



**POLITECHNIKA
RZESZOWSKA**
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA

ROZPRAWA DOKTORSKA

*Wpływ obróbki mechanicznej i morfologii wydzieleń
węglików w żarowytrzymałych stopach odlewniczych ŻS6U-
WI na własności zmęczeniowe Łopatek I Stopnia Turbiny
Sprężarki stosowanych w produkcji lotniczej.*

mgr inż. Anna Pytel

Promotor:

Dr hab. inż. Andrzej Nowotnik, prof. PRz.

Pragnę wyrazić najserdeczniejsze podziękowania wszystkim osobom, które radą i życzliwością przyczyniły się do powstania tej pracy:

Promotorowi naukowemu: Dr hab. Inż. Andrzej Nowotnik, prof. PRz za wyrozumiałość, opiekę naukową, niezliczone dyskusje oraz zaufanie.

Pracownikom Zakładu Napędów Lotniczych (Pratt&Whitney Rzeszów S.A), a szczególności pracownikom z biura metalurgicznego 5804 za stworzenie wspianiałej atmosfery pracy.

Pracownikom Consolidated Precision Products CPP za wspieranie działań oraz pomoc w realizacji procesów produkcyjnych.

Mojemu mężowi Danielowi za wsparcie i motywację w dążeniu do celu.

Mojej rodzinie oraz przyjaciółom za wsparcie na każdym etapie mojej przygody z nauką.

Wszystkim, których nie wymieniałam za okazałą pomoc.

Praca wsparta infrastrukturą badawczą:

Pratt&Whitney Rzeszów S.A, Consolidated Precision Products oraz Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu lotniczego.

DATA OZNACZENIA (RRRR-MM-DD)	26.06.2023	NR PRACOWNICZY: (P...)	P534864
-------------------------------------	------------	-------------------------------	---------



Zaznacz jeśli dokument **nie zawiera danych technicznych.**

lub

Wpisz wszystkie kody klasyfikacyjne, występujące w dokumencie zgodnie z wytycznymi.

	KLASYFIKACJA		
	LOKALIZACJA	REGULACJE U.S.	
		EAR	ITAR
	U.S.	P-ECCN	P-USML
OUTSIDE U.S.	ECCN	USML	
	REGULACJE LOKALNE		
	POLSKA	PL/UE	
		NSR	

Kod klasyfikacyjny musi być zawsze podany w polach U.S. oraz Outside U.S.

Klasyfikacja lokalna musi być zawsze podana gdy osoba wypełniająca tabelę znajduje się poza terenem Stanów Zjednoczonych.

Spis Treści:

I. WPROWADZENIE	1
II. STUDIUM LITERATURY	4
2.1. Łopatkki I Stopnia Turbiny Sprężarki – zastosowanie.....	4
2.2. Budowa i rodzaje Łopatek Turbiny Sprężarki.....	7
2.3. Materiały stosowane do wyrobu Łopatek Turbiny Sprężarki.....	10
2.3.1. Nadstopy na osnowie niklu.....	11
2.3.2. Charakterystyka materiału ŻS6U-WI.....	16
2.4. Technologia wytwarzania Łopatek Turbiny Sprężarki.....	21
2.4.1. Technologia wytwarzania półwyrobu Łopatek Turbiny Sprężarki.....	22
2.4.2. Obróbka cieplno-chemiczna Łopatek Turbiny Sprężarki.....	26
2.4.3. Obróbka strumieniowo-ścierna Łopatek Turbiny Sprężarki.....	29
2.4.4. Obróbka powierzchniowo wykańczająca stosowana na Łopatkach Turbiny Sprężarki.....	31
2.5. Problemy technologiczne i eksploatacyjne Łopatek Turbiny Sprężarki.....	33
2.6. Charakterystyka prac optymalizacyjnych w technologii wytwarzania łopatek turbiny sprężarki.....	38
2.7. Podsumowanie stanu zagadnienia – teza pracy.....	40
IIa. METODYKA	43
2.8. Materiał do badań.....	45
2.8.1. Badania własności fizycznych.....	47
2.9. Charakterystyka odlewów łopatek.....	47
2.9.1. Rozmiar ziarna.....	47
2.9.2. Badania mikroskopowe.....	49
2.9.2.1. Badania mikrostruktury powłoki.....	49
2.10. Badania własności mechanicznych.....	50
2.10.1. Trwałość zmęczeniowa.....	50
2.10.2. Próba pełzania i statyczna próba rozciągania.....	54
2.10.3. Pomiar twardości.....	56
2.10.4. Pomiar naprężeń wewnętrznych.....	58
III. BADANIA WŁASNE	59
3. Analiza procesu odlewania łopatek z żarowytrzymałego stopu odlewniczego ŻS6U-WI	59
3.1. Identyfikacja problemów produkcyjnych w technologii wytwarzania Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia.....	59
3.2. Analiza procesu odlewania łopatek z żarowytrzymałego stopu odlewniczego ŻS6U-WI.....	64
3.2.1. Wpływ pierwiastków charakteryzujących się wysokim powinowactwem do węgla na własności zmęczeniowego materiału ŻS6U-WI.....	64
3.2.2. Wpływ warunków odlewania na mikrostrukturę i własności odlewów z nadstopu niklu ŻS6U-WI.....	67
3.2.3. Wpływ warunków procesu odlewania na rozmiar ziarna stopu ŻS6U-WI.....	81
3.2.4. Wpływ dodatku modyfikatora na rozmiar ziarna materiału ŻS6U-WI.....	84
3.3. Analiza wlewków w stanie dostawy, tzw. masterheat – krzywa nagrzewania i chłodzenia.....	91

4. Zastosowanie procesów specjalnych w technologii wytwarzania łopatek z żarowytrzymałego stopu odlewniczego ŻS6U-WI.....	95
4.1. Wpływ warunków obróbki cieplnej na własności użytkowe Łopatek Turbiny Sprężarki z nadstopu ŻS6U-WI.....	95
4.2. Wpływ temperatury przesycania na mikrostrukturę odlewów łopatek z nadstopu ŻS6U- WI.....	99
4.3. Proces aluminiowania Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia z nadstopu ŻS6U-WI.....	115
4.4. Wyżarzanie Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia.....	120
4.5. Badania nieniszczące Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia.....	120
5. Obróbka strumieniowo-ścierna oraz mechaniczna łopatek z żarowytrzymałego stopu odlewniczego ŻS6U-WI.....	121
5.1. Wpływ warunków obróbki strumieniowo- ścierniej na własności zmęczeniowe łopatek.....	121
5.1.1. Analiza mikrostruktury Łopatek Turbiny Sprężarki po obróbce strumieniowo- ścierniej i po próbach zmęczeniowych.....	130
5.1.2. Badania naprężeń wewnętrznych łopatek w stanie wyjściowym oraz po obróbce hydrostrumieniowej (kulowaniu).....	132
5.2. Wpływ warunków obróbki mechanicznej (szlifowanie, polerowanie) na jakość powierzchni Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia.....	133
5.2.1. Analiza wpływu warunków obróbki mechanicznej na stan powierzchni zamka i szyjki Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia.....	134
5.2.2. Wpływ obróbki wykańczającej na mikrostrukturę warstwy wierzchniej Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia.....	135
IV. WNIOSKI I PODSUMOWANIE.....	142
V. BIBLIOGRAFIA.....	148

STRESZCZENIE

Nadstopy na osnowie niklu są powszechnie stosowane w technologii części przemysłu lotniczego, które narażone są na oddziaływanie, w czasie eksploatacji środowiska utleniającego, wysokiej temperatury i naprężeń zmiennocyklicznych. W dynamicznie rozwijającym się przemyśle lotniczym ważne jest ciągłe doskonalenie procesów wytwarzania elementów składowych silnika oraz poszerzenia wiedzy specjalistów branżowych w zakresie konstrukcji poszczególnych podzespołów, warunków ich pracy, jak i również stosowanych w ich budowie materiałów. Kształtowanie wiedzy pracowników rzutuje na szybkości reakcji na czynnik powodujący opóźnienie przepływu produkcji części lotniczych. W pracy przeprowadzono szczegółową analizę cyklu wytwarzania Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia, na przykładzie materiału ŻS6U-WI, z uwzględnieniem występujących odchyłek technologicznych w celu opracowania modelu postępowania w zakresie modyfikacji procesu w obszarze zmian umożliwiających osiągnięcie zgodnej z wymaganiami lotniczymi jakości produkowanych w PWR części. Prace podzielono na cztery etapy główne. Etap pierwszy to opis stanu zagadnienia w odniesieniu do analizy procesu wytwarzania Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia w kontekście planowanych do wykonania działań modyfikujących proces. W etapie drugim przeprowadzono badania mające na celu weryfikację materiału wsadowego (półwyrobu) w odniesieniu do zastosowania w procesie odlewania precyzyjnego łopatek. W kolejnym etapie analizie krytycznej poddano stosowane w technologii łopatek turbiny procesy obróbki cieplnej i cieplnochemicznej w zakresie umożliwiających dokonanie modyfikacji ich parametrów gwarantujących uzyskanie jakości odlewów zgodnych z normami firm zamawiających produkt. Etap czwarty obejmował analizę wpływu parametrów procesów powierzchniowej obróbki wykańczającej oraz obróbki strumieniowo-ściernej na własności mechaniczne łopatek. W celu potwierdzenia możliwości zmiany parametrów procesów specjalnych wykonano badania mikrostruktury oraz dokonano oceny odporności zmęczeniowej łopatek na każdym etapie prowadzonych badań. Umożliwiło to dokonać weryfikacji wszystkich działań produkcyjnych zapewniającej potwierdzić możliwości aplikacyjne opracowanej technologii w procesie produkcyjnym gotowych produktów lotniczych. Opracowane wyniki i opisane wnioski pozwalają na sprawny przepływ produkcji oraz bezpieczną eksploatację Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia w silniku PZL 10W.

ABSTRACT

Nickel-based superalloys are commonly used in the technology of parts of the aerospace industry that are exposed to oxidizing environments, high temperatures and cyclical stresses during operation. In the dynamically developing aviation industry, it is important to constantly improve the processes of manufacturing engine components and to expand the knowledge of industry specialists in the field of construction of individual components, their working conditions, as well as the materials used in their construction. Shaping the knowledge of employees affects the speed of reaction to the factor causing delay in the production flow of aircraft parts. In the work, a detailed analysis of the production cycle of the 1st Stage Compressor Turbine Blades was carried out, on the example of the ŻS6U-WI material, taking into account the technological deviations in order to develop a model of proceeding in the modification of the process in the area of changes enabling the achievement of the quality of the parts produced in PWR in accordance with aviation requirements. The works were divided into four main stages. The first stage is a description of the status of the issue in relation to the analysis of the production process of the 1st Stage Compressor Turbine Blades in the context of the planned process modification activities. In the second stage, tests were carried out to verify the input material (semi-finished product) in relation to the use of blades in the precision casting process. In the next stage, the heat and thermo-chemical treatment processes used in the technology of turbine blades were subjected to a critical analysis in the scope enabling modification of their parameters guaranteeing the quality of castings compliant with the standards of the companies ordering the product. The fourth stage included the analysis of the impact of surface finishing and abrasive blasting process parameters on the mechanical properties of the blades. In order to confirm the possibility of changing the parameters of special processes, microstructure tests were performed and the fatigue resistance of the blades was assessed at each stage of the research. This made it possible to verify all production activities to confirm the application possibilities of the developed technology in the production process of finished aviation products. The developed results and the described conclusions allow for an efficient production flow.

I. WPROWADZENIE.

Podstawą rozwoju turbinowych silników lotniczych jest ciągła poprawa ich osiągnięć i sprawności, obniżenie kosztów produkcyjnych, kosztów eksploatacyjnych oraz zwiększenie niezawodności ich elementów i podzespołów. Łopatki Turbiny Sprężarki I Stopnia należą do kluczowych elementów w konstrukcji silników turbinowych gwarantujących ich sprawność i bezpieczną pracę. W trakcie eksploatacji narażone są na oddziaływanie dużych gradientów temperatury pomiędzy strumieniem spalin z komory spalania, a chłodzącym je powietrzem. Wytwarzanie części lotniczych, do których należą Łopatki Turbiny stanowiące przedmiot badań w pracy, wymaga zachowania wysokiego reżimu produkcyjnego gwarantującego wyeliminowanie wszelkich odchyłek mogących mieć wpływ na ich bezpieczną eksploatację. W cyklu produkcyjnym części lotniczej ważny jest czas reakcji w momencie zidentyfikowanych odchyłek od założeń technologicznych, gwarantujący wykonanie odpowiednich działań zapewniających ciągłość prowadzenia działań gospodarczych w obszarze produkcji elementów, czy skomplikowanych podzespołów decydujących o bezpieczeństwie wykonywania operacji lotniczych. Bardzo ważne jest zatem prowadzenie analiz (wykonanych w ramach pracy doktorskiej), umożliwiających ocenić zakres oddziaływania, stwierdzonych w trakcie realizowanych działań badawczych, problemów, na cykl produkcyjny przedsiębiorstwa z obszaru produktów i konstrukcji lotniczych. Proces wytwarzania łopatek turbiny wymagający nadzwyczajnej precyzji działań z obszaru poszczególnych operacji należy właśnie do technologii, która narzuca konieczność wykonania szczegółowych badań weryfikujących jakość przeprowadzonych działań produkcyjnych w kontekście zapewnienia najwyższej jakości gwarantującej bezpieczną ich eksploatację w krytycznych warunkach oddziaływania degradującego środowiska gazów spalinowych i naprężeń o charakterze zmiennie-cyklicznym. Dlatego produkcja łopatek jest bardzo czasochłonna, a prowadzone badania walidujące jakość realizowanych prac na każdym etapie ich produkcji determinują możliwość wykonania kolejnych kroków w technologii celem uzyskania gotowego do pracy wyrobu. Bardzo ważne jest poznanie specyfiki produkcji łopatek w kontekście oceny wpływu warunków stosowanych procesów specjalnych na odchyłki od parametrów normatywnych wymaganych przez klienta. W ramach prowadzonych działań projektowych realizowanych w doktoracie wdrożeniowym przeprowadzono krytyczną analizę procesu wytwarzania łopatek I stopnia turbiny sprężarki, turbinowego silnika śmigłowcowego, wykonanych z nadstopu na osnowie niklu ŻS6U-WI w odniesieniu do operacji, które mogą generować problemy w produkcji łopatek uniemożliwiające uzyskanie własności zmęczeniowych zgodnych z wymaganiami odbiorczymi PWR. Dodatkowo, z uwagi na identyfikowane pęknięcia determinujące liczbę brakowanych części, wykonano również badania dotyczące wpływu warunków procesów obróbki mechanicznej, jak i procesów metalurgicznych implikujących powstawanie wad determinujących generowanie i propagację pęknięć w odlewach łopatek. Brak precyzyjnych danych określających przyczyny powstawania niezgodności odbiorczych, powoduje powstanie dużej liczby braków, podwyższających koszty produkcyjne. Celem pracy było zdefiniowanie problemów mających bezpośredni wpływ na technologię wytwarzania łopatek, co miało zapewnić podwyższenie liczby gotowych elementów charakteryzujących się własnościami spełniającymi wysokie wymagania odbiorcze. Na podstawie uzyskanych wyników badań z prowadzonych analiz dotyczących wpływu działań poszczególnych procesów stanowiących element technologii wytwarzania łopatek wykonywanych z materiału ŻS6U-WI, stwierdzono, że możliwe jest wprowadzenie zmian modyfikujących działania produkcyjne, które zapewnią zachowanie wysokich standardów

jakościowych i bezpieczeństwa finalnych wyrobów stanowiących element analiz prowadzonych w pracy, ale i również innych części lotniczych produkowanych w firmie PWR. Wynik wykonanych badań to opracowane stabilne parametry procesu metalurgicznego i obróbki mechanicznej umożliwiające wytwarzać najwyższej jakości odlewy ze stopu ŻS6U-WI, oraz innych stopów odlewniczych stosowanych w praktyce przemysłowej PWR. Wysoki poziom gotowości technologicznej zrealizowanego projektu wdrożeniowego gwarantowały badania prowadzone nie tylko na elementach – próbkach, ale przede wszystkim na gotowych częściach lotniczych, brakowanych na etapach badań, które stanowiły podstawę prowadzonych analiz w zakresie optymalizacji procesu wytwarzania determinującego przejście do kolejnego działania produkcyjnego w obszarze stosowanej technologii części lotniczej. W pierwszej części pracy dotyczącej studium literatury opisano stan zagadnienia w odniesieniu do danych dotyczących problematyki z zakresu optymalizacji procesów produkcyjnych gwarantujących bezpieczeństwo eksploatacji podzespołów i konstrukcji lotniczych, w których są stosowane części stanowiące przedmiot badań w pracy, tj. łopatki w turbinie. Opisano warunki pracy turbiny, środowisko oddziałujące na własności stosowanych w procesie wytwarzania łopatek nadstopów niklu.

Z uwagi na wdrożeniowy charakter prowadzonych badań, w części opisującej problematykę realizowanych działań projektowych scharakteryzowano budowę łopatek oraz produkowany w zakładzie PWR silnik PZL-10W, w którym badane łopatki instalowane są w turbinie sprężarki I stopnia. Przedstawiono ich kompletny cykl produkcji z uwzględnieniem procesów wytwórczych półwyrobu oraz opisano problemy technologiczne, z którymi zmagają się firmy wytwarzające podobne produkty. Analiza danych literaturowych potwierdziła, że istotna jest ciągła i szczegółowa kontrola procesu produkcji, w kontekście determinowania wszelkich odchyłek powodujących powstawanie wyrobów niezgodnych z wymaganiami. Zapewnienie ich wysokiej jakości uwarunkowane jest posiadaną wiedzą technologiczną decydującą o natychmiastowej reakcji przy identyfikacji wad, zapewniającej wykonanie działań optymalizujących procesy w kontekście utrzymania ciągłości produkcyjnej gwarantującej utrzymanie łańcucha dostaw dla odbiorcy części lotniczych. Umiejętności i wiedza z obszaru przyczyn powstawania odchyłek od danych normatywnych bazuje na prowadzonych badaniach w zakresie modyfikacji procesów specjalnych stosowanych w technologii wytwarzania łopatek. Stąd, w pracy skupiono się na krytycznej analizie procesów wytwarzania półwyrobu (odlewanie), procesów specjalnych oraz procesów powierzchniowej obróbki wykańczającej i obróbki strumieniowo-ściernej w odniesieniu do ich wpływu na jakość finalnego wyrobu. Wykonano badania w zakresie analizy oddziaływania warunków technologicznych na odporność zmęczeniową Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia, a więc na parametr stanowiący główny czynnik walidujący gotowość zastosowania wyrobu do operacji lotniczych. Uzyskane wyniki prowadzonych działań projektowych umożliwiły opracować standardy w obszarze zdefiniowanych technologii w procesie wytwarzania części w Pratt&Whitney Rzeszów S.A. Ciągła optymalizacja wszystkich procesów ma kluczowy wpływ na finalne własności łopatek ocenianych m.in. ich odpornością na działanie napreżeń zmiennie-cyklicznych w warunkach oddziaływania wysokiej temperatury. **Głównym celem projektu było opracowanie parametrów technologii wytwarzania gotowych łopatek ze stopu ŻS6U-WI z zachowaniem wysokich standardów jakościowych zapewniających bezpieczną ich eksploatację w silniku lotniczym.** Wyniki przeprowadzonych badań i analiz są obecnie podstawą wprowadzanych programów dotyczących nowych uruchomień odlewów

z żarowytrzymałych stopów odlewniczych. Są pomocne w realizowanych pracach walidacyjnych wdrożeń w ramach procesów produkcyjnych stosowanych w praktyce przemysłowej Pratt&Whitney, w której stosowane są głównie stopy charakteryzujące się własnościami fizycznymi i wytrzymałościowymi zbieżnymi z własnościami stopu stanowiącego główny przedmiot badań w projekcie wdrożeniowym, tj. stopu ŻS6U-WI.

Koszty produkcji wyrobów charakteryzujących się złą jakością, niezgodnościami, których występowanie determinowane jest stosowanymi w procesie ich produkcji czynnikami sprzyjającymi tworzeniu nieciągłości w materiałach, muszą być eliminowane poprzez prowadzenie prac i badań umożliwiających definiowanie przyczyn ich powstawania. Pozwoli to na opracowanie działań optymalizacyjnych w odniesieniu do uzyskania wyrobu, przy zastosowaniu zmodyfikowanych warunków procesowych, wykazującego jakość zgodną z wymaganiami odbiorczymi. Brak takich działań w warunkach prowadzenia działalności produkcyjnej wyrobów wadliwych, dopuszczającej ich obecność na rynku lotniczym, ma istotny wpływ na wizerunek firmy. Powoduje to kryzys odbioru przez rynek lotniczy przedsiębiorstwa, które nie jest w stanie zapewnić jakości wytwarzanych produktów, co przynosi straty finansowe i niemożliwe do nadrobienia straty w odbiorze firmy przez potencjalnych kontrahentów. Dopuszczenie do sprzedaży wadliwego wyrobu powoduje również opóźnienia w łańcuchu dostaw, przepływu produkcji co oddziałuje finansowo nie tylko na dostawcę i odbiorcę, ale i również na cały rynek lotniczy. W celu ograniczenia negatywnego wpływu zaburzeń produkcyjnych na czas wymagany do wyeliminowania czynników generujących nieciągłości, konieczne jest opracowanie procedur stanowiących podstawę wprowadzenia do technologii standardów zapewniających zachowanie wysokiego reżimu działań procesowych w cyklu produkcyjnym części lotniczej. Badania prowadzone w ramach projektu doktorskiego umożliwiły opracować procedury definiujące standardy w realizacji procesów produkcyjnych części stosowanych w turbinowych silnikach śmigłowcowych z żarowytrzymałych stopów odlewniczych na przykładzie ŻS6U-WI. Uzyskane wyniki badań opisujące wpływ czynników procesów specjalnych stosowanych w produkcji łopatek turbiny na własności stopu są cennym źródłem wiedzy z obszaru optymalizacji warunków wytwarzania krytycznych części lotniczych, zmierzających do osiągnięcia zakładanego na etapie wdrożenia wymaganego poziomu produkcji. Projekt miał na celu opracowanie stabilnych, determinujących uzyskiwanie wysokiej jakości wyrobów warunków technologicznych w odniesieniu do dopuszczenia ich do działalności produkcyjnej w zakładzie Pratt&Whitney w kontekście wymaganych własności nadstopu ŻS6U-WI, procesów kształtujących jego finalne własności, co finalnie zapewnia wyprodukowanie części lotniczej zgodnej z danymi normatywnymi branży lotniczej .

II. STUDIUM LITERATURY.

2.1. Łopatkki I Stopnia Turbiny Sprężarki – zastosowanie.

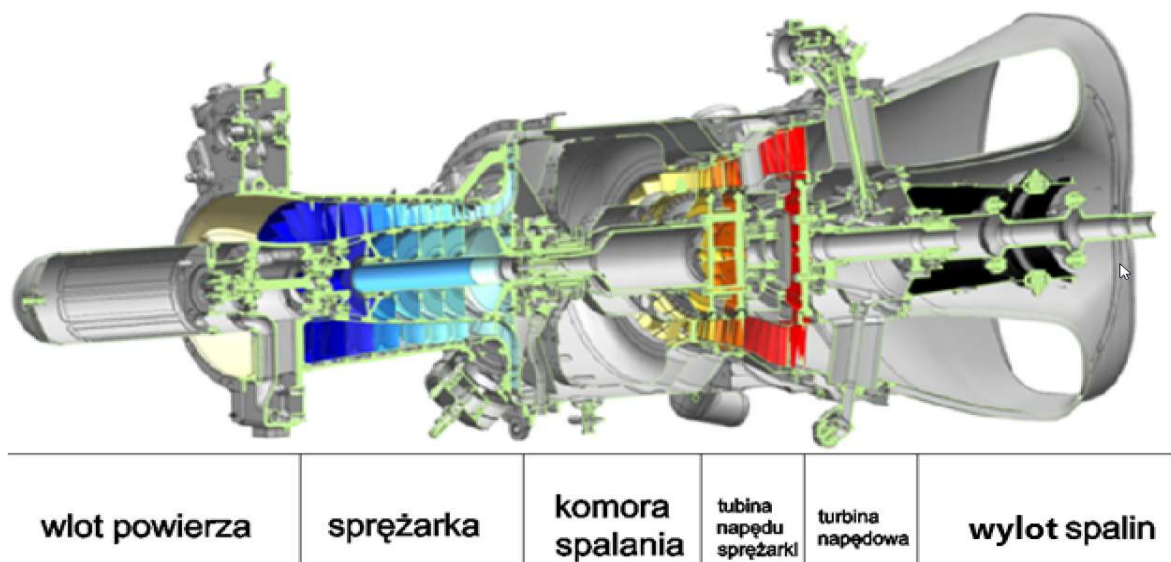
Silniki turbowentylatorowe należą do najczęściej stosowanych napędów w samolotach. Silniki takie pracują w cyklu: zwiększenie ciśnienia i podwyższenie temperatury powietrza w sprężarkach niskiego i wysokiego ciśnienia, wtryskiwanie paliwa przy jednoczesnym wprowadzeniu powietrza oraz spalanie powstałej mieszanki wewnątrz komory spalania i wprowadzenia strumienia gorących spalin do powierzchni roboczej pióra łopatek pierwszego stopnia turbiny wysokiego ciśnienia. Cykl ten powoduje obrót wału sprężarek co generuje ciąg silnika odpowiadający za sprawność napędu lotniczego. Temperatura gazów wlotowych do turbiny ma wpływ na wydajność energetyczną silników lotniczych. Stąd, dąży się do podwyższenia temperatury pracy turbiny, co umożliwia zwiększenie sprawności cieplnej silników lotniczych.

Łopatkki Pierwszego Stopnia Turbiny narażone są, poza działaniem silnie korozyjnego środowiska gazów spalinowych, na degradacyjne skutki długotrwałego zmęczenia cieplnego. Wynika to z charakteru pracy turbiny silnika, która w czasie startu i lądowania poddawana jest działaniom naprężeń cieplnych wynikających z konieczności osiągnięcia odpowiedniej mocy turbiny generowanej ciśnieniem gorących gazów spalinowych. Ograniczenie dla wzrostu sprawności turbiny stanowią materiały, z których wytwarzane są łopatkki poddane w czasie eksploatacji wysokim wartościom obciążeń cieplnym i mechanicznym. Ważne zatem, jest prowadzenie prac badawczych dotyczących modyfikacji procesów wytwarzania łopatek i aparatów kierujących umożliwiającymi podwyższenie sprawności cieplnej, a więc mocy turbiny poprzez zwiększenie temperatury i ciśnienia gazów na jej wlocie. Przeprowadzona analiza danych literaturowych oraz dotychczasowe wyniki badań własnych stanowiły podstawę do sformułowania tezy pracy: **możliwe jest wytwarzanie łopatek pierwszego stopnia turbiny o prognozowanych własnościach zmęczeniowych, przy zastosowaniu odpowiednich parametrów procesu obróbki mechanicznej i poprzez kształtowanie odpowiedniej morfologii wydzieleni węglików w mikrostrukturze łopatek wytwarzanych z żarowytrzymałego stopu odlewniczego ŻS6U-WI**. Przeprowadzone badania miały na celu analizę wpływu parametrów technologicznych na własności użytkowe i jakościowe wyrobów wytwarzanych w procesie odlewania precyzyjnego łopatek turbiny sprężarki pierwszego stopnia. Ograniczenia technologii w zakresie procesów kształtujących odpowiednie własności jakościowe i użytkowe wyrobów, często stanowią podstawę prac optymalizujących w odniesieniu do możliwości ich (łopatek) długotrwałego, bezpiecznego i bezawaryjnego eksploataowania w czasie pracy silnika lotniczego. Wynika to m.in. z konieczności stosowania w produkcji łopatek procesów specjalnych generujących wady, które negatywnie oddziałują na finalne własności gotowych produktów. Stąd, krytyczne jest prowadzenie badań mających na celu ograniczenie do minimum zjawisk powodujących m.in. podwyższenie kosztów produkcji wynikających z konieczności stosowania procesów specjalnych, które umożliwiają osiągnięcie przez łopatkki zakładanych własności użytkowych. Do procesów, które mogą negatywnie oddziaływać na finalne własności wyrobów w postaci Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia wytypowano:

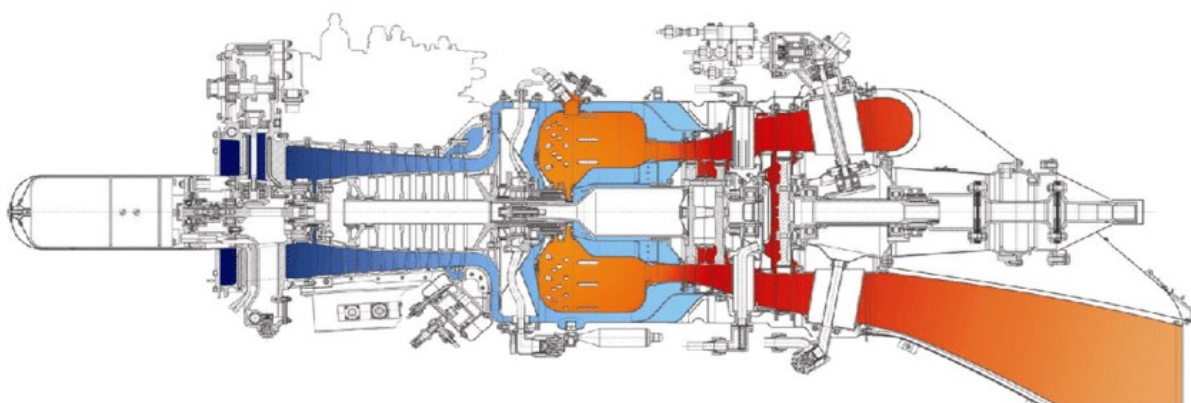
- proces wywarzania półwyrobu,
- procesy specjalne,

- powierzchniowa obróbka wykańczająca,
- obróbka strumieniowo-ścierna.

