

## **Prof. dr hab. inż. Józef Błachnio**

Air Force Institute of Technology  
6 Księcia Bolesława str., 01-494 Warszawa, Poland  
E-mail: jozef.blachnio@itwl.pl

## **Dr inż. Mariusz Bogdan**

Department of Mechanical Engineering  
Białystok Technical University  
45 Wiejska str., 15-333 Białystok, Poland  
E-mail: m.bogdan@pb.edu.pl

## **Dr inż. Dariusz Zasada**

Military University of Technology  
2 Kaliskiego str., 00-908 Warszawa, Poland  
E-mail: dzasada@wat.edu.pl

# **Wpływ podwyższonej temperatury na trwałość łopatek turbiny gazowej**

**Słowa kluczowe:** turbina gazowa, łopaska, mikrostruktura, trwałość

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań mikrostruktury łopatek wirnika turbiny wykonanych z nadstopów na bazie niklu. Celem badań było określenie skutków oddziaływania wysokiej temperatury na stabilność mikrostruktury materiału łopatek. Stopień zaawansowania zmian mikrostruktury nadstopu po oddziaływaniu wysokiej temperatury porównywano ze stanem mikrostruktury łopatek nowych. Materiałem do badań były łopatki ze stopów typu EI 867 oraz ŻS 32. Badania mikrostruktury łopatek poddawanych oddziaływaniu wysokiej temperatury oraz łopatek po eksploatacji wykazały występowanie niekorzystnych zmian w stosunku do mikrostruktury łopatek nowych. Stwierdzono, że przyczyną niekorzystnych zmian w mikrostrukturze było przegrzanie nadstopu. Łopaska w takim stanie wykazuje niską żaroodporność oraz żarowytrzymałość. Element, w którym wystąpi przegrzanie jest narażony na uszkodzenie, co przeważnie pociąga za sobą wadliwą pracę turbiny. Tego typu uszkodzenia usuwa się w trakcie naprawy głównej silnika co wiąże się z ogromnymi kosztami.

## **1. Wprowadzenie**

Turbiny gazowe stosowane są w energetyce w silnikach trakcyjnych, morskich, lotniczych i technice kosmicznej. W trakcie eksploatacji podlegają zmiennym obciążeniom mechanicznym oraz cieplnym. Istotą niskocyklowych obciążeń jest łączne i jednoczesne destrukcyjne działanie zmiennych obciążeń mechanicznych i cieplnych o wysokich amplitudach. Tego rodzaju obciążeniom podlegają zwłaszcza łopatki wirujące. Ze wzrostem temperatury wytrzymałość materiałów łopatek maleje. W wyniku oddziaływania wysokiej temperatury i spalin o agresywnym oddziaływaniu chemicznym, stan techniczny łopatek ulega niekorzystnym zmianom. Dochodzi do przegrzania materiału, jego pęcznienia jak również zmęczenia cieplnego [4, 17, 18, 22]. W konsekwencji prowadzi to do utraty żaroodporności i żarowytrzymałości materiału łopatek.

Sprawność turbiny kształtująca się na poziomie 30-45%, zmniejszająca się w procesie eksploatacji, zależy w sposób istotny od temperatury spalin. Jednak podwyższanie

temperatury spalin jest ograniczone właściwościami stosowanych materiałów: ich odpornością na pełzanie, zmianą mikrostruktury (przegrzanie), zmęczeniem cieplnym, korozją wysokotemperaturową i in. [5, 20].

Najbardziej zawodnymi elementami turbiny gazowej są łopatki wirnika [4, 17]. Podczas pracy podlegają one obciążeniom zmiennym: mechanicznym wskutek wirowania, aerodynamicznym i cieplnym od opływu czynnika roboczego. Ponadto oddziałują na nie chemicznie agresywnie spaliny o wysokiej temperaturze. Niezawodność i trwałość eksploatacyjna łopatek jest sumą wielu czynników, w których dominujące znaczenie odgrywa materiał z jakiego są wykonane. Wysokie i stabilne właściwości wytrzymałościowe nadstopów w ujęciu strukturalnym to odpowiednia mikrostruktura nie ulegająca osłabiającym zmianom w eksploatacji [2, 6, 16].

Szczególnie wysokie wymagania stawiane są materiałom stosowanym na łopatki turbin. Postęp w dziedzinie rozwoju nadstopów oraz technologii wytwarzania łopatek doprowadziły do podwyższenia temperatury pracy łopatek prawie do 1350K [8]. Udoskonalone nadstopy na łopatki turbiny zostały osiągnięte w wyniku rozwoju stopów na bazie niklu i kobaltu. Ponadto w celu zwiększenia właściwości mechanicznych, dodaje się chrom, tytan, molibden, wanad, wolfram, niob, tantal i inne pierwiastki [1, 7, 10, 11]. Podstawowym składnikiem nadstopu jest faza  $\gamma$  czyli roztwór stały Ni o strukturze regularnej ściennie centrowanej. W skład tej fazy mogą wchodzić głównie pierwiastki Co, Cr, Mo, W oraz Re, które umacniają ją roztworowo.

Ze względu na metody wytwarzania łopatek nadstopy dzieli się na przerabiane plastycznie i odlewnicze. W nadstopach łopatek przerabianych plastycznie ułamek objętości umacniającej fazą  $\gamma'$  wynosi od 20 do 45%. Łopatki wykonane z tych nadstopów mogą pracować do temperatury 1173K. Dalszy wzrost temperatury pracy łopatek do około 1273 K wymaga zwiększenia ułamka objętości fazy  $\gamma'$  w stopie. Można to uzyskać poprzez modyfikację składu chemicznego, jak również przez zmianę technologii wytwarzania np. w wyniku wprowadzenia nadstopów odlewniczych. W nadstopach odlewniczych ułamek objętości fazą  $\gamma'$  wynosi około 60%. W celu podwyższenia temperatury pracy łopatek ponad 1373K stosuje się krystalizację kierunkową [16, 18, 19]. Umożliwia to wzrost odporności nadstopu na pełzanie. Dalszy rozwój nadstopów był związany z wyeliminowaniem granic ziaren - nadstopy monokrystaliczne, tj. takie zbudowane są z pojedynczego kryształu o jednolitej budowie wewnętrznej w całej objętości łopatki. Stosowanie tych technologii wytwarzania łopatek turbin umożliwiło uzyskanie 5-krotnego zwiększenia wytrzymałości zmęczeniowej oraz 10-krotne zwiększenie trwałości w wysokiej temperaturze w porównaniu z łopatkami wykonanymi z nadstopów polikrystalicznych [8].

