperature) – temperatury, w której następuje odzyskanie własności plastycznych podczas chłodzenia po nagrzewaniu;
- Przedziału temperaturowego BTR w którym, w czasie chłodzenia po spawaniu, materiał jest podatny na pękanie spowodowane likwacją, prowadzącą do spadku plastyczności na obszarze granic ziaren materiału.

Wyznaczenie wartości parametrów NST, NDT, DRT, BTR umożliwi określenie podatności złączy spawanych do pękania lub zniszczenia w czasie spawania (przy nagrzewaniu oraz chłodzeniu) i stanowi podstawę do opracowania technologii spawania.

2. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

2.1. MATERIAŁ BADAŃ

Skład chemiczny badanych materiałów zestawiono w tabeli 1. Materiał w postaci wykonanych próbek dostarczyła firma WSK „PZL” Rzeszów. Próbkę wykonano zgodnie z wytycznymi Dynamic Systems Inc. – producenta symulatora Gleeble.

2.2. METODYKA WYZNACZENIA PARAMETRÓW CHARAKTERYZUJĄCYCH PODATNOŚĆ SPAWANYCH MATERIAŁÓW DO PĘKANIA (NST, NDT, DRT, SRT, BTR)

Wyznaczenie parametrów charakteryzujących podatność spawanych materiałów do pękania (NST, NDT, SRT, DRT, BTR) przeprowadza się za pomocą symulatora Gleeble 3800. Podstawę metodyczną były materiały szkoleniowe i noty aplikacyjne DSI Inc. [5-8] oraz metodyki własne opracowane w IMŻ [9-12].

Fizyczna interpretacja parametrów wyznaczanych podczas symulacji procesu za pomocą systemu Gleeble 3800

Głównym celem prowadzonych badań jest określenie odporności stali na inicjowanie pęknięć. Za pomocą systemu Gleeble 3800 możliwe jest przeprowadzenie dwu rodzajów doświadczeń kończonych rozciąganiem próbki do zerwania, w wyniku których oceniana jest odporność stali na inicjowanie pęknięć, a mianowicie:

1. Doświadczenie polegające na nagrzaniu próbek do temperatur poniżej temperatury solidus i następnie odkształceniu do zerwania.
2. Doświadczenie polegające na nagrzaniu próbki do temperatury powyżej temperatury likwidus, chłodzeniu do temperatury poniżej temperatury solidus i następnie odkształceniu do zerwania.

dzeniu do temperatury poniżej temperatury solidus zadaną prędkością i następnie odkształceniu do zerwania.

Zrealizowanie próby rozciągania w ostatnim etapie doświadczenia umożliwi określenie wartości przewężenia oraz zależności siły od odkształcenia zastępczego. Na tej podstawie wyznaczyć można następujące parametry:

- **NST**: temperaturę określoną podczas nagrzewania, przy której wytrzymałość materiału spada do zera (NST określana jest po przyłożeniu znikomej siły – ~80 N).
- **SRT**: temperaturę określoną podczas chłodzenia po uprzednim nagrzaniu materiału do stanu ciekłego, przy której materiał ponownie wykazuje minimalną wytrzymałość (0,49 MPa),
- **NDT**: temperaturę utraty plastyczności (wyznaczoną podczas nagrzewania),
- **DRT**: temperaturę odzyskania plastyczności (wyznaczoną podczas chłodzenia z temperatury >NDT, przy której miara dającej się zauważyć plastyczności uzyskuje wartość 5%),

W celu scharakteryzowania odporności stali na proces pękania wprowadza się parametr R_F , który zdefiniowany następująco:

$$R_F = \frac{NST - NDT}{NDT} \quad (1)$$

Parametr ten nosi nazwę współczynnika odporności na pękanie; im większa jest jego wartość, tym większa jest podatność stali do pękania. (Możliwość pojawienia się pęknięć jest ograniczona, jeżeli $NST - NDT < 20^\circ C$). Jednak wielu badaczy jest zdania, że współczynnik ten należy rozpatrywać łącznie z charakterem zmian maksymalnej siły rozciągania w funkcji temperatury, poniżej temperatury NST.

3. WYNIKI BADAŃ

Badania wstępne objęły wykonanie doświadczenia z zarejestrowaniem temperatury w środku próbki. W tym celu przygotowano próbkę, którą schematycznie przedstawiono na rys. 1.

Charakterystyka nagrzewania:

Nagrzewanie RT (room temperature) \rightarrow 1200°C (z szybkością 20°C/s) dalej do 1320°C (z szybkością 1°C/s); wytrzymanie 30 sek, Chłodzenie do temperatury 1200°C (z szybkością 1°C/s), wytrzymanie 10 sek i wyłączenie grzania.