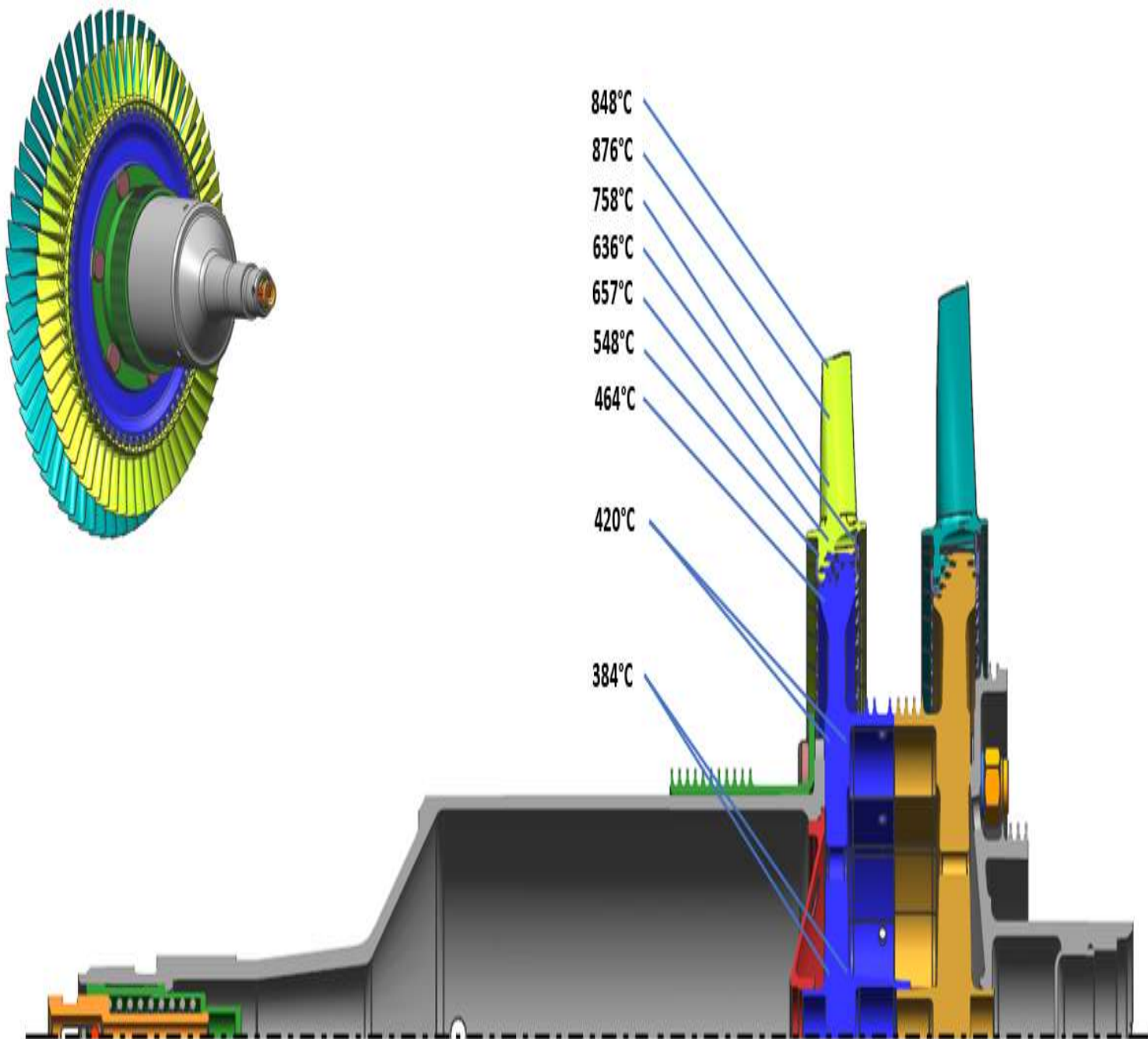
Wykonanie analiz mających na celu ocenę wpływu parametrów poszczególnych etapów czasochłonnego i wymagającego pod względem technicznym i metodycznym technologii wytwarzania łopatek turbiny, wymaga opisu konstrukcji silnika turbinowego, na przykładzie silnika PZL-10W służącego m.in. do napędu śmigłowców „Sokół”, ze szczególnym wskazaniem miejsca pracy łopatek stanowiących przedmiot badań w realizowanej pracy doktorskiej. Konstrukcja silnika PZL-10W, wciąż produkowanego oraz remontowanego w firmie Pratt&Whitney Rzeszów S.A., została opracowana w Polsce na podstawie projektu z roku 1975 r. Pierwszy PZL-10W uruchomiono na hamowni 12 maja 1977 r. realizując 60 godzinne próby silnikowe. W 1979 r. rozpoczęto naziemne testy 6 prototypów śmigłowca „Sokół” wyposażonych w silnik PZL-10W, które ukończono w 1984 r., a w 1987 r. oblatano pierwszy seryjny egzemplarz śmigłowca. Obecnie produkowane są silniki trzeciej generacji z resursem między remontowym wynoszącym 3000 godzin. Zastosowane zaawansowane technologie i nowoczesne materiały oraz elektroniczny mikroprocesorowy układ regulacyjno-paliwowy w połączeniu ze zwiększonym resursem zapewniło silnikowi osiągnięcie wyższych parametrów pracy, co umożliwiło dalszą ich eksploatację na trudnym rynku lotniczym [1].



Rys. 1. Przekrój silnika PZL-10W.



Rys. 2a. Zakres temperatury pracy w poszczególnych strefach silnika PZL-10W.



Rys. 2b. Zakres temperatury pracy Łopatki Turbiny Sprężarki I Stopnia.

Strefa turbin napędu sprężarki (w której pracują Łopatki Turbiny Sprężarki I Stopnia) poddana jest w trakcie eksploatacji działaniu najwyższej wartości temperatury, tj. do ok. 850°C (rys. 2a).

Turbina, podstawowy element lotniczego silnika turbinowego, jest wirnikową maszyną przepływową, w której następuje zmiana entalpii czynnika roboczego na pracę mechaniczną, powodując obracanie jej wirnika. Praca ta stanowi o mocy turbiny, której odbiorcami są m.in. sprężarka silnika turbinowego, śmigła samolotowe, wirniki nośne śmigłowców, akcesoria silnikowe itd. Osiągi silnika turbinowego, są uzależnione od rodzaju konstrukcji turbiny. Zwiększenie jej sprawności powoduje zwiększenie ciągu/mocy oraz zmniejszenie jednostkowego zużycia paliwa silnika (i odwrotnie). Trwałość i niezawodność eksploatacyjna silnika turbinowego jest uzależniona od geometrii poszczególnych części składowych

tworzących turbinę, które poddawane są oddziaływaniu dużych obciążeń cieplnych i mechanicznych [1].

Zalety stosowania turbin:

- ✓ rozwijanie dużej mocy przy małych wymiarach i małej masie własnej,
- ✓ wysoka sprawność energetyczna
- ✓ nieskomplikowana budowa,
- ✓ łatwa eksploatacja w różnych warunkach klimatycznych (szczególnie w niskich temperaturach),
- ✓ wysoka niezawodność działania.

Wady stosowania turbin:

- * wysoka temperatura robocza niektórych części (konieczne zastosowanie kosztownych żarowytrzymałych stopów warstw na podłożu metalicznych elementów),
- * złożony kształt łopatek (trudna technologia wytwarzania). [1]

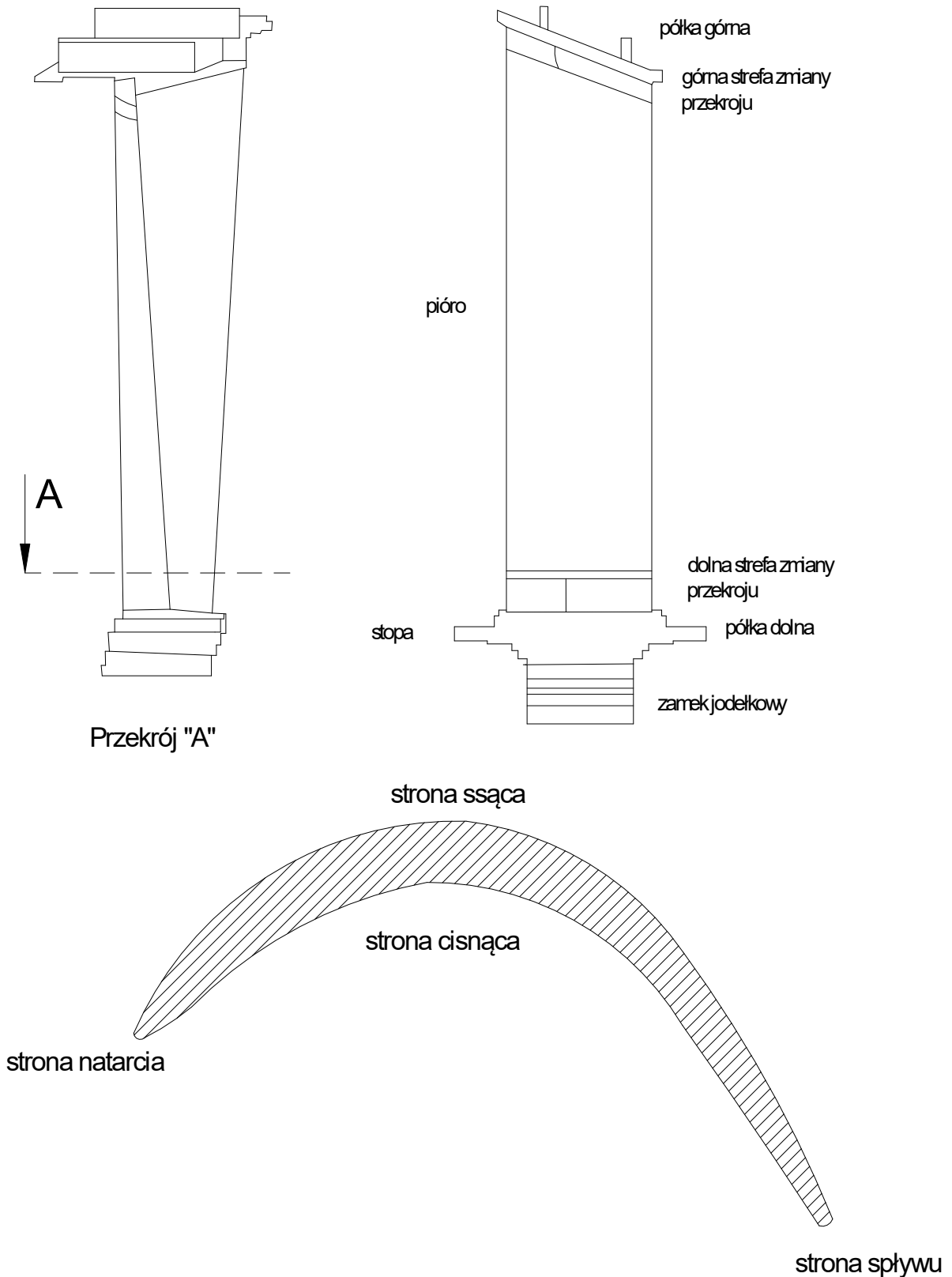
2.2. Budowa i rodzaje Łopatek Turbiny Sprężarki.

Łopatki Silników Turbinowych, jako podstawowe elementy turbiny, za pośrednictwem których przekazuje się energię czynnika wirnikowi, odpowiedzialne są za bezpieczeństwo pracy całego układu silnika. Ich wytrzymałość, trwałość i niezawodność podczas pracy silnika decyduje często o bezpieczeństwie lotu. W historii lotnictwa odnotowano przypadki, w których uszkodzone łopatki odpowiedzialne były za uszkodzenia w silnikach, prowadzących do katastrof lotniczych, z ofiarami śmiertelnymi [1].

Łopaska składa się z części roboczej, profilowej (pióro łopatki) oraz stopki (zamek łopatki). Profil łopatki podzielony jest na cztery części, tj. strefę natarcia (ang. *leading edge*), strefę po stronie działania ciśnienia gazów (ang. *pressure side*), krawędź spływu (ang. *trailing edge*) oraz strefę ssącą (ang. *suction side*). W łopatce, w kierunku promieniowym, można wyodrębnić następujące strefy: zamek jodełkowy osadzony w gnieździe dysku turbiny (ang. *firtree*), stopę (ang. *shank*), półkę dolną (ang. *bottom platform*), dolną strefę zmiany przekroju półka - pióro (ang. *hub fillet*), pióro (ang. *airfoil*), górną strefę zmiany przekroju pióro-półka (ang. *tip fillet*) oraz półkę górną (ang. *shroud*). Geometria łopatki w strefie przejścia części roboczej w stopkę zoptymalizowana jest w sposób zapewniający maksymalne obniżenie masy oraz naprężeń głównych, które powstają w trakcie jej eksploatacji.

Obszar połączenia zamka z piórem jest krytyczny dla bezpieczeństwa pracy łopatki, co wynika z gwałtownej zmiany przekroju prowadzącej do zmiany sztywności elementu, odpowiedzialnej w trakcie eksploatacji łopatki za złożony stan obciążeń mechaniczno-cieplnych. Stąd ważne jest w opracowywaniu konstrukcji łopatek zapewnienie w tej strefie **odpowiedniej wytrzymałości zmęczeniowej** gwarantującej bezpieczną pracę całego podzespołu silnika. Niewielkie zmiany kształtu, ostre krawędzie w tym obszarze powodują bardzo duże zmiany w rozkładzie naprężeń (karb strukturalny wynikający z koncentracji naprężeń), co ma wpływ na wartość odkształceń całej łopatki. Moment zginający i skręcający wynikający z działania sił bezwładności oraz ciśnienia gazów, odpowiadają za spiętrzenie naprężeń w obszarze krawędzi spływu, po stronie roboczej i krawędzi natarcia, po stronie ssącej łopatki. Dodatkowo, podczas pracy w tej strefie łopatki, występuje w czasie jej eksploatacji, wysoki gradient temperatury spowodowany tym, że łopaska od dołu chłodzona jest strumieniem wewnętrznym, a na część roboczą działają gorące gazy z kanału przepływowego turbiny.

Stąd ważne jest optymalizowanie kształtu i profilu części roboczej łopatki w zależności od parametrów przepływu czynnika przez wieniec łopatkowy. Kształt stopki uzależniony jest przede wszystkim od typu silnika i wartości obciążeń [1]. W budowanych obecnie turbinach spalinowych, stosuje się przede wszystkim łopatki z zamkiem o złożonym kształcie, tzw. jodełkowe (rys. 3).



Rys. 3. Budowa Łopatki Turbiny I Stopnia.

Możliwe jest zaprojektowanie kształtu łopatki, tak aby naprężenia rozciągające w poszczególnych strefach były stałe, zaś momenty gnące prawie równe zeru. Zoptymalizowana w ten sposób geometria, zapewnia łopatce wysoką wytrzymałość i odporność na zginanie, co gwarantuje jej bezpieczną eksploatację. W turbinach spalinowych, część robocza łopatki (pióro), w wyniku kontaktu z gorącymi gazami, jest bardzo silnie nagrzewana, co powoduje obniżenie własności wytrzymałościowych materiału. Oddziaływanie wysokiej temperatury na materiał, z którego wykonana jest łopatka stanowi również siłę pędą procesa pełzania. Do obciążeń mechanicznych oddziaływujących na łopatki silnika turbinowego zaliczamy:

- obciążenia wywołane statycznym i dynamicznym działaniem przepływającego czynnika (strumienia gazów spalinowych) na profilową część łopatki, tj. na pióro,
- obciążenia masowe wywołane działaniem sił odśrodkowych,
- obciążenia wywołane drganiami sprężystymi łopatek i całego wirnika,
- obciążenia cieplne, cykliczne, związane z rozszerzalnością cieplną materiału wynikające z charakteru eksploatacji silnika.

Łopatki turbin i sprężarek osiowych w trakcie eksploatacji poddawane są działaniu naprężeń:

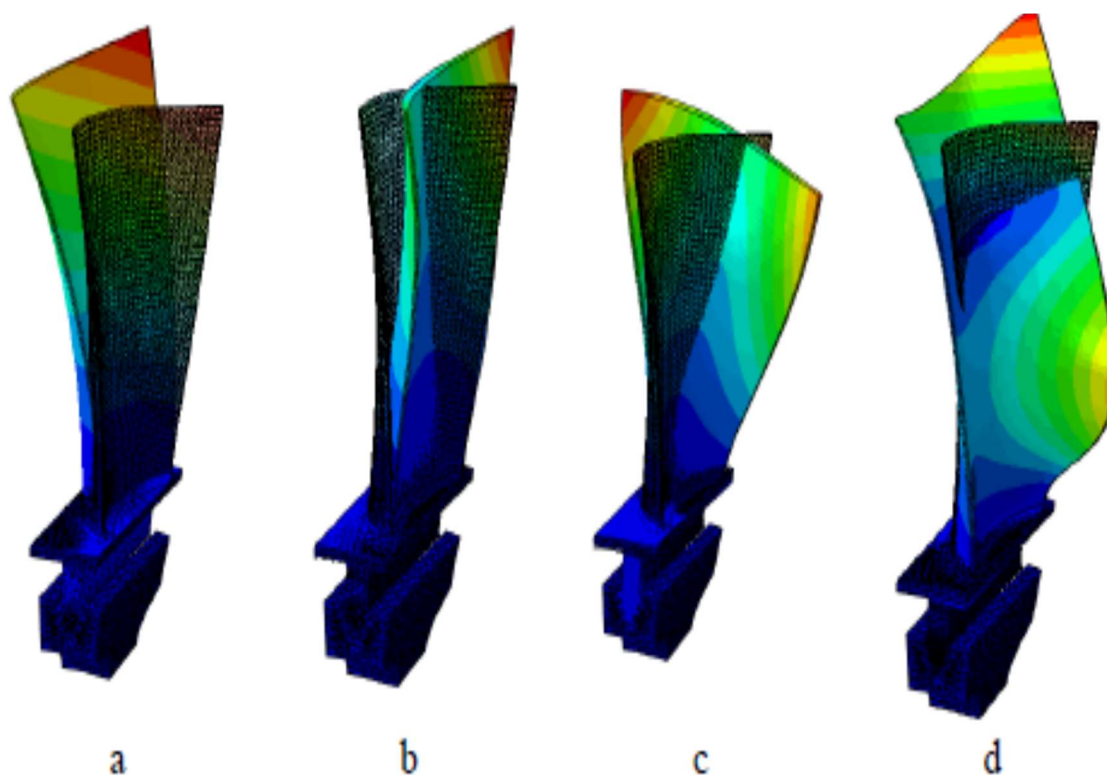
- rozciągających,
- zginających,
- stycznych, m.in. i styczne od drgań skrętnych części roboczej łopatki [1].

Naprężenia normalne wypadkowe, w dowolnym przekroju poprzecznym Łopatki Turbiny Sprężarki, stanowią sumę algebraiczną normalnych naprężeń składowych. W obliczeniach wytrzymałościowych zmierzających do optymalizacji geometrii łopatek, główne założenie parametryzacji opracowywanych modeli opiera się na strefie, w której występują największe naprężenia normalne lub zredukowane. Dotyczy to szczególnie obszaru narażonego na koncentrację naprężeń, które mogą prowadzić do zniszczenia łopatki. Momenty zginające i skręcające, wynikające z oddziaływania sił bezwładności oraz pola ciśnienia gazów, powodują powstanie koncentracji naprężeń w obszarze krawędzi spływu po stronie cisnącej i krawędzi natarcia po stronie ssącej łopatki. W tym obszarze koncentrują się również naprężenia dynamiczne wywołane drganiami własnymi łopatki. Do głównych przyczyn drgań łopatek silników turbinowych można zaliczyć:

- okresowo zmienne parametry strumienia powietrza i spalin w kanale przepływowym silnika,
- cykliczny charakter procesu spalania w komorach,
- nieprawidłowo wyważony wirnik,
- charakter pracy kół zębatych przekładni redukcyjnych,
- oddziaływanie sił grawitacyjnych [1].

Drgania łopatek powodują powstawanie zmiennie-cyklicznych naprężeń zmęczeniowych, co w połączeniu z naprężeniami wynikającymi z innych obciążeń, może być przyczyną uszkodzenia silników. Ocenia się, że naprężenia te są odpowiedzialne za ok. 60% pęknięć propagujących do dekohezji łopatek, a powstałe w wyniku zniszczenia, szczątki jednej łopatki mogą prowadzić do uszkodzenia innych, co podwyższa naprężenia powodujące nierównomierną pracę wynikającą z niejednorodnego rozkładu masy na wirniku [1]. Uszkodzenia eksploatowanych łopatek mogą powstać w wyniku m.in.: obciążeń mechanicznych z oddziaływaniem sił gazu oraz sił bezwładności pochodzących od sił odśrodkowych i skrętnych rotora turbiny, cząstek stałych uderzających w roboczą część,

szoków cieplnych, wysokiej temperatury gazów spalinowych, obciążeń zmęczeniowych materiału łopatki oraz silnie korozyjnego środowiska.



Rys. 4. Rodzaje drgań łopatki roboczej silnika PZL-10W: a- giętne, b-skrętne, c-giętno-skrętne, d- węzeł drgań. [1]

2.3. Materiały Stosowane do wyrobu Łopatek Turbiny Sprężarki.

Materiały, z których wytwarzane są łopatki turbiny silników lotniczych muszą spełniać wysokie wymagania żarowytrzymałościowe i żaroodpornościowe. Łopatki często eksploatowane są w temperaturze bliskiej temperatury topnienia materiału, z którego są odlane, co przy jednoczesnym oddziaływaniu dużych obciążeń zmiennie-cyklicznych, powoduje, że narażone są na uszkodzenia mechaniczne, na korozję, działanie procesu pełzania i na zużycie erozyjne. Łopatki analizowane w pracy doktorskiej wytwarzane są w procesie odlewania precyzyjnego, natomiast dysk i uszczelnienia turbiny to elementy kute. Różnorodność stosowanych materiałów w procesie wytwarzania części silnikowych wynika z konieczności spełnienia wysokich wymagań konstrukcyjnych. Współpracujące części składowe konstrukcji lotniczych charakteryzuje ścisła zależność własności wytrzymałościowych. Materiały na łopatki turbin muszą posiadać wysoką odporność na długotrwałe oddziaływanie wysokiej temperatury, której wartość może dochodzić do 90% temperatury topnienia materiału przy jednoczesnym oddziaływaniu naprężeń zginających i cyklicznych naprężeń cieplnych pochodzących od strumienia gazów spalinowych. Przez cały okres eksploatacji, napędowe turbiny gazowe mogą być poddane działaniu do 5000 pełnych cykli cieplnych [1].

Wysokie wymagania stawiane materiałom na elementy nowoczesnych gazowych turbin wysokotemperaturowych spełniają stopy na osnowie niklu, zwane nadstopami (również z ang. *superalloys* – superstopami). O ich wyborze do produkcji elementów części gorącej silnika,

m.in.. turbiny, decyduje skład chemiczny, ale przede wszystkich **technologiczne możliwości kształtowania mikrostruktury** gwarantującej uzyskanie zakładanych przez konstrukcje lotnicze, w tym łopatek, własności żarowytrzymałych oraz żaroodpornych.

2.3.1. Nadstopy na osnowie niklu.

Nadstopy niklu należą do jednych z najbardziej zaawansowanych, pod względem składu chemicznego, materiałów stosowanych w przemyśle lotniczym, stworzonych przez człowieka. W procesie wytwarzania nadstopów stosuje się nawet kilkanaście różnych dodatków stopowych [48]. Każdy z pierwiastków stopowych odgrywa swoją rolę w kształtowaniu finalnych własności fizycznych i mechanicznych nadstopów, a w szczególności ich dwóch podstawowych faz tj. osnowy γ oraz wydzieleni umacniających γ' [45]. Nadstopy na osnowie niklu to jeden z podstawowych materiałów stosowany w technologiach wytwarzania części lotniczych. Wynika to z ich wysokich własności mechanicznych- stabilnych w długim okresie oddziaływania wysokiej temperatury. Żaroodporność, żarowytrzymałość i odporność na korozję czy zużycie erozyjne to czynniki decydujące o możliwościach zastosowania stopów niklu w technice lotniczej, jako najtrwalszych materiałów w produkcji części, które mają być eksploatowane w ekstremalnych warunkach obciążeń zmęczeniowo-ciepłnych. Stosowanie nadstopów nie ogranicza się jedynie do procesów wytwarzania elementów części gorącej silnika lotniczego, ale również w technologiach wymagających od części lotniczych wysokiego poziomu niezawodności i wydajności w czasie ich pracy. Elementy gorącej części silników lotniczych narażone są na działanie wysokiej temperatury (nawet do ok. 850°C dla Łopatek Turbiny opisywanych w pracy doktorskiej), zmiennych obciążeń mechanicznych oraz agresywnego środowiska gazów utleniających. Coraz wyższe wymagania stawiane materiałom lotniczym, pracującym w wysokiej temperaturze, wymuszają **ciągłe dążenie do ulepszania technologii produkcyjnych**, w których kluczową rolę spełniają stopy niklu. Prowadzone są również badania w obszarze modyfikacji składu chemicznego nadstopów. **Ważna jest**, podczas realizowania procesów kształtowania własności stopów, **znajomość wpływu wszystkich czynników produkcyjnych oddziałujących na ich finalne własności mechaniczne**, co umożliwi wyeliminować niepożądane skutki działań procesowych, kluczowych dla cyklu wytwarzania części lotniczych.

Przedmiotem badań w pracy są Łopatki Turbiny Sprężarki I Stopnia wytworzone w procesie odlewania precyzyjnego, metodą traconego wosku (z ang. *investment casting proces*). Zastosowanie odpowiednich materiałów oraz technologii wytwarzania gwarantuje uzyskanie części charakteryzujących się wysokim poziomem niezawodności w trudnych warunkach eksploatacji, jakimi jest praca w silniku lotniczym. Jest to możliwe do osiągnięcia poprzez ścisłą kontrolę parametrów wytwarzania, gwarantującą wytworzenie w odlewach odpowiedniej makro- i mikrostruktury, krytycznej dla finalnych własności części. W procesie kształtowania mikrostruktury polikrystalicznych (równoosiowych – z ang. *equiaxed*) odlewniczych nadstopów na osnowie niklu dąży się do wytworzenia drobnych i równoosiowych ziarn o wysokiej jednorodności, z osnową fazy γ (czyli roztworem stałym pierwiastków stopowych w niklu) z wydzieleniami fazy międzymetalicznej umacniającej γ' - $Ni_3(Al, Ti)$ oraz z węglkami typu MC i $M_{23}C_6$.

