

Projekt kluczowy Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

Opracowanie technologii przetapiania stopów niklu z zastosowaniem modyfikowania nanocząstkami proszków

Politechnika Śląska, Politechnika Warszawska, Politechnika Rzeszowska

Analiza możliwości i wybór żarowytrzymałych stopów na osnowie niklu do przetapiania odzyskowego

Żarowytrzymałe stopy niklu są podstawowym materiałem stosowanym na odlewy elementów części silników lotniczych i to zarówno na części statycznych jak i obrotowych elementów kierujących, pracujących w podwyższonej temperaturze pod działaniem sił masowych. Od odlewów tych wymaga się m. in. wysokiej odporności zmęczeniowej, odporności na pękanie w wysokiej temperaturze i odporności na korozję w środowisku zawierającym produkty spalania paliw. Podstawową grupę odlewów spełniających te wymagania jakościowe stanowią części zapewnienia bezpieczeństwa w locie, w tym dyski turbin, łopatki sprężarki, łopatki turbin wysokiego ciśnienia i inne. Odlewy te podlegają specjalnym procedurom, regulującym procesy produkcyjne oraz procesy i operacje kontrolne jakości wg wymagań poszczególnych producentów sprzętu lotniczego, takich jak: United Technologies Corporation, General Electric, Hispano Suiza, Fiat Avio i innych; wymagania te nie zawierają jednak szczegółowych informacji odnośnie do technologii wykonywania odlewów, które te wymagania mają spełniać. Aktualnie odlewy precyzyjne na części silników lotniczych wykonuje z nowoczesnych gatunków stopów niklu i kobaltu takich jak: IN-100, IN-713C, REN-77, MAR-M247, MAR M 509 itp. Są to stopy utwardzane wydzieleniowo, które podczas krzepnięcia wykształcają specyficzną mikrostrukturę, składającą się z ziaren równoosiowych, zamrożonych oraz słupkowych; taka struktura stopu może być przyczyną powstawania i propagacji pęknięć a tym samym przyczyną groźnych awarii silników samolotowych.. W literaturze światowej można spotkać bardzo wiele informacji na temat uszlachetniania mikrostruktury nadstopów niklu metoda rafinacji i modyfikowania inokulantami nanocząstkowymi.

Stopy niklu będące tematem projektu nie są jak dotąd wytwarzane w Polsce; nie prowadzi się również uszlachetniających przetopów odzyskowych. **Szczególne istotnym problemem jest zagospodarowanie odpadów poprodukcyjnych (braki, elementy układów wlewowych itp.).** Ponowne użycie stopów wymaga uzupełnienia niektórych dodatków (zwłaszcza śladowych) oraz zabiegu modyfikowania, w celu uszlachetnienia stopu.

Krajowy przemysł bazuje na imporcie, a wyroby ze stopów niklu odlewa się tylko w kilku odlewniach. Głównym problemem jaki wiąże się z tematyką projektu jest opracowanie technologii modyfikacji stopów niklu w wyniku wprowadzenia do nich w czasie topienia modyfikatorów którymi mogą być między innymi nanocząstki azotków, węglików i tlenków (np. tytany, wolframu, hafnu itp.).

Wymagana wielkość cząstek (od kilku do kilkudziesięciu nanometrów, mogących pełnić rolę w stopie zarodków krystalizacji, jak i stanowić cząstki umacniające) jest trudna do wprowadzenia bezpośrednio do stopu (metody ex situ). Głównym kierunkiem poszukiwań jest opracowanie metody wytwarzania w stopie nanocząstek (metody „in situ”). W tym przypadku konieczne jest wykorzystanie reakcji aluminotermicznej w ciekłym stopie Ni. Badania nad opracowaniem takiego wariantu modyfikacji stopu niklu rozpoczęto w Polsce.