Ponadto na łopatki turbin gazowych stosuje się powłoki żaroodporne o dobrej przewodności cieplnej i wysokiej stabilności struktury. Właściwości cieplne powłok przede wszystkim zależą od składu chemicznego materiału i mikrostruktury [3, 4]. Stosowane są różne typy pokryć ochronnych otrzymywane wieloma metodami. Największe zastosowanie znalazły pokrycia dyfuzyjne na osnowie aluminidków oraz ich odmiany zwane pokryciami modyfikowanymi [9, 14, 21]. Powłoki te składają się z warstwy podkładowej i warstwy izolującej. Powinny one charakteryzować się bardzo niskim przewodnictwem cieplnym.

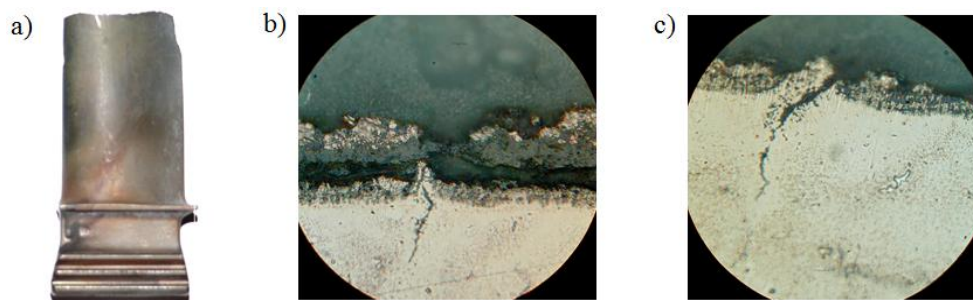
Dalszym krokiem, mającym na celu podwyższenie temperatury spalin i obniżenie temperatury łopatek, jest ich chłodzenie wewnętrzne powietrzem pobieranym z za sprężarki silnika. Pozwala to na obniżenie temperatury materiału łopatki w stosunku do temperatury opływającego je strumienia spalin nawet o ponad 600K [21, 22]. Ponadto uzyskuje się korzystniejszy rozkład temperatury łopatki w stanach przejściowych pracy turbiny.

Dodatkowo w celu zwiększenia wytrzymałości projektuje się złożone kształty geometryczne łopatek. Kształtowane są one tak, aby nie powstał rezonans drgań, podczas zaburzeń pracy silnika [6]. Stosuje się także półki na końcach lub w pobliżu końców piór,

stanowiące tłumiki eliminujące niebezpieczną postać i częstotliwość drgań oraz zwiększające szczelność w luzie wierzchołkowym wirnika turbiny. Minimalny luz zabezpiecza straty czynnika roboczego.

Pomimo stosowania wielu przedsięwzięć w celu poprawy efektywności pracy turbiny gazowej jej trwałości i niezawodności, to jednak w procesie długotrwałej eksploatacji występują różnego rodzaju uszkodzenia elementów turbin, zwłaszcza ich łopatek (Rys. 1, Rys. 2). Wyróżnia się uszkodzenia będące następstwem wad materiałowych, technologicznych, odstępstwa od jakości produkcji i napraw. Ważnymi przyczynami mogą też być nieodpowiednie rozpylanie paliwa w komorze spalania jak również jego pogorszone właściwości fizyko-chemiczne [5, 15].

Najczęstszymi przypadkami uszkodzeń są przegrzania piór łopatek (Rys. 1a, 2a). Prowadzi to nieraz do urwania końca pióra (Rys. 1a). Proces destrukcji łopatki turbiny gazowej zwykle rozpoczyna się od niszczenia jej żaroodpornej powłoki (Rys. 1b c, 2b).



Rys. 1. Przykładowe postacie eksploatacyjnych uszkodzeń niechłodzonej łopatki turbiny wykonanej z nadstopu kutego typu EI 867: a) urwany wierzchołek wskutek przegrzania nadstopu; b) rozwarstwienie żaroodpornej powłoki oraz inicjacja pęknięcia nadstopu, x500; c) erozja żaroodpornej powłoki oraz pęknięcie penetrujące w głąb nadstopu, x500



Rys. 2. Przykładowe postacie uszkodzeń chłodzonych łopatek turbin wykonanych z odlewanego nadstopu typu ŻS 32: a) przegrzany materiał przy wierzchołku [2]; b) całkowite wypalenie powłoki na krawędzi natarcia aż do odsłonięcia nadstopu oraz pęknięcie na krawędzi natarcia [12]; c) przytarcie czoła pióra łopatki [12]

W efekcie tego materiał łopatki narażony jest na bezpośrednie cieplne i chemiczne oddziaływanie spalin. Taka sytuacja powoduje przede wszystkim przegrzanie materiału i powstawanie pęknięć pióra łopatki (Rys. 1c, 2b). Czynnikiem mającymi wpływ na to zjawisko są temperatura nadkrytyczna, czas jej oddziaływania oraz chemiczna agresywność spalin. Skutkiem oddziaływania wysokiej temperatury, dużych naprężeń rozciągających

pochodzących od wirowania i czasu występuję zjawisko rozszerzalności cieplnej materiału łopatki. Wpływa ono istotnie na zmniejszenie luzu wierzchołkowego wirnika turbiny. W konsekwencji prowadzi to do ocierania czoła łopatki o korpus turbiny (Rys. 2c), co powoduje dodatkowe nagrzewanie się materiału pióra i niekorzystne zmiany w mikrostrukturze nadstopu. Zmiany typowe dla procesu wysokotemperaturowego pełzania przy jednoosiowym stanie naprężeń, zwykle są obserwowane w łopatkach z półką.