Możliwość prognozowania zmiany własności części lotniczych w czasie, a więc wytrzymałości zmęczeniowej nadstopów, ma kluczowe znaczenie dla ich zastosowania przy zachowaniu najwyższych standardów bezpieczeństwa. Dostępne w literaturze, wyniki badań wskazują, że trwałość zmęczeniowa zmniejsza się m.in. wraz ze wzrostem amplitudy

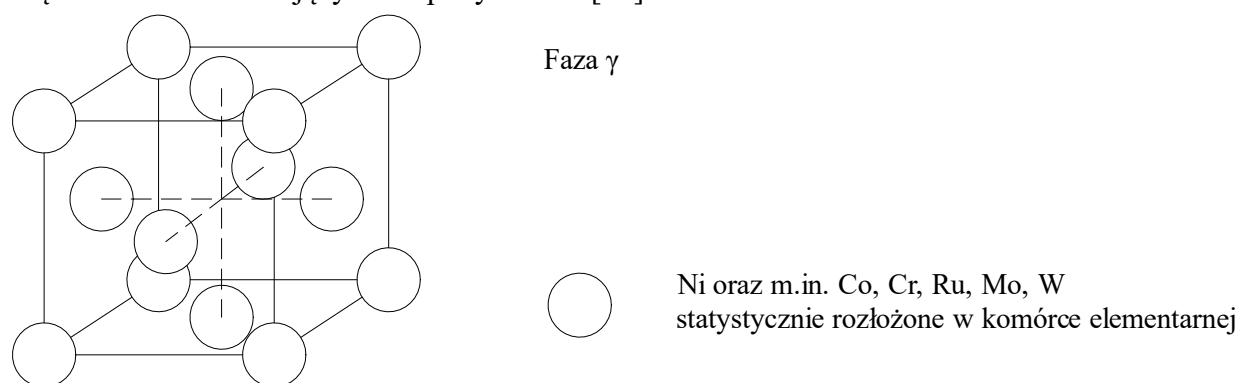
odkształceń i wielkości ziarna stopu [37]. Jednocześnie, w produkcji części lotniczych, często czynniki decydujące o końcowych własnościach zmęczeniowych produktu determinowane są zmianami, opisanymi w sposób gwarantujący opracowanie norm, których stosowanie w procesie wytwarzania zapewnia ocenę finalną produktów bez konieczności użycia urządzeń analitycznych, np. mikroskopu. Należy jednak zaznaczyć, że analiza mikrostruktury stopu jest bardzo ważna przy ocenie jakości wykonania części. Przykładem może być konieczność detekcji w odlewie cząstek węglików decydujących o własnościach zmęczeniowych materiału. W przypadku dużego udziału objętościowego węglików (typu MC oraz $M_{23}C_6$), w danym obszarze mikrostruktury badanego materiału, stop cechować się będzie niską wytrzymałością zmęczeniową. Nadstopy odlewnicze z dużą zawartością pierwotnych węglików wykazują stosunkowo mniejszą wytrzymałość na kruche pękanie, szczególnie w obszarach charakteryzujących się wysokim stopniem segregacji. Ponadto, gdy w procesie odlewania części z nadstopu, stosowane są wysokie temperatury, mogą tworzyć się węgliki o morfologii tzw. „pisma chińskiego”. Stopy na osnowie niklu umacniane są wydzieleniowo dyspersyjnymi cząstkami fazy międzymetalicznej $Ni_3(Ti, Al)$ zwaną fazą γ' . Podczas długotrwałej pracy Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia w wysokiej temperaturze w mikrostrukturze stopu zachodzą zmiany powodujące obniżenie ich własności mechanicznych. Wyznaczenie tych zmian w zależności od czasu oddziaływania wysokiej temperatury, jest ważnym wskaźnikiem przy doborze materiałów na części wykorzystywane do produkcji elementów i podzespołów silników lotniczych. Nadstopy na osnowie niklu poza dodatkami stopowymi, celowo wprowadzanymi w czasie ich wytwarzania, zawierają śladowe ilości szkodliwych pierwiastków takich jak: krzem, fosfor, siarka, tlen i azot. Zanieczyszczenia te wchodzi w reakcję z ciekłym stopem, w wyniku oddziaływania czynników środowiska zewnętrznego, podczas realizacji procesu ich wytapiania. Pierwiastki, takie jak: selen, bizmut, tellur, tal czy ołów muszą być ograniczone do bardzo niewielkiej zawartości (na poziomie tysięcznych, a nawet dziesięciotysięcznych części procenta), ponieważ silnie obniżają własności mechaniczne stopu. Większość nadstopów na osnowie niklu zawiera ok. 10÷20% mas. chromu, do 8% mas. aluminium z tytanem, 5÷15% mas. kobaltu i małą ilość boru, cyrkonu, magnezu i węgla. Głównymi dodatkami są: molibden, niob i wolfram, które spełniają podwójną rolę, tj. umacniają roztworowo i tworzą węgliki. Chrom i aluminium są kluczowe dla odporności na korozję, poprawiają stabilność powierzchni dzięki tworzeniu tlenków, odpowiednio Cr_2O_3 i Al_2O_3 . Pierwiastki występujące w nadstopach niklu w zależności od pełnionej funkcji można podzielić na:

- rozpuszczające się w osnowie austenicznej: *Co, Fe, Cr, V, Mo, W*;
- tworzące wydzielenia: *Al, Ti, Nb, Ta, np. Ni₃Al, Ni₃Ti czy Ni₃(Al, Ti)*;
- tworzące węgliki: *Cr, Mo, W, V, Nb, Ti, Ta*;
- segregujące do granic ziaren: *Mg, B, C, Zr*;
- tworzące tlenki zapobiegające korozji: *Cr, Al*;
- zwiększające odporność na wysokotemperaturowe utlenianie: *La, Th*. [3]

Bardzo istotna w kształtowaniu własności materiału jest znajomość faz występujących w analizowanym materiale. W nadstopach na osnowie niklu mogą występować następujące fazy:

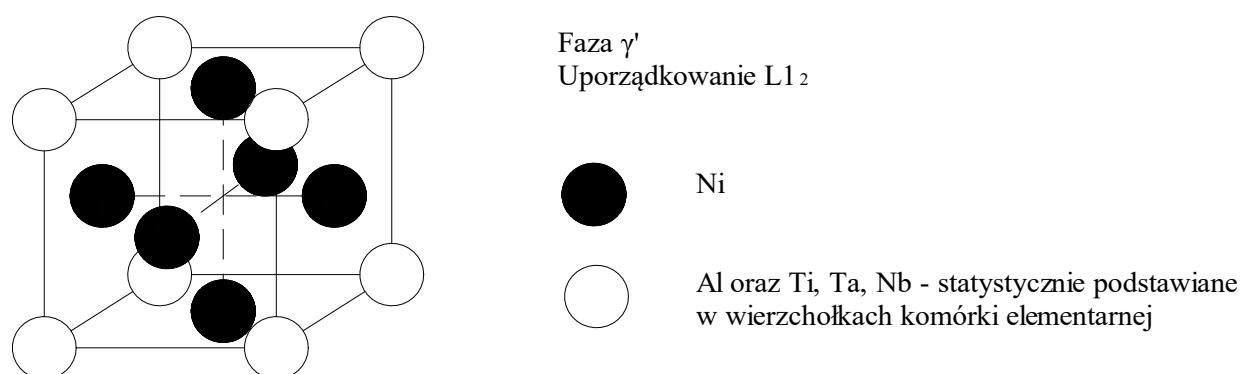
⇒ **osnowa - faza γ** , która jest fazą niemagnetyczną, roztworem niklu o strukturze krystalicznej RSC (A1), z rozpuszczoną dużą ilością kobaltu, żelaza, chromu, molibdenu i wolframu; faza ta stanowi osnowę we wszystkich stopach na osnowie niklu, nawet w stopach, w których jej obojętność względna wynosi poniżej 30%. W stopach

utwardzonych wydzieleniowo fazą γ' , osnowa obecna jest w kanałach między cząsteczkami umacniającymi stop wydzielen [45].



Rys. 5. Model komórki elementarnej fazy γ [49].

⇒ **Faza γ' - (Ni_3 (Al, Ti))**, która jest koherentną fazą z osnową γ , tworzy Nb, Ta i Cr; faza kluczowa do uzyskania wysokotemperaturowej wytrzymałości i odporności na pełzanie, w niektórych stopach jej zawartość przekracza 50%. Faza występuje także na granicach ziarn - umacniając je. Jej wytrzymałość wzrasta wraz ze wzrostem temperatury do ok. 850°C [45].



Rys. 6. Model komórki elementarnej fazy γ' [49].

⇒ **γ'' (Ni_3 Nb)**, którą tworzą nikiel i niob w obecności żelaza. Charakteryzuje się strukturą krystaliczną o sieci tetragonalnej przestrzennie centrowanej.

⇒ **borki** o małej gęstości tworzą się, gdy bor segreguje do granic ziaren.

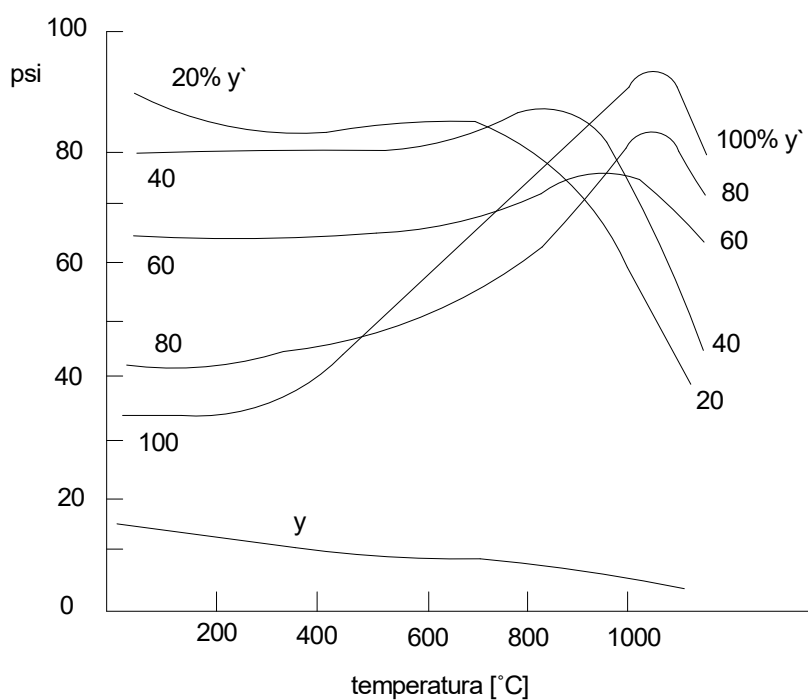
⇒ **węgliki** – faza umacniająca granice i ziarna austenitu. Węgiel dodany w ilości 0,05 do 0,20% tworzy węgliki z głównymi składnikami stopów oraz z niektórymi dodatkami stopowymi. Węgliki nie należą do stabilnych składników fazowych nadstopów i ulegają przemianom w warunkach eksploatacji oraz w czasie obróbki cieplnej.

⇒ **węgliki tytanu, tantal, hafnu i niobu** (węgliki typu MC) podczas obróbki cieplnej i eksploatacji mogą się rozpuszczać i wówczas na granicach ziaren tworzą się węgliki typu $M_{23}C_6$, M_6C [3].

⇒ **tlenki** – wydzieleniowo umacniające stop – ODS. Głównie są to tlenki itru, toru i lantanu. Tlenki wprowadzone są do stopów w czasie ich wytwarzania.

⇒ **fazy topologicznie zwarte (TCP)**, o kształcie płytek lub igieł, np. - σ , η i Lavesa, które pogarszają ciągliwość i odporność na pełzanie [3]. Są to kruche fazy międzymetaliczne. Powstają najczęściej w czasie eksploatacji części wytworzonych z nadstopów na osnowie niklu [45].

Osnowa nadstopów niklu (γ), krystalizująca w strukturze o sieci ściennie centrowanej Al (RSC), jest roztworem stałym różnowęzłowym dodatków stopowych w niklu, umacniających stop roztworowo. Wszystkie stopy na osnowie niklu umacniane są głównie wydzieleniami fazy (γ') koherentnej z osnową (niedopasowanie na poziomie max. 1%). Posiada ona niezwykle korzystne własności, gdyż jej wytrzymałość wzrasta ze wzrostem temperatury, przy zachowaniu dobrej plastyczności, co zwiększa żarowytrzymałość stopu bez wzrostu skłonności do kruchości, w odróżnieniu od umacniania fazami o większej twardości, np. węglnikami [3]. Faza ta jest uporządkowana do temperatury topnienia stopu, a umocnienie roztworowe przy wysokim udziale tej fazy w stopie wzrasta wraz z temperaturą eksploatacji. Wpływ fazy γ' na własności stopu zależy głównie od wielkości i kształtu jej wydzieleni. Faza ta charakteryzuje się taką samą siecią struktury krystalicznej jak osnowa, tj. RSC, jednak o innym parametrze (różnica ok. 0,2 nm). Zawartość Al i Ti w stopach dobierana jest w sposób gwarantujący wytworzenie w mikrostrukturze odlewniczych nadstopów niklu wydzieleni fazy γ' na poziomie 50% objętości względnej składników mikrostruktury.



Rys. 7. Wpływ temperatury na własności mechaniczne wydzieleni fazy γ' .

Jeżeli stop jest prawidłowo obrobiony cieplnie, to faza γ' wydzieli się w taki sposób, że orientacja krystaliczna osnowy i wydzieleni jest taka sama. Różnice w parametrze sieci krystalicznej osnowy i wydzieleni fazy γ' są na bardzo niskim poziomie, co powoduje wysoki stopień koherencji osnowy z fazą umacniającą. Duże niedopasowanie tych faz powoduje duże naprężenia koherencji, a więc duże umocnienie stopu. Jednocześnie granica międzyfazowa staje się bardziej ruchliwa i obserwuje się łatwiejszą koagulację fazy γ' . Cząstki fazy γ' stanowią największe przeszkody dla ruchu dyslokacji, dla największego niedopasowania

tych faz, przy którym jednak koherencja jest jeszcze zachowana [3]. Niedopasowanie można regulować w ograniczonym zakresie modyfikując skład chemiczny osnowy tj. przez zmianę względnej zawartości aluminium i tytanu lub przez dodanie małych ilości innych pierwiastków. Faza γ' zawierająca dużo Ti jest mniej stabilna niż faza γ' zawierająca podwyższoną zawartość Al. Faza z dużą zawartością Ti, ze względu na niewystarczającą stabilność własności może podczas długotrwałej eksploatacji stopu w wysokiej temperaturze przemienić się w fazę η (Ni_3Ti) o sieci krystalicznej heksagonalnej zwartej. Faza η występuje zwykle w postaci płytek i nie wpływa tak korzystnie na odporność na pełzanie i własności mechaniczne stopu, jak faza γ' . Kształt wydzieleni zależy od stopnia niedopasowania, energii powierzchniowej oraz objętości względnej γ' . W stopach zawierających małą objętość względną fazy γ' cząstki charakteryzują się morfologią sferoidalną, natomiast w stopach o podwyższonej zawartości Al i Ti wydzielenia przybierają kształt sześcienny. Występują również wydzielenia o kształcie płytkowym, przy bardzo dużym niedopasowaniu osnowy z fazą γ' (tzw. ujemnym niedopasowaniu parametru $\gamma' >$ parametru γ). Rodzaj i morfologia węglików zależą od składu stopu oraz zastosowanego procesu obróbki cieplnej. Węglik w nadstopach na osnowie niklu mają na celu:

- ⇒ Węglik pierwotne MC, głównie TiC i NbC, wydzielające się w cieczy lub na początku krzepnięcia stopu są zarodkami ziaren osnowy i ograniczają rozrost ziaren podczas obróbki cieplnej.
- ⇒ Węglik wtórne typu $M_{23}C_6$, M_7C_6 i M_6C , wydzielające się głównie na granicach ziaren, w których głównym pierwiastkiem metalicznym jest chrom, mogą podczas obróbki cieplnej rozpuszczać się i wydzielać ponownie [3].

Jeżeli węgliki wydzielają się w formie łańcuchów cząstek na granicach ziaren, to obniżają udarność i powodują zmniejszenie wytrzymałości na pełzanie, natomiast jeżeli tworzą się w postaci izolowanych cząstek o kształcie globularnym, to zwiększają wytrzymałość na pełzanie. Większość obecnie stosowanych w technice lotniczej nadstopów niklu zawiera małe ilości boru i cyrkonu, odpowiednio około 0,01 i 0,1%. Pierwiastki te wpływają na kształt cząstek węglików występujących w obszarze granic ziarn, co powoduje poprawę wytrzymałości na pełzanie i ciągliwość stopu. Do pierwiastków najbardziej oddziałujących na podwyższenie własności wytrzymałościowych i stabilność powierzchni w warunkach pracy w wysokiej temperaturze są aluminium i tantal. Pierwiastkami niepożądanymi w nadstopach są: ołów, bizmut, cynk i arsen, głównie dlatego, że zmniejszają ciągliwość podczas pełzania. Niskie i ściśle regulowane zawartości magnezu lub metali ziem rzadkich przeciwdziałają kruchości spowodowanej występowaniem w odlewach siarki [3].

Żarowytrzymałe i żaroodporne stopy niklu stosowane są na wyroby pracujące w temperaturze do ok. 1100°C. Wśród nadstopów na osnowie niklu wyróżnia się nadstopy: do przeróbki plastycznej, odlewnicze, stopy krystalizujące kierunkowo lub monokrystalicznie, stopy utwardzane dyspersyjnie tlenkami (ODS), stopy wytwarzane metodami metalurgii proszków, tworzywa nowej generacji – kompozyty na osnowie metalu, ceramiki, faz międzymetalicznych, polimerów oraz kompozyty węgiel/węgiel/grafit. **Temperatura pracy stopów odlewniczych jest o około 30°C wyższa niż temperatura pracy stopów przerabianych plastycznie.** Kierunkowa krystalizacja podwyższa tę temperaturę o 30°C, natomiast odlewy o strukturze monokrystalicznej mogą być stosowane w temperaturze przekraczającej wartość nawet 1300°C [3]. Stopy odlewnicze stosowane w produkcji łopatek turbiny oprócz wysokiej żarowytrzymałości i żaroodporności powinny cechować się wysoką odpornością na zmęczenie cieplne. Stopy o mikrostrukturze drobnoziarnistej są bardziej

odporne na zmęczenie cieplne od gruboziarnistych, jednocześnie stopy charakteryzujące się dużym rozmiarem ziaren posiadają wyższą wytrzymałość na cykliczne obciążenia zmienne w wysokiej temperaturze, co wynika z podwyższonej odporności takich stopów na pełzanie.

W celu uniknięcia w odlewach z nadstopów niklu zubożenia strefy przypowierzchniowej w składniki stopowe Cr, Ti, Al, B, ich obróbkę cieplną prowadzi się w piecach z atmosferą ochronną lub próżniowych. W celu podwyższenia żaroodporności tych stopów stosuje się również proces aluminiowania. W żarowytrzymałych stopach odlewniczych na osnowie niklu tworzą się te same fazy, co w stopach przerabianych plastycznie. Jedną z wad nadstopów odlewniczych jest skłonność pierwiastków do segregacji. Do obszarów międzydendrytycznych segregują pierwiastki o niskiej temperaturze topnienia oraz związki jak np. siarczki czy tlenki. Natomiast osie dendrytów wzbogacają się trudno topliwymi fazami. Długotrwałe wyżarzanie w wysokiej temperaturze oraz przesycanie decyduje o równomiernym ich rozmieszczeniu w całej objętości. W stopach wieloskładnikowych zawierających Ti, Al, Mo wydzielenie faz może zachodzić także w czasie chłodzenia po przesycaniu. Dlatego też **objętość względna i rozkład cząstek faz umacniających, decydujących o własnościach stopów, zależy od szybkości chłodzenia odlewu oraz od warunków obróbki cieplnej.** Dodatkowo wprowadzenie dodatku krzemu ujemnie wpływa na żarowytrzymałość stopów, zatem jego ilość powinna być jak najmniejsza. Podobnie jak krzem, dodatek ołowiu, cyny i fosforu powoduje obniżenie własności żarowytrzymałościowych nadstopów odlewniczych.

2.3.2. Charakterystyka materiału ŻS6U-WI.

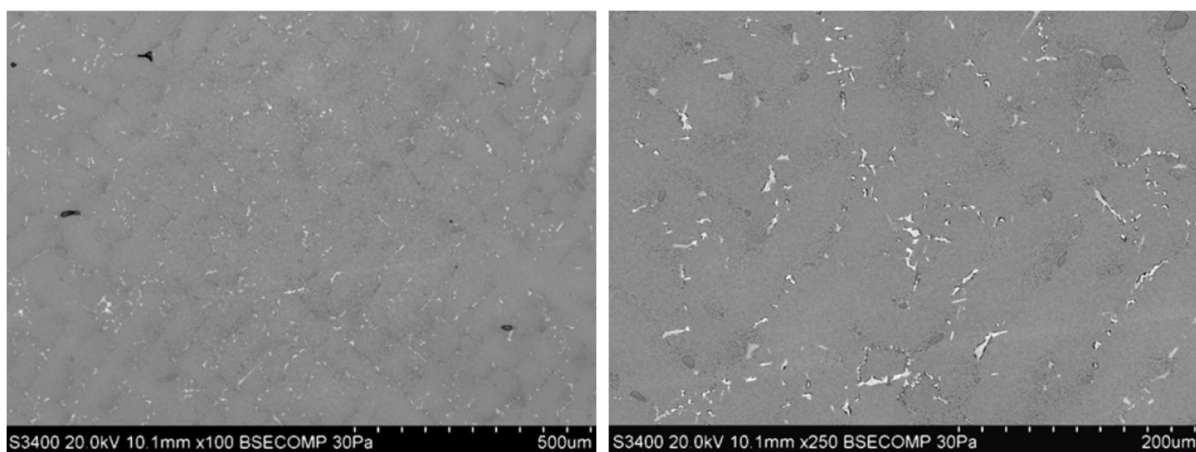
Łopatkami nowoczesnych gazowych turbin wysokotemperaturowych wytwarza się przede wszystkim ze stopów na osnowie niklu. Do grupy tych stopów należy materiał ŻS6U-WI. Jest to żarowytrzymały stop odlewniczy wytapiany indukcyjnie w warunkach próżni przeznaczony do ponownego przetopu w indukcyjnych odlewniczych piecach próżniowych. Stop ten stosowany do topienia w piecach próżniowych charakteryzuje się dobrą rzadkoplątnością i skurczem odlewniczym równym $2 \div 2,5\%$. Dostarczany jest do odlewni precyzyjnej jako półwyrób w formie odlewów w kształcie prętów (z ang. *masterheat*) o dowolnej średnicy i długości. Powierzchnie tych półwyrobów przeznaczonych do przetopu w próżniowych piecach indukcyjnych powinny być wolne od wtrąceń żużlowych i niemetalicznych, wtrąceń innego metalu i ceramicznych oraz zgorzelin tlenkowych powiększających średnicę prętów. Materiał ŻS6U-WI to nadstop niklu z dużą zawartością pierwiastków jak: chrom, kobalt, wolfram czy aluminium (tabela 1) [2]. Stop ten używany jest m.in. w procesie produkcyjnym Łopatek Turbiny Sprężarki poddanych badaniom prowadzonych w ramach pracy doktorskiej.

Tabela. 1. Skład chemiczny stopu ŻS6U-WI – wg normy branżowej OST-1-90126-85

<i>Zawartość pierwiastków, %mas.</i>			
Węgiel	0,13÷0,20	Cyrkon	max. 0,04
Chrom	8,0÷9,5	Bor	max. 0,035
Nikiel	Osnowa	Krzem	max. 0,4
Kobalt	9÷10,5	Mangan	max. 0,4
Molibden	1,2÷2,4	Siarka	max. 0,010
Wolfram	9,5÷11,0	Fosfor	max. 0,015
Aluminium	5,1÷6,0	Itr	max. 0,01
Tytan	2,0÷2,9	Ołów	max. 0,001
Niob	0,8÷1,2	Bizmut	max. 0,0005
Cer	max. 0,02	Żelazo	max. 1,0

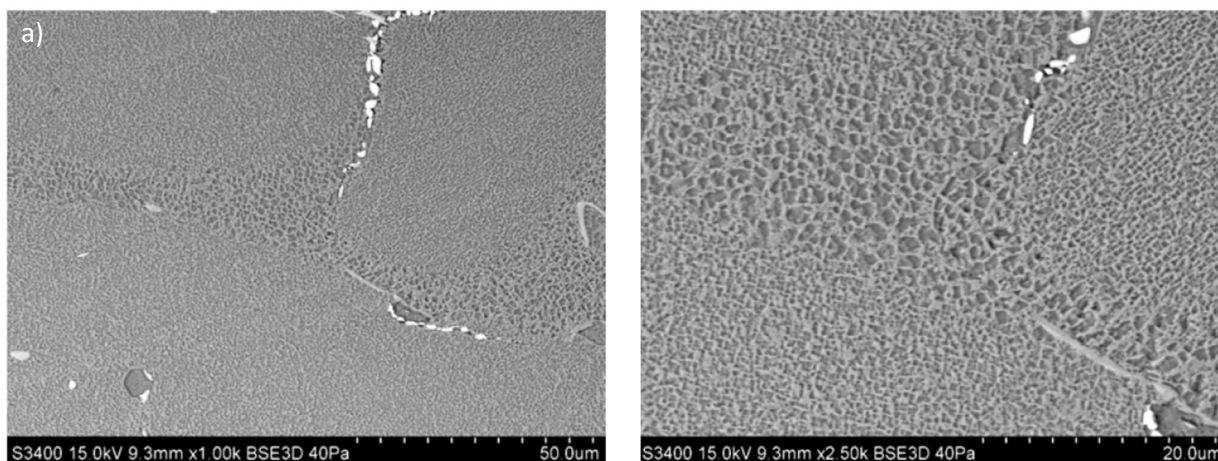
Uwaga: Bor, lantan, cer, cyrkon, itr i wapń wprowadzane są do stopu na podstawie obliczeń i nie oznaczają się ich podczas badań składu chemicznego. W stopach dopuszcza się różnicę zawartości boru $+0,005\%$.

Poza doбором składu chemicznego, determinującym właściwości wytrzymałościowe stopów stosowanych w produkcji łopatek, zastosowana technologia decyduje o mikrostrukturze, co gwarantuje spełnienie wymagań stawianym materiałom przeznaczonych na części lotnicze. Nadstopy niklu, umacniane fazą γ' z uwagi na wyjątkową kombinację stabilnych, w długim okresie czasu, właściwości wytrzymałościowych w warunkach wysokiej wartości temperatury, odporności na proces pełzania, korozję i na utlenienie w środowisku gazów spalinowych, znalazły powszechne zastosowanie przy wytwarzaniu elementów silników lotniczych i nowoczesnych turbin gazowych. W celu podwyższenia właściwości stopu, w projektowanym zakresie temperatur pracy do około 850°C , do stopu ŻS6U-WI dodawane są: tytan, aluminium i niob. Dodatek aluminium podwyższa przede wszystkim odporność na utlenienie (żaroodporność), tytan umacnia stop wydzieleniowo tworząc m.in. węgliki typu MC, a niob poza wpływem na wzrost właściwości wytrzymałościowych w wyniku tworzenia fazy γ' , tworzy fazę δ . Pierwiastki te tworzą więc różne fazy umacniające w zakresie temperatury zbliżonej do stosowanej w cyklu produkcyjnym stopu ŻS6U-WI. Typowa mikrostruktura nadstopu niklu z gatunku ŻS6U-WI składa się z osnowy, tj. fazy γ stanowiącej roztwór stały pierwiastków stopowych w niklu (rys. 8), fazy międzymetalicznej γ' -Ni₃(Al, Ti) podstawowej fazy umacniającej stop (rys. 9), węglików typu MC i M₂₃C₆ (rys. 10) oraz eutektyki $\gamma - \gamma'$ (rys. 8). Mikrostruktura stopu ŻS6U-WI przedstawiona na rys. 8÷10 jest typowa dla stopów odlewniczych. Charakteryzuje się dużym stopniem jednorodności w całej jego objętości. Osnowę stopu stanowią głównie dendryty roztworu stałego γ (rys. 8). W stopie obserwuje się obecność porów gazowych, o nieregularnym rozłożeniu i średniej objętości względnej nie przekraczającej $0,1\%$. Dodatkowo występuje, w nielicznych obszarach mikrostruktury, eutektyka $\gamma' - \gamma$.



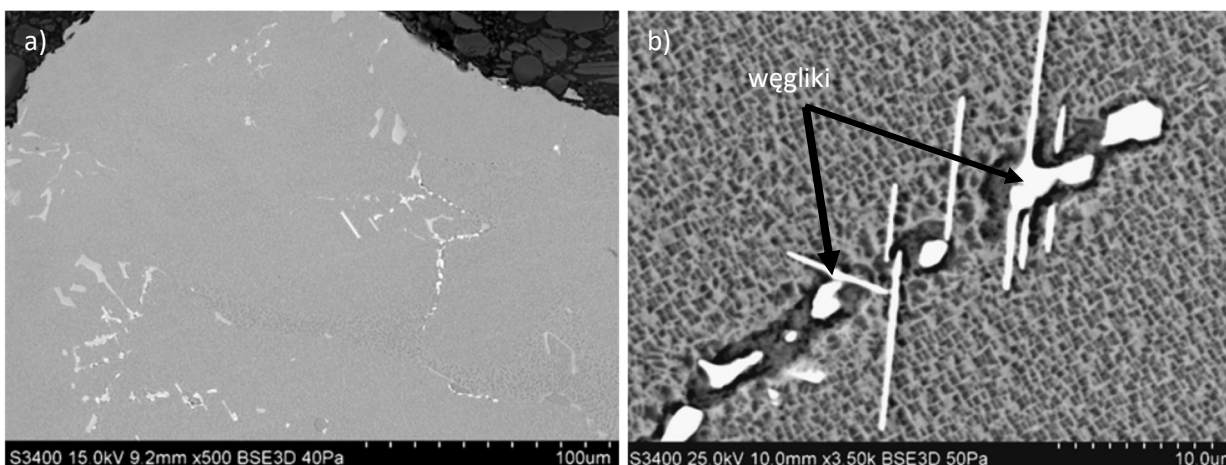
Rys. 8. Mikrostruktura stopu ŻS6U-WI w obszarze zamka łopatki. Widoczne dendryty roztworu stałego oraz nieliczne pory. Stan trawiony, odczynnik Kalling`a, LM.

Faza umacniająca – to związek międzymetaliczny γ' -Ni₃(Al, Ti), (rys. 9) wydziela się w postaci bardzo drobnych cząstek charakteryzujących się sześciennym kształtem, których rozmiar uzależniony jest od obszaru występowania, tzn. dyspersyjne, bardzo drobne wydzielenia fazy γ' , usytuowane są wewnątrz dendrytów, te większe, występują w przestrzeniach międzydendrytycznych.



Rys. 9. Mikrostruktura stopu ŻS6U-WI w obszarze lewej krawędzi zamka łopatki. Widoczne zróżnicowane rozmiarowo cząsteczki fazy γ' , stan trawiony, odczynnik Kalling`a, SEM.

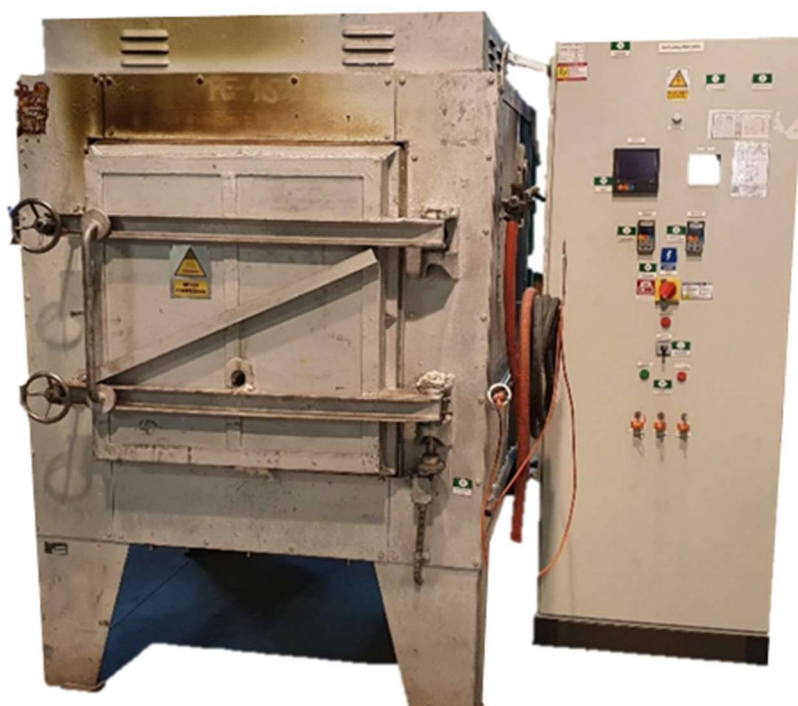
Węglik – obserwowane w mikrostrukturze nadstopu niklu ŻS6U-WI to głównie węgliki wolframu i tytanu typu MC oraz węgliki typu $M_{23}C_6$. Węglik typu MC umiejscowione są głównie w przestrzeniach międzydendrytycznych oraz rzadziej wewnątrz i na granicach ziarn. Natomiast węgliki typu $M_{23}C_6$ wydzielają się głównie na granicach ziarn. Węglik posiadają zróżnicowany kształt od globularnego do równoosiowego, poprzez zwarte o nieregularnym kształcie aż po iglaste (rys. 10).



Rys.10. Mikrostruktura stopu ŻS6U-WI. Widoczne węgliki typu MC oraz $M_{23}C_6$ w przestrzeniach międzydendrytycznych oraz wewnątrz dendrytów. Stan trawiony, odczynnik Kalling`a. SEM.