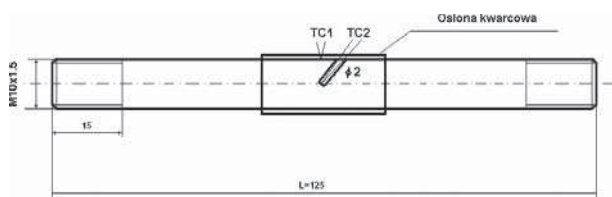
Wykres zarejestrowanej temperatury w dwóch punktach pokazano na rys. 2.

Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że różnica temperatury pomiędzy środkiem próbki (TC2), a powierzchnią (TC1) wynosi 31°C (rys. 2).

Tabela 1. Skład chemiczny badanych stopów

Table 1. Chemical composition of the alloys

Gatunek	Skład chemiczny, [%]													
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Co	Ti	Al	Nb	P	S	Fe	Ta
Inconel 625	0,011	0,21	0,16	22,15	8,90	61,39	0,040	0,08	0,07	3,71	0,007	0,001	3,11	0,001
Inconel 718	max 0,08			19,00	3,00	52,5		0,9	0,5	5,1	0,007	0,001	18,5	0,001



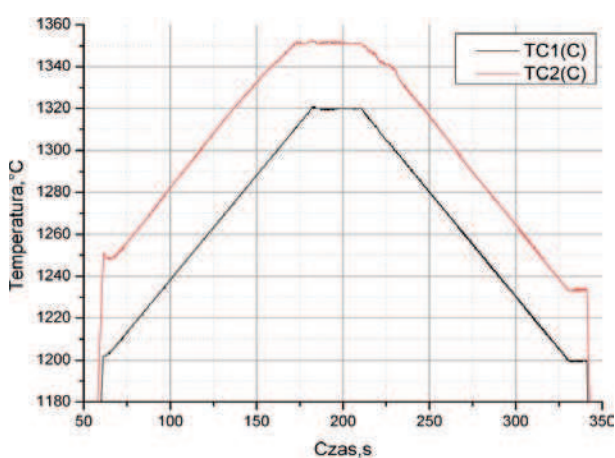
Oznaczenia:

TC1 – termopara sterująca (2 druty typu K) przygrzana do powierzchni próbki

TC2 – termopara płaszczowa typu K mierząca temperaturę w osi próbki

Rys. 1. Schemat rozmieszczenia termoelementów (TC1, TC2) do badań rozkładu temperatury w próbce podczas procesu grzania za pomocą symulatora Gleeble

Fig. 1. Layout of thermocouples (TC1, TC2) for determination of temperature difference in the specimen during heating by means of Gleeble simulator

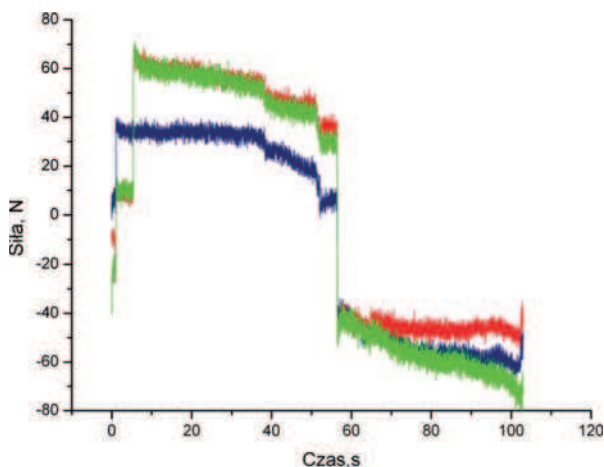


Rys. 2. Przebieg nagrzewania próbki ze stopu Inconel 625 z pomiarem temperatury w dwóch punktach (wg rys. 1)

Fig. 2. Heating of specimen made of Inconel625 with two point temperature measurement (according to Fig. 1)

Oprócz badań rozkładu temperatury, przeprowadzono doświadczenie, którego celem było zarejestrowanie siły mierzonej przez czujnik bez założonej próbki. Test powtórzono trzykrotnie.

Wyniki doświadczeń pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Wykres zmian siły w czasie, bez założonej próbki (3 próby oznaczone różnymi kolorami)

Fig. 3. Force vs. time diagram, without mounted specimen (3 specimens coded with different colours)

Na podstawie przeprowadzonych prób stwierdzono, że z tytułu pokonywania oporów tarcia układu mechanicznego symulatora, wartość rejestrowanej siły osiąga wartość ok. 60 N.