Na podstawie danych WSK - PZL Rzeszów dokonano analizy asortymentu najczęściej odlewanych nadstopów niklu i kobaltu. Ostatecznie do badań w ramach zadania badawczego wytypowano następujące stopy: **IN-713C, IN-100 i MAR-247.**

Kryterium oceny wyników prowadzonych przetopów będą analizy wlewków wyjściowych (master heat), karty technologiczne wytopów prowadzonych w WSK Rzeszów, analizy składu chemicznego wytopów odzyskowych, badania makro- i mikrostruktury wybranych odlewów (łopatek) oraz próbek z przetopów odzyskowych (po modyfikowaniu), wykresy analizy termicznej, właściwości mechaniczne (Rm, A5 i twardość)

W celu określenia kryteriów oceny przetapianych stopów przeprowadzono wstępne badania analizy krzepnięcia stopów wyjściowych, na próbkach pobranych z wlewków „master heat”. Opis zastosowanej w tym celu metody ATD przedstawiono poniżej.

Ocena wyników analizy składu chemicznego na podstawie dokumentacji dla wybranej partii odlewów i braków

Zrealizowano:

- wybór asortymentu odlewanych elementów,
- wstępna analiza losowo wybranych zestawów dokumentacji technologicznej topienia stopu IN-713C i odlewania topatek (porównano składy chemiczne „master heat” oraz składy uzyskane na konkretnych odlewach).
- pobranie próbki i przeprowadzenie badań makro- i mikrostruktury stopów po przetopie,
- przeprowadzenie badań mikroanalizy rentgenowskiej wybranych mikroobszarów próbek;
- wskazano na rozbieżności pomiędzy wynikami analizy wlewków wsadowych „master heat”, a wynikami makro i mikroanalizy rentgenowskiej (głównie dla Co).

2. przygotowano zalecenia dla sposobu gromadzenia odpadów poprodukcyjnych (układy wlewowe i braki) wraz z z dokumentacją technologiczną topienia i odlewania:

- skład chemiczny: wlewków wsadowych, po roztopieniu, próbki z układu wlewowego, próbki pobrane z odlewów,
- czas topienia,
- maksymalna temperatura ciekłego stopu,
- temperatura odlewania,
- uzysk, uwzględniający ilość braków),

Stop: 713 C Data badania: 28.10.2008
Heat: 4V2863
Specyfikacja: PWA 655 U

WSK Rzeszów – zawartość, % mas.

C	Mn	Si	P	S	Cr	Co	Mo	W	Ti
0,09	0,003	0,005	-	0,007	13,32	0,21	4,29	-	0,84

Al	Ta	Hf	B	Zr	Fe	Cu	Nb-Ta	Ni
5,77	0,005	-	0,011	0,08	0,04	<0,001	2,16	73,5

Cannon-Muskegon Corp. – zawartość, % mas.

C	Mn	Si	P	S	Cr	Co	Mo	W	Ti
0,103	0,003	0,01	0,004	0,002	13,48	<0,25	4,20	<0,05	0,81

Al	Ta	Hf	B	Zr	Fe	Cu	Nb-Ta	Ni
6,13	<0,05	<0,05	0,01	0,08	0,039	<0,001	2,16	r

Właściwości wytrzymałościowe

Nr próbki	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A ₅ [%]	Z [%]	HRC	Ułamkow. (liczby)
1	780	875	6,5	N/D	35-36	N/D
2	N/D	N/D	N/D	N/D	35	N/D
3	N/D	N/D	N/D	N/D	36	N/D

Zarowytrzymałość

Nr próbki	T [°C]	σ [MPa]	ε [mm]	A ₅ [%]	Z [%]	Obciążenie [kg]
3	882	200	52,8	10,5	N/D	626,0

Stop: IN 100 Data badania: 28.10.2008
Heat: 4V2862
Specyfikacja: CPV 219 REV M

WSK Rzeszów – zawartość, % mas.

C	S	P	Si	Mn	Co	Cr	Mo	Ti	Al
0,17	0,002	0,003	0,005	0,01	13,34	0,50	3,21	4,70	5,42

Al-Ti	V	Fe	B	Zr	Bi	Pb	Ni	
10,13	0,82	0,03	0,02	0,03	0,30ppm	0,5ppm	2,49	r

Cannon-Muskegon Corp. – zawartość, % mas.