## 2. Wpływ podwyższonej temperatury na degradację łopatek niechłodzonych z nadstopu typu EI 867

W eksploatacji turbiny gazowej występują często przypadki krótkotrwałego nagrzewania materiału łopatek powyżej ich normalnej temperatury eksploatacji. Ważne jest zatem zachowanie żarowytrzymałości i żaroodporności stopu na podwyższonej temperaturę w wymaganym czasie pracy łopatki. Żarowytrzymałość stopów przeznaczonych na łopatki turbin gazowych ma związek z umacniającą fazą  $\gamma'$ . Pod wpływem oddziaływania czynnika roboczego o wysokiej temperaturze ulega ona koagulacji i rozpuszczaniu w osnowie. W celu określenia wpływu podwyższonej temperatury na degradację nadstopu łopatek kutych przeprowadzono badania eksperymentalne. Do badań przyjęto nowe łopatki wirnika turbiny gazowej wykonane ze stopu EI-867 WD (HN62MVKJu) - łopatki nie chłodzone. Pióra łopatek podzielono na cztery równe próbki, które do badań wybierano losowo i wygrzewano (po trzy) w pięciu wartościach temperatury co 100 K, począwszy od temperatury 1023 K. Wygrzewanie oraz studzenie próbek odbywało się w piecu próżniowym (pojedynczo) – brak ingerencji ośrodka na powierzchnie łopatek.

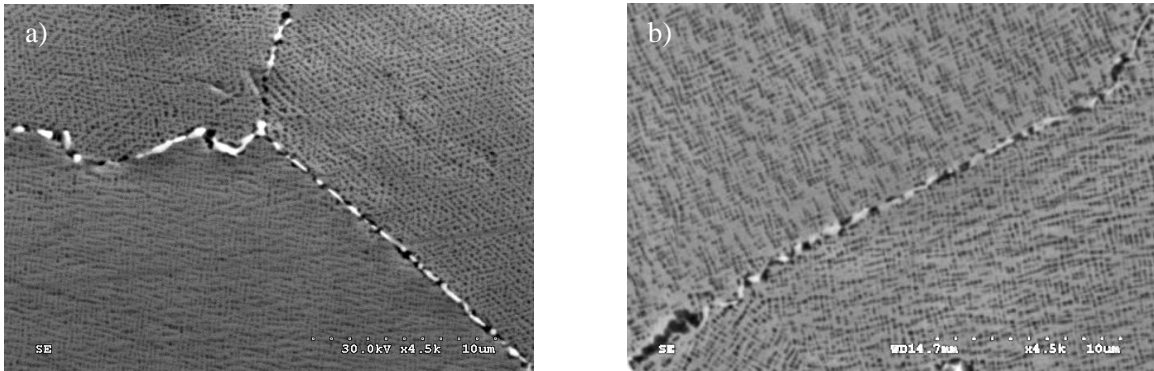
Stop EI-867 WD należy do nielicznej grupy superstopów niklu nie zawierających tytanu. Jest on nadstopem o mniejszej zawartości chromu, przez co jest wrażliwy na działanie korozji [4, 16, 20]. Z tego względu stosuje się pokrycia ochronne – powłoki aluminiowe. Norma TU 14-1-232-72 zawiera wymagania dotyczące składu chemicznego superstopu (tabela 1), obróbki cieplnej oraz właściwości mechanicznych.

Tabela 1. Zestawienie podstawowego składu chemiczny stopu EI-867 WD (% masy)

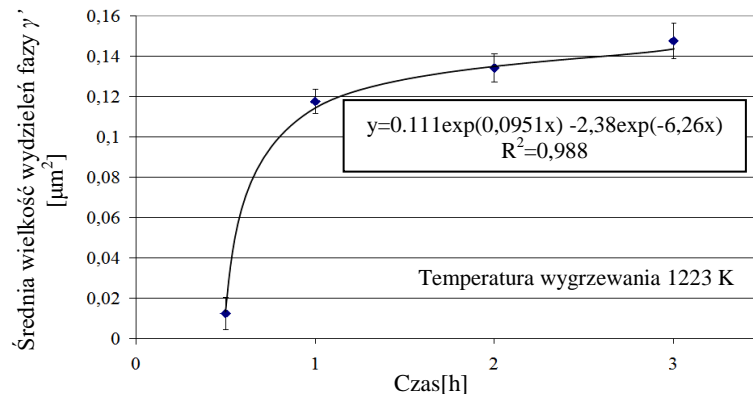
C	Mo	Si	Cr	Ni	Co	Mo	W	Al	B	Fe
max	max	max		reszta					max	
0,1	0,3	0,6	9,0		14	10,3	5,0	4,5	0,02	4,0

Struktura stopu jest typowa dla superstopów niklu i złożona jest z: fazy  $\gamma$ , fazy  $\gamma'$  oraz węglików i borków. Faza  $\gamma'$  jest roztworem stałym aluminium, tub tytanu w niklu. Cząsteczki fazy  $\gamma'$  ( $\text{Ni}_3\text{Al}$ ,  $\text{Ni}_3\text{Ti}$ ) i mają kształt sześcienny [13, 16, 18]. Objętość względna fazy  $\gamma'$  po standardowej obróbce cieplnej stopu wynosi 31÷34%. Obróbka cieplna obejmuje przesycanie i starzenie. Chłodzenie w powietrzu w czasie przesycania prowadzi do wydzielenia drobnych cząsteczek fazy  $\gamma'$ , których objętość względna wynosi około 20%. Starzenie powoduje dalsze wydzielenie cząsteczek fazy  $\gamma'$  i rozrost wcześniej wydzielonych. Wśród węglików, których objętość względna w stopie nie przekracza 2%, dominuje węgiel  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ . Powstaje on podczas obróbki cieplnej lub wydziela się podczas eksploatacji, zwykle na granicach ziaren w zakresie temperatury 933K÷1253K. Wewnątrz ziaren występuje węgiel  $\text{M}_6\text{C}$  [4, 16]. Wartości temperatury wygrzania próbek wyciętych z łopatek związane są z zakresem temperatury, jaka występuje w trakcie normalnej oraz awaryjnej pracy łopatek wirnika w eksploatacji. Temperatura strumienia czynnika roboczego na wejściu do turbiny gazowej, ze względu na ograniczenia wynikające z cieplnych i chemicznych charakterystyk materiałów, użytych na niechłodzone łopatki turbiny, powinna mieścić się w przedziale 1173÷1223K [17, 20].