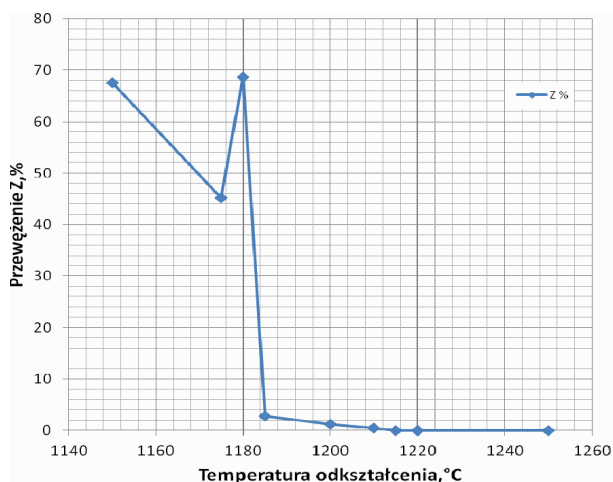
Przy wyznaczeniu NST wykonuje się początkowo 2 testy. Jeżeli różnica uzyskanych wartości NST jest $>20^{\circ}\text{C}$, wówczas należy wykonać trzecią próbę. Wartość średnia stanowi temperaturę NST. W niniejszej pracy przyjęto arbitralnie wyznaczenie temperatury NST, jako średniej uzyskanej dla 7 próbek.

Próbki do wyznaczenia temperatury zerowej wytrzymałości NST nagrzewano początkowo z szybkością 20°C/s do temperatury 1200°C , a następnie z szybkością 1°C/s do temperatury zerwania. Temperaturę NST określono na podstawie 7 testów.

Wyznaczona temperatura NST dla stopu Inconel 625 wynosiła $1258 \pm 9^{\circ}\text{C}$ (dla $\alpha = 0,01$, $n = 7$).

Próbki do wyznaczenia temperatury zerowej wytrzymałości NDT nagrzewano początkowo z szybkością 20°C/s do temperatury 1100°C , a następnie z szybkością 1°C/s do temperatury odkształcenia. W dwóch przypadkach (temperatury odkształcenia 1200°C i 1250°C) początkowe nagrzewanie z szybkością 20°C/s prowadzono do temperatury 1160°C .

Zmianę przewężenia w funkcji temperatury odkształcenia zilustrowano na rys. 4.



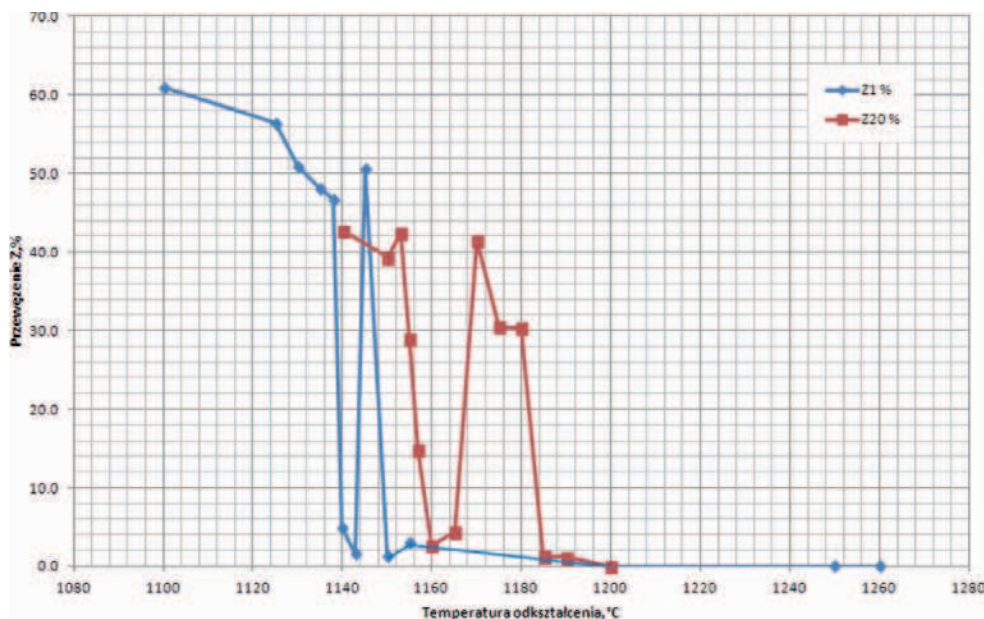
Rys. 4. Wykres przewężenia w funkcji temperatury odkształcenia dla stopu Inconel 625 (wyznaczenie temperatury NDT)

Fig. 4. Reduction of area vs. deformation temperature for Inconel 625 alloy (Determination of NDT temperature)

Przewężenie odkształconego do zerwania stopu Inconel 625, po nagrzaniu do temperatury 1215°C wynosi $0,0\%$. Zatem temperatura NDT wynosi ok. 1215°C .

Temperaturę odzysku plastyczności DRT wyznaczano nagrzewając próbki do temperatury 1100°C/s z szybkością 20°C/s , a następnie z szybkością 1°C/s do temperatury 1260°C . Po 5-sekundowym wyrównaniu temperatury, próbki schładzano do temperatury odkształcenia, która mieściła się w zakresie $1260 \div 1100^{\circ}\text{C}$. Szybkość chłodzenia wynosiła 1°C/s . Odkształcenie poprzedzone było 5-sekundowym wytrzymaniem przy zadanej temperaturze odkształcenia. Próbki rozciągano do zerwania z prędkością 1 mm/s .