C	S	P	Si	Mn	Co	Cr	Mo	Ti	Al
0,164	0,002	0,014	0,02	<0,01	13,41	0,47	3,02	4,67	5,62

Al-Ti	V	Fe	B	Zr	Bi	Pb	Ni	
10,29	0,79	0,04	0,014	0,03	0,30ppm	0,5ppm	2,37	r

Właściwości wytrzymałościowe

Nr próbki	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A ₅ [%]	Z [%]	HRC	Ułamkow. (liczby)
1	780	875	6,5	N/D	35-36	N/D
2	N/D	N/D	N/D	N/D	35	N/D
3	N/D	N/D	N/D	N/D	36	N/D

Zarowytrzymałość

Nr próbki	T [°C]	σ [MPa]	ε [mm]	A ₅ [%]	Z [%]	Obciążenie [kg]
3	882	200	52,8	10,5	N/D	626,0

Próba pelzania

Nr próbki	d [mm]	l [mm]	T [°C]	σ [MPa]	l ₀ [mm]	l [mm]	T ₀ [N]	T ₁ [N]	Obciążenie [kg]
2	6,245	25,0	760	702,4	0,0099	44,2	1,0636	4,25	2194,0

Stop: MAR-247 Data badania: 15.10.2008
Heat: 4V2810
Specyfikacja: PWA 1447 K

WSK Rzeszów – zawartość, % mas.

C	Mn	Si	P	S	Cr	Co	Mo	W	Ti
0,15	0,001	-	0,003	-	8,44	9,86	0,64	10,11	1,03

Al	Ta	Hf	B	Zr	Fe	Cu	Nb	Ni
5,47	3,29	1,42	0,019	0,05	0,05	-	0,05	reszta

Cannon-Muskegon Corp. – zawartość, % mas.