Wstępnym etapem badań metalograficznych była ocena struktury w celu określenia czasu trwania procesu wygrzewania fragmentów łopatek. Czas oraz temperatur wpływają na kinetykę rozrostu i koagulacji cząstek fazy  $\gamma'$ . Przeprowadzono eksperyment polegający na wygrzaniu próbek w temperaturze powyżej  $T_{max}$  (maksymalnej temperatury za turbiną tj. 1223 K przez 0,5h, 1h, 2h oraz 3h). Dzięki czemu uzyskano informację dotyczącą zmian strukturalnych zarówno powłoki, jak i materiału łopatek, zależnych od czasu wygrzewania – modyfikacja wielkości i rozmieszczenia dyspersyjnej fazy  $\gamma'$  (Rys. 3). Określono zmiany wielkości (powierzchni) wydzieli umacniającej fazy  $\gamma'$  w funkcji czasu wygrzewania (Rys. 4).



Rys. 3. Morfologia wydzieli fazy  $\gamma'$  - wygrzewanie w temperaturze 1223K przez: a) 0,5h; b) 1h (pow. x4500)

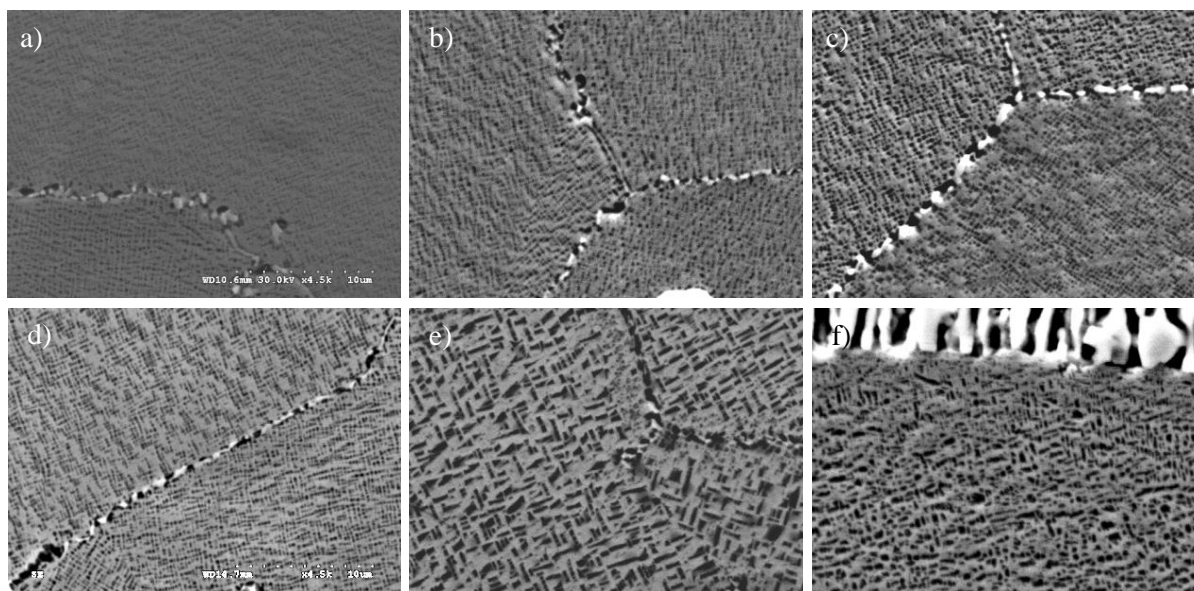


Rys. 4. Zmiany średniej wielkości cząstek fazy  $\gamma'$  w zależności od czasu wygrzewania próbek z łopatek w temperaturze 1223K

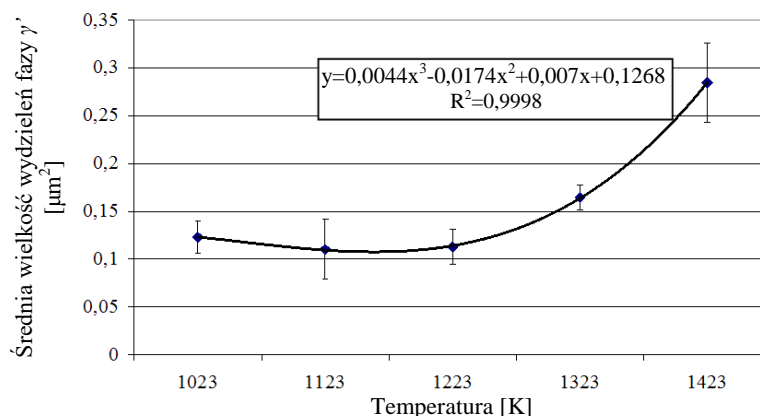
Na podstawie rysunku 4 przyjęto czas wygrzewania, który w badaniu oddziaływania wysokich temperatur na materiał łopatek wynosił 1h, dla stałej temperatury, tj. 1223K. W tym czasie następuje gwałtowny wzrost wielkości cząstek fazy  $\gamma'$  (dodatkowym argumentem przemawiającym za takim wyborem jest czas zadania lotniczego w warunkach eksploatacji dla przyjętego typu silnika odrzutowego, wynoszący także około 1h).