W celu zwiększenia stopnia ujednorodnienia i poprawy własności żarowytrzymałych, odlewy poddawane są procesowi obróbki cieplnej. Obróbka odlewów ŻS6U-WI polega na przesycaniu z temperatury $1220 \pm 14^\circ C$ celem uzyskania jednorodnej mikrostruktury osnowy przesyconej pierwiastkami wydzielającymi się standardowo w warunkach wolnego chłodzenia stopu wygrzewanego powyżej temperatury solvus. Dodatkowo, w celu usunięcia naprężeń wewnętrznych, odlewy z nadstopu ŻS6U-WI po zakończonej powierzchniowej obróbce wykańczającej, poddaje się procesowi wyżarzania w atmosferze ochronnej w temperaturze $1000 \pm 14^\circ C$ z zastosowaniem chłodzenia strumieniem argonu bądź w próżni (w terminologii przemysłowej proces ten nazywany jest *trawieniem termicznym*).

Elementy części gorącej silników lotniczych, wykonane z materiału ŻS6U-WI, pracują w ekstremalnych warunkach, tj. w warunkach wysokiej temperatury i silnie korozyjnego środowiska spalin pochodzących ze spalania paliwa lotniczego. Dlatego, na krytyczne dla pracy turbiny sprężarki Łopatkę stosuje się zabezpieczenia powierzchni w postaci dyfuzyjnych warstw aluminiowych. Wytwarzane w procesie aluminowania, w zakresie temperatury $950\div 1000^{\circ}\text{C}$, warstwy podwyższają żaroodporność łopatek. Dąży się zatem do uzyskania mikrostruktury o morfologii składników fazowych gwarantujących ograniczoną dyfuzję pierwiastków stopowych, a więc zapewniającą podwyższoną odporność na procesy pełzania. Stop ŻS6U-WI jest jednym ze stopów na osnowie niklu, który uzyskuje wymagane własności żarowytrzymałe dla produkowanych z tego stopu łopatek i wirników turbin pracujących w $800\div 1050^{\circ}\text{C}$, po przeprowadzonym procesie obróbki cieplnej. Wysokie własności żarowytrzymałe stop ten uzyskuje po obróbce cieplnej składającej się tylko z operacji przesykania, poprzez chłodzenie na powietrzu. Dla odlewów z nadstopu ŻS6U-WI wytwarzane są dedykowane urządzenia oraz oprzyrządowanie wymagane do celów prowadzenia obróbki cieplnej, które gwarantują m.in. stabilność geometryczną i jednorodny rozkład temperatury w całej objętości wyrobów (rys. 11 i 12). Do prowadzenia procesu obróbki cieplnej stosuje się najczęściej piece próżniowe wyposażone w grzałki grafitowe, również piece z atmosferą ochronną gazu obojętnego, grzane oporowo (tabela nr 2 – charakterystyka pieca stosowanego w badaniach). Starzenie przesyconego stopu ŻS6U-WI nie poprawia znacząco jego własności mechanicznych. Stop ŻS6U-WI charakteryzuje się wysoką odpornością na zmęczenie cieplne. W czasie eksploatacji, obserwuje się w mikrostrukturze łopatek niewielkie zmniejszenie objętości względnej fazy γ' w przypowierzchniowych obszarach wyrobów. Wymagane jest żeby atmosfera, w której pracują części wykonane ze stopu ŻS6U-WI była wolna od tlenku żelaza. Stop ŻS6U-WI cechuje się wysoką żaroodpornością do temperatury 1100°C , przy dużej skłonności do powstawania pęknięć w temperaturze $700\div 800^{\circ}\text{C}$ i znacznie niższą żarowytrzymałością w temperaturze 950°C .



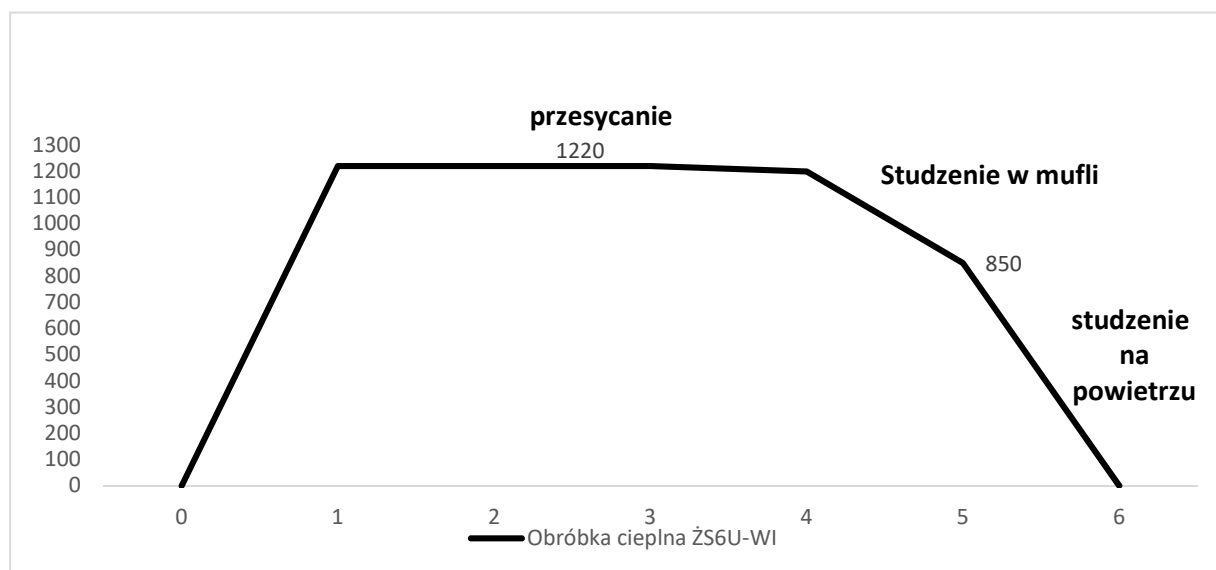
Rys. 11. Wysokotemperaturowy, elektryczny piec komorowy PEK-300A.



Rys. 12. Oprzyrządowanie do obróbki cieplnej nadstopów w atmosferze ochronnej (argon) – mufla.

Tab. 2. Parametry pieca PEK-300A do obróbki cieplnej stopu ŻS6U-WI.

Piec PEK-300A	
Moc pieca	40 kW
Napięcie zasilające transformator	3x380 V
Temp. znamionowa	1500°C
Regulacja temperatury	samoczynna
Typ tablicy sterowniczej	300A
Charakterystyka elementu grzejnego Super-Kanthal	
Moc	3300 W
Oporność na gorąco	0,160
Napięcie robocze	23,6 V
Napięcie prądowe	140 A
Obciążenie prądowe	12,5 W/cm ²
Napięcie rozruchowe	1/3 napięcia roboczego



Rys.13. Obróbka cieplna materiału ŻS6U-WI.

2.4. Technologia wytwarzania Łopatek Turbiny Sprężarki.

Postęp technologiczny w lotnictwie wymaga ciągłej realizacji prac badawczo-rozwojowych w obszarze nowych rozwiązań konstrukcyjnych. Przełomem w opracowaniach pierwszych samolotów były obliczenia termodynamiczne prowadzące do zbudowania pierwszych silników rotacyjnych oraz turbin gazowych. Wstępne założenia w budowie silnika lotniczego wymagało zintegrowania komory spalania z turbosprężarką generującą odpowiednie ciśnienie powietrza na dużych wysokościach przelotowych statków lotniczych. Stąd bardzo ważne jest w technologii silnika stosowanie materiałów odpornych na działanie wysokiej temperatury, zwłaszcza w przypadku technologii elementów pracujących w części gorącej, tj. łopatek. Z uwagi na charakter pracy Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia w silniku lotniczym, ważne jest określenie wpływu czynników produkcyjnych na ich własności zmęczeniowe, zwłaszcza w warunkach eksploatacji. Z danych literaturowych wynika, iż wiele awarii, bądź katastrof lotniczych spowodowanych było uszkodzeniami elementów składowych silników zainicjowanymi pęknięciami zmęczeniowymi [73]. Odporność na zmęczenie stanowi zatem kluczowy parametr jakościowy części wytwarzanych z nadstopów niklu, które mają być eksploatowane w warunkach naprężeń odpowiadających za powstawanie wad krytycznych dla całego zespołu silnika lotniczego. Ważne jest również, w czasie prowadzenia analizy założeń dla warunków pracy wszystkich elementów kluczowych, w celu uzyskania zakładanej wydajności silnika, odróżnienie możliwości powstania wad wynikających z błędów konstrukcyjnych, czy eksploatacyjnych od tych, które mogą mieć swoje źródło w technologii wytwarzania bądź powstałych w czasie remontu poszczególnych podzespołów silnika.

Łopatki Turbiny należą do tych części silnika lotniczego, które podlegają ciągłym zmianom konstrukcyjnym, mającym na celu zwiększenie ich sprawności oraz trwałości, co determinuje osiąganie coraz wyższych wydajności dla całego zespołu turbiny. Łopatki silników turbinowych, mimo swoich małych wymiarów, często nieskomplikowanej budowie odgrywają kluczową rolę w procesie generowania mocy turbiny. Są to elementy, za pomocą których przekazywana jest energia czynnika wirnikowi silnika. Zatem są to kluczowe części turbiny, których **wytrzymałość i trwałość determinuje bezpieczeństwo pracy** całego układu. Są one narażone, w trakcie eksploatacji, na działanie dużej różnicy temperatury pomiędzy spalinami, a chłodzącym je powietrzem. Dotyczy to przede wszystkim łopatek kierujących pierwszego stopnia, na które oddziałują gazy gorące płynące bezpośrednio z komory spalania. Łopatki uczestniczące w zamianie energii kinetycznej gazów spalinowych na ruch obrotowy wirnika, poddawane są ciągłym działaniom naprężeń cieplnych, których wartość wzrasta wraz z różnicą temperatury gazów i chłodzącego je powietrza, dodatkowo działa na nie siła odśrodkowa. Wzrost temperatury gazów odpowiada za prędkość zmian własności materiału, z którego wytworzone są łopatki turbiny. Sprawność silnika turbinowego wzrasta wraz z temperaturą. Podwyższenie temperatury gazów spalinowych teoretycznie jest możliwe, z uwagi na wartość temperatury spalania kerozyny (która wynosi ok. 2300°C). Jednak ograniczeniem są materiały, z których wytwarzane są elementy części gorącej silnika. Temperatura eksploatacji tych elementów determinowana jest wartością temperatury, po przekroczeniu której własności mechaniczne materiału, z którego są wytworzone, ulegają pogorszeniu. Dodatkowo krytyczne elementy turbinowych silników lotniczych narażone są na destrukcyjne działania obciążeń zmęczeniowych, niezależnie od systemu eksploatacji. Praca w warunkach ciągłego oddziaływania naprężeń cieplno-zmęczeniowych może prowadzić do powstania wady inicjującej pęknięcia, w obecności lub braku wpływu erozji, korozji i uszkodzeń mechanicznych np. pióra łopatki. Zjawisko zniszczenia łopatek pojawia się najczęściej w wysokocyklowym lub gigacyklowym zakresie trwałości zmęczeniowej materiału, z którego wytwarzane są elementy eksploatowane w warunkach zmęczeniowych. Przypadki

uszkodzeń zmęczeniowych powstałych w początkowej fazie eksploatacji (nowe silniki lub bezpośrednio po remoncie) są wynikiem błędów konstrukcyjnych, wad produkcyjnych, złej jakości prac remontowych, uszkodzeń mechanicznych lub spowodowane są dynamicznym przeciążeniem. W tym przypadku inicjacja zmęczenia następuje najczęściej w obszarze wad materiałowych, w warunkach niskocyklowego zmęczenia materiału. Wytrzymałość zmęczeniową łopatek można zwiększyć poprzez stosowanie obróbki mechanicznej lub obróbki cieplnej materiałów. Jednym z procesów umożliwiającym podwyższyć odporność elementów wytwarzanych z nadstopów niklu na działanie naprężeń zmęczeniowych jest obróbka plastyczna na zimno powierzchni (a ang. *shot peening*).

Uzyskane wyniki opisane w pracy doktorskiej wskazują, iż jakość produkcji i remontu łopatek może mieć wpływ na przyspieszone pękanie materiału pod wpływem cyklicznie zmieniających się naprężeń, w trakcie ich eksploatacji. Konieczne jest zatem ciągłe doskonalenie narzędzi i metod weryfikacji stanu technicznego łopatek turbiny sprężarki. Produkcja Łopatek Turbiny Sprężarki należy do czasochłonnych oraz bardzo skomplikowanych procesów wytwarzania gotowych wyrobów lotniczych.

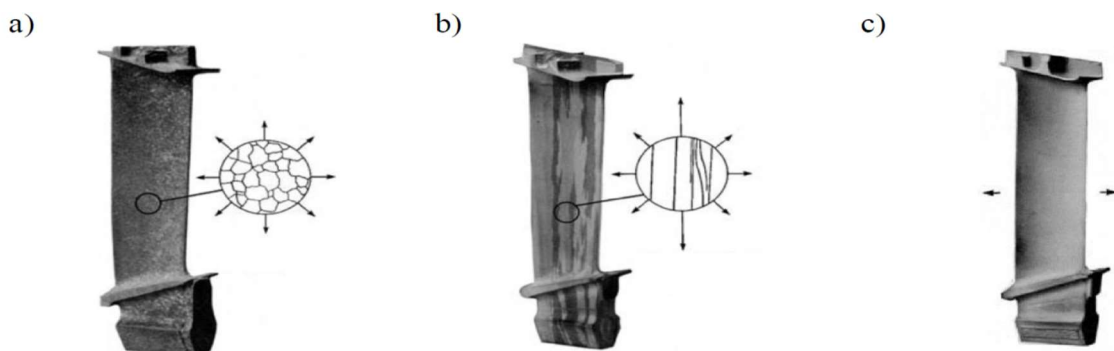
Cykl produkcji Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia składa się z:

- a) procesu odlewania,
- b) obróbki cieplnej i cieplno- chemicznej,
- c) powierzchniowej obróbki wykańczającej,
- d) obróbki strumieniowo - ścierniej.

2.4.1. Technologia wytwarzania półwyrobu Łopatek Turbiny Sprężarki.

Rozwój procesów wytwarzania części lotniczych już w latach 70-tych determinowany był głównie składem chemicznym oraz jednorodnością odlewów. W pierwotnej produkcji elementy turbiny, takie jak łopatki wirujące, były otrzymywane poprzez obróbkę plastyczną, głównie kucie. Pod koniec okresu II Wojny Światowej rozpoczęto próby odlewania elementów z nadstopów. Przełomowa okazała się wówczas metoda próżniowa w produkcji odlewów z nadstopów. Dzięki jej wykorzystaniu ostatecznie usunięto zanieczyszczenia oraz niepożądane tlenki, co pozwoliło kontrolować i zoptymalizować zmodyfikowany skład chemiczny stopów oraz odlewać elementy o bardziej skomplikowanych kształtach [45]. Łopatki Turbin Sprężarki I Stopnia omawiane w pracy doktorskiej **wytwarza się w procesie odlewania precyzyjnego, w warunkach próżni**. Odlewanie w warunkach kontrolowanego chłodzenia, przy zastosowaniu odpowiedniego gradientu temperatury na granicy rozdziału ciekłego i krystalizującego stopu, umożliwia uzyskanie łopatek charakteryzujących się ziarnem o wymagającej strukturze. Uzyskane w pracy wyniki badań własnych wykazały, że realizacja procesów odlewniczych w celach produkcyjnych gotowych elementów ze stopów na osnowie niklu charakteryzuje się wysokim stopniem trudności. Trudności technologii odlewania wynikają m.in. z niekorzystnych własności technologicznych tych stopów: obniżonej lejućności, dużego skurczu odlewniczego, a przede wszystkim z dużej reaktywności ciekłego metalu z atmosferą gazu nad kąpielą oraz z materiałem ceramicznym tygla i formy odlewniczej. Skala tych trudności wzrasta wraz z oczekiwanym ciągłym podwyższaniem własności użytkowych odlewów wytwarzanych z tych stopów, co determinowane jest dążeniem do doskonalenia i zwiększania wydajności w technologiach lotniczych, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej jakości odlewów. W warunkach wysokotemperaturowej eksploatacji, wzrost własności żarowytrzymałych elementów z nadstopów niklu uzyskuje się w wyniku oddziaływania pierwiastków umacniających roztworowo stop, a przede wszystkim dzięki wydzieleniom

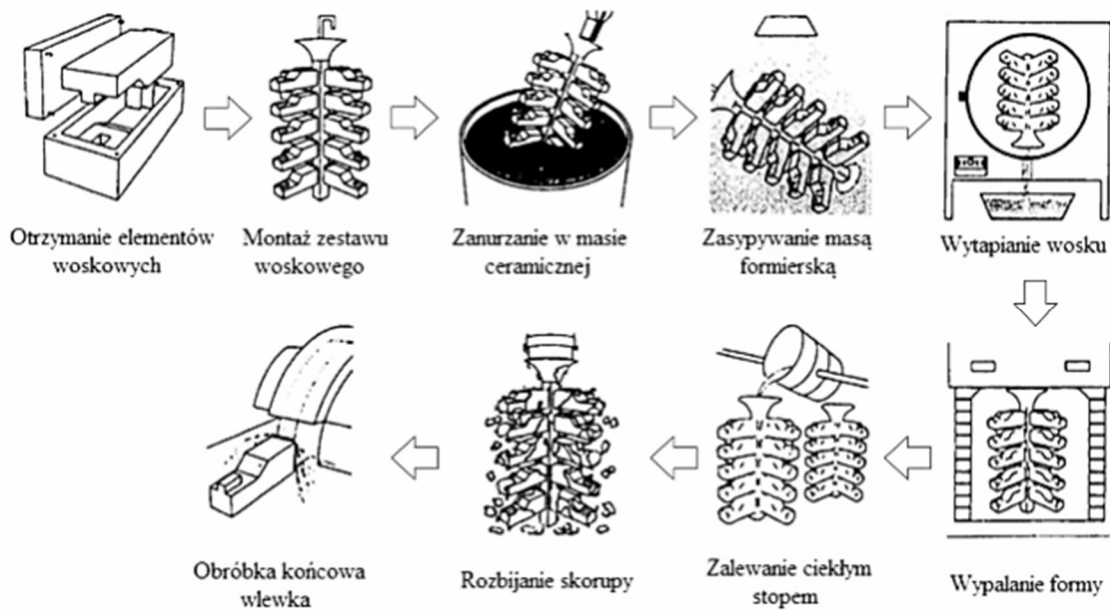
dyspersyjnym faz powstających w procesie wielostopniowej obróbki cieplnej. Fazy te tworzą silnie reaktywne pierwiastki, takie jak: aluminium, tytan, cyrkon, niob czy ren. Powinowactwo tych pierwiastków do tlenu stanowi jedną z trudności technologicznych w procesie wytapiania i odlewania produktów ze stopów na osnowie niklu. W stopie odlewniczym faza γ' jest równomiernie rozmieszczona w roztworze stałym, w postaci dyspersyjnych sferoidalnych cząstek wydzielających się na granicach ziarn. Podczas wolnego chłodzenia ze stanu ciekłego, w stopie wydzielają się węgliki $Me_n^1 Me_m^2 C$ oraz $Me_{23}C_6$. Dodatkowo, na granicach ziarn wydzielają się pierwotne węgliki tytanu TiC. Parametry procesu wytwarzania części lotniczych podlegają optymalizacji w zależności od przeznaczenia gotowych wyrobów. Łopatki Turbiny Sprężarki analizowane w pracy doktorskiej posiadają makrostrukturę o ziarnach równoosiowych. Parametry odlewania precyzyjnego modyfikowane są w zależności od warunków pracy łopatek.



Rys. 14. Makrostruktura łopatek z odlewniczego nadstopu niklu o ziarnach równoosiowych (a), kolumnowych (b), oraz monokrystaliczna (c). [29]

Technologia odlewania precyzyjnego wykorzystywana jest dla odlewów krytycznych elementów gorącej części silnika lotniczego, jak turbiny niskiego i wysokiego ciśnienia. Odlewanie precyzyjne pozwala uzyskać odlewy o geometrii charakteryzującej się niską tolerancją wymiarową oraz wykazujące niską wartość Ra chropowatości surowej powierzchni odwzorowanej przez formę. Stosowanie odlewania precyzyjnego pozwala na wyeliminowanie lub znaczne ograniczenie z cyklu produkcyjnego części lotniczych, procesów obróbki mechanicznej oraz na ograniczenie zużycia materiałów formierskich. W przemysłowym odlewnictwie precyzyjnym największe znaczenie ma **metoda wytapianych modeli woskowych**. Łopatki Turbiny Sprężarki I Stopnia, stanowiące przedmiot prowadzonych badań, wykonane zostały w procesie odlewania metodą wosku traconego. W technologii odlewania precyzyjnego z wykorzystaniem tej metody wyróżnić można następujące etapy:

- ⇒ Wykonanie modelu woskowego odlewu i układu wlewowego metodą wtryskiwania do form metalowych.
- ⇒ Budowa woskowego zestawu modelowego i wielowarstwowej formy ceramicznej, suszenie formy, usuwanie wosku, wypalanie pozostałości wosku po procesie wytapiania.
- ⇒ Wyżarzanie formy ceramicznej przed zalaniem ciekłym stopem.
- ⇒ Montaż ceramicznych filtrów piankowych w układzie wlewowym formy ceramicznej.
- ⇒ Topienie stopu (masterheat) w piecu próżniowym, w tyglu ceramicznym i zalanie formy ceramicznej stopionym stopem.
- ⇒ Obróbka poodlewnicza odlewów wybitych z formy ceramicznej.
- ⇒ Obróbka cieplna odlewów w atmosferze ochronnej gazów obojętnych lub w warunkach wysokiej próżni.
- ⇒ Kontrola jakości odlewów.



Rys. 15. Schemat kolejnych etapów odlewania precyzyjnego metodą traconego wosku [47].

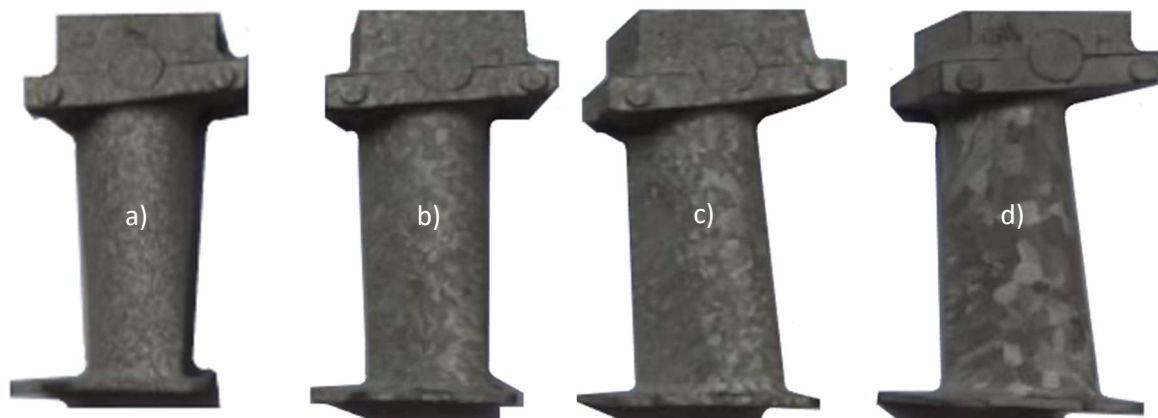
Jednorazowe modele woskowe pokrywane są w procesie wytwarzania formy ceramicznej masą ceramiczną i po jej związaniu – są wytapiane z formy w autoklawie, przy zastosowaniu pary wodnej pod wysokim ciśnieniem. Następnie, tak przygotowana forma jest wypalana w temperaturze ok. 1100°C, co umożliwi uzyskanie wysokiej wytrzymałości materiału ceramicznego i usunięcie z formy pozostałości materiału woskowego. W otrzymaną wnękę formy, po jej wypaleniu, wlewany jest ciekły stop w warunkach próżni. Odlewanie precyzyjne przy zastosowaniu form wytwarzanych w procesie wytapianych modeli stosowano w technologii produkcji elementów charakteryzujących się wysoką dokładnością, jak Łopatki Turbiny Sprężarki I Stopnia. Obecnie proces ten stosuje się przy wytwarzaniu elementów maszyn, rakiet, elementów turbin spalinowych, części uzbrojenia, elementów w przemyśle lotniczych czy samochodowym.



Rys. 16. Piec do kierunkowego odlewania firmy ALD – zdjęcie poglądowe [98].

Nikiel zawierający niewielkie ilości siarki jest bardzo kruchy [26]. Wykazano, że czysty nikiel mimo wysokich własności wytrzymałościowych, stabilnych w czasie eksploatacji w długim czasie w temperaturze do 500°C i wysokiej temperatury topnienia (1452°C) charakteryzuje się leżnością uniemożliwiającą stosowanie go w warunkach przemysłowych. Dodatki krzemu, manganu lub węgla nadają niklowi odpowiednie własności odlewnicze (przy braku negatywnego wpływu na jego odporność na korozję). Na odlewy w produkcji lotniczej stosuje się stopy niklu z dodatkami 1,0÷2,0% Si i 1,0÷1,5% Mn oraz domieszkowane do 0,3% C, do 0,03% S, 0,08÷0,1% Mg, do 1,0% Fe oraz do 0,3 % Cu. Topienie stopów niklu przeprowadza się najczęściej w piecach elektrycznych, o wyłożeniu zasadowym lub obojętnym, przede wszystkim indukcyjnych, średniej i dużej częstotliwości, a także łukowych, bezpośrednich. Niezależnie od sposobu topienia procesy powinny być prowadzone w warunkach próżni, gdyż ciekły nikiel wykazuje dużą skłonność do nadmiernego pochłaniania węgla, siarki i tlenu. Odtlenianie i odsiarczanie stopów niklu przeprowadza się metalicznym manganem (około 0,5% ciężaru wsadu metalowego) i metalicznym magnezem (około 0,1%). Mangan odtlenia stop, a magnez wiąże siarkę w MgS (zamiast Ni₃S₂), który jako lżejszy wpływa częściowo na powierzchnię kąpiel, skąd zostaje zebrany wraz z żużlem [26]. Temperatura zalewania nadstopów niklu do formy piaskowej wynosi 1500÷1600°C, do form grafitowych i kokili – powyżej 1600°C. Skurcz odlewniczy w formie piaskowej wynosi około 2%, a w kokili około 2,3% [26]. Składnikami negatywnie oddziałującymi na własności stopów niklu jest węgiel (przy zawartości powyżej 0,35%), siarka i ołów. Duży skurcz odlewniczy nadstopów wymaga stosowania odpowiednich nadlewów oraz zapewnienia swobodnego skurczu w formie. Układ wlewowy i sposób zasilania są podobne jak w odlewach staliwnych, przy czym skuteczne jest stosowanie nadlewów ciepło szczelnych oraz egzotermicznych. Odlewnicze nadstopy niklu charakteryzują się dużym oporem właściwym przy dużej żaroodporności i wytrzymałości w podwyższonej temperaturze. W niektórych nadstopach niklu żelazo zastępuje nikiel, co nie ma wpływu na obniżenie maksymalnej temperatury użytkowej elementu. Proces krystalizacji, w warunkach odlewania kierunkowego, odlewów łopatek o zmiennej grubości przekrojów może prowadzić do tworzenia w poszczególnych strefach różniących się polem przekroju, mikrostruktury charakteryzującej się odmiennym rozmiarem ziarna i zróżnicowaną morfologią składników fazowych. Jest to efekt fluktuacji energii swobodnej układu w obrębie frontu krystalizacji, która może prowadzić do powstawania defektów wzrostowych odlewu tworzących się w wyniku niesymetrycznych ruchów frontu, powodujących zmianę orientacji dendrytów utworzonych wewnątrz zróżnicowanych geometrycznie bloków odlewu. W celu uzyskania drobnoziarnistej mikrostruktury i wymaganych własności odlewanych elementów, stosuje się rozwiązania zapewniające podobne warunki krzepnięcia w całej objętości odlewu (dobór odpowiedniej technologii budowy formy). Przy złożonych kształtach i różnej grubości odlewów zastosowanie odpowiedniej konstrukcji formy nie rozwiązuje problemu zróżnicowanej mikrostruktury stopu, stąd opracowano rozwiązanie bazujące na modyfikowaniu substancją zarodkotwórczą – modyfikatorem wprowadzanym zarówno do ciekłego stopu, jak i warstwy wierzchniej formy mającej kontakt z ciekłym metalem. Mieszaninę modyfikatora z masą (zazwyczaj ceramiczną) nakłada się na model woskowy, jako wstępna warstwę formy. Najczęściej stosowanymi modyfikatorami w technologii odlewania precyzyjnego są związki chemiczne oparte na kobaltie, np. glinian kobaltu – CoAl₂O₄. Rozmiar ziarn jest determinowany zawartością modyfikatora w warstwie wierzchniej formy (rysunek 17). Wartość temperatury wygrzewania formy oraz temperatury ciekłego

metal w mniejszym stopniu wpływa na rozmiar ziarn odlewu. Natomiast efekt oddziaływania modyfikatora w odlewach o dużych przekrojach jest zdecydowanie mniejszy.



Rys. 17. Makrostruktura łopatek odlanych przy zastosowaniu różnych parametrów odlewania. Zastosowano modyfikację warstwy wierzchniej formy poprzez użycie dodatku glinian kobaltu – CoAl_2O_4 w ilości:

a) 1%, b) 2%, c) 5%, d) 10%.