C	Mn	Si	P	S	Cr	Co	Mo	W	Ti
0,148	0,001	0,01	0,004	0,002	8,35	1,01	0,65	10,02	1,00

Al	Ta	Hf	B	Zr	Fe	Cu	Nb	Ni
5,64	3,18	1,42	0,019	0,032	0,034	0,001	<0,05	reszta

Właściwości wytrzymałościowe – brak danych

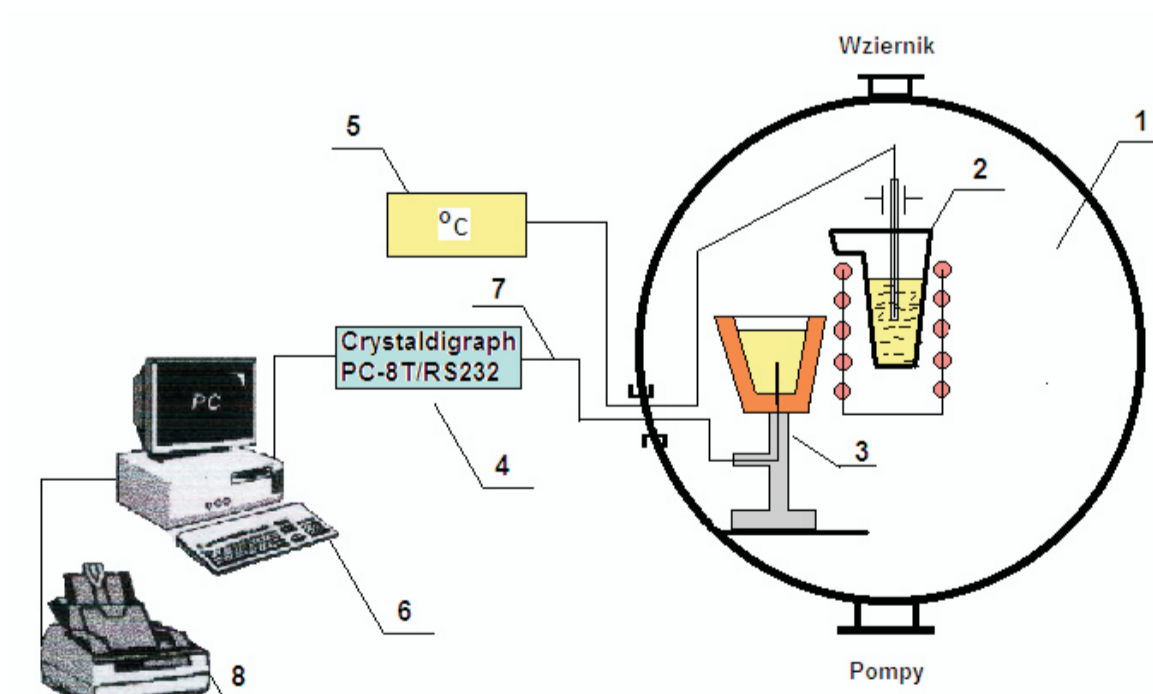
Zarowytrzymałość – brak danych

Próba pelzania

Nr próbki	T [°C]	σ [MPa]	Obciąż. plast. [mm]	Čas do zerw. [s]	Čalk. odksz. plast. [mm]	Čalk. odksz. plast. [%]	Obciążenie [kg]	A ₅ [%]	Čas 1% odksz. [s]
1	760	695,7	0,0056	154	1,185	4,74	2157,5		
2	882	200	0,0052	111	1,3554	5,42	627,5	7	88,2

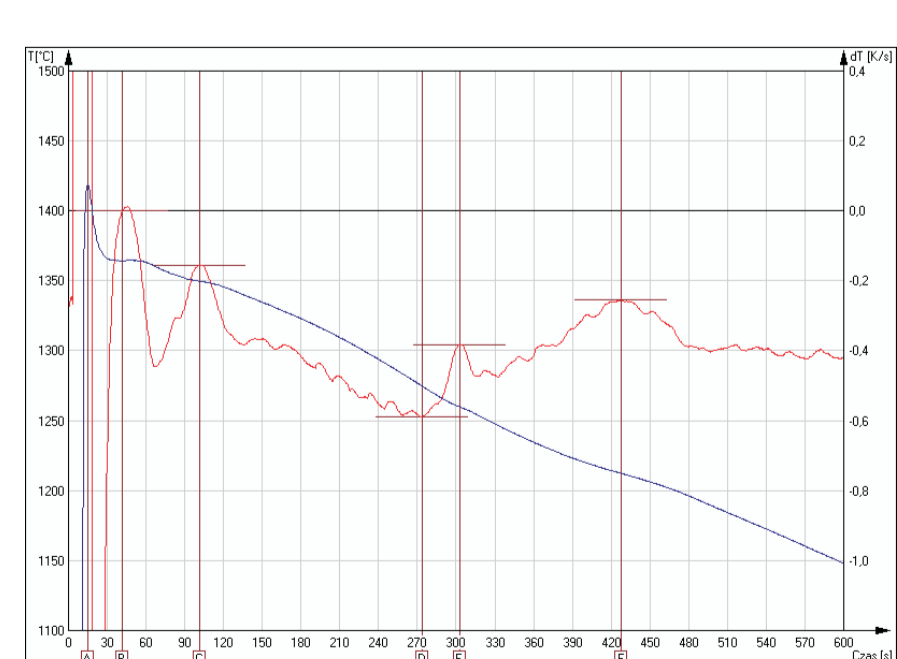
Ocena parametrów krzepnięcia wybranych stopów metodą analizy termicznej ATD dla wybranej partii materiałów