Dokonano analizy mikrostruktury nadstopu poddanego oddziaływaniu wysokiej temperatury, dzięki czemu uzyskano dokładną informację dotyczącą zmian. Zmiany mikrostruktury, głównie modyfikacja wielkości i rozmieszczenia dyspersyjnej fazy  $\gamma'$ , istotnie wpływają na właściwości wytrzymałościowe. Na rysunku 5a-f przedstawiono wyniki badania metalograficznego nadstopu bez wygrzewania oraz po wygrzewaniu przez okres 1h przy przyjęciu pięciu różnych wartości temperatury.

Obliczono zmiany zmianę wielkości cząstek fazy  $\gamma'$  w zależności od temperatury wygrzewania (Rys. 6). Stwierdzono, że już w temperaturze 1123 K powstaje początkowe stadium koagulacji wydzielen umacniającej się fazy  $\gamma'$ , która charakteryzuje się stosunkowo dużą regularnością oraz dużą liczbą wydzielen przypadającą na jednostkę powierzchni (Rys. 5b,c). W miarę wzrostu temperatury struktura fazy  $\gamma'$  staje się mniej regularna przy jednoczesnym wzroście wielkości ziarna (Rys. 6).



Rys. 5. Mikrostruktura warstwy podpowierzchniowej nadstopu EI – 867 WD: a) nadstop bez wygrzewania oraz nadstop wygrzewany przez 1h w temperaturze: b) 1023K; c) 1123K; d) 1223K; e) 1323K; f) 1423K (pow. x4500)



Rys. 6. Zmiany średniej wielkości cząstek fazy  $\gamma'$  w funkcji temperatury

Początkowe stadium łączenia się sześciennych wydzielen fazy  $\gamma'$  w płytce zachodzi przy temperaturze 1223 K (Rys. 5d). Przy temperaturze 1323 K stwierdzono znaczny już rozrost i koagulację wydzielen umacniającej fazy  $\gamma'$ , która przybiera kształt płytek (Rys. 5e). Mniejsza jest znacznie liczba wydzielen, jednak są one dużo większe niż te, które powstały w temperaturze 1223 K. Morfologia fazy  $\gamma'$  wskazuje, że po przekroczeniu temperatury 1223 K stop EI – 867 WD ulega przegrzaniu.

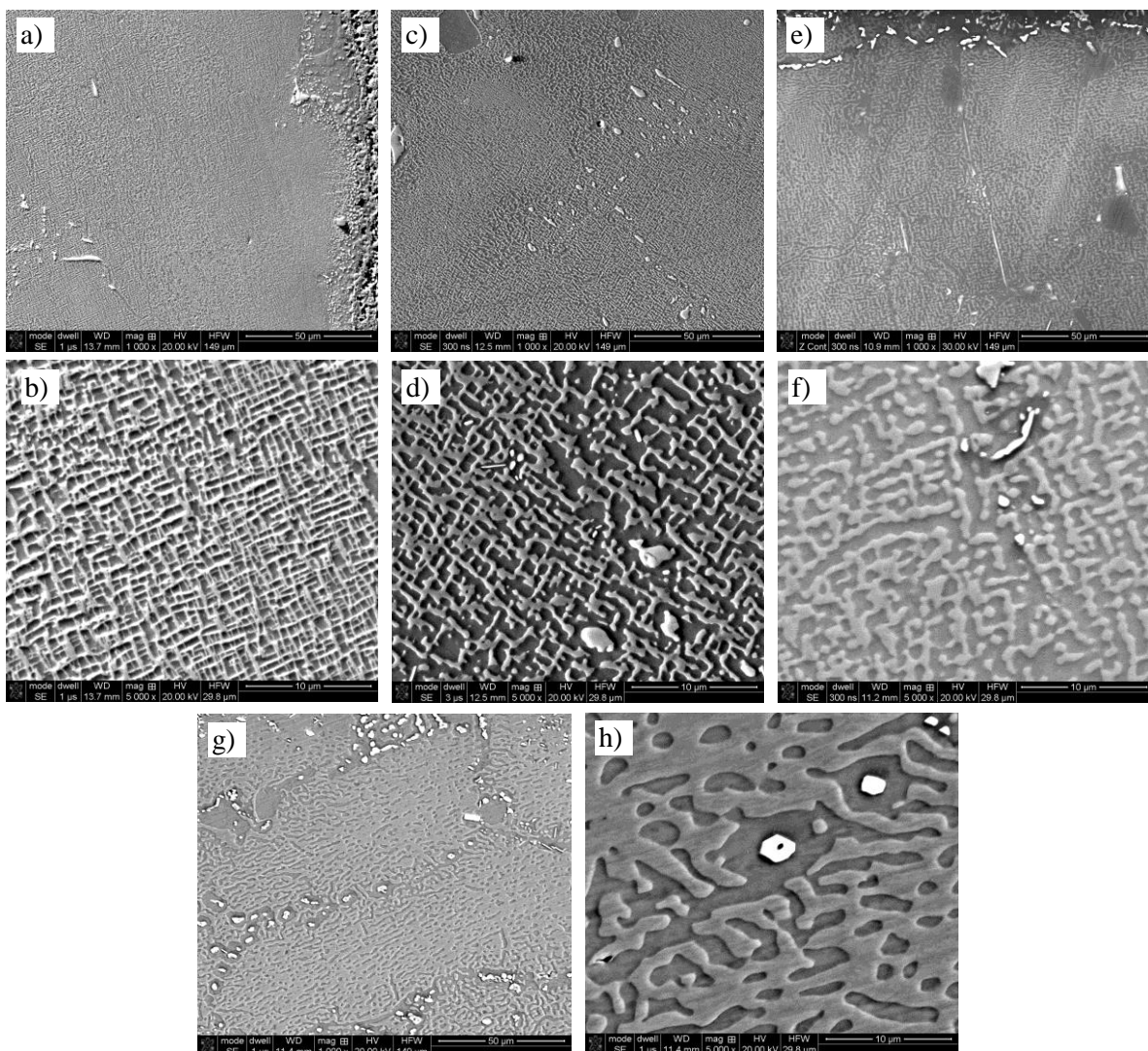
### 3. Wpływ podwyższonej temperatury pracy na degradację łopatek chłodzonych z nadstopu typu ŻS 32