Wartość temperatury DRT określana jest przy odzyskaniu 5% przewężenia. W przypadku przeprowadzonych badań dla stopu Inconel 625 temperatura ta przy prędkości odkształcenia 1 mm/s mieści się w za-



Rys. 5. Wykres przewężenia w funkcji temperatury odkształcenia (prędkość narzędzia: 1 mm/s (Z1) i 20 mm/s – (Z20)) dla stopu Inconel 625 – wyznaczenie temperatury DRT

Fig. 5. Reduction of area vs. deformation temperature (tool velocity: 1 mm/s (Z1) and 20 mm/s – (Z20)) for Inconel 625 alloy – determination of DRT temperature)

kresie ok. 1145÷1150°C, przy czym próbę dla temperatur odkształcenia 1140°C, 1145°C i 1150°C wykonano dwukrotnie. Badania te zostały powtórzone również dla prędkości odkształcenia (właściwie ruchu narzędzia 20 mm/s). Wyniki przedstawiono na rys. 5. W tym przypadku temperatura DRT mieści się w przedziale 1180÷1185°C. W przypadku prędkości odkształcenia 20 mm/s wyniki pokazane na rysunku 5 dla niektórych temperatur oznaczają wartości średnie (dla 1155° i 1170°C z 3 prób, 1175°C z 4 prób, a dla temperatury 1180°C z 2 testów).

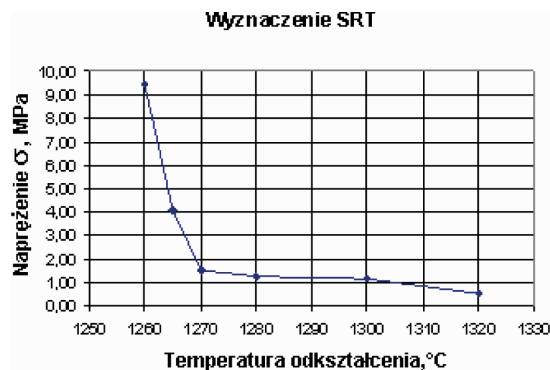
Przedział temperatur pomiędzy NST i DRT uważany jest wg [7] jako zakres temperatur kruchości. W przypadku stopu Inconel 625 zakres temperatur kruchości BTR wynosi 73÷78°C, (przy szybkości rozciągania 20 mm/s, przy 1 mm/s – 108÷113°C).

Temperaturę odzysku wytrzymałości SRT wyznaczano nagrzewając próbki do temperatury 1200°C/s z szybkością 20°C/s, a następnie z szybkością 1°C/s do temperatury 1300÷1320°C (ze strefowym przetopieniem próbki). Po 30-sekundowym wyrównaniu temperatury, próbki schładzano do temperatury odkształcenia, która mieściła się w zakresie 1320÷1260°C. Szybkość chłodzenia wynosiła 10°C/s. Odkształcenie poprzedzone było 5-sekundowym wytrzymaniem przy zadanej temperaturze odkształcenia. Próbkę rozciągano do zerwania z szybkością 1 mm/s.

Wartość temperatury SRT określa się przy odzyskaniu naprężenia ok. 0,5 MPa. W przypadku przeprowadzonych badań dla stopu Inconel 625 odpowiada to temperaturze ok. 1320°C. Przy określaniu wartości naprężeń zastosowano poprawkę, a mianowicie od wartości maksymalnej siły odejmowano poprawkę 60 N, wynikającą z pokonywania oporów ruchu układu mechanicznego.

Zmianę maksymalnego naprężenia w funkcji temperatury pokazano na rys. 6

Próbki do wyznaczenia temperatury zerowej wytrzymałości NST stopu Inconel 718 nagrzewano początko-



Rys. 6. Wykres naprężenia w funkcji temperatury odkształcenia dla stopu Inconel 625 (wyznaczenie temperatury SRT)

Fig. 6. Stress vs. Deformation temperature for Inconel 625 alloy (determination of SRT temperature)

wo z szybkością 20°C/s do temperatury 1200°C, a następnie z szybkością 1°C/s do temperatury zerwania.