Uzyskanie gruboziarnistej mikrostruktury wiąże się z obniżeniem własności zmęczeniowych łopatek turbiny sprężarki. Najbardziej niebezpiecznym zjawiskiem jest otrzymanie tzw. ziarn kolumnowych w obszarze zamka łopatki. Nadstopy na osnowie niklu są podatne na uszkodzenia wynikające z naprężeń zmęczeniowych o niskim cyklu, w warunkach pracy w wysokiej temperaturze i oddziaływania naprężeń mechanicznych. Prognozowanie trwałości zmęczeniowej ma kluczowe znaczenie dla niezawodnego praktycznego zastosowania odlewów z nadstopów niklu. Wykazano, że trwałość zmęczeniowa zmniejsza się wraz ze wzrostem amplitudy odkształcenia i wielkości ziarna [37]. W przypadku uzyskania makrostruktury gruboziarnistej (jak ziarno kolumnowe) stop łatwo kumuluje naprężenia, co w efekcie powoduje obniżenie finalnych własności wytrzymałościowych wyrobu. Produkcja współczesnych turbinowych silników lotniczych należy do skomplikowanych procesów wymagających stosowania zaawansowanych technik w czasie opracowywania konstrukcji wszystkich elementów i oprzyrządowania silnika, ich procesu wytwarzania gwarantujących prawidłową i bezpieczną ich eksploatację.

2.4.2. Obróbka cieplno-chemiczna Łopatek Turbiny Sprężarki.

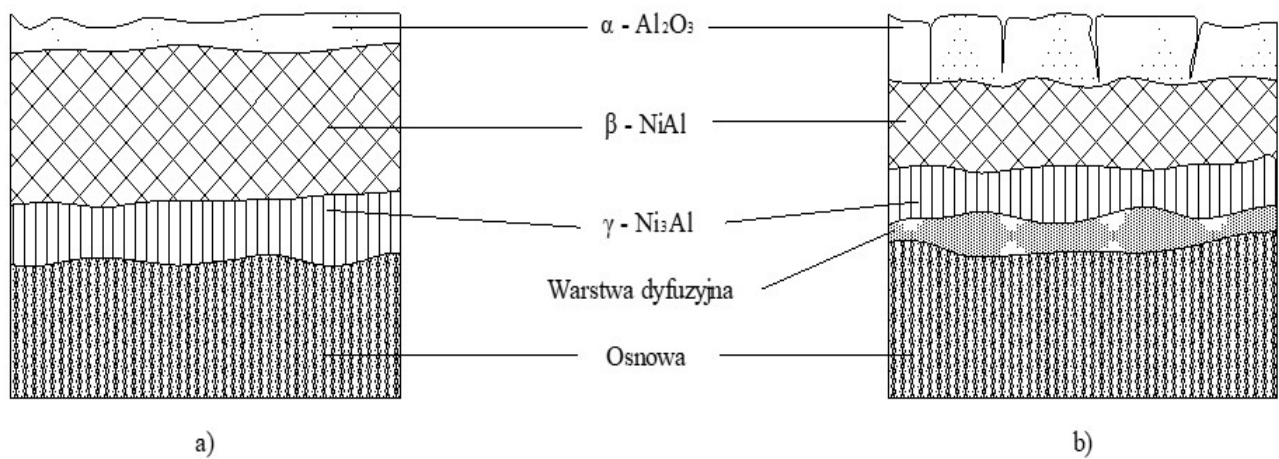
Jak wskazano powyżej, od łopatek turbiny wymagana jest wysoka odporność na naprężenia zmiennie-cykliczne, wysoką temperaturę oraz odporność na korozję w trakcie eksploatacji w warunkach oddziaływania ciśnienia silnie korozyjnych gazów spalinowych. Stąd odlewy łopatek poddawane są zabiegom obróbki cieplnej oraz cieplno-chemicznej zapewniającym uzyskanie wymaganych własności. Odlewy łopatek, bezpośrednio po krystalizacji mogą posiadać defekty strukturalne, których obecność prowadzi do: obniżenia własności wytrzymałościowych przyspieszonych przegrzaniem materiału, pełzaniem, a także działaniem naprężeń mechanicznych. Dlatego bardzo ważna jest znajomość mechanizmów powstawania wad oraz uszkodzeń w materiale, prowadzących do stopniowej degradacji mikrostruktury łopatki, ale i również powierzchni w wyniku działania procesów korozji oraz erozji. Niekorzystne warunki eksploatacji lub wady produkcyjne np. nieodpowiednia temperatura

przesycania stopu, nieprawidłowo wykonany proces wytwarzania warstw żaroodpornych i powłok ceramicznych mogą decydować o długości czasu eksploatacji łopatek turbiny, jak i również bezpieczeństwie lotu samolotu. Reakcja warstw i powłok, jak i również materiału na obciążenia mechaniczne i cieplne zależy głównie od temperatury pracy łopatek. Dobór odpowiedniej technologii warstwy i powłoki ochronnej, ale i również stopu wymaganych do wytworzenia łopatki, która ma charakteryzować się zakładaną trwałością musi uwzględniać zakładane, finalne własności mechaniczne i odporności na obciążenia cieplne w strefie maksymalnego oddziaływania temperatury w komorze turbiny na pióro łopatki. Nie jest zatem możliwe ciągle podwyższanie temperatury pracy łopatek turbin gazowych z nadstopów niklu, zapewniającej znaczny wzrost efektywności działania turbin, z uwagi na ograniczenia materiałowe wynikające z obniżania własności żarowytrzymałych nadstopów wraz ze wzrostem temperatury eksploatacji. Stąd, zwiększenie trwałości nadstopów uzyskuje się poprzez osadzanie na powierzchni łopatek powłok ochronnych zapewniających odporność elementów na zużycie ścierne, erozyjne, fretting, korozję oraz zmęczenie cieplne. W celu zwiększenia odporności materiału łopatek wirnika turbiny na działanie wysokiej temperatury i korozyjne działanie spalin stosuje się m.in. proces aluminiowania.

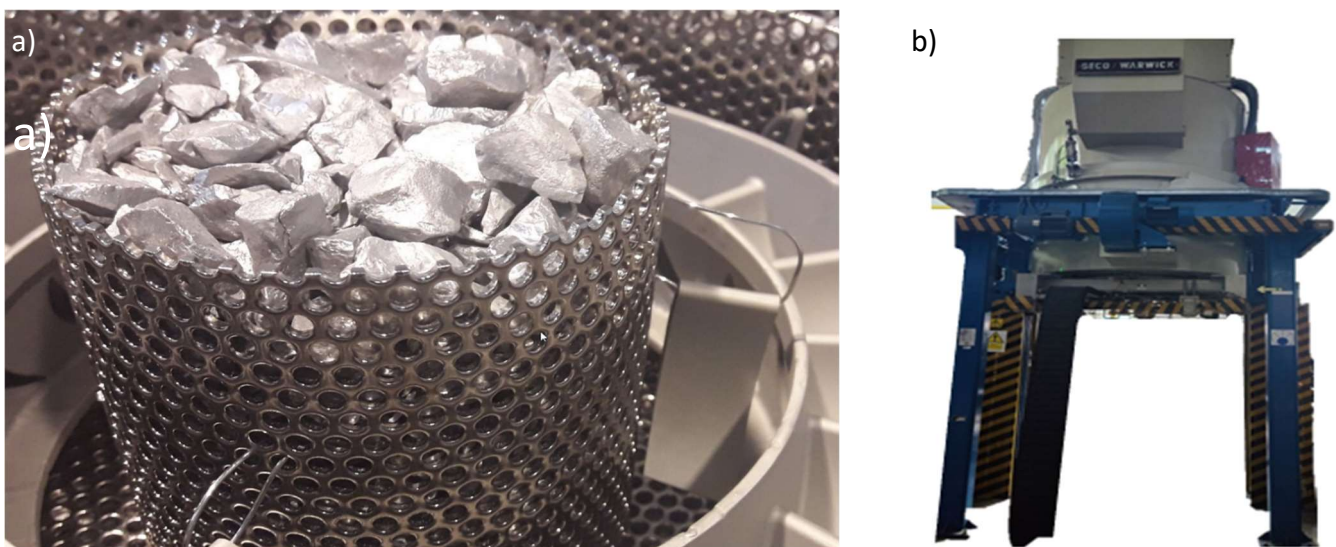
a) Aluminiowanie.

Zastosowanie warstw i powłok ochronnych wytwarzanych na powierzchni elementów części gorącej silnika, zapewnia skuteczną ochronę podłoża przede wszystkim łopatek pierwszego i drugiego stopnia turbiny wysokiego ciśnienia przed działaniem strumienia gorących gazów oraz destrukcyjnego oddziaływania korozyjnego środowiska produktów spalania, głównie tlenków azotu. Jednocześnie umożliwia to podwyższanie temperatury pracy najbardziej obciążonych cieplnie elementów silnika. Warstwy i powłoki powinny charakteryzować się przede wszystkim małą wartością współczynnika przewodności cieplnej i wysoką stabilnością własności fizycznych i mechanicznych w długim okresie użytkowania, w warunkach obciążeń cieplnych (szoków cieplnych). W technice lotniczej, w zależności od prognozowanych warunków pracy elementu (np. łopatki turbiny), zwykle warstwy dyfuzyjne wytwarzane w procesie aluminiowania zapewniają kilkukrotne wydłużenie czasu pracy materiału w agresywnej atmosferze w wysokiej temperaturze. Zaprojektowanie odpowiedniej warstwy powierzchniowej pracującego elementu determinuje możliwość pracy materiału w podwyższonej temperaturze. Stąd, większość materiałów pracujących w agresywnej atmosferze w wysokiej temperaturze wymaga stosowania barier zapobiegających nadmiernej degradacji powierzchni w wyniku utleniania w warunkach obciążeń mechanicznych w długim okresie czasu. Wynikiem procesu aluminiowania jest najczęściej warstwa, w skład której wchodzi fazy międzymetaliczne z układu Ni-Al, Fe-Al lub Ti-Al (aluminidki), które charakteryzują się wysoką odpornością na utlenianie. W warunkach utleniających tworzy się również na nich ochronna powłoka tlenku glinu Al_2O_3 . Dobór składu fazowego warstwy ochronnej dla wybranego materiału na łopatek o zakładanej trwałości, powinien uwzględniać własności mechaniczne i cieplne w strefie maksymalnego oddziaływania temperatury i ciśnienia gazów spalinowych, tj. pióra. Proces aluminiowania może być prowadzony w środowisku stałym, ciekłym lub gazowym. Do aluminiowania w środowisku stałym stosuje się aluminium, tlenek aluminium, żelazoglin, kaolin oraz chlorek amonu w postaci granulatu proszkowego. Proces aluminiowania prowadzony jest w temperaturze $850\div 1050^\circ C$ w atmosferze azotu lub wodoru. Czas obróbki cieplnej wynosi od 1 do 3 godzin (w przypadku aluminiowania części o małych gabarytach) i od 10 do 14 godzin (dla części o dużym przekroju). Do prowadzenia procesów aluminiowania

w środowisku gazowym stosuje się retorty, w których umieszczona jest mieszanka aluminium (45%), tlenku glinu (45%) i chlorku amonowego (10%). Proces prowadzony jest w atmosferze gazu ochronnego: azotu lub wodoru w temperaturze $900\div 1050^{\circ}\text{C}$, w czasie 2 h. **Proces aluminowania materiału ŻS6U-WI** przeprowadza się w temperaturze 1000°C . Czas trwania procesu, ilość granulatu oraz aktywatora (AlFe_3) uzależniony jest również od wymaganej grubości aluminowanej warstwy wierzchniej na detalach. Do utworzenia żaroodpornej warstwy ochronnej na polikrystalicznych łopatkach odlanych ze stopu ŻS6U-WI stosowana jest mieszanka składająca się z: Al ($42\div 46\%$) i Cr ($54\div 58\%$) oraz dodatków takich jak Bi, C, Co, Fe, Pb, Mn, Ni, N czy Si. Po wykonaniu procesu aluminowania warstwa poddawana jest ocenie pod względem: wizualnym, głębokości, procentowej zawartości aluminium na powierzchni, możliwości wystąpienia efektów utlenienia oraz oceny składu fazowego. Ważne jest zachowanie odpowiednich wytycznych procesu tworzenia warstwy ze względu na jej odporność w warunkach eksploatacyjnych (rys. 18).



Rys. 18. Przekrój wyrobu po procesie aluminowania: warstwa przed a), warstwa po długotrwałej eksploatacji b).



Rys. 19. a) Mocowanie części przed wykonaniem procesu aluminowania b) piec do aluminowania.



Rys. 20. Mufla do procesów aluminiowania Łopatek Turbiny.

W celu obniżenia kruchości warstwy alumidkowej, po aluminiowaniu łopatki poddaje się wyżarzaniu dyfuzyjnemu w temperaturze $900\div 1050^{\circ}\text{C}$ przez 3 do 5 godzin. Po dodatkowym procesie wyżarzania dochodzi do nieznacznego zwiększenia grubości warstwy spowodowanej wydłużonym czasem dyfuzji atomów aluminium do podłoża [50]. Oprzyrządowanie oraz urządzenia stosowane w procesie aluminiowania przedstawiono na rysunku 19 oraz 20.

b) Wyżarzanie.

Odlewy Łopatek Turbiny Sprężarki poddawane są procesom obróbki wykańczającej, które mają na celu uzyskanie wymaganych własności użytkowych i jakościowych. Proces produkcyjny łopatek w formie odlewów składa się z obróbki mechanicznej, tj. szlifowania, frezowania i polerowania. Zabiegi powierzchniowej obróbki wykańczającej powodują wprowadzenie do materiału Łopatki Turbiny Sprężarki naprężeń rozciągających, które mogą odpowiadać za powstawanie pęknięć w trakcie ich eksploatacji. W celu usunięcia naprężeń wewnętrznych, łopatki poddawane są procesowi obróbki cieplnej, tj. wyżarzaniu. Łopatki Turbiny Sprężarki wytwarzane z żarowytrzymałego nadstopu na osnowie niklu ŻS6U-WI, przechodzą proces wyżarzania w temperaturze 1000°C w czasie 2h, w warunkach próżni (tzw. trawienie termiczne). Po tym zabiegu, stanowiącym ostatni etap produkcji, Łopatki Turbiny Sprężarki poddawane są kontroli fluoroscencyjnej.

2.4.3. Obróbka strumieniowo-ścierna Łopatek Turbiny Sprężarki .

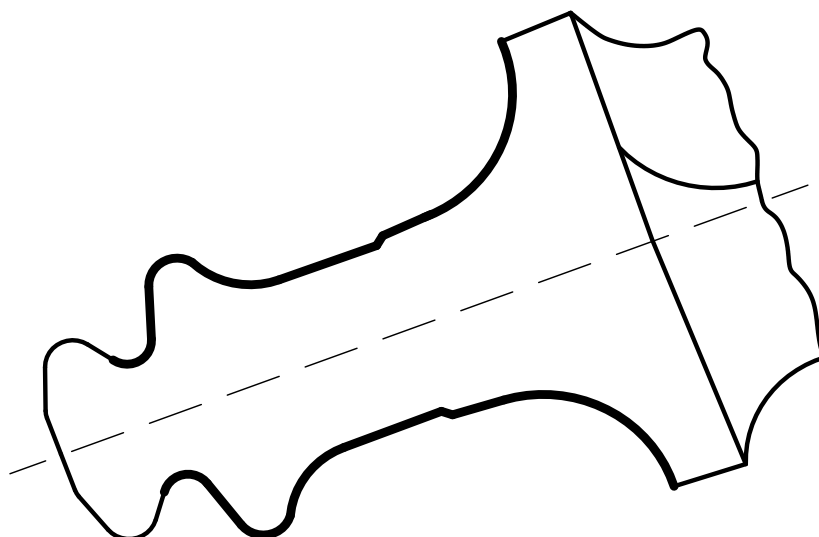
Jedną z przyczyną zniszczenia zmęczeniowego łopatek mogą być naprężenia rozciągające w materiale powstałe w wyniku oddziaływania zewnętrznych obciążeń lub naprężeń wewnętrznych powstałych podczas realizacji procesów stanowiących element technologii wytwarzania gotowych wyrobów. Do tych procesów należą m.in. procesy powierzchniowej obróbki wykańczającej Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia (polerowanie, szlifowanie, frezowanie).

Powstałe wewnętrzne naprężenia rozciągające sprzyjają inicjowaniu i propagacji mikropęknięć materiału w trakcie jego eksploatacji, zwłaszcza w warunkach oddziaływania

wysokiej temperatury. Procesem obróbki strumieniowo-ścierniej, prowadzonym w celu poprawy własności wierzchniej warstwy produktu (co ma wpływ na jego odporność na naprężenia zmęczeniowe), jest kulowanie strumieniowe. Kulowanie strumieniowe to ekonomiczna i niewymagająca stosowania skomplikowanego i bardzo drogiego oprzyrządowania metoda obróbki plastycznej na zimno wyrobów ze stopów niklu. Pozwala na wytworzenie w warstwie wierzchniej produktu metalicznego szczątkowych naprężeń ściskających. Kulowanie (ang. *shot-peening*) powoduje umocnienie odkształceniowe powierzchni obrabianych przedmiotów i poprawę ich własności wytrzymałościowych, zwłaszcza wytrzymałości zmęczeniowej. W celu uzyskania zakładanych własności łopatek, które mają stanowić główny element układu stanowiącego turbinę gwarantującą osiągnięcie zakładanej mocy silnika, przy jednoczesnym zapewnieniu bezpieczeństwa pracy, wymagane jest prowadzenie prac zmierzających do optymalizacji parametrów procesu kulowania. Badania i prace empiryczne mają głównie na celu ocenę wpływu parametrów kulowania (m.in. ciśnienia, czasu kulowania, wielkości i rodzaju ścierniwa, odległości dyszy itd.) na własności zmęczeniowe gotowego produktu.

Proces kulowania strumieniowego polega na przekazywaniu do obrabianej powierzchni materiału metalicznego energii kinetycznej, przez rozpędzone pod wpływem działania ciśnienia roboczego kulki (śrut) nagniatające, co powoduje zmiany w materiale w postaci odkształcenia plastycznego i sprężystego. Ma to wpływ na m.in. wzrost wartości naprężeń własnych na powierzchni materiału. Istnienie odkształceń sprężystych jest możliwe w wyniku blokady ich odprężenia poprzez oddziaływanie odkształconej plastycznie warstwy wierzchniej. Zatem, występują głównie pod powierzchnią odkształconej w wyniku kulowania strefy przypowierzchniowej materiału. Celem kulowania jest wytworzenie takiego stanu warstwy wierzchniej w materiale obrabianym, który nada jej odpowiednią wartość zgniotu, na danej głębokości, co spowoduje powstanie korzystnego rozkładu naprężeń własnych, głównie o charakterze ściskającym.

Badanie procesu odpowiedzialnego za umacnianie warstwy wierzchniej w wyniku stosowania obróbki powierzchniowej – kulowania, umożliwia ocenić wpływ tej metody na doskonalenie konstytuowania własności warstwy wierzchniej części silnika, w tym przypadku łopatek turbiny obciążonych zmęczeniowo w czasie eksploatacji. Proces ten należy do technologii specjalnych, wykończeniowych, w których własności użytkowe obrabianych powierzchni są kształtowane przez zjawiska fizyczne zachodzące podczas kulowania przy zastosowaniu zróżnicowanych parametrów procesowych. Wszystkie stosowane media używane do procesu kulowania muszą mieć kulisty kształt. Uderzenia kulistych ziaren śrutu powodują powstanie wgłębień na powierzchni prowadzących do wytworzenia stanu naprężeń ściskających, który zapobiega i opóźnia procesy powstawania mikropęknięć na obrabianych powierzchniach. Naprężenia te wpływają również na poprawę odporności na korozję, w tym na odporność na zużycie ścierno-korozyjne (ang. *fretting*) oraz zużycie wykruszające (ang. *pitting*). Uzyskanie najlepszych i powtarzalnych własności użytkowych i jakościowych serii łopatek możliwe jest poprzez zastosowanie automatycznego procesu kulowania. Stąd, dążenie do standaryzacji procesu zmierzającego do opracowania najlepszych parametrów wieloaspektowej optymalizacji obróbki kulowania.



Rys. 21. Obszary Łopatki miejsc podlegające kulowaniu (linia pogrubiona).

Efekty kulowania mierzymy poprzez:

- **pomiar intensywności naprężeń** - wartość naprężeń wewnętrznych w warstwie wierzchniej elementu, powstałych w wyniku prowadzenia procesu kulowania,
- **pomiar powierzchni pokrycia** (stosunek rzeczywistego pola powierzchni kulowanej, do pola powierzchni całkowitej, która miała zostać poddana obróbce kulowania).

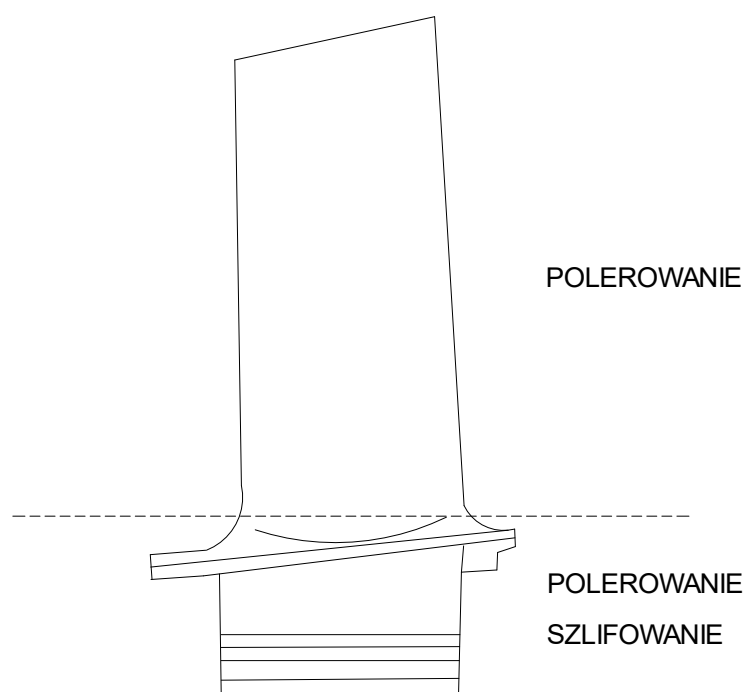
Do pomiaru intensywności stosuje się tzw. płytki Almena (Typ A, N oraz C). Płytki Almena są to paski blachy o znormalizowanych wymiarach, grubości i twardości. Płytki montowane są do wzornika części i zostają poddane obróbce kulowaniem z zdefiniowanymi wstępnie parametrami, dlatego najważniejszym aspektem podczas kulowania jest utrzymanie stałych parametrów obróbki: rodzaj, twardość i granulacja śrutu, prędkość wylotowa śrutu (ciśnienie robocze lub prędkość turbin), ilość wyrzucanego śrutu, położenie detalu względem dysz lub turbin oraz czas ekspozycji.

Dodatkowo, zarówno półwyroby jak i sam detal (Łopatki Turbiny Sprężarki I Stopnia) na etapie produkcji poddaje się procesowi piaskowania elektrokorundem 220. Piaskowanie stosowane jest w celu czyszczenia powierzchni ze zgorzeliny oraz zanieczyszczeń powstałych w czasie prowadzonych działań w ramach procesu odlewania i obróbki mechanicznej. Proces piaskowania ma również na celu aktywowanie powierzchni odlewów łopatki przed wykonaniem procesu obróbki cieplno-chemicznej (aluminiumowania).

2.4.4. Obróbka powierzchniowo wykańczająca stosowana na Łopatkach Turbiny Sprężarki.

W procesie wytwarzania Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia stosowane są zabiegi powierzchniowej obróbki wykańczającej. tj.: **szlifowanie, frezowanie oraz polerowanie**. Łopatki w zależności od rodzaju turbiny mogą różnić się kształtem i wymiarami. Wysokość typowych łopatek turbiny mieści się w zakresie od 60 do 250 mm. Cechą charakterystyczną wirnikowych łopatek turbinowych jest kształt zamka. Większość stosowanych w technice lotniczej łopatek turbiny wyposażonych jest w zamek wielotrapezowy (tzw. jodełkowy), który za pomocą od 2 do 5 par “zębów” przekazuje równomiernie obciążenie na tarczę turbiny. Zamek wykonywany jest z dokładnością większą niż $\pm 0,01$ mm [28].

Łopatkę silnika lotniczego pracują poprawnie w przypadku, gdy jest zapewniony idealny kontakt powierzchni zamkowej łopaty i tarczy, co decyduje o wysokiej zdolności tłumienia drgań, które mogą inicjować ogniska pęknięć zmęczeniowych i mogą przyczynić się do uszkodzenia trzonu łopaty i występu tarczy. Badania dynamiczne, zmęczeniowe połączeń łopatek w wieńcu, wykazały, że drgania, dla wszystkich typów łopatek, bez względu na ich geometrię, nie zanikają w obszarze stopy łopaty, ale propagują w głąb połączenia zamkowego, co ostatecznie może prowadzić do wystąpienia zjawisku frettingu [38]. Stąd, bardzo ważne jest zapewnienie równomiernego podziału obciążenia elementów profilu zamka łopaty, w sposób gwarantujący właściwy kontakt powierzchni zamkowej z powierzchnią tarczy, w której mocowane są łopaty. Kontakt powierzchni elementów mocujących łopaty realizowany jest poprzez sprężysto-plastyczne odkształcenia w jej warstwie wierzchniej, wynikające z tworzących się w trakcie technologii wytwarzania łopaty uszkodzeń powierzchni, chropowatości, naprężeń wewnętrznych, stopnia umocnienia powierzchni, uzależnionych technologicznych procesów obróbki powierzchni kontaktowych— obróbka mechaniczna, aluminiowane itp. Rodzaj zamka łopaty dobiera się w zależności od jego przeznaczenia, lokalizacji, stopnia turbiny i sprężarki oraz warunków pracy. Przy wyborze metody obróbki zamka należy uwzględnić własności użytkowe żarowytrzymałych materiałów, ich obrabialność oraz dokładność wzajemnego położenia powierzchni połączeń zamkowych o rozbudowanym profilu. Obecnie w produkcji Łopatek Turbiny stosuje się m.in. metody: obróbki skrawaniem (frezowanie), obróbki elektrochemicznej i elektroerozyjnej. W praktyce produkcji lotniczej zamki łopatek najczęściej są kształtowane w procesie szlifowania głębokiego. Wymaga to jednak stosowania specjalnych, bardzo drogich szlifierek o dużej mocy, a także stosowania ściernic o odpowiedniej, dostosowanej do geometrii i wymagań detalu charakterystyce. Prowadzone procesy obróbki wykańczające w obszarach łopaty, w których stosowane są naddatki materiałowe muszą gwarantować odpowiednią ekonomię technologii, co wymaga niskiej czasochłonności prac, minimalnych naddatków i niskich kosztów obróbczych.



Rys. 22. Rodzaje obróbki mechanicznej stosowane na Łopatkach Turbiny Sprężarki I Stopnia.

Walidacja metody obróbki zamków łopatek w przemyśle lotniczym realizowana jest w kontekście weryfikacji mikrostruktury warstwy wierzchniej w odniesieniu do określenia możliwości występowania mikropęknięć oraz oceny wartości naprężeń własnych w warstwie wierzchniej obrabianego elementu łopatki.

2.5. Problemy technologiczne i eksploatacyjne Łopatek Turbiny Sprężarki.

Silniki turbinowe eksploatowane są w warunkach zmiennych obciążeń dynamiczno-cieplnych. Ocenę stanu technicznego części wewnętrznej poszczególnych stref silnika, z uwzględnieniem oceny jakości powierzchni elementów odpowiedzialnych za prawidłową pracę całego systemu jakim jest jednostka silnikowa, prowadzi się na podstawie badań porównawczych z wynikami prowadzonych wcześniej inspekcji tego samego silnika. W dokumentacji serwisowej przechowywane są również wzorce odniesienia, które stanowią cenne źródło informacji na temat zużycia poszczególnych elementów silnika. Wyniki analiz, badań, pomiarów gromadzone są w cyfrowych bazach danych i poddawane są systematycznym analizom. Zapewnia to subiektywne określenie (na podstawie wiedzy i doświadczenia diagnosty) dopuszczalnego poziomu ryzyka wystąpienia uszkodzenia krytycznego. Stanowi to źródło zagrożeń i niepewności w podjęciu prawidłowej decyzji, co do sposobu dalszego postępowania z diagnozowanym obiektem. Ważna jest, na każdym etapie prowadzonych działań inspekcyjnych, detekcja wady i opis procesu jej powstawania, umożliwiający odróżnienie jej od wad powstających w wyniku błędów konstrukcyjnych, czy nieprawidłowej eksploatacji, co pozwoli na określenie źródła ich inicjacji w stosowanej technologii wytwarzania bądź powstałych w trakcie remontu obserwowanego podzespołu. Do głównych przyczyn powodujących przedwczesne eliminowanie maszyn z eksploatacji należą uszkodzenia: pęknięcie zmęczeniowe, odkształcenie mechaniczne i cieplne, przegrzanie i przypalenia czy korozja chemiczna i/lub wysokotemperaturowa oraz erozja mechaniczna i gazowa. Brak wykrycia w odpowiednim momencie tych wad może stanowić zagrożenie dla użytkowników maszyn silnikowych.

Wysoka niezawodność silników turbinowych wynika z:

- osiągnięć nauki o aerodynamice przepływów (pozwalających optymalizować kształt łopatek i kanałów przepływowych silników),
- stosowania nowych i wytrzymalszych materiałów konstrukcyjnych,
- wykorzystania technik komputerowych do sterowania i kontrolowania stanu technicznego silników,
- zastosowania najnowszych technologii wytwarzania części i podzespołów – ciągłe ulepszanie procesów. [39]

Z uwagi na charakter pracy Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia stosowanych w produkcji lotniczej ważne jest określenie wpływu czynników produkcyjnych na własności zmęczeniowe finalnego produktu przeznaczonego do eksploatacji. Zmęczenie jest zjawiskiem stopniowej degradacji wytrzymałości materiału, czyli osłabiania sił kohezji, w warunkach działania (zmiennych w czasie) naprężeń normalnych lub statycznych albo ich interakcji w określonym punkcie przekroju poprzecznego.