Badaniami objęto łopatki odlewane z niklowo kobaltowego nadstopu typu ŻS 32. Zawartość podstawowych składników stopowych przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie podstawowego składu chemicznego nadstopu typu ŻS 32 (% masy)

Ni	Al	Cr	Co	Nb	Mo	Ta	W	Re
62,4	6,1	5,1	10,8	1,3	1,2	1,2	8,4	3,0

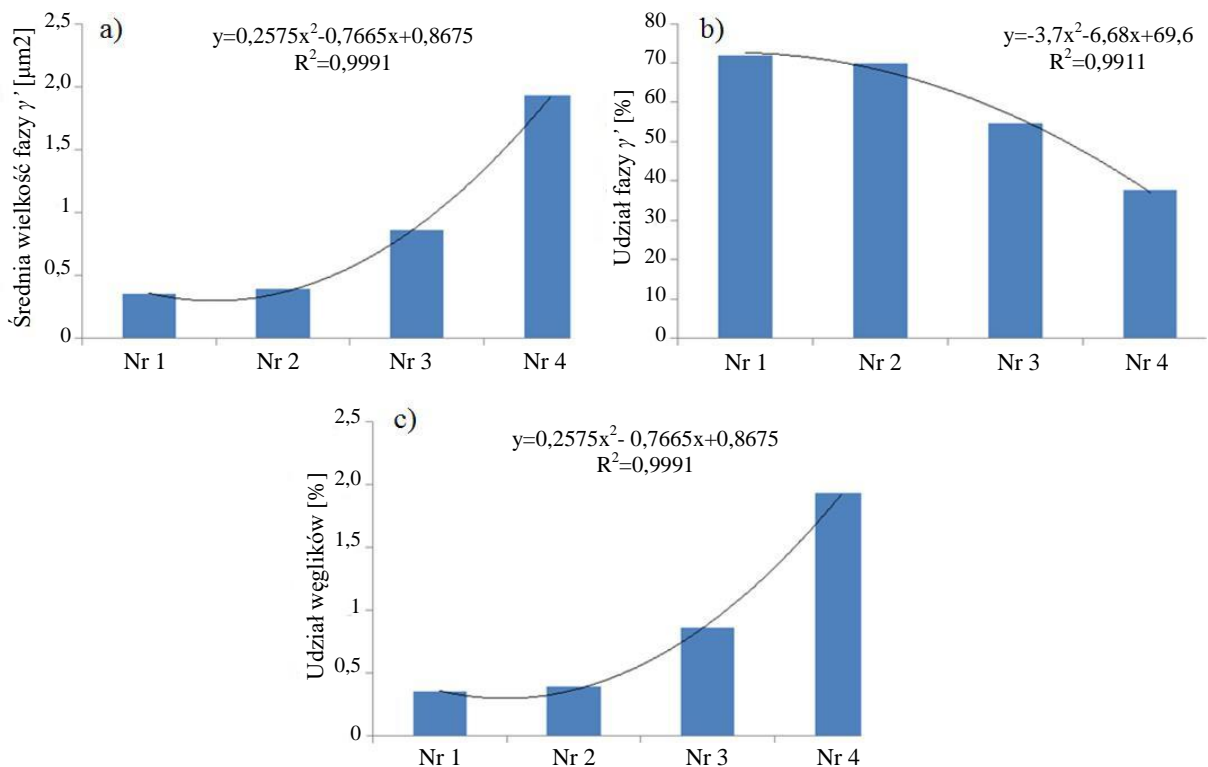
Do badań przyjęto łopatki wirnika turbiny nowe oraz po coraz dłuższym czasie eksploatacji. Łopatki zostały przedwcześnie wybudowane z turbiny z powodu ich przegrzania. W celu określenia wpływu podwyższonej temperatury w trakcie eksploatacji na degradację mikrostruktury nadstopu ŻS 32, przeprowadzono badania metalograficzne.



Rys. 7. Wpływ podwyższonej temperatury na zmiany morfologii w przekroju poprzecznym krawędzi natarcia: a, b) łopatka nowa Nr 1; c, d) łopatka po najkrótszym czasie eksploatacji Nr 2; e, f) łopatka po średnim czasie eksploatacji Nr 3; g, h) łopatka po najdłuższym czasie eksploatacji Nr 4

Na podstawie przeprowadzonych obserwacji strukturalnych wykonanych przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowy Quanta 3D FEG stwierdzono, bardzo wyraźny wpływ podwyższonej temperatury na degradację mikrostruktury analizowanych łopatek wykonanych z nadstopu typu ŻS 32. Mikrostruktura badanych łopatek składa się przede wszystkim z fazy  $\gamma$  i  $\gamma'$  oraz węglików. Stwierdzono, że wraz z podwyższeniem temperatury pracy oraz czasu eksploatacji następują wyraźne zmiany mikrostrukturalne (Rys. 7). Zaobserwowano między innymi znaczące zmiany morfologii fazy umacniającej  $\gamma'$ . W łopatie nowej cząsteczki fazy  $\gamma'$  ( $\text{Ni}_3\text{Al}$ ) mają kształt sześcienny (kubiczny). W wyniku oddziaływania podwyższonej temperatury następuje zmiana ich kształtu z kubicznego (Rys.7 a i b) do prostopadłościennego (Rys.7c-f) aby w najwyższej temperaturze przyjąć kształt owalny (Rys.7g i h).

Zaobserwowane zmiany związane są z rozrostem umacniającej fazy  $\gamma'$  oraz spadkiem jej udziału (Rys. 8a). W przypadku łopatki nowej średnia wielkość cząstek fazy  $\gamma'$  wynosi około  $0,3\mu\text{m}$ . W wyniku oddziaływania podwyższonej temperatury oraz czynników eksploatacyjnych wartość ta wzrasta do poziomu  $2\mu\text{m}$ . Odnotowana tendencja ma również znaczące przełożenie na zmiany udziału powierzchniowego opisywanej fazy umacniającej  $\gamma'$ . Zaobserwowano, że udział powierzchniowy fazy  $\gamma'$  zmniejsza się z poziomu 70% dla łopatki nowej do poziomu 35% dla łopatki eksploatowanej w najwyższej temperaturze (Rys. 8b). Zaobserwowane zmiany morfologiczne fazy umacniającej  $\gamma'$  w wyniku oddziaływania podwyższonej temperatury, są niewielkie natomiast występuje jej wpływ na udział powierzchniowy węglików (Rys. 8c).