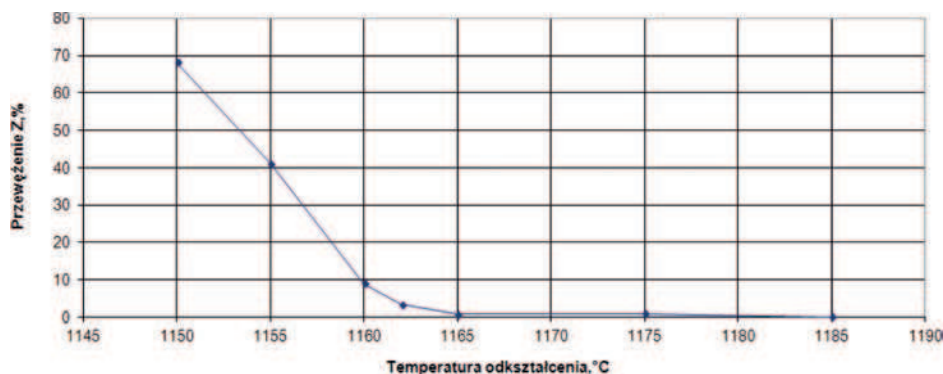
Wyznaczona temperatura NST stopu Inconel 718 wyniosła: 1245±6°C (dla $\alpha = 0,01$, $n = 7$).

Na rysunkach 7–9 przedstawiono (odpowiednio) wykresy przewężenia w funkcji temperatury odkształcenia dla stopu Inconel 718, uzyskane podczas wyznaczania temperatur charakterystycznych dla tego stopu takich jak:

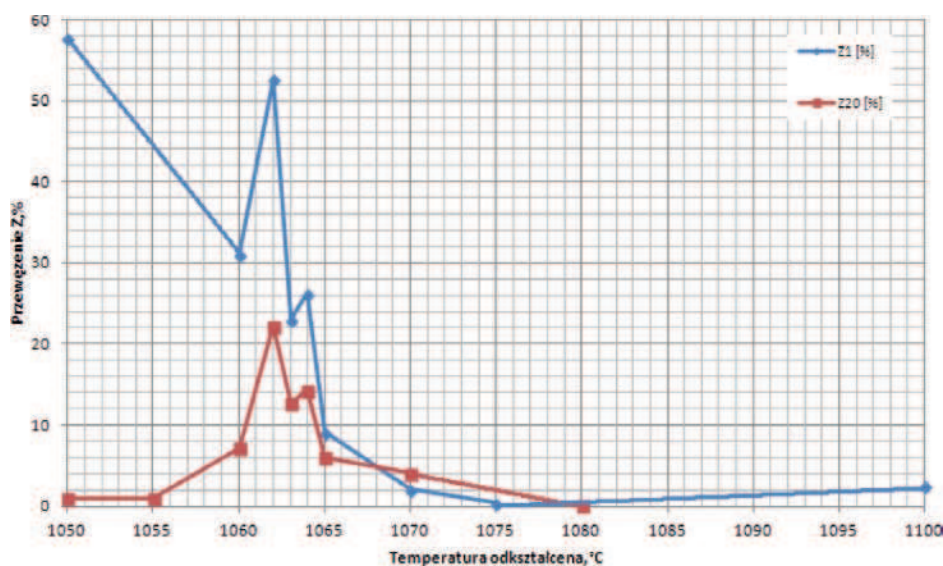
- temperatury zerowej plastyczności NDT;
- temperatury odzysku plastyczności DRT, przy prędkości odkształcenia 1 mm/s i 20 mm/s;
- temperatury odzysku wytrzymałości SRT.

Wyznaczona na podstawie przeprowadzonych badań temperatura NDT stopu Inconel 718 wynosi 1185°C.

Wartość temperatury DRT określa się przy odzyskaniu 5% przewężenia. W przypadku przeprowadzonych badań dla stopu Inconel 718 odpowiada to temperaturze ok. 1065÷1070°C. Na rysunku 8 można jednak zauważyć, że przy temperaturze 1060°C występuje na-

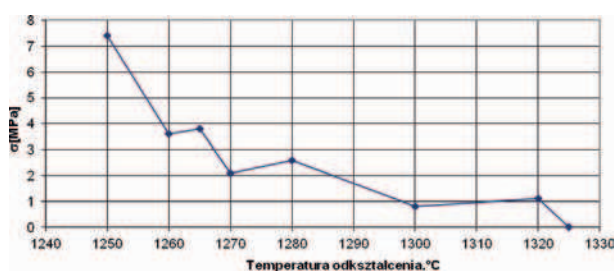


Rys. 7. Wykres przewężenia w funkcji temperatury odkształcenia dla stopu Inconel 718 – wyniki badań – NDT
 Fig. 7. Reduction of area vs. deformation temperature for Inconel 718 alloy – results of NDT determination



Rys. 8. Wykres przewężenia w funkcji temperatury odkształcenia dla stopu Inconel 718 – wyniki badań – DRT (dla dwóch prędkości rozciągania: 1 mm/s (Z1) i 20 mm/s (Z20))

Fig. 8. Reduction of area vs. deformation temperature for Inconel 718 alloy – results of DRT temperature determination (for two tool velocities: 1 mm/s (Z1) and 20 mm/s (Z20))



Rys. 9. Wykres naprężenia w funkcji temperatury odkształcenia dla stopu Inconel 718 – wyniki badań – SRT

Fig. 9. Stress vs. Deformation temperature for Inconel 718 alloy – results of SRT determination

gły spadek przewężenia, który występuje dla obu szybkości odkształcenia.