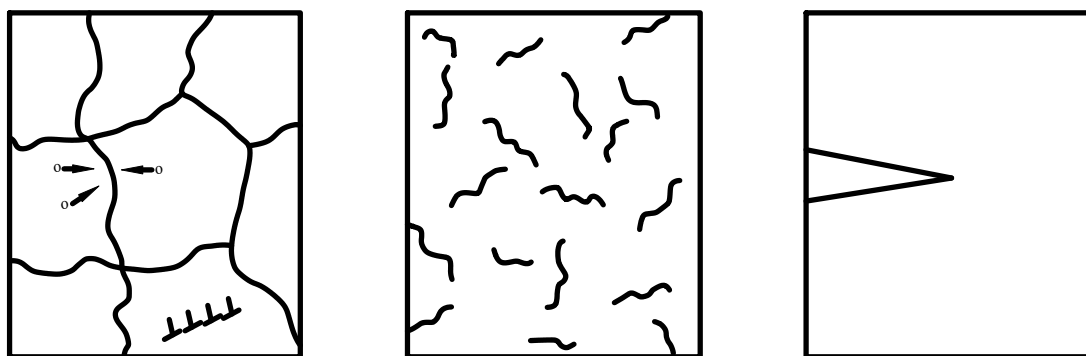
Czynniki wpływające na wytrzymałość zmęczeniową:

- a) **Wpływ koncentracji naprężeń** – w miejscu zmiany przekroju poprzecznego i obszarach naruszenia ciągłości materiału występuje zmiana rozkładu naprężeń, powodująca ich lokalny wzrost powyżej wartości nominalnej (wynikającej z obliczeń). Takie zjawisko określa się jako działanie karbu. W obszarach karbu powstaje trójosiowy stan naprężeń, hamujący zdolność materiału do odkształcania się w kierunku obciążenia.
- b) **Karb** – parametrem charakteryzującym karb jest jego kształt. Kształt karbu w elemencie ma wpływ na jego wytrzymałość zmęczeniową. Im ostrzejszy, tym szybciej dochodzi do inicjowania pęknięcia, a tym samym wytrzymałość zmęczeniowa elementu maleje.
- c) **Wpływ rodzaju obróbki i stanu warstwy wierzchniej** – każdy rodzaj obróbki stanu warstwy wierzchniej materiału ma wpływ na wytrzymałość zmęczeniową materiału. Nierówność powierzchni powstała na skutek obróbki skrawaniem lub w toku procesów walcowania albo odlewania należy traktować jako mikro-karby, które w znacznym stopniu obniżają własności zmęczeniowe materiału. Wpływ obróbki i stanu powierzchni opisuje się współczynnikiem β_p – jako stosunek wytrzymałości zmęczeniowej próbki gładkiej (polerowanej) Z_{gl} do jej wytrzymałości po obróbce Z_p :
$$\beta_p = \frac{Z_{gl}}{Z_p}$$
- d) Nieskorygowany **błąd konstrukcyjny łopatek** (niewłaściwie odstrojenie łopatek od wymuszeń synchronicznych w zakresie startowych).
- e) **Wady materiału** (wady produkcyjne, drobne defekty powierzchniowe), będące źródłem ryzyka przyśpieszonego zmęczenia materiału.
- f) **Symptomy narastającego zmęczenia materiału** (zmiany fazowe mikrostruktury, mikro- i makro- pęknięcia, naprężenia własne). [39]

Wytrzymałość zmęczeniową materiału można zwiększyć poprzez stosowanie zabiegów mechanicznych czy cieplnych. Zabiegi mechaniczne doprowadzające do zgniotu warstwy wierzchniej to między innymi: kulowanie. Obróbka cieplna to przede wszystkim przesycanie i wyżarzanie odprężające. Przyśpieszone zmęczenie materiału związane jest zawsze z dwoma czynnikami: **sprawczym** (bezpośrednią przyczyną zmęczenia) i **sprzyjającym** inicjacji zmęczenia. W przypadku wirujących łopatek m.in. sprężarki:

- **Czynnikiem sprawczym** jest nadmierne wytężenie materiału wywołane przez:
 - obciążenia eksploatacyjne występujące podczas pracy silnika i lotu samolotu (źródło naprężeń eksploatacyjnych);
 - naprężenia własne wprowadzone na etapie produkcji łopatki i efekty kumulacji historii obciążeń (nieobserwowane),
- **Czynnikami sprzyjającymi** są m.in. zmiany erozyjne powierzchni piór (loty w dużym zapyleniu), uszkodzenia łopatek przez drobne ciała obce (FOD), częste zmiany prędkości obrotowych i przeciążeń, loty przy dużych kątach natarcia oraz błędy eksploatacyjne, remontowe, produkcyjne

Cykl życia łopatki sprężarki przedstawiono na rysunku nr 23.



Etap I

Etap II

Etap III

Zmiany mikrostruktury:

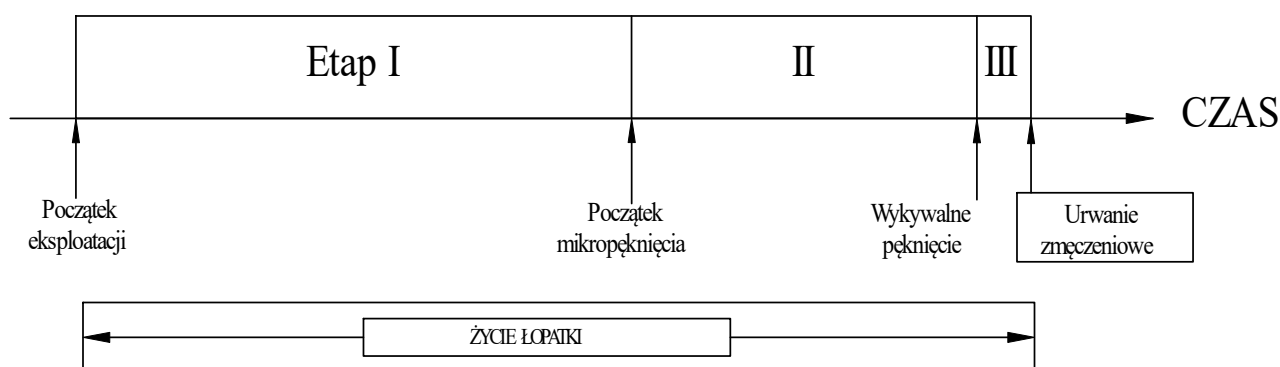
- dyfuzja
- ruch dyslokacji
- zmiana granic ziaren

Rozwój mikropęknięć:

- nukleacja
- wzrost mikrouszkodzeń
- łączenie mikrouszkodzeń

Rozwój makropęknięcia:

- Faza I (krótkie pęknięcie)
- Faza II (propagacja)
- Faza III (dołom)

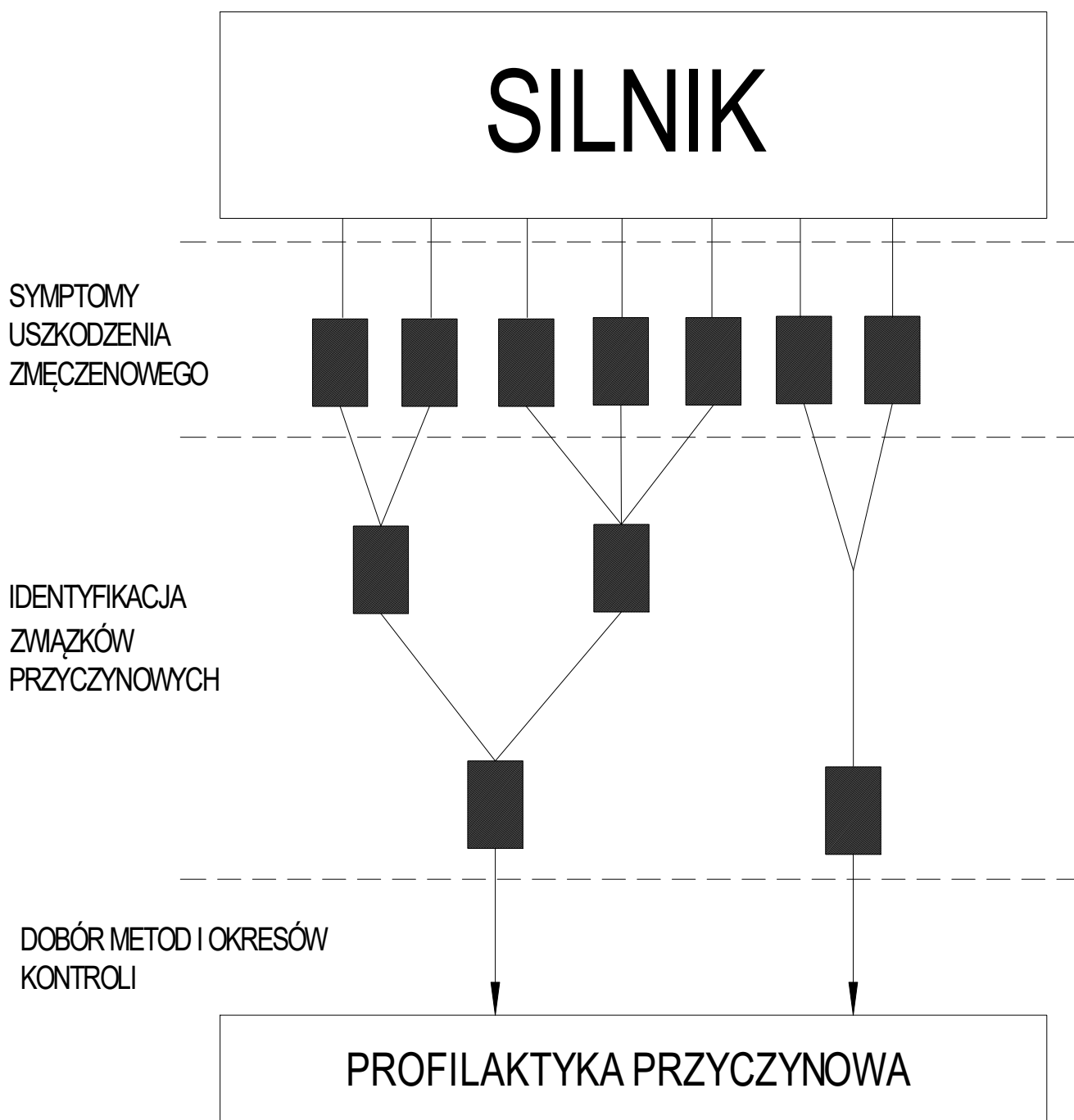


Rys. 23. Cykl życia łopatki sprężarki. [39]

Ocena ryzyka pęknięcia zmęczeniowego i skuteczna profilaktyka łopatek sprężarki wymaga nie tylko zrozumienia problemu badawczego, ale również umiejętności obserwacji nowych, subtelnych symptomów diagnostycznych wynikających z budowy materiału w skali makro, mikro i atomowej. Poziom wyężenia materiału i kumulacji zmęczenia uwarunkowany jest przez:

- Źródło** – widmo wymuszeń eksploatacyjnych generowanych przez różne zjawiska dynamiczne oraz technologie wytwarzania łopatki.
- Ścieżkę** – sposób transferu niszczącej postaci energii od źródła do obiektu.
- Obiekt:**
 - Własności modalne łopatki,
 - Cechy geometryczne łopatki, w tym współczynniki spiętrzenia naprężeń na lokalnych zmianach przekroju poprzecznego,
 - Własności mechaniczne, wynikające m.in. z typu materiału (stopu) stosowanego w technologii,
 - Historie obciążeń.

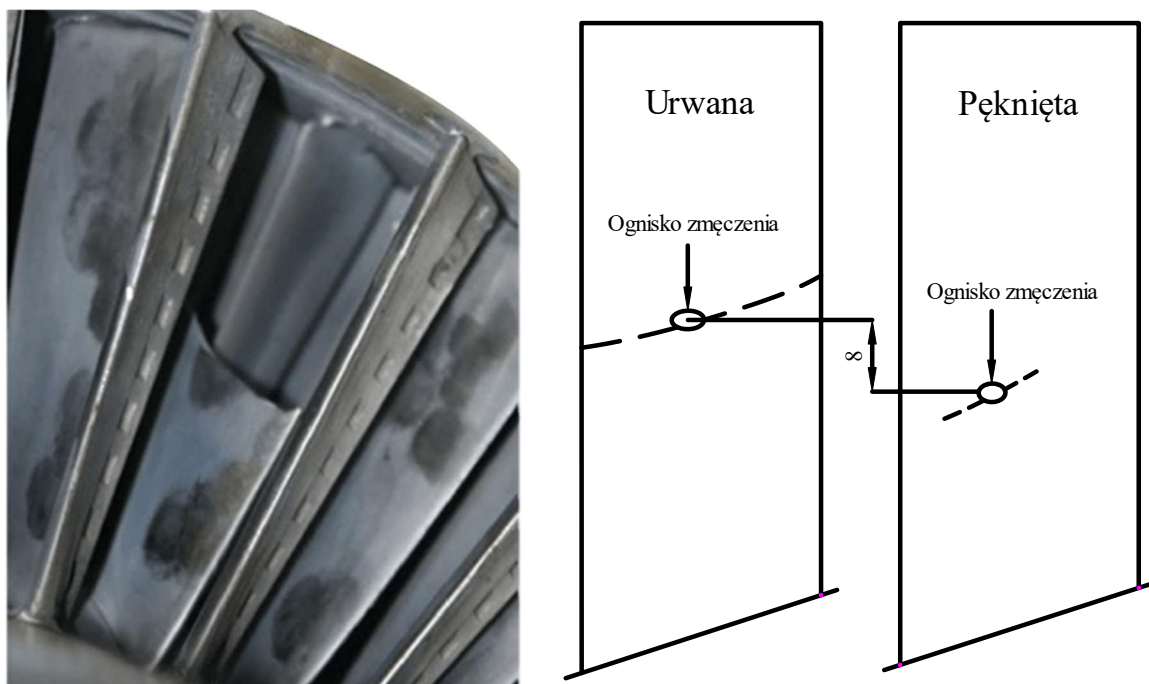
Do wiarygodnej identyfikacji i prognozowania stanu technicznego łopatki niezbędne jest kompleksowe podejście do problemu przedstawione schematycznie na rysunku nr 24 [39].



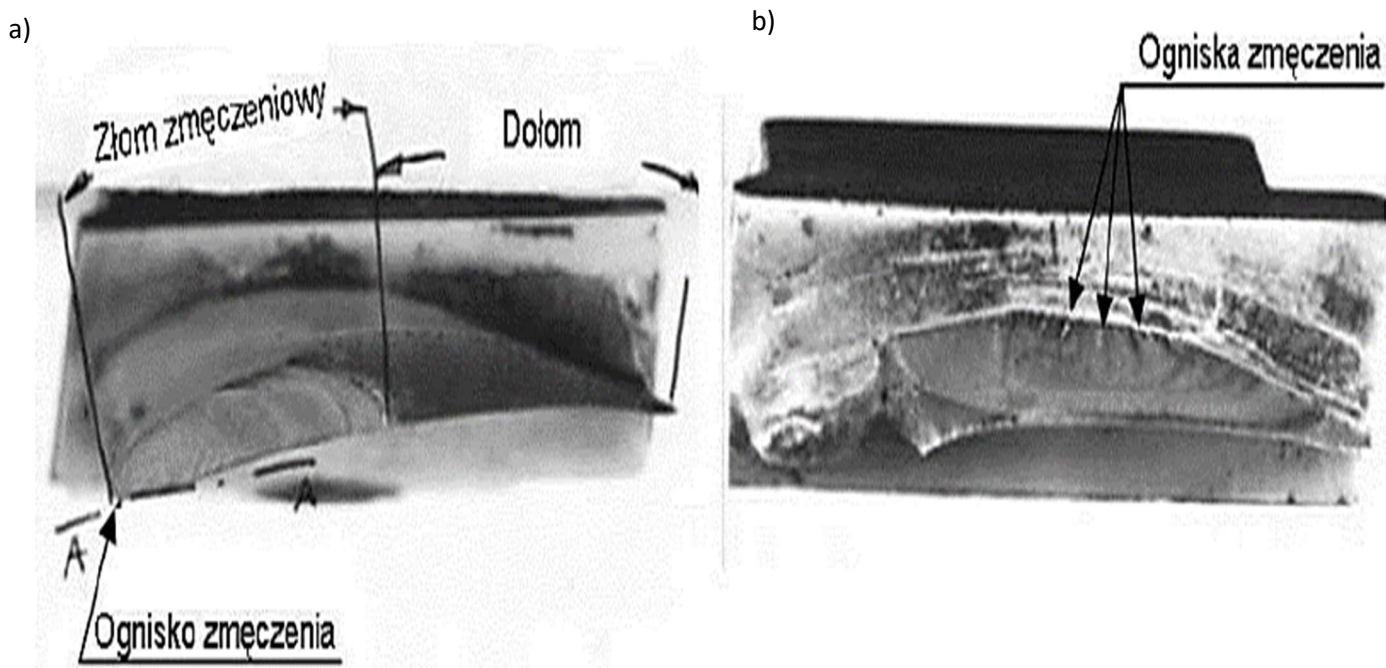
Rys. 24. Kompleksowe podejście do problemów zmęczeniowych silnika [39].

Współczesne badania opierają się przede wszystkim na badaniu:

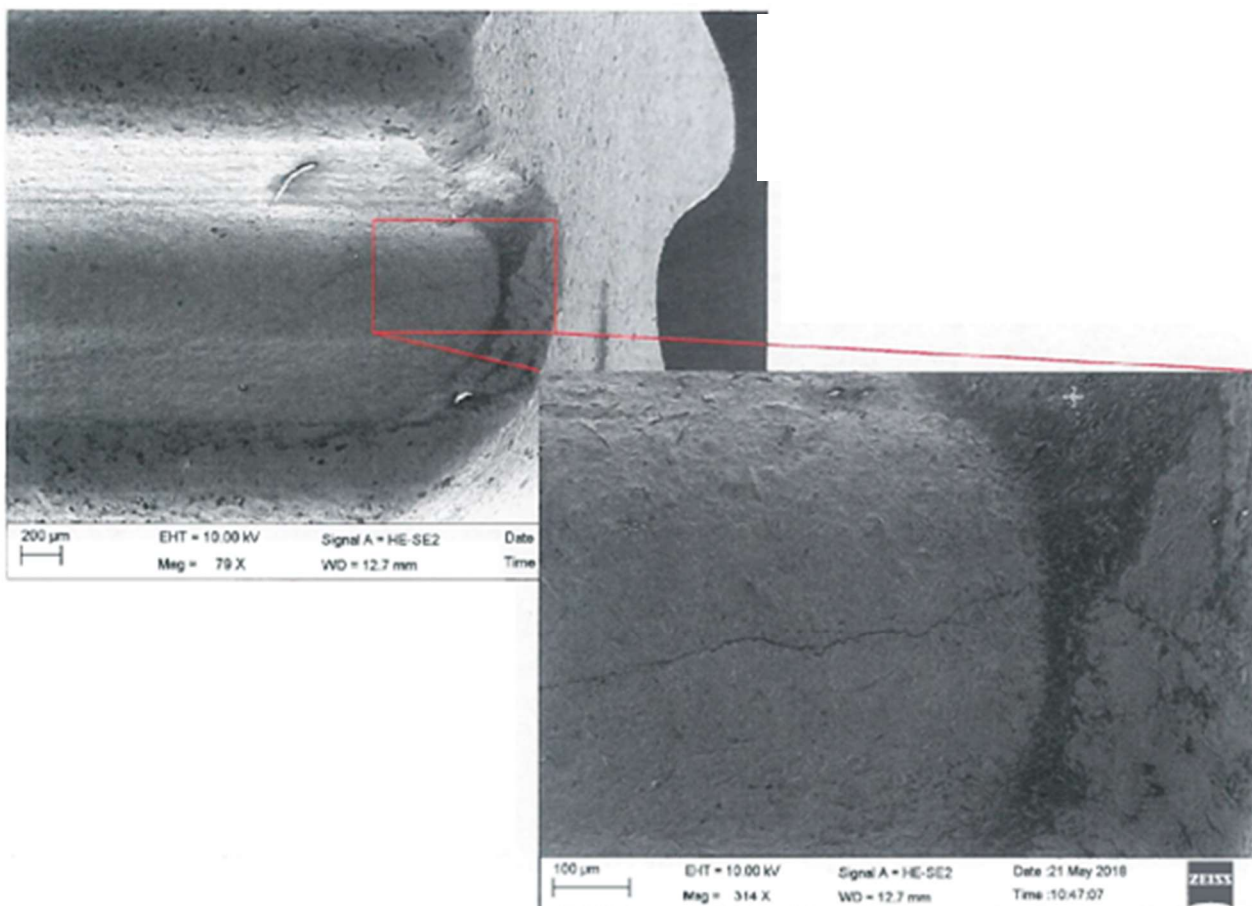
- a) **błędów struktury materiału** (wady produkcyjne, drobne defekty podpowierzchniowe struktury), będące źródłem przyspieszonego zmęczenia materiału),
- b) **symptomów narastającego zmęczenia materiału** (zmiany składu fazowego mikrostruktury, mikro- i makro- pęknięcia, naprężenia własne) [39].



Rys. 25. Przykładowe pęknięcie zmęczeniowe łopatek I stopnia sprężarki (silnik typu TW3-117) ognisko pęknięcia na powierzchni grzbietu [39].



Rys. 26. Problemy zmęczeniowe łopatek I stopnia sprężarki silnika SO-3 inicjowane na powierzchni pióra od: a) krawędzi natarcia, b) grzbietu [39].



Rys. 27. Pęknięcie Łopatki Turbiny Sprężarki w najgrubszym przekroju zamka łopatki świadczące o występowaniu bardzo dużych naprężeń indukowanych mechanicznie.

2.6. Charakterystyka prac optymalizacyjnych w technologii wytwarzania łopatek turbiny sprężarki.

Zapewnienie stałej i nieprzerwanej produkcji wiąże się z koniecznością błyskawicznej reakcji na problemy związane z procesem wytwarzania. **Korporacje lotnicze najwyższy priorytet nadają wysokiej jakości wytwarzanych części.** Każda część produkcyjna musi przejść przez szereg badań sprawdzających ujętych w normach materiałowych oraz w normach branżowych, wewnętrznie tworzonych przez zakłady produkcyjne w ramach korporacji, oraz zdefiniowanych w formie odchyłek wymiarowych, jakościowych zawartych na rysunku konstrukcyjnym części czy zespołu. W przypadku wystąpienia niewykrytej wcześniej wady, czy odchyłki wymiarowej zwiększa się częstotliwość badań bądź wytwarza serie próbne części, celem podjęcia decyzji o zgodności danego detalu. Ze względu na dużą różnorodność materiałów stosowanych w lotnictwie oraz szeregu czynników mogących mieć wpływ na jakość produktu w procesach produkcyjnych, mogą pojawiać się wady/odchyłki jednostkowe lub występujące regularnie. Zdarza się, że pomimo dopracowanej technologii wytwarzania, czynnikiem wpływającym na jakość produktu jest człowiek, środowisko, zmiana dostawcy, wpływ oprzyrządowania itp. W przypadkach, gdy odnalezienie przyczyny odchyłki jest utrudnione, dochodzi do braku możliwości osiągnięcia zakładanego poziomu produkcji i zaburzenia w łańcuchu produkcyjnym. W przypadku pojawienia się tych problemów ważny

jest dokładny opis źródła powstania. Konieczne jest przeprowadzenie dogłębnej analizy pozwalającej na ocenę wpływu problemu na eksploatację części, czy kompletnego silnika, a więc i w konsekwencji na bezpieczeństwo lotu. W przypadku wystąpienia problemu produkcyjnego najważniejsze jest zdefiniowanie przyczyny powstania niezgodności i zabezpieczenie przed powtórny jej wystąpieniem.

W przemyśle lotniczym opisuje się odpowiednie procedury, poprzez określenie prac zmierzających do usunięcia krytycznego dla biznesu problemu. W przypadku pojawiania się odchyłki, wdraża się proces analizy przyczyn jej powstania w odniesieniu do możliwości rozwiązania tego krytycznego dla produkcji, zjawiska. Schemat działań można podzielić na kilka etapów:

1. Project Overview, Scope & Objectives.

Początkowa faza oceny przyczyny powstawiania wady, zakładająca konieczność powołania zespołu roboczego specjalistów. W przypadku obszernych procesów produkcyjnych, gdzie konieczna jest analiza zarówno procesów mechanicznych, specjalnych jak procesów wytwarzania – ilość członków zespołu się zwiększa. Określenie celu projektu to opis wymaganych osiągnięć w wyniku realizacji projektu. Określenie celu jest najważniejszą czynnością, którą należy wykonać.

2. Challenges & Opportunities.

Wyzwania stawiane przed uczestnikami projektu są bardzo rozległe i wymagające. Przede wszystkim należy zadbać o najwyższą jakość wytwarzanych wyrobów. Na drodze zmierzającej do określenia rozwiązania problemu, stawiany jest szereg wyzwań, jak presja czasu, koszty związane z zatrzymaniem produkcji i badaniami, długotrwały proces wytwarzania czy zatrzymanie dostaw dla klientów.

3. Technology & Innovation.

Konieczne jest dokładne przeanalizowanie całego procesu wytwarzania przez specjalistów danej dziedziny, aby od działań koncepcyjnych, przejść do standardowego procesu. Ten etap badań działań procesowych, często ma na celu zapoznanie się z innowacyjnymi technologiami i wdrożenie nowych rozwiązań.

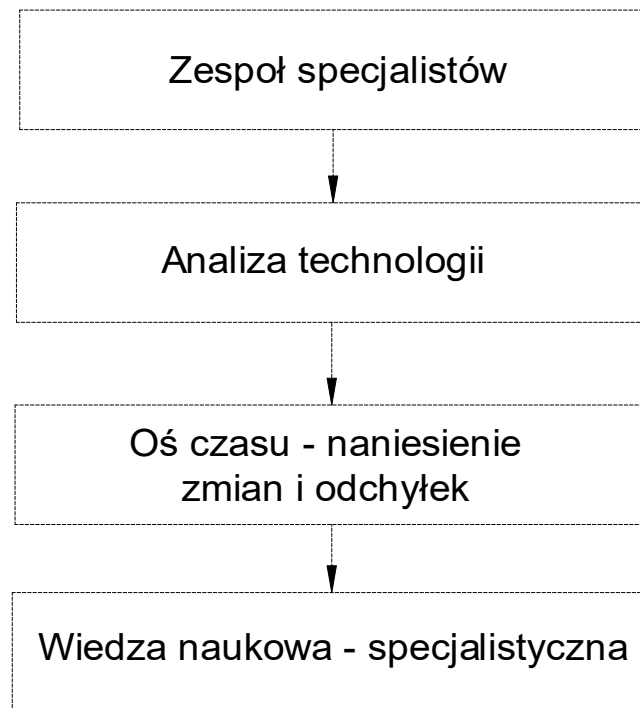
4. Quality check.

Jednym z kolejnych etapów jest ocena jakościowa. Ważne jest dokładne określenie na osi czasu zaistniałego problemu, poprzez opis wszystkich ważnych czynników bądź zmian w procesie produkcyjnym mogących mieć wpływ na jakość wytwarzanej części.

5. Empower our People.

W rozwiązywaniu rozległych projektów ważne jest korzystanie z wiedzy i doświadczenia innych osób. Prowadzi to przede wszystkim do dzielenia się wiedzą oraz ciągłego doskonalenia wszystkich członków zespołu. W przypadku problemów przemysłowych często istotne jest konsultowanie się z różnymi placówkami badawczymi, a więc z uczelniami lub instytutami naukowo-branżowymi.

Dodatkowo schemat działań w przypadku realizacji prac zmierzających do rozwiązania rozległego projektu badawczego przedstawiono na rysunku nr 28.



Rys. 28. Schemat działań w celu rozwiązania rozległych projektów badawczych.

2.7. Podsumowanie stanu zagadnienia – teza pracy.

Podstawą rozwoju turbinowych silników lotniczych jest poprawa ich sprawności, osiąarów, zwiększenia niezawodności elementów i podzespołów oraz obniżenie kosztów ich eksploatacji. Wysoka temperatura pracy turbiny wiąże się z koniecznością stosowania materiałów o dużej żaroodporności oraz żarowytrzymałości. Niezwykle ważne jest, ciągłe prowadzenie prac z obszaru B+R nad poprawą ich własności wytrzymałościowych poprzez modyfikację i udoskonalenia procesów wytwarzania półfabrykatu, a także produkcji samego detalu, przy zachowaniu wysokiej jakości wytwarzanych części. Jednocześnie, prowadzenie prac optymalizacyjnych w zakresie technologii części, nie zwalnia dostawców z konieczności prowadzenia ciągłej produkcji, co wiąże się z potrzebą szybkiej reakcji na problemy związane z procesem wytwarzania lub na te, które pojawiają się już w czasie eksploatacji części, czy całych podzespołów lotniczych. Mimo zachowania w produkcji lotniczej wysokich standardów produkcyjnych, wciąż zdarzają się (pomimo dopracowanej technologii wytwarzania) błędy spowodowane czynnikiem ludzkim bądź środowiskowym, które negatywnie oddziałują na eksploatację jednostek lotniczych. Błędy mogą pojawić się już na etapie wytwarzania materiałów, w tym stopów metali, które stanowią podstawę prowadzenia produkcji części niezbędnych do wytworzenia półproduktów (np. odkuwki, odlewu), czy gotowych elementów np. w postaci odlewów łopatek, czy aparatów kierujących.