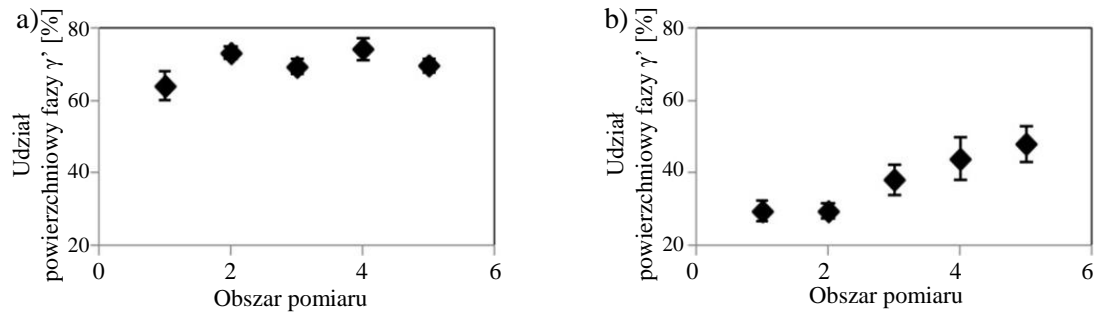


Rys. 8. Wpływ podwyższonej temperatury na zmiany: a) średniej wielkości fazy  $\gamma'$ , b) udziału powierzchniowego fazy  $\gamma'$ , c) udziału powierzchniowego węglików

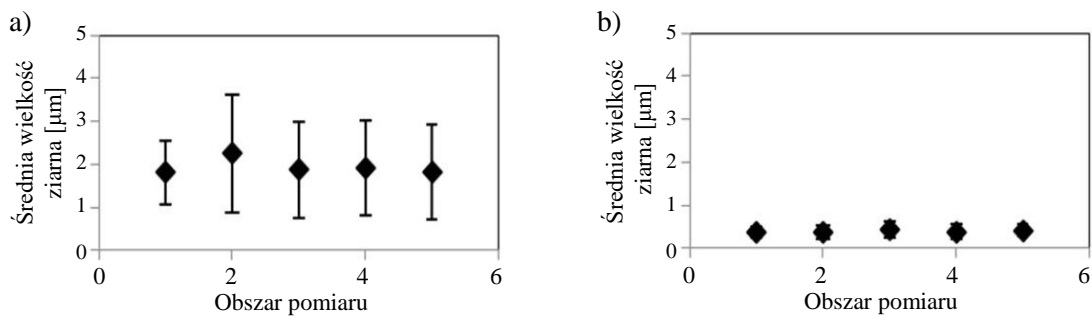
Udział powierzchniowy węglików we wszystkich obserwowanych łopatkach kształtuje się na poziomie 2-2,5% udziału powierzchniowego. Dodatkowo również nie odnotowano istotnych zmian w morfologii obserwowanych węglików. Stwierdzono natomiast



wyraźny wpływ podwyższonej temperatury i czasu eksploatacji badanych łopatek na udział powierzchniowy fazy  $\gamma'$  w poszczególnych strefach na przekroju poprzecznym badanych łopatek (Rys. 9). W przypadku łopatki narażonej na oddziaływanie najwyższej temperatury i najdłuższego czasu eksploatacji Nr 4, stwierdzono, mierząc udział powierzchniowy opisywanej fazy od krawędzi natarcia w głąb łopatki, że przy samej powierzchni jest on najmniejszy (30%). W głębi tej łopatki udział opisywanej fazy wzrasta do poziomu około 50%. Nie zaobserwowano natomiast wpływu stwierdzonej tendencji na zmiany wielkości cząstek fazy  $\gamma'$ , w analogicznych obszarach obserwowanych na przekrojach poprzecznych pozostałych łopatek (Rys. 10).



Rys. 9. Udział powierzchniowy umacniającej fazy  $\gamma'$  w głąb krawędzi natarcia: a) łopatka Nr 2, b) łopatka Nr 4



Rys. 10. Wielkość ziaren umacniającej fazy  $\gamma'$  w głąb krawędzi natarcia: a) łopatka Nr 2, b) łopatka Nr 4

#### 4. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionych wyników badań można stwierdzić, że zarówno w przypadku łopatek nowych, jak i tych eksploatowanych poddanych oddziaływaniu podwyższonej temperatury dochodzi do zmian mikrostruktury materiału łopatek. Decydującymi czynnikami w przypadku eksperymentu z nowymi łopatkami EI-867 jest temperatura wysoka oraz czas jej oddziaływania. Czas wygrzewania który w badaniu oddziaływania wysokiej temperatury na materiał łopatki wynosił 1h, dla stałej temperatury, tj. 1223 K; w tym czasie nastąpił gwałtowny wzrost wielkości cząstek fazy  $\gamma'$ . Dodatkowym argumentem przemawiającym za takim wyborem jest czas zadania lotniczego w warunkach eksploatacji dla przyjętego typu silnika odrzutowego, wynoszący także około 1h. Natomiast dobrane wartości temperatury wygrzewania łopatek związane są również z zakresem temperatury, jaka występuje w trakcie normalnej oraz awaryjnej pracy łopatek wirnika w eksploatacji. Temperatura strumienia czynnika roboczego (spalin) na wyjściu z komory spalania lotniczego silnika odrzutowego ze względu na ograniczenia wynikające z cieplnych i chemicznych charakterystyk materiałów, użytych na pełne, niechłodzone łopatki turbiny,

powinna mieścić się w przedziale 1173-1223 K, znajduje to potwierdzenie w literaturze [17]. Morfologia fazy  $\gamma'$  wskazuje, że po przekroczeniu temperatury 1223 K stop EI - 867 WD ulega przegrzaniu, a badana łopaska nie może być uznana za przydatną do dalszej eksploatacji. Uzyskane obrazy mikrostruktury stopu EI - 867 WD poddanego oddziaływaniu coraz wyższej temperatury mogą stanowić podstawę do oceny stopnia przegrzania łopatek turbiny gazowej.