Przedział temperatur między NST i DRT uważany jest wg [6, 7] jako temperaturowy zakres kruchości (ang. BTR). W przypadku stopu Inconel 718 BTR wynosi ok. 175÷180°C.

Wartość temperatury SRT określana jest przy odzyskaniu naprężenia ok. 0,5 MPa, co dla stopu Inconel 625 odpowiada temperaturze ok. 1320°C. SRT stopu Inconel 718 mieściła się w przedziale temperatur 1320-

1325°C. Przy wyliczaniu wartości naprężeń zastosowano poprawkę, a mianowicie od wartości maksymalnej siły odejmowano 60N, wynikającą z pokonywania oporów ruchu układu mechanicznego.

4. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Badania przeprowadzono na próbkach stopów Inconel 625 i 718 (tabela 1), dostarczonych przez WSK PZL Rzeszów. Rozpoczęto je od przeprowadzenia doświadczeń wstępnych, które objęły wykonanie testów z pomiarem temperatury w środku próbki i na powierzchni. Na podstawie analizy wykresów z przeprowadzonego doświadczenia stwierdzono, że różnica temperatury pomiędzy środkiem geometrycznym próbki (TC2) a powierzchnią (TC1) wynosi 31°C (rys. 2). Podobne wartości uzyskano w doświadczeniach przeprowadzonych dla innych materiałów, między innymi dla stali C45.

Oprócz badań rozkładu temperatury, przeprowadzono doświadczenie, którego celem było zarejestrowanie siły mierzonej przez czujnik bez założonej próbki. Test powtórzono trzykrotnie. Na podstawie przeprowadzonych prób stwierdzono, że z tytułu pokonywania

oporów tarcia układu mechanicznego symulatora, rejestrowana siła osiąga wartość ok. 60 N (rys. 3). Określenie wartości siły oporu było szczególnie ważne przy wyznaczaniu temperatury SRT.

Badania parametrów charakteryzujących stop inconel 625 w zakresie temperatur zbliżonych do stanu ciekłego, a mających szczególne znaczenie podczas procesu spawania, rozpoczęto od określenia temperatury zerowej wytrzymałości (NST), której wartość wyniosła $1258 \pm 9^\circ\text{C}$. Jeżeli do niej dodamy 31°C , wówczas otrzymana wartość odpowiada podawanej w literaturze temperaturze solidus tego stopu (1290°C) [13].

Wartość temperatury zerowej plastyczności wyznaczona podczas nagrzewania stopu Inconel 625 (rys. 4) wynosiła 1215°C .

W celu scharakteryzowania odporności stopu Inconel 625 na proces pęknięcia obliczono parametr R_F wg równania (1). Wartość parametru R_F wyniosła 0,035. Parametr ten nosi nazwę współczynnika odporności na pęknięcie; im większa jest jego wartość, tym większa jest podatność materiału do pęknięcia. W materiałach DSI Inc. [7] stwierdza się, że możliwość pojawienia się pęknięć jest ograniczona, jeżeli $\text{NST-NDT} < 20^\circ\text{C}$. W przypadku badanego stopu różnica NST-NDT wynosi ok. 43°C , zatem trzeba się liczyć z możliwością inicjowania pęknięć w procesie spawania.

Temperatura odzysku plastyczności DRT określana jest umownie jako temperatura, przy której badany materiał wykazuje przewężenie 5%. W przypadku przeprowadzonych badań dla stopu Inconel 625 odpowiada to temperaturze ok. 1140°C (rys. 5 – linia niebieska). Należy jednak stwierdzić, że przy temperaturze nieco wyższej, a mianowicie 1145°C występuje nagły wzrost przewężenia do ok. 50%, co potwierdzono wykonując powtarzalne badanie. Prawdopodobnie przy tej temperaturze może zachodzić proces wydzieleniowy, który zasadniczo zmienia zachowanie badanego materiału. W interpretacji tego zjawiska mogą być pomocne badania metodami analizy termicznej, którymi w projekcie zajmowało się Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego Politechniki Rzeszowskiej. Wykonano również badania uzupełniające dla stopu Inconel 625 [14]. Dotyczyły one wyznaczenia temperatury DRT przy prędkości narzędzia 20 mm/s. Uzyskano wynik DRT o ok. 20°C wyższy niż przy prędkości 1 mm/s (rys. 5 – linia czerwona).

Przedział temperatur pomiędzy NST i DRT uważany jest [7] jako zakres temperatur kruchości. W przypadku stopu Inconel 625 zakres temperatur kruchości BTR wynosi odpowiednio: $108 \div 113^\circ\text{C}$ (1 mm/s) lub $73 \div 78^\circ\text{C}$ (przy 20 mm/s).