Służby metalurgiczne producenta silników lotniczych muszą posiadać w tym przypadku wysokie kompetencje merytoryczne, również z obszaru wiedzy procesowej, która jest niezbędna do uruchomienia, często bardzo wymagających, ze względu na ciągłą presję czasu oraz koszty związane z zatrzymaniem produkcji, działań zaradczych i naprawczych w odniesieniu do realizowanych zamówień i eksploatowanych w tym czasie dostarczonych

części. Łopatki Turbiny Sprężarki, poddane szerokim badaniom w ramach pracy doktorskiej, wytwarzane są z polikrystalicznego nadstopu niklu ŻS6U-WI w procesie odlewania precyzyjnego. Nadstop ten cechuje się dobrymi własnościami mechanicznymi w podwyższonej temperaturze, a żaroodporność gwarantuje mu zastosowanie dyfuzyjnych aluminidkowych warstw. Ze względu na charakter pracy łopatek, gwarancją ich bezpiecznej eksploatacji, jest zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości zmęczeniowej w warunkach oddziaływania wysokiej temperatury i naprężeń zmiennie-cyklicznych. Przeprowadzona analiza danych literaturowych, jak i również dokumentacji produkcyjnej wskazuje na wiele czynników zewnętrznych (technologicznych) mogących wpływać negatywnie na jakość finalnego wyrobu. Dotyczy to m.in. stosowanych parametrów w ramach poszczególnych etapów produkcyjnych, własności fizycznych i mechanicznych materiałów użytych w procesie wytwarzania produktów, jakości i prawidłowej pracy oprzyrządowania i urządzeń. Zatem, znajomość oddziaływania tych czynników, indywidualnie dla każdego z produkowanych detali, jest gwarantem zapewnienia ciągłości produkcji z zachowaniem wysokich wymagań jakościowych pochodzących bezpośrednio od finalnych odbiorców technologii. Dlatego ciągła kontrola przebiegu procesu jest nieodłącznym elementem koniecznym do realizowania dostaw produktów, wytwarzanych w ramach prowadzonej działalności gospodarczej, zgodnych z terminem realizacji zamówienia i przy utrzymaniu ich wysokiej jakości. Ogromna zmienność czynników zewnętrznych, niezależnych od producenta części lotniczych, stwarza konieczność ciągłego nadzorowania produkcji, również i tej prowadzonej w sposób seryjny, co jest zgodne z dostarczaniem wraz z zamówieniem wymaganiami, ale również elementów kompletnych zespołów pozostających w ciągłym użytkowaniu w ramach eksploatowanych statków lotniczych wyposażonych w silniki z zainstalowanymi częściami wytwarzanymi m.in. przez firmę Pratt&Whitney. Jak wcześniej wskazano, istnieją wyniki prac, w których wykazano możliwość degradacji części w trakcie ich eksploatacji, co może doprowadzić do awarii, a w najgorszym przypadku do katastrofy w ruchu lotniczym. Ma to bezpośrednie przełożenie na odbiór przez rynek lotniczy firm produkujących te części, które ulegają w trakcie ich użytkowania uszkodzeniom, czy nawet zniszczeniu. Zatem najbardziej niebezpiecznym i niekorzystnym dla wizerunku firm lotniczych momentem, w prowadzeniu działalności produkcyjnej, jest zaobserwowanie lub stwierdzenie jakiegokolwiek odchyłki od znormalizowanych parametrów ich pracy, co stanowi podstawę unieruchomienia produkcji, łańcucha dostaw i zastosowanie procedur badawczych zapewniających detekcję wad i analizę przyczyn jej powstania. Prowadzi to do długotrwałego, bardzo kosztownego dla firm biorących udział w technologii wytwarzania podzespołu, prowadzenia działań determinujących „kto i za co (finansowo i wizerunkowo) ma być odpowiedzialny?”. Z uwagi na fakt, że w historii lotnictwa odnotowano przypadki, w których uszkodzone łopatki odpowiedzialne były za zniszczenie silnika lotniczego, co zdecydowało o katastrofie lotniczej, w przypadku prowadzenia produkcji łopatek turbiny sprężarki I stopnia prowadzone są ciągłe analizy umożliwiające zoptymalizowanie stosowanych procedur gwarantujących zachowanie ciągłości produkcji wysokiej jakości części zapewniających bezpieczną ich eksploatację.

Przeprowadzono zatem analizę literaturową w zakresie charakterystyki stopu ŻS6U-WI stosowanego w produkcji Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia. Miała ona na celu krytyczną ocenę wpływu technologii produkcji części z wykorzystaniem tego stopu w kontekście jego cech makro i mikrostrukturalnych uwzględniających morfologię i rozmieszczenie poszczególnych składników fazowych i ich oddziaływania na jakość gotowej i eksploatowanej części. Główną uwagę skupiono na poszczególne etapy kompletnego procesu produkcyjnego

łopatek, z uwzględnieniem procedur metalurgicznych, w tym przygotowania oprzyrządowania odlewniczego oraz parametrów odlewniczych, jak i również na prowadzone działania zmierzające do uzyskania finalnych własności żaroodpornych i żarowytrzymałych przez detal stanowiący przedmiot przeprowadzonych badań. Opisano również, wciąż aktualne problemy pojawiające się podczas produkcji Łopatek Turbiny oraz te, które zaobserwowano dotychczas podczas ich długotrwałej eksploatacji w warunkach operacyjnych, tj. w warunkach lotu silnika lotniczego. Jednocześnie zdefiniowano schemat planowanych do wykonania prac z obszaru B+R oraz analiz zmierzających do rozwiązania tych problemów technologicznych. Przedstawione w pracy studium literatury, norm lotniczych, danych pochodzących z dotychczasowej produkcji stanowiło podstawę opracowania nowych wytycznych w odniesieniu do procedur eliminowania wszelkich odchyłek pojawiających się w technologii wytwarzania Łopatek Turbiny Sprężarki. Opisane w dalszej części pracy wyniki podjętych działań przyczyniły się do ograniczenia do minimum braków w przyszłej produkcji i zapewniły ciągłość przepływu detali.

Zdiagnozowane problemy w produkcji Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia charakteryzowały się wysokim poziomem złożoności zagrażającym możliwości osiągnięcia w czasie ich wytwarzania zakładanych parametrów jakościowych uwzględniających wysokie wymagania odbiorcze. Stwierdzono występowanie w łopatkach wad – pęknięć, które eliminowały zastosowanie ich w cyklu eksploatacyjnym silnika lotniczego. Prowadzone w sposób ciągły badania odbiorcze łopatek potwierdziły obecność w obszarze zamka aż trzech typów nieciągłości. Zaobserwowane pęknięcia należą do niezwykle trudnych, zarówno do identyfikacji, jak i również prowadzenia analiz zmierzających do opisu przyczyny ich powstawania. Ocena mechanizmu inicjacji i propagacji takiej odchyłki konstrukcyjnej wymaga posiadania wiedzy z obszaru zarówno materiałoznawstwa (inżynierii materiałowej), jak i doświadczenia produkcyjnego bazującego na znajomości wymagań i pracy detalu. W tak krytycznych przypadkach konieczne jest bardzo poważne podejście do odnalezienia przyczyny wystąpienia wad i jej eliminacji zapewniające uzyskanie produktu charakteryzującego się jakością gwarantującą jego bezpieczne eksploataowanie. Stąd, po uwzględnieniu statystyk produkcyjnych, analiz danych literaturowych i wyników dotychczasowych badań własnych sformułowano tezę rozprawy:

Parametry procesów produkcyjnych w technologii wytwarzania Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia z odlewniczego nadstopu niklu ŻS6U-WI determinują wytrzymałość zmęczeniową oraz jakość finalnego wyrobu gwarantującą prawidłową i bezpieczną ich pracę w warunkach cyklicznych obciążeń cieplnych i mechanicznych. Możliwe jest zatem, zidentyfikowanie i ostateczne wyeliminowanie krytycznych, dla jakości łopatek, wszelkich odchyłek materiałowych i konstrukcyjnych poprzez zastosowanie nowo opracowanych procedur naprawczych na etapie kontroli i analizy cyklu produkcyjnego w systemie: I etap - Odlewanie, II etap - Procesy Specjalne, III etap – obróbka mechaniczna, IV etap – kulowanie, zapewniając uzyskanie produktu spełniającego wysokie wymagania jakościowe odbiorców części stosowanych w produkcji silników lotniczych. Analiza uzyskanych wyników badań własnych stanowić będzie podstawę wprowadzenia nowych wymagań w odniesieniu do finalnych warunków technicznych odbioru Łopatek Turbiny Sprężarki produkowanych z materiału ŻS6U-WI oraz wprowadzenia ulepszeń i innowacyjnych rozwiązań w technologii produkcji części lotniczych produkowanych w firmie Pratt&Whitney S.A.

IIa. METODYKA BADAŃ.

Celem badań było usystematyzowanie opisu metody wytwarzania Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia oraz określenie wpływu czynników produkcyjnych na finalne własności mechaniczne wyrobu. Badania prowadzono na elementach wytworzonych z nadstopu ŻS6U-WI, zmierzając do uzyskania parametrów technologicznych umożliwiających wytwarzanie elementów o określonych własnościach jakościowych i wytrzymałościowych. Schemat blokowy planu badań będący jednocześnie zakresem planowanych prac badawczych przedstawiono na (rys. 1). Zaproponowane rozwiązanie problemu technologicznego zostało podzielone na 4 działania będące jednocześnie etapami procesu wytwarzania produktu. Poniższy plan przedstawia konieczne do przeprowadzenia zadania badawcze, niezbędne do wykonania w celu uzyskania stabilnej w kontekście technologii wytwarzania powtarzalnych pod względem jakościowym, wybranych elementów z nadstopu niklu, spełniających wymagania przemysłu lotniczego.

Etap I – proces wytwarzania półwyrobu (odlewanie) – wykonano: analizę składu chemicznego poszczególnych wytopów, badania zmęczeniowe przy zmiennych parametrach odlewania, obserwacje mikrostruktury odlewu w celu identyfikacji składników fazowych, analiza objętości względnej składników fazowych, badanie makrostruktury oraz analiza cieplna stopu w stanie dostawy.

Etap ten miał na celu przeprowadzenie analizy jakości materiału wsadowego stosowanego w procesie odlewania. Głównym, koniecznym do określenia elementem było opracowanie parametrów odlewniczych pozwalających na uzyskanie wytopu o najwyższej jakości.

Etap II – procesy specjalne (obróbka cieplna - przesycanie, obróbka cieplno-chemiczna – aluminowanie) – wykonano: badania własności mechanicznych (R_m, A) oraz żarowytrzymałości, badania fraktograficzne przelomów, badania mikroskopowe półwyrobu po obróbce cieplnej z określeniem udziału objętościowego fazy γ' , składu chemicznego wydzielen, badania jakościowe i ilościowe warstwy aluminidkowej na gotowym detalu i po eksploatacji.

Etap ten zakładał usystematyzowanie danych z procesów obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej. Istotne było określenie parametrów procesu obróbki cieplnej, jak i opracowanie wzorców mikrostruktury odlewów po procesach obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej.

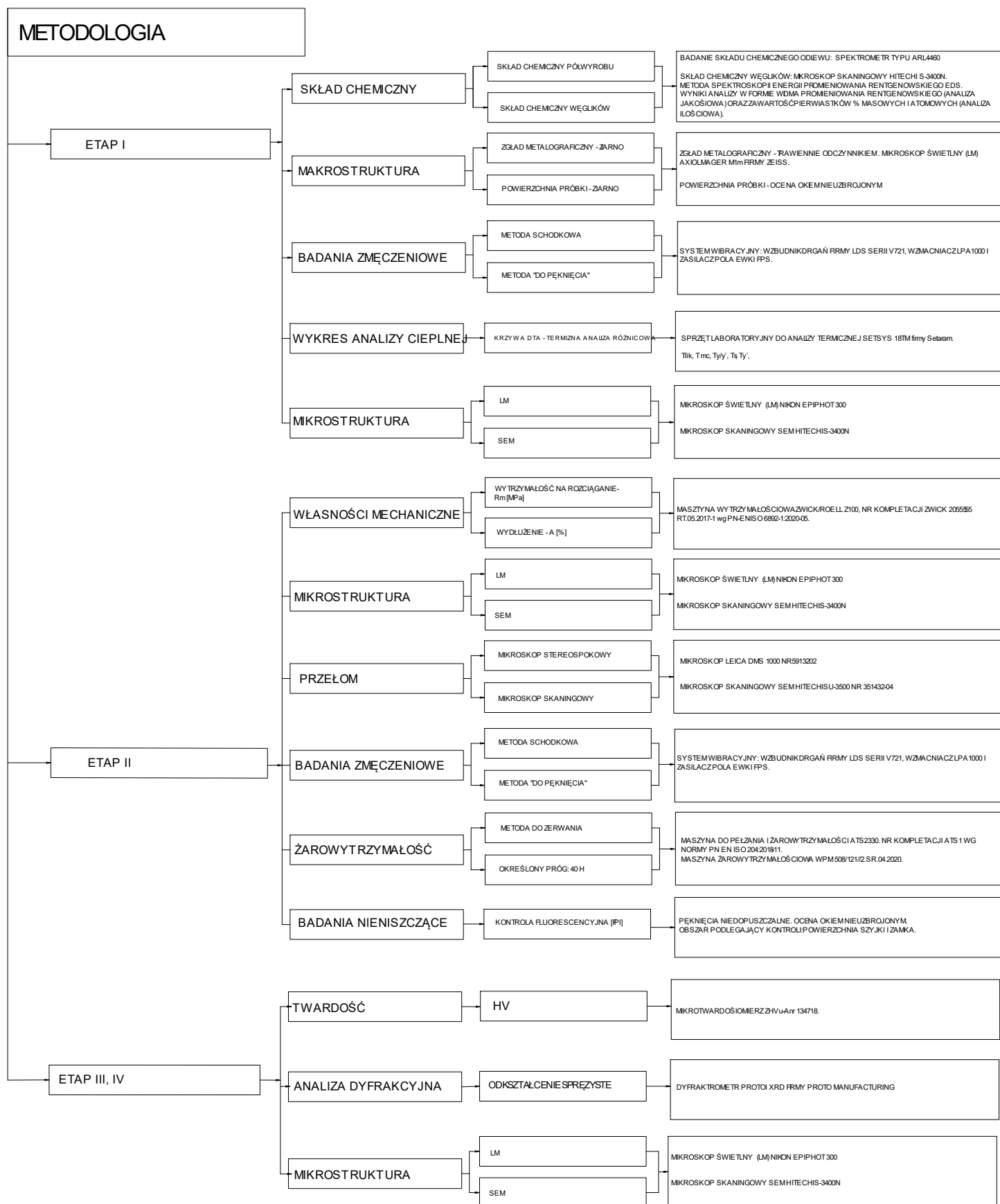
Etap III – obróbka strumieniowo- ścierna (kulowanie) – wykonano: badanie zmęczeniowe gotowego wyrobu, badanie mikrostruktury warstwy wierzchniej (obserwacje mikroskopowe) oraz badania dyfrakcyjne.

Etap ten zakładał określenie parametrów procesu kulowania wpływających na poprawę wytrzymałości zmęczeniowej odlewów.

Etap IV – powierzchniowa obróbka wykańczająca (obróbka mechaniczna) – wykonano: badanie mikrotwardości, badanie metalograficzne warstwy wierzchniej odlewów oraz badania dyfrakcyjne.

Etap ten umożliwił ocenić jakość operacji obróbczych mogących mieć niekorzystny wpływ na jakość powierzchni, a co za tym idzie wytrzymałość zmęczeniową łopatek.

Geometria badanych łopatek uzależniona jest od etapu cyklu produkcji wytwarzania Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia wytypowanego do wykonania prac mających na celu określenie wpływu parametrów procesowych na jakość finalnych wyrobów. Metodyka wyboru próbek - łopatek do badań mikroskopowych jest analogiczna dla odlewów jak i gotowych części.

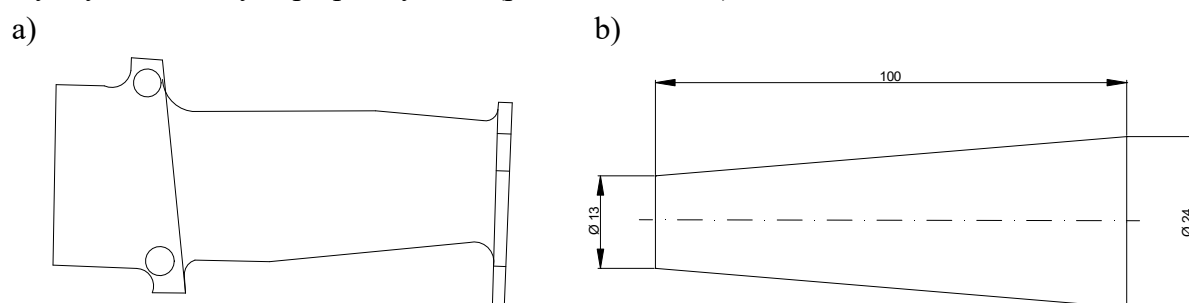


Rys.1. Plan badań doboru parametrów procesu wytwarzania Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia.

Badania wykonane w pracy doktorskiej są ściśle powiązane z technologią wytwarzania Łopatek Turbiny Sprężarki. Skupiono się głównie na badaniach prowadzonych w tych etapach cyklu produkcyjnego, które mogą mieć bezpośredni wpływ na powstawanie wad i odchyłek technologicznych oddziałujących na proces wytwarzania łopatek, ale i również ich późniejszą eksploatację. Z uwagi na raportowanie na poszczególnych etapach produkcji odchyłek wyników od norm wprowadzono konieczność stosowania dodatkowych badań, nie wynikających z wymagań warunków technicznych klienta. W pracy badawczej skupiono się na czterech etapach produkcji części tj. wytworzenie półwyrobu, procesy specjalne, obróbka strumieniowo-ścierna oraz powierzchniowa obróbka wykańczająca. Wszystkie te badania prowadzono według kolejności prowadzonego procesu. Jednocześnie, wykonanie badań prowadzonych w ramach wcześniejszego etapu, determinowało możliwość wykonania badań w zakresie kolejnego etapu produkcji części. W toku badań wprowadzono zmienne parametry jedynie w etapie, który analizowano, tak aby nie wprowadzać dodatkowych zmiennych mogących wpływać na błędną interpretację wyników badań i nieprawidłowe ukierunkowanie wniosków na kolejne działania prowadzone w zakresie innego analizowanego procesu. Należy podkreślić, że ze względu na charakter pracy (doktorat wdrożeniowy) wszystkie realizowane działania były ściśle uzależnione od przebiegu produkcji Łopatek Turbiny Sprężarki analizowanych w pracy doktorskiej. Badania wykonane w toku analiz opisujących wpływ czynników produkcyjnych na finalną wytrzymałość zmęczeniową detali prowadzono w sposób ściśle związany z każdym etapem produkcji.

2.8. Materiał do badań.

Stop ŻS6U-WI jest żarowytrzymałym stopem odlewniczym wytapianym indukcyjnie w warunkach próżni. Tak uzyskany wytop przeznaczony jest do ponownego przetopu w indukcyjnych odlewniczych piecach próżniowych. Stop ten dostarczany jest do odlewni precyzyjnej jako półwyrób w formie odlewów w kształcie prętów (z ang. *masterheat*) o określonych przez zamawiającego wymiarach. Proces odlewania realizowano z użyciem formy ceramicznej umożliwiającej wytworzenie max. 25 łopatek i 4 próbek świadków, które stosowano w badaniach walidujących skład chemiczny odlewów oraz badaniach wytrzymałościowych po przesycaniu (patrz rozdział IV).



Rys 2. Schemat Łopatki Turbiny I Stopnia, a) odlew łopatki b) próbka świadek.

Badanie składu chemicznego odlewów łopatek prowadzono na próbkach świadkach przy zastosowaniu optycznego spektrometru emisyjnego ARL 4460 produkcji Thermo Fisher Scientific. Próbkę przed analizą szlifowano wstępnie na szlifierce głowicowej Athena przy użyciu segmentów ściernych o granulacji 50, lub papierze ściernym o granulacji 60 lub 80.

Skład chemiczny MASTERHEAT I przedstawiono w tabeli nr 1 oraz zestawiono tabelarycznie skład chemiczny wytopów poddanych badaniom w ramach badań pracy doktorskiej (tabela nr 2).

Tabela 1. Skład chemiczny stopu w stanie dostawy, tzw. masterheat I, % mas.

Zawartość pierwiastków, %mas.	
Węgiel	0,1610
Chrom	8,57
Nikiel	Osnowa
Kobalt	9,55
Molibden	1,61
Wolfram	10,21
Aluminium	6,0
Tytan	2,28
Niob	1,11
Cer	0
Cyrkon	0
Bor	0,013
Krzem	0
Mangan	0,020
Siarka	0,0030
Fosfor	0,003
Itr	0
Ołów	0
Bizmut	0
Żelazo	0,05

Tabela 2. Skład chemiczny stopów użytych do badań w pracy doktorskiej.

WYTOP	Skład chemiczny, % wag.												
	C	P	S	Mn	Al	Cr	Co	Mo	Ti	Fe	W	Nb	Ni
A	0,150-0,142	0,004	0,003	0,02	5,8-6,0	8,65	9,4	1,58	2,39	0,04	10,1	1,12	59,7
B	0,178-0,158	0,004	0,007	0,02	5,6-5,8	8,34	9,84	1,5	2,62	0,04-0,1	9,98	1,12	59,7
1	0,155-0,166	0,004	0,005	0,02	5,6-5,8	8,50	9,49	1,62	2,24	0,05	10,33	1,11	59,8
2	0,161-0,166	0,004	0,004	0,02	5,5-5,9	8,51	9,54	1,62	2,21	0,05	10,2	1,11	60,0
3	0,160-0,166	0,003	0,003	0,02	5,7-5,9	8,48	9,38	1,62	2,21	0,05	10,09	1,08	60,2
C	0,142-0,147	0,003	0,004	0,02	5,9-5,6	8,43	9,37	1,63	2,28	0,04	10,04	1,08	60,4
D,E,F,G	0,152-0,157	0,004	0,003	0,02	5,7-5,9	8,51	9,37	1,61	2,25	0,04	10,1	1,08	60,4
8	0,155-0,166	0,003	0,003	0,02	5,5-5,8	8,49	9,52	1,60	2,20	0,04	10,32	1,12	60,8
H	0,148	0,004	0,003	0,02	5,8	8,50	9,48	1,63	2,25	0,04	10,14	1,10	60,3
J	0,14	0,004	0,004	0,02	6,0	8,45	9,43	1,61	2,27	0,06	10,19	1,11	60,8
K	0,140÷0,146	0,004	0,004	0,02	5,6÷5,9	8,48	9,55	1,62	2,31	0,04	10,20	1,10	60,5
L	0,178÷0,158	0,003	0,004	0,02	5,6÷5,8	8,34	9,84	1,5	2,62	0,04-0,1	9,98	1,12	59,7
M	0,150÷0,147	0,003	0,003	0,02	5,8÷5,9	8,61	9,57	1,64	2,32	0,04	10,26	1,14	59,5
N	0,146÷0,157	0,003	0,003	0,02	5,8÷5,9	8,45	9,56	1,5	2,32	0,04	9,99	1,11	59,6

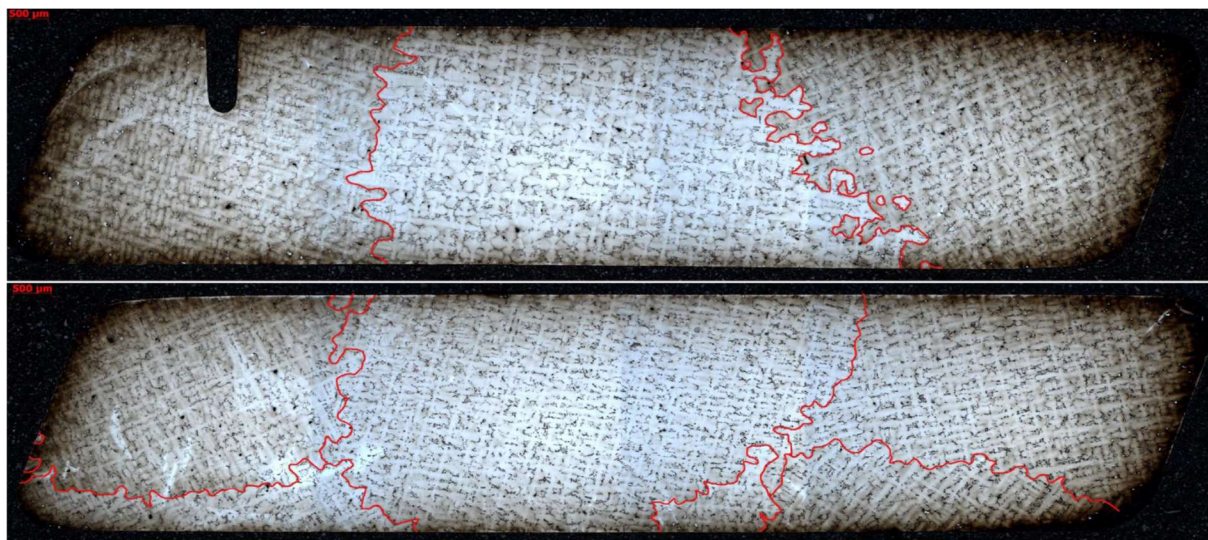
W celu podwyższenia własności mechanicznych (R_m , A) oraz żarowytrzymałości, stopy wraz z próbkami świadkami poddano procesowi obróbki cieplnej tj. przesycaaniu w temperaturze $(1200 \div 1225) \pm 14^\circ\text{C}$ / 4h w warunkach gazu ochronnego, tj. argonu.

2.8.1. Badania własności fizycznych.

W celu określenia własności fizycznych stopu w formie dostawy (tzw. *masterheat*) przeprowadzono badania kalorymetryczne z zastosowaniem analizatora termicznego (DTA) SETSYS 18TM firmy Seta ram. Próbki o średnicy 3mm i długości 3mm nagrzewano od temperatury pokojowej do temperatury 1540°C , ze stałą prędkością nagrzewania $10^\circ\text{C}/\text{min}$ i chłodzono do temperatury 20°C z prędkością $10^\circ\text{C}/\text{min}$.

2.9. Charakterystyka odlewów łopatek.

2.9.1. Rozmiar ziarna wyznaczono zarówno na zglądach wyciętych z zamka łopatki (rys. 150), trawionych w odczynniku Kalling'a wg ASTM E407 oraz na gotowych, odlanych łopatkach, które trawiono w roztworze o składzie $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, H_2SO_4 , HCl (rys. 151). Rozmiar ziarna na przekroju zamka łopatki określono metodą siecznych (sieczna na długości zamka łopatki). Zglądy metalograficzne przygotowano zgodnie z normą ASTM E3, przy użyciu urządzeń firmy Struers. Próbki wycięto z zamka łopatki przy zastosowaniu tarczy diamentowej, które następnie inkludowano w przewodzącej żywicy termoplastycznej i szlifowano na papierach ściernych o gradacji od 400 do 4000, a następnie polerowano przy użyciu diamentowych zawiesin i tarcz polerskich.



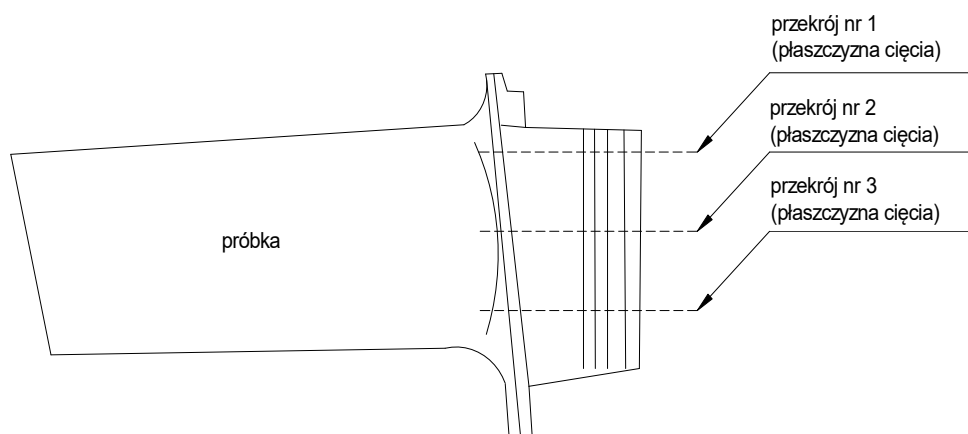
Rys. 3. Przekrój poprzeczny Łopatki Turbiny Sprężarki, stan trawiony odczynnikiem Kalling'a (czerwonymi linia oznaczono granice ziarn, tj. obszary o różnej orientacji dendrytów).



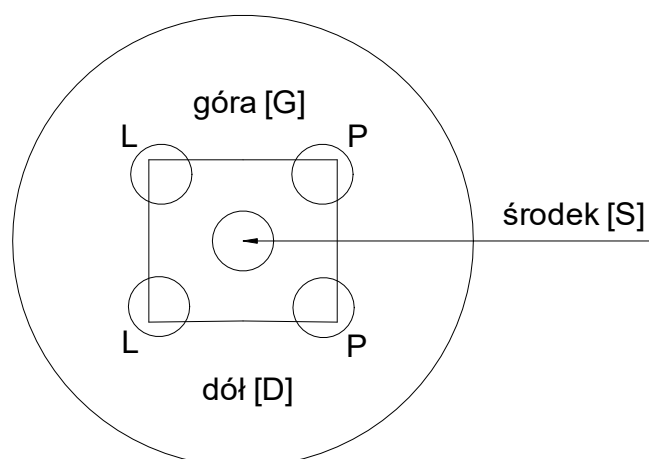
Rys. 4. Łopatki Turbiny Sprężarki, stan trawiony.