Wykres ATD dla stopu IN-713C

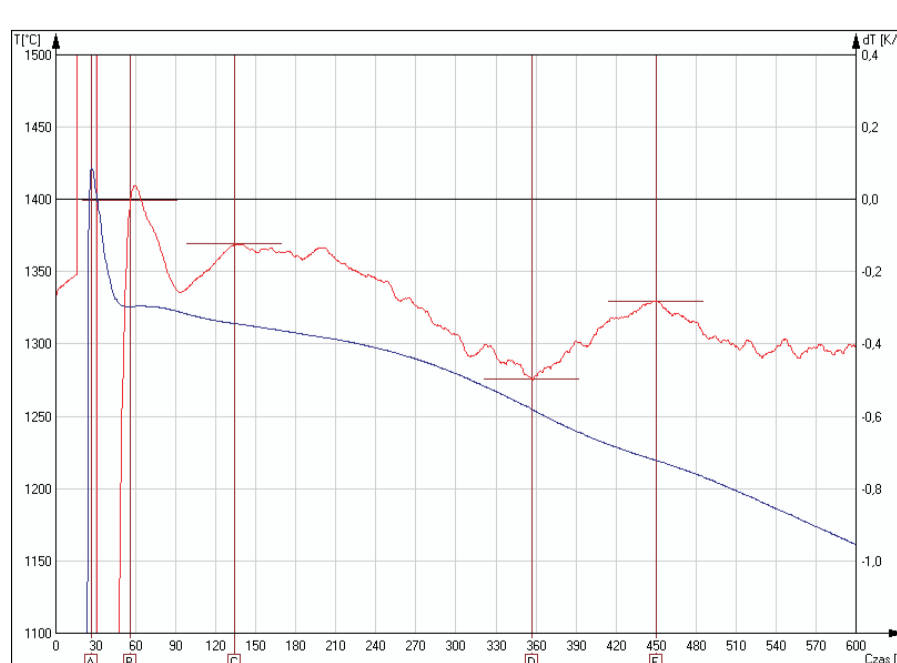


Schemat stanowiska badawczego: 1 – komora pieca VSG-02; 2 – tygiel i cewka indukcyjna; 3 – grafitowa forma odlewnicza; 4 – Aparat Crystallograph PC-8T; 5 – cyfrowy miernik temperatury; 6 – komputer PC; 7 – przewód kompensacyjny; 8 – drukarka

Wykres ATD dla stopu MAR-247



Wykres ATD dla stopu MAR-247



T _{max} [A]	19,0 [s]	1517,8 [°C]
T _{ik} [B]	65,5 [s]	1336,0 [°C]
T _{out} [C]	306,0 [s]	1304,9 [°C]
T _{sol} [D]	454,0 [s]	1247,8 [°C]
T _{pot} [E]	613,0 [s]	1164,7 [°C]

T _{max} [A]	15,0 [s]	1418,4 [°C]
T _{ik} [B]	42,0 [s]	1364,4 [°C]
T _{out} [C]	101,5 [s]	1349,8 [°C]
T _{sol} [D]	274,0 [s]	1274,6 [°C]
T _{pot} [E]	303,0 [s]	1259,8 [°C]

T _{max} [A]	27,0 [s]	1422,0 [°C]
T _{ik} [B]	56,0 [s]	1326,0 [°C]
T _{out} [C]	134,0 [s]	1314,1 [°C]
T _{sol} [D]	357,0 [s]	1254,6 [°C]
T _{pot} [E]	451,0 [s]	1219,4 [°C]

Wnioski

1. Opracowano stanowisko do termicznej analizy ATD krystalizacji i krzepnięcia stopów niklu i kobaltu.

2. Przeprowadzono kilkanaście analiz ATD stopów IN-713C, MAR-247 i IN-100. Wlewków do badań zakupiono w WSK Rzeszów.

3. Analiza wykresów ATD wskazuje na wydzielanie się eutektyki węglkowej (zwłaszcza w stopach MAR-247 i IN-100) oraz na zależność temperatury T_{ik} od zawartości głównych składników badanych stopów.

4. Wskazano na możliwość opracowania zależności empirycznej pomiędzy temperaturą T_{ik} a zawartością głównych składników badanych stopów. Dotyczy to zwłaszcza stopów IN-713C i IN-100. Temperatura T_{ik} dla stopu MAR-257 jest wyższa o około 20 do 30°C (w porównaniu do IN-713C), co jest wynikiem obecności w stopie około 10% W i 3,1% Ta. Z kolei najniższa temperatura T_{ik} dla stopu IN-100 jest wynikiem niższej, w stosunku do pozostałych stopów, zawartości Cr, Mo i Ti oraz większej zawartości Al.

• początek krzywej dT/dt będzie podstawą analizy (oceny) procesu zarodkowania stopu. Może być tym samym etapem interpretacji zabiegu modyfikacji stopu.

• zakres „średniowy” krzywej dT/dt stanowi podstawę do analizy ilościowej ciepła krzepnięcia, co daje możliwość wyznaczenia składu strukturalnego. To z kolei umożliwia prognozę własności mechanicznych analizowanego stopu.



• koniec krzywej dT/dt, będzie źródłem informacji na temat „czystości” stopu. Obecność w stopie gazów i zanieczyszczeń prowadzi zwykle do utworzenia niskotopliwych eutektyk, co znacznie wydłuża końcowy etap krzepnięcia i obniża wartość prędkości spadku temperatury. Zmienia się również nachylenie słycznej do przebiegu pochodnej, w zależności od stopnia zanieczyszczenia, i tak: gdy nachylenie to rośnie, można wnioskować o powiększaniu się czystości stopu.