Temperatura odzysku wytrzymałości SRT określana jest jako temperatura, przy której materiał poddany rozciąganiu wykazuje maksymalne naprężenie zrywające ok. 0,5 MPa. W przypadku przeprowadzonych badań dla stopu Inconel 625 odpowiada to temperaturze ok. 1320°C (wartość temperatury w środku próbki wynosiła zatem 1351°C , rys. 3). Oznacza to, że materiał znajduje się w stanie dwufazowym (ciało stałe – ciecz).

Badania parametrów charakteryzujących stop Inconel 718 w zakresie temperatur zbliżonych do stanu ciekłego, a mających szczególne znaczenie podczas procesu spawania, rozpoczęto od określenia temperatury zerowej wytrzymałości (NST), która dla tego stopu wyniosła $1245 \pm 6^\circ\text{C}$. Inconel 718 według danych literaturowych [15] ma temperaturę solidus 1260°C . Jeżeli do

wartości NST dodamy ok. 30°C , wówczas otrzymana wartość świadczy o pojawieniu się fazy ciekłej (przynajmniej w środkowej części próbki) podczas nagrzewania.

Wartość temperatury NDT stopu Inconel 718 wyniosła ok. 1185°C i była o ok. 30°C niższa od temperatury NDT stopu Inconel 625.

W celu scharakteryzowania odporności stopu Inconel 718 na proces pęknięcia obliczono parametr R_F wg równania (1). Wartość parametru R_F wyniosła 0,051 i była większa niż dla stopu Inconel 625 (0,035). W przypadku badanego stopu różnica temperatur NST-NDT wynosi ok. 60°C , zatem trzeba się liczyć z możliwością inicjowania pęknięć w procesie spawania [7].

Temperatura odzysku plastyczności DRT określana jest umownie jako temperatura, przy której badany materiał wykazuje przewężenie 5%. W przypadku przeprowadzonych badań dla stopu Inconel 718 wynosi ona ok. $1065 \div 1070^\circ\text{C}$ (rys. 8) i jest o blisko 100°C niższa niż w stopie Inconel 625 (rys. 5).

W przypadku stopu Inconel 625 zakres temperatur kruchości BTR wynosi $99 \div 118^\circ\text{C}$, dla stopu Inconel 718 zaś ok. 180°C , co może wskazywać na większą podatność tego stopu do pęknięcia likwacyjnego.

Temperatura odzysku wytrzymałości SRT określana jest jako temperatura, przy której materiał poddany rozciąganiu wykazuje maksymalne naprężenie zrywające ok. 0,5 MPa. W przypadku przeprowadzonych badań dla stopu Inconel 625 odpowiada to temperaturze ok. 1320°C (rys. 6). Wartość temperatury w środku próbki wynosiła zatem 1351°C . Oznacza to, że materiał znajduje się jeszcze w stanie dwufazowym (ciało stałe – ciecz). Podobnie jest w przypadku stopu Inconel 718, dla którego SRT wynosi ok. $1320 \div 1325^\circ\text{C}$ (rys. 9).

5. WNIOSKI

Przeprowadzone w Instytucie Metalurgii Żelaza prace obejmowały opracowanie szczegółowego programu doświadczeń, przygotowanie stanowiska badawczego oraz metodyki pod kątem badań stopów Inconel 625 i Inconel 718. Przeprowadzono obliczenia wybranych właściwości termofizycznych (ciepło właściwe, gęstość, entalpia, zakres temperatur krzepnięcia, lepkość) w funkcji temperatury, a także wykonano doświadczenia wstępne, pozwalające ocenić wielkość różnicy temperatury pomiędzy środkiem a powierzchnią próbki, a także wartość siły oporu poruszającego się układu mechanicznego symulatora Gleeble bez założonej próbki. Ostatecznie wyznaczono wysokotemperaturowe charakterystyki (NST, NDT, DRT, SRT i BTR) badanych materiałów w warunkach faza stała-ciecz podczas nagrzewania i chłodzenia. W celu scharakteryzowania odporności badanych materiałów na proces pęknięcia obliczono parametr R_F .

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono:

1. Wartość różnicy temperatury pomiędzy powierzchnią a rdzeniem próbki w wykonanych doświadczeniach wynosiła ok. 30°C .
2. Wielkość siły oporu poruszającego się układu mechanicznego wynosiła ok. 60N.
3. Wartość temperatury zerowej wytrzymałości (NST) dla stopu Inconel 625 wyniosła $1258 \pm 9^\circ\text{C}$, a dla stopu Inconel 718 $1245 \pm 6^\circ\text{C}$.