W przypadku łopatek eksploatowanych (o różnym stanie technicznym) oprócz wysokiej temperatury niestabilnej w czasie oraz czasu użytkowania, dochodzi jeszcze jeden bardzo istotny czynnik, tj. agresywność spalin. W wyniku przeprowadzonych badań łopatek eksploatowanych stwierdza się, że pod wpływem oddziaływania podwyższonej temperatury niekorzystnie zmienia się skład chemiczny, morfologia i rozmieszczenie w strukturze materiału łopaski umacniającej fazy  $\gamma'$ . Morfologia cząsteczek fazy  $\gamma'$  zależy od znaku naprężenia mechanicznego. Naprężenie rozciągające, występujące poosiowo łopaski w trakcie obracania się wirnika turbiny, sprzyja rozrostowi fazy  $\gamma'$  w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku naprężenia. Wskutek tego z pierwotnego kształtu kuboidalnego tworzą się płytki których szersze ścianki usytuowane są prostopadle do kierunku naprężenia, a wąskie ścianki prostopadle do pozostałych kierunków sześcianu [9, 19]. Te niekorzystne zmiany mikrostruktury nadstopu wywierają decydujący wpływ na jego własności wytrzymałościowe. Rozrost fazy  $\gamma'$  prowadzi do koagulacji wydzielen, a zatem i do niekorzystnej zmiany jej kształtu. Ponadto zmniejsza się procentowy udział tej fazy w strukturze. Wskutek tego maleje żaroodporność i żarowytrzymałość nadstopu łopatek. Ten stan istotnie wpływa na trwałość łopatek i ma zasadniczy wpływ na przedwczesną naprawę główną turbiny gazowej. W przypadku samolotu wiąże się to z wyjściem samolotu z gotowości, wybudową silnika i przekazaniem go do naprawy głównej. Chociaż końcowym efektem są ogromne koszty związane z naprawą z powodu np. jednej przegrzanej łopaski turbiny. To jednak bezpieczeństwo lotów jest nadrzędną zasadą eksploatacji statków powietrznych.

## Literatura

1. Bojar Z., et al. Changes of microstructure of blades made of ŁK-4 alloy during long-term operation of aircraft turbine engine. Military University of Technology Bulletin 1988; 12: 51-64.
2. Błachnio J, Bogdan M, Kułaszka A. New non-destructive methods of diagnosing health of gas turbine blades. Advances in Gas Turbine Technology 2011: 465-498.
3. Błachnio J, Pawlak W. Damageability of gas turbine blades - evaluation of exhaust gas temperature in front of the turbine using a non-linear observer. Advances in gas turbine technology 2011: 435-464.
4. Błachnio J, Bogdan M. Ocena stanu łopatek turbiny gazowej na podstawie barwy ich powierzchni. Problemy badań i eksploatacji techniki lotniczej. Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych 2012; (8): 11-33.
5. Błachnio J, Spychała J, Pawlak W, Zasada D. The attempt to assess the technical condition of a gas turbine blade when information on its operating condition is limited. Journal of KONBIN 2014; 2(30): 75-86.

6. Błachnio J, Kułaszka A, Zasada D. Degradation of the gas turbine blade coating and its influence on the microstructure state of the superalloy. *Journal of KONES* 2015; 22(2): 17-24.
7. Ciszewski A, Chodorowski J. *Aviation materials science*. Warsaw Technical University, Warszawa, 2003.
8. Dubiel B. *Microstruktural changes during creep of single-crystalline nickel-base superalloys*. Kraków: University of Science and Technology Press, 2011.
9. Góral M, Swadźba L, Moskal G, Jarczyk G, Aguilard J. Diffusion aluminide coatings for TiAl intermetallic turbine blades. *Intermetallics* 2011; 19(5): 744-747.
10. Hernas A. *Creep resistance of steel and alloys*. Gliwice: Silesian Technical University, 1999.
11. Hodor K. *Gradient structure of surface layer of Ni- and Fe+Ni-based alloys*. Doctor's thesis. Kraków: Academy of Mining and Metallurgy, 2002.
12. Kułaszka A, Giewoń J. Report No 28 and No 73. Warsaw: Air Force Institute of Technology, 2014.
13. Majka H, Sieniawski J. Research of kinetics and coagulation of  $\gamma'$  phase in nickel superalloy EI-867. *Archive of Materials Science* 1998; 4(4): 237-254.
14. Mikułowski B. *Heat and creep resistant alloys - superalloys*. Kraków: Editions Academy of Mining and Metallurgy, 1997.
15. Pawlak W, Błachnio J. On the need to maintain homogenous temperature field within the working agent at the intake of a jet engine turbine. *Journal of KONES* 2014; 21(1): 205-213.
16. Paton B. *Creep resistance of cast nickel alloys and protection thereof against oxidation*. Kiev: Naukowa Dumka, 1997.
17. Poznańska A. *Lifetime of aircraft engine blades made of EI-867 alloy upon aspect of non-uniform distortion and structural changes*. Doctor's thesis. Rzeszów Technical University, 2000.
18. Reed R. C. *The Superalloys. Fundamentals and applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
19. Scheibel J, White C, Yoo M. *Met. Trans.* 1985; 16A: 651.
20. Sieniawski J. *Criteria and methods of evaluation of materials for elements of aircraft turbine engines*. Technical University Rzeszów, 1995.
21. Swadźba L, Formanek B, Maciejny A. Corrosion damage and regeneration of aluminide coatings on aircraft turbine blades. *Materials Science and Engineering*. 1989; A121:407-412.

22. Tajra S, Otani R. The theory of high-temperature strength of materials. Metalurgija, Moskwa, 1986.