4. Prognozowana wartość temperatury NDT stopu Inconel 625 wynosiła ok. 1216°C. Dla stopu Inconel 718 jej wartość wyniosła 1185°C.
5. Wartość parametru R_F charakteryzującego odporność stopu Inconel 625 na proces pęknięcia wyniosła 0,035, a dla stopu Inconel 718 osiągnęła wartość 0,051. Przy czym zakres temperatur NST-NDT dla tego stopu Inconel 625 wynosił 43°C, a dla stopu Inconel 718 wyniósł 60°C.
6. Temperatura odzysku plastyczności DRT stopu Inconel 625 wynosiła 1145÷1150°C (przy prędkości 1mm/s) lub 1175÷1180°C (przy prędkości 20 mm/s), a dla stopu Inconel 718 mieściła się w zakresie temperatur 1165÷1170°C.
7. Zakres temperatur kruchości, w przypadku stopu Inconel 625, określane jako BTR, wynosi ok. 108÷113°C (przy prędkości 1 mm/s) lub 73÷78°C (przy prędkości 20 mm/s), a dla stopu Inconel 718 wynosi 175÷180°C.
8. Temperatura odzysku wytrzymałości SRT stopu Inconel 625 wynosi 1320°C, dla stopu Inconel 718 była zbliżona i mieściła się w przedziale temperatur 1320÷1325°C.

Projekt pt.: „Opracowanie i wdrożenie komputerowego systemu wspomagania procesów spawania w konstrukcjach lotniczych”, realizowany w ramach przedsięwzięcia „INITECH”, umowa nr ZPB/33/63903/IT2/10, dofinansowany przez NCBiR.

LITERATURA

1. Metzler D.A.: A Gleeble®-based method for ranking the strain-age cracking susceptibility of Ni-based superalloys. *Welding Journal*, Vol. 87 October 2008, p. 249-256.
2. Dul I.: Zastosowanie i przetwarzanie stopów niklu w przemyśle lotniczym. *Przegląd Spawalnictwa* nr 7-8/2009, s.67-73.
3. Telejko I., Kruchość staliwa w zakresie stanu stało-ciepłego, seria Monografie 1/2004, Wyd. Akapit, Kraków 2004
4. Telejko I., Adrian H., Guzik B., High temperature brittleness of cast alloys, *Archives of Metallurgy and Materials*, 2013, 58, 83-87.
5. GLEEBLE® 3500/3800 Operation Manual 2/97 N307, 1995-1997 Dynamic Systems Inc.
6. GLEEBLE® 3500/3800 Options Reference Manual 2/98 N320, 1996-1998 Dynamic Systems Inc.
Chapters (rozdziały):
9510 Low Force
35525 HAZ for Windows
35530 CCT for Windows
39100 Scanning Laser Dilatometer
7. GLEEBLE SYSTEMS AND APPLICATIONS Digital Control Gleeble Systems Training School, December 1998, Dynamic Systems for Materials Research.
8. APN006 Application of Gleeble Systems in Semi-Solid Processing APN Simulation. Nota aplikacyjna DSI Inc.
9. Zalecki W., Kuziak R., Łapczyński Z.: Badania wpływu parametrów krzepnięcia na wysokotemperaturową plastyczność stali konstrukcyjnych. Zad. 1: Opracowanie metodyki badań, selekcja materiału i przygotowanie próbek do badań. Sprawozdanie IMŻ Nr S-00311/1/BM, maj 2000. Praca niepublikowana.
10. Zalecki W., Kuziak R., Łapczyński Z.: Badania wpływu parametrów krzepnięcia na wysokotemperaturową plastyczność stali konstrukcyjnych. Zad. 2: Przeprowadzenie testów symulujących proces ciągłego odlewania w powiązaniu z określeniem parametrów charakteryzujących skłonność stali do pęknięcia. Sprawozdanie IMŻ Nr S-00311/2/BM, listopad 2000. Praca niepublikowana.
11. Zalecki W., Kuziak R., Łapczyński Z.: Badania wpływu parametrów krzepnięcia na wysokotemperaturową plastyczność stali konstrukcyjnych. Zad. 3: Opracowanie map procesu ciągłego odlewania stali doświadczalnej. Sprawozdanie IMŻ Nr S-00311/3/BM, grudzień 2000. Praca niepublikowana.
12. Zalecki W., Kuziak R., Łapczyński Z.: Opanowanie metod symulacji fizycznej procesów metalurgicznych za pomocą systemu Gleeble. Zad. 2: Opanowanie metod symulacji fizycznej procesu odlewania stali, w tym badania wpływu parametrów technologicznych na wysokotemperaturową plastyczność stali wytwarzanej w procesie COS. Sprawozdanie IMŻ Nr S-00312/2/BM, październik 2000. Praca niepublikowana.
13. Inconel Alloy 625 LCF – WWW.bibusmetals.com.pl.
14. Zalecki W., Łapczyński Z., Głowacki M.: „Wykonanie fizycznych symulacji cykli cieplnych spawania dla weryfikacji modeli komputerowych”. Cz. 1. Sprawozdanie IMŻ nr PI-0002-04. Grudzień 2010.
15. Inconel 718 – Composition, Properties and Applications of Inconel 718 Nickel-Chromium Alloy by Alloy Wire International (dane z Internetu).