2.9.2. Badania mikroskopowe – obserwacje mikrostruktury łopatek, jak i również zglądów metalograficznych elementów wyciętych z zamka, jak i również z innych obszarów łopatki prowadzono przy pomocy mikroskopu optycznego i stereoskopowego oraz elektronowego mikroskopu skaningowego z systemem EDS do mikroanalizy rentgenowskiej. Badania mikrostruktury łopatek prowadzono na powierzchni przekroju wyciętego z zamka łopatki (rys.5a). Obserwacje prowadzono na powierzchni zglądu w ściśle zdefiniowanych obszarach (rys. 5b).

a)



b)

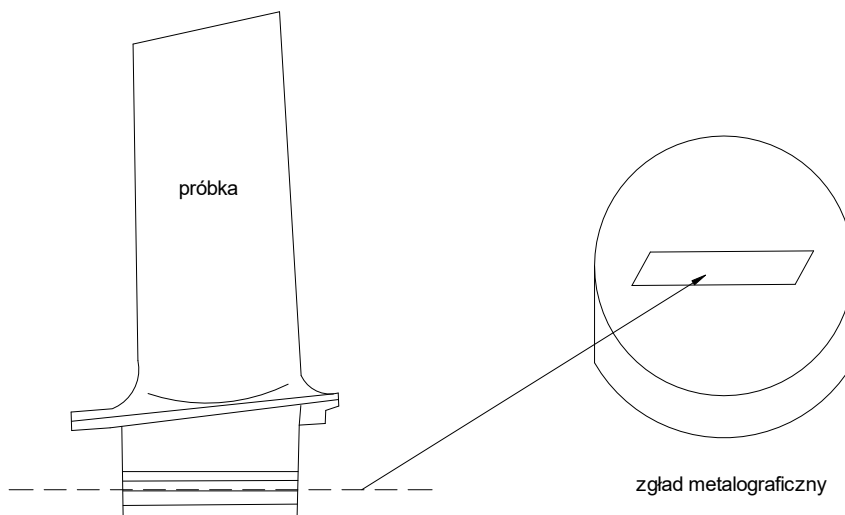


Rys. 5. Łopatką Turbiny Sprężarki I Stopnia z zaznaczonymi miejscami wycięcia próbek do badań mikroskopowych a) oraz oznaczonymi obszarami obserwacji na przekroju poprzecznym próbki b) W analizie wyników badań mikrostruktury stosowano oznaczenia: **PG** – prawy górny róg, **PD**- prawy dolny róg, **LG** – lewy górny róg, **LD** – dolny lewy róg, **S** – środek próbki

Badania mikroskopowe wytworzonych odlewów wykonano przy użyciu mikroskopu stereoskopowego Leica DMS 1000, mikroskopu optycznego OLYMPUS model GX71 oraz elektronowego mikroskopu skaningowego HITACHI SU-3500. Stosowano napięcie 15, 20 kV oraz tryb elektronów wtórnych SE. Badania mikroskopowe odlewów miały na celu określenie porowatości oraz objętości względnej (V_v) składników fazowych mikrostruktury (węglików, osnowy γ oraz fazy umacniającej γ') oraz grubości warstwy. Do pomiarów zastosowano program do analizy obrazu Stream Motion 1.8, stanowiący wyposażenie mikroskopu świetlnego OLYMPUS GX71.

Analizę składu chemicznego składników fazowych mikrostruktury wykonano za pomocą spektrometru rentgenowskiego z dyspersją energii (EDS), sprzężonego odpowiednio z mikroskopem skaningowym SU-3500 firmy Hitachi. Mikroanalizę składu chemicznego prowadzono na zglądach trawionych, w mikroobszarach powierzchni pojedynczej cząstki, wydzielenia czy w mikroobszarze ziarna badanego składnika fazowego.

Badania mikroskopowe odlewów po próbach zmęczeniowych prowadzono na przekrojach próbek wyciętych (prostopadłe do osi łopatki – rys. 6) z zamka gotowych *Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia* po próbach zmęczeniowych. Badania wykonano przy zastosowaniu mikroskopu optycznego AxiolMAGER M1m firmy ZEISS oraz mikroskopu stereoskopowego Stereo Discovery firmy ZEISS. Obserwacje mikrostruktury z obszaru zamka łopatek po próbach zmęczeniowych techniką skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) wykonano z wykorzystaniem wysokorozdzielczego mikroskopu elektronowego Merlin Gemini II, wyposażonego w działo elektronowe z emisją polową (FEG) oraz detektor charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego EDX Quantax 800 z oprogramowaniem firmy Bruker. Zgłady metalograficzne przygotowano zgodnie z normą ASTM E3.



Rys. 6. Łopaska turbiny z zaznaczonym miejscem wycięcia próbek do badań mikroskopowych.

Badania mikroskopowe przelomów po badaniach wytrzymałościowych prowadzono na powierzchni przelomu próbek po statycznej próbie rozciągania oraz po próbie zmęczeniowej przy użyciu mikroskopu stereoskopowego (pow. do 63x) oraz przy użyciu mikroskopu SEM HITACHI SU-3500.

2.9.2.1. Badania mikrostruktury powłoki.

Wszystkie badane w pracy doktorskiej *Łopatki Turbiny Sprężarki I Stopnia* poddano procesowi aluminiowania dyfuzyjnego metodą „Above Pack” w piecu retortowym z płukaniem próżniowym. Aluminiowanie przeprowadzono w temperaturze $1000 \pm 14^\circ\text{C}$ w czasie $5 \div 7$ godzin. Części przed aluminiowaniem poddano obróbce strumieniowo-ścierniej z wykorzystaniem ścierniwa w postaci elektrokorundu 220.

Pomiar grubości powłoki.

Za grubość warstwy aluminiowanej przyjęto całkowitą grubość warstwy na przekroju próbek, obejmującą strefę addytywną i dyfuzyjną. Pomiar grubości warstwy wykonano na próbce trawionej odczynnikiem Kalling, z użyciem mikroskopu optycznego Epiphot 200 przy powiększeniu 500x.

Badanie odporności warstwy na utlenienie.

Utlenianie łopatek po procesie aluminiowania prowadzono zgodnie z przyjętą w przemyśle lotniczym metodą weryfikacyjną nowych warstw ochronnych przeznaczonych do eksploatacji. Próby utleniania prowadzono w warunkach izotermicznych z zastosowaniem temperatury $1121\pm 14^{\circ}\text{C}$ w czasie 23 h, oraz chłodzono na powietrzu do temperatury pokojowej. Proces prowadzono w piecu komorowym bez atmosfery ochronnej. Kinetykę procesu utleniania określono wykonując badania mikroskopowe jakości warstwy po próbie. W ocenie żaroodporności stosowano odlewy Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia. Jako wyznacznik prawidłowo wykonanego procesu aluminiowania zastosowano brak wżerów tlenkowych oraz brak oznak utlenienia czołowego.

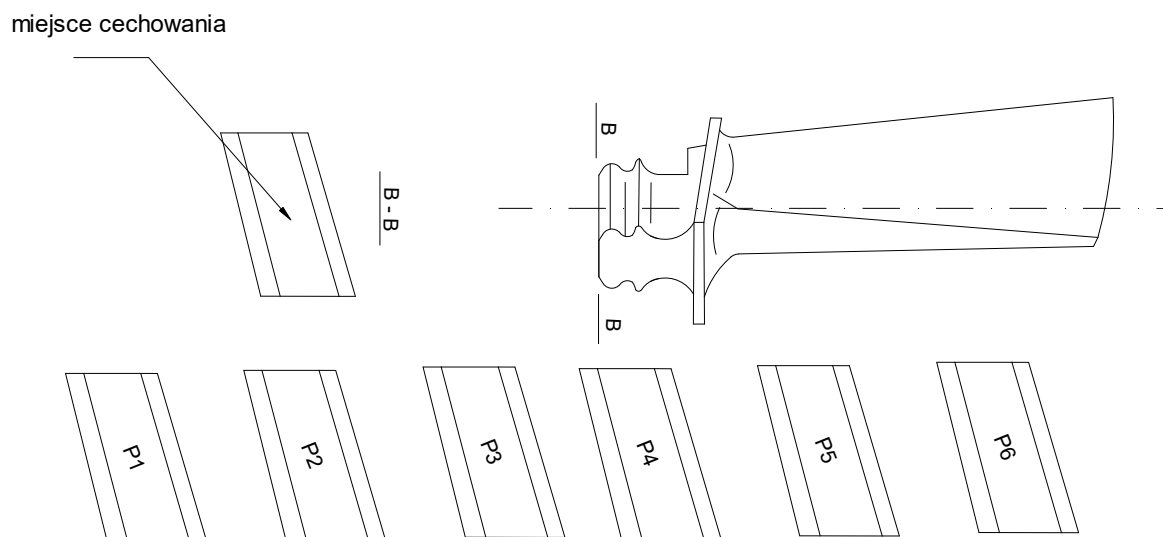
Badania składu chemicznego warstwy w odlewach łopatek po procesie aluminiowania.

Badania zawartości procentowej aluminium w warstwie aluminidkowej prowadzono na piórze Łopatki Turbiny Sprężarki I Stopnia w obszarze od 0,005 mm od powierzchni zewnętrznej warstwy. Badania z zastosowaniem skaningowego mikroskopu elektronowego SEM/EDS w mikroobszarach warstwy wykonano na nietrawionych przekrojach pióra łopatki.

2.10. Badania własności mechanicznych.

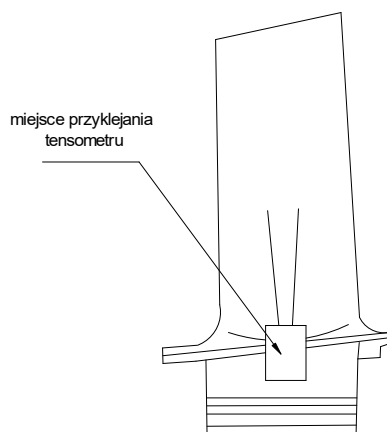
2.10.1. Trwałość zmęczeniowa.

Badania własności zmęczeniowych wykonano na gotowych Łopatkach Turbiny Sprężarki I Stopnia. Produkcja podzespołów lotniczych wymaga stosowania procedur oznaczania części w sposób gwarantujący identyfikację każdego detalu na wszystkich etapach produkcji, jak i również podczas ich eksploatacji przez finalnego odbiorcę. Łopatki Turbiny Sprężarki I Stopnia (próbki) cechowane są za pomocą polerki wibracyjnej literą (np. P) i znakiem zapisanym cyfrą arabską w kolejności od 1,2,3... itd., co stanowi ich indywidualny wyróżnik w prowadzonym ciągu produkcyjnym (rys. 7).



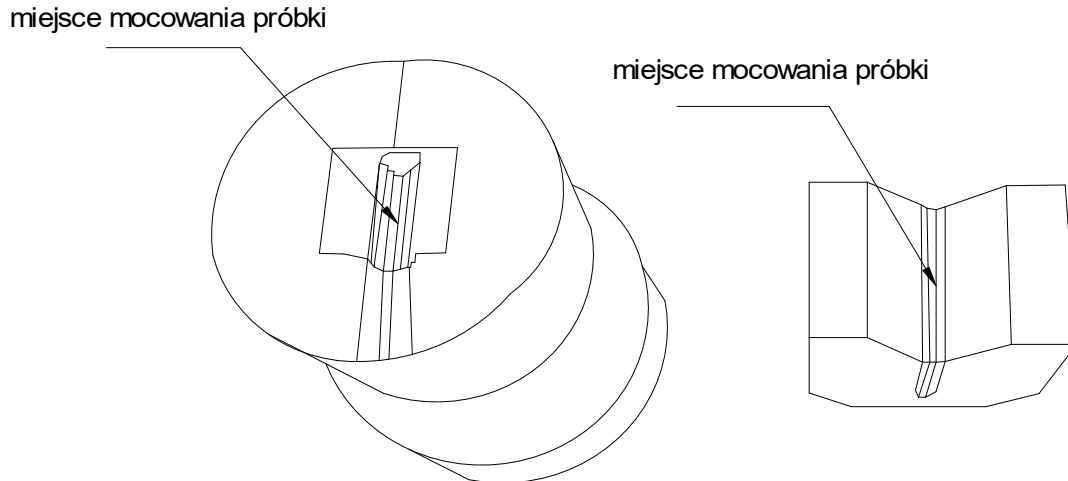
Rys. 7. Sposób i miejsce cechowania łopatek przeznaczonych do badań zmęczeniowych.

Badania zmęczeniowe prowadzono przy zastosowaniu elektrodynamicznego wibratora firmy LDS Small Electrodynamic Vibration System V721 Series składającego się ze wzbudnika drgań LDS serii V721, wzmacniacza LPA1000 i zasilacza pola cewki FPS. Łopatki Turbiny Sprężarki mocowano w uchwycie na stole wzbudnika elektrodynamicznego i stosowano sygnał wzbudzający w zakresie drgań rezonansowych z pierwszą postacią giętą. Wartość naprężenia, mierzona za pomocą czujnika umieszczonego bezpośrednio na powierzchni łopatki (rys. 8), był utrzymywana na stałym poziomie w czasie realizowanej próby.



Rys. 8. Miejsce mocowania tensometru na próbce do badań wytrzymałości zmęczeniowej.

Badania wytrzymałości zmęczeniowej wykonywano z wykorzystaniem metody, w której cyklicznie podwyższono wartość naprężenia aż do momentu dekohezji łopatki. Jako bazową liczbę cykli przyjęto $N = 1 \times 10^7$. Wartość naprężeń podnoszono skokowo aż do pęknięcia łopatki o $\Delta\sigma = 2 \text{ [kG/mm}^2\text{]}$. Wykonano również badania przy zastosowaniu metody schodkowej.



Rys. 9. Oprzyrządowanie do mocowania Łopatek Turbiny przeznaczonych do badań wytrzymałości zmęczeniowej (rysunek poglądowy).

Dla każdej łopatki wyznaczono **umowną granicę wytrzymałości, średnią wytrzymałość zmęczeniową** trwałą oraz odchylenie standardowe zgodnie z [1] [2].

Umowna granica wytrzymałości:

$$\sigma_{-1}^y = \sigma_p^y - \frac{\Delta\sigma}{2}, \quad [1]$$

gdzie:

σ_p^y – naprężenie niszczące łopatki,
 $\Delta\sigma$ – przyrost wartości naprężenia

Średnia wytrzymałość zmęczeniowa łopatek:

$$\sigma_{-1} = \frac{\sum_{y=1}^n \sigma_{-1}^y}{n}, \quad [2]$$

gdzie:

n – liczba łopatek

Metoda z zastosowaniem cyklicznego podwyższania wartości naprężenia do momentu pęknięcia łopatki prowadzona jest w warunkach zdefiniowanej liczby cykli N dla badanej łopatki, przy wykorzystaniu stopniowego zwiększania wartości naprężeń po wykonaniu N cykli próby. Każdą próbę rozpoczyna się od obciążenia łopatki naprężeniem minimalnym σ_0 . Jeśli próbka pęknie w czasie N cykli próby, to wartość naprężeń dla kolejnej próby ulega podwyższeniu o $\Delta\sigma$. Próby zmęczeniowe prowadzi się do zniszczenia każdej próbki.

Metoda schodkowa umożliwia ocenić czy próbka ulegnie pęknięciu w czasie zdefiniowanej liczby cykli N i założonym naprężeniu σ . Każda z próbek badana jest przy określonym naprężeniu i przy tej samej założonej wcześniejszej liczbie cykli N . Jeśli próbka ulegnie pęknięciu podczas realizowanej próby, to kolejna próba prowadzona jest przy naprężeniu mniejszym

o $\Delta\sigma$, jeżeli natomiast próbka nie ulegnie pęknięciu to wartość naprężenia w kolejnej próbie prowadzonej z użyciem następnej próbki jest podwyższana o $\Delta\sigma$. Przed rozpoczęciem badań trwałości zmęczeniowej z użyciem metody schodkowej konieczne jest zdefiniowanie parametrów odnoszących się do liczby cykli, wartości nominalnych i zmian naprężeń planowanych dla badanych próbek w odniesieniu do materiału, z którego są wykonane (tabela 1). Wymagane jest zatem wykonanie wstępnych prób dla dwóch skrajnych wartości naprężeń oraz liczby cykli prowadzących do pęknięcia oraz do zakończenia próby bez dekohezji łopatki.

Tab.3. Parametry stosowane w metodzie schodkowej i „do pęknięcia”.

Metoda schodkowa	Metoda do pęknięcia
N – bazowa liczba cykli	N – bazowa liczba cykli
σ – naprężenie początkowe	σ_0 – nominalne naprężenie próby
$\Delta\sigma$ – przyrost wartości naprężenia	$\Delta\sigma$ – przyrost wartości naprężenia

Przed rozpoczęciem badań zmęczeniowych wszystkie łopatki poddano kontroli fluorescencyjnej (FPI) w celu wyeliminowania wadliwych części.

Bazowa liczba cykli dla badanych łopatek wynosiła $2 \times 10^6 \div 2 \times 10^7$. Przyjęto zakres zmiany wartości naprężenia $\Delta\sigma$ na poziomie 3-5% wytrzymałości zmęczeniowej trwałej, która wynosiła 700 MPa. W badaniach przyjęto obciążenia zmieniające się w sposób sinusoidalny. Parametry cyklu do badań określające wartość amplitudy naprężenia cyklu oraz naprężenia średniego cyklu dobierano w zależności od badanych elementów. W badaniach przyjęto obciążenie zmieniające się w sposób sinusoidalny. Parametry cyklu do badań określające wartość amplitudy naprężenia cyklu oraz naprężenia średniego cyklu dobierano w zależności od badanych elementów.

Do analizy wyników prowadzonych w ramach pracy doktorskiej użyto arkusza kalkulacyjnego umożliwiającego wyznaczenie trwałości zmęczeniowej badanych łopatek. W arkuszu prowadzono obliczenia zgodnie z wynikami uzyskanymi w trakcie realizowanej próby z zastosowaniem opisanych metod badawczych (schodkowej i metody do pęknięcia). Przed wykonaniem obliczeń dokonywano wyboru odpowiedniej metody pomiarowej i wprowadzano do arkusza, zgodnie z wykonywanymi próbami, następujące dane wejściowe:

- bazową liczbę cykli N
- $\Delta\sigma$ – przyrost naprężenia
- wyniki z próby zmęczeniowej.

Wynikiem obliczeń była średnia wartość wytrzymałości zmęczeniowej trwałej oraz odchylenie standardowe z danych pomiarowych.

Do obliczeń wytrzymałości zmęczeniowej trwałej w **metodzie schodkowej** wykorzystuje się liczbę prób (liczba łopatek, które zostały lub nie zostały zniszczone), których całkowita częstość występowania n jest w badaniu mniejsza.

Wartość średniej wytrzymałości zmęczeniowej trwałej wyznacza się stosując wzory Dixona i Mooda [3]:

$$\sigma_{-1} = \sigma_0 + \left(\frac{\sum_{i=0}^q x_i n_i}{n} \pm \frac{1}{2} \right) \times \Delta\sigma \quad [3]$$

σ_0 – najniższa wartość naprężenia dla prób, których całkowita częstość występowania w badaniach jest mniejsza.

$\Delta\sigma$ – przyrost wartości naprężenia

n – liczba łopatek z prób, których całkowita częstość występowania w badaniach jest mniejsza

Znak „+” w [3] stosuje się w obliczeniach prowadzonych dla prób, które nie kończą się zniszczeniem łopatek, a „-”, w przypadku prowadzenia obliczeń dla prób, w których łopatki ulegają zniszczeniu. Obliczona średnia wartość wytrzymałości zmęczeniowej trwałej stanowi wartość naprężenia, przy której 50% zastosowanych w badaniach próbek przetrwa daną liczbę cykli zmian obciążenia. Odchylenie standardowe obliczono wg [4].

$$s = 1,62 \times \left(\frac{n \times \sum_{i=1}^q (i^2 \times n_i) - \sum_{i=0}^q i \times n_i^2}{n^2} + 0,029 \right) \times \Delta\sigma \quad [4]$$

Wyznaczenie średniej wartości wytrzymałości zmęczeniowej trwałej w **metodzie do pęknięcia** wymaga określenia wartości umownej granicy wytrzymałości dla każdej badanej próbki [5]:

$$\sigma_{-1}^y = \sigma_p^y - \frac{\Delta\sigma}{2} \quad [5]$$

σ_{-1}^y – wartość naprężenia, przy którym próbka ulega zniszczeniu

$\Delta\sigma$ – przyrost wartości naprężenia

Wartość średniej wytrzymałości zmęczeniowej trwałej oblicza się wg wzoru [6]:

$$\sigma_{-1} = \frac{\sum_{y=1}^n \sigma_{-1}^y}{n}, \quad [6]$$

n – liczba łopatek

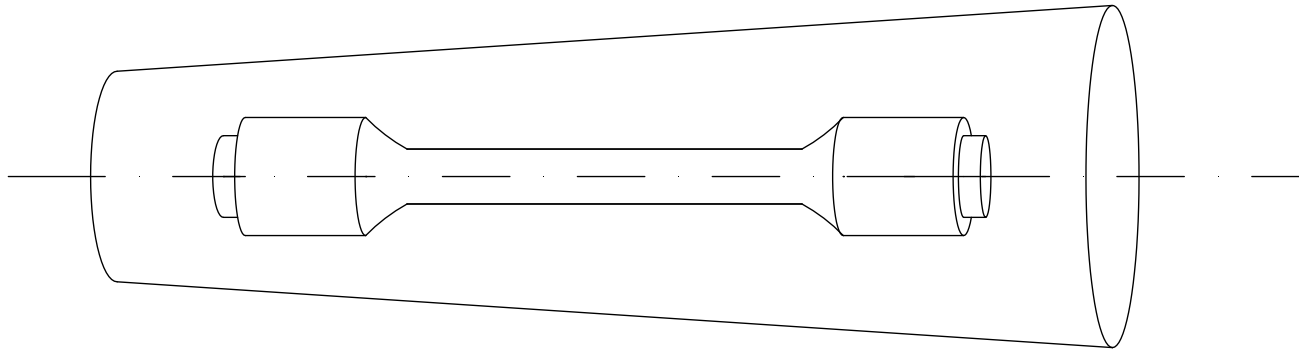
Natomiast odchylenie standardowe liczone jest wg [7]:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{y=1}^n (\sigma_{-1}^y - \sigma_{-1})^2}{n-1}} \quad [7]$$

Malejąca amplituda drgań dla zdefiniowanej wartości naprężenia podczas próby zmęczeniowej może sygnalizować powstanie i propagację pęknięcia próbki. W celu potwierdzenia powstania pęknięcia, próbki po badaniach zmęczeniowych poddano kontroli fluorescencyjnej (FPI). W przypadku wykrycia pęknięć w części uchwytowej, próbki takie eliminowano z dalszych obliczeń. Próbę ponawiano, lub pomijano w końcowych analizach.

2.10.2. Próba pelzania i statyczna próba rozciągania.

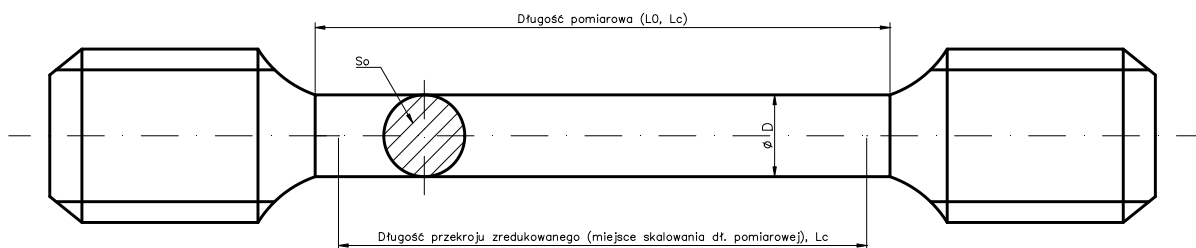
W ramach wykonywanych odlewów, oprócz łopatek, w każdej formie odlewano również dodatkowe próbki cylindryczne (tzw. próbki świadki), z których wykonano próbki przeznaczone do badań własności mechanicznych, tj. **do badań żarowytrzymałości w próbie pelzania** oraz **do badań wytrzymałościowych w statycznej próbie rozciągania**. Przed wykonaniem próbek do badań żarowytrzymałości, odlane wraz z łopatkami próbki cylindryczne obrobiono cieplnie w ramach tego samego wsadu, tj. wraz z łopatkami produkcyjnymi.



Rys. 10. Sposób pobrania próbek do badań wytrzymałościowych z próbek „świadców”.

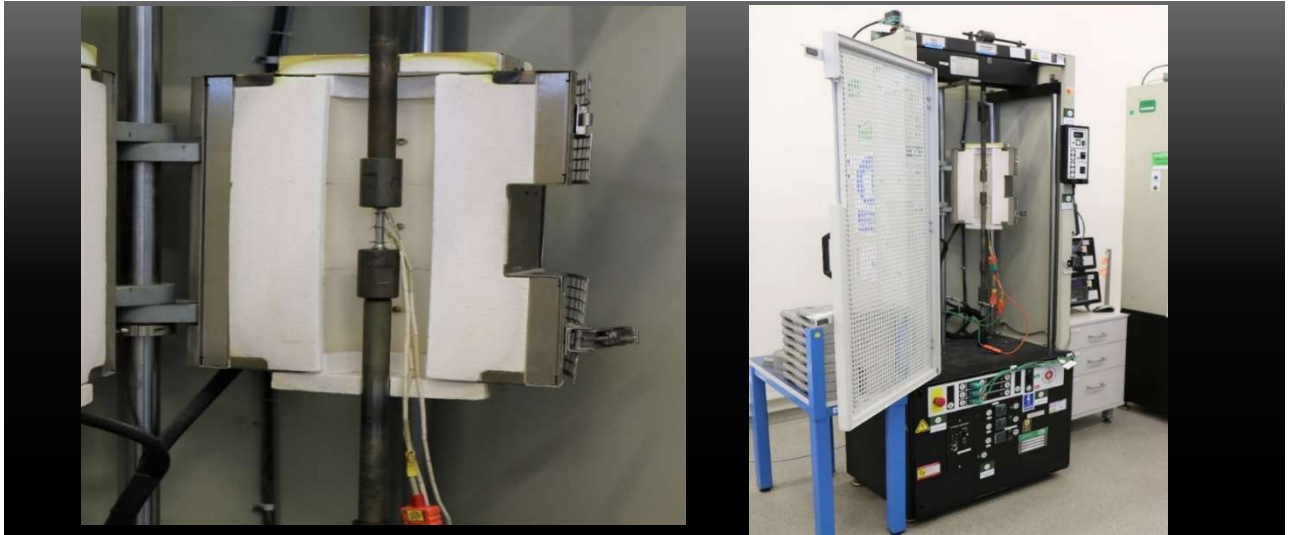
Ocena żarowytrzymałości – próba pełzania

Żarowytrzymałość Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia po przesycaniu z temperatury 1225°C/4h określono w próbach pełzania prowadzonych za pomocą maszyny wytrzymałościowej ATS 2330 (rys. 12). Próbki nagrzewano w piecu do 975°C i obciążano stałą siłą osiową wywołującą w ich przekrojach poprzecznych naprężenie rozciągające o wartości 226 MPa. Próbę pełzania prowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 204:2018-11. Podstawowym problemem doboru warunków próby pełzania w jednoosiowym stanie naprężenia jest określenie kształtu i wymiarów próbki. Zaproponowano próbki o kształcie i wymiarach wynikających z geometrii próbek świadców (rys. 10).



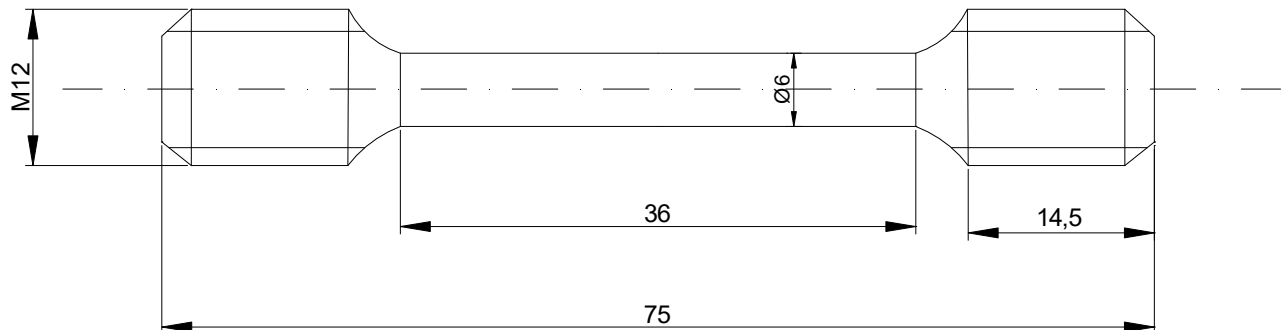
S_0 - pole powierzchni przekroju poprzecznego próbki na długości pomiarowej, mierzone przed rozerwaniem [mm^2], L_0 - długość pomiarowa początkowa [mm], L_c -długość próbki [mm],
 $\varnothing D$ - średnica początkowa próbki [mm]

Rys. 11. Próbka do badania żarowytrzymałości w próbie pełzania o przekroju okrągłym.



Rys. 12. Maszyna wytrzymałościowa ATS 2330 stosowana do prowadzenia prób pełzania.

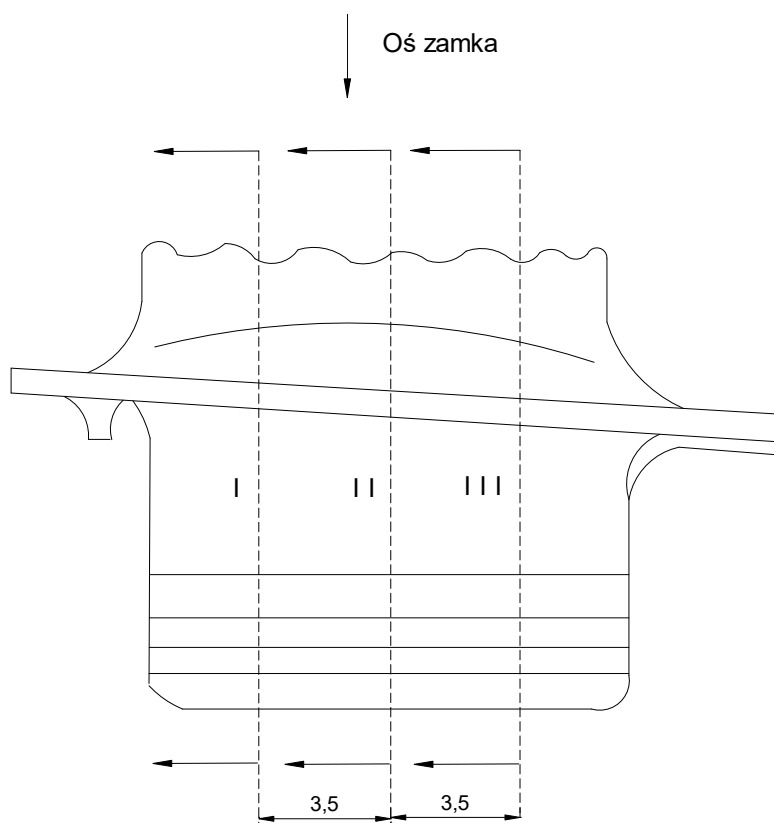
Wytrzymałość na rozciąganie R_m oraz wydłużenie A_5 odlewów wyznaczono w **statycznej próbie rozciągania**. Próby prowadzono w temperaturze pokojowej (w zakresie od 10 do 38°C) na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z100, zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1:2020-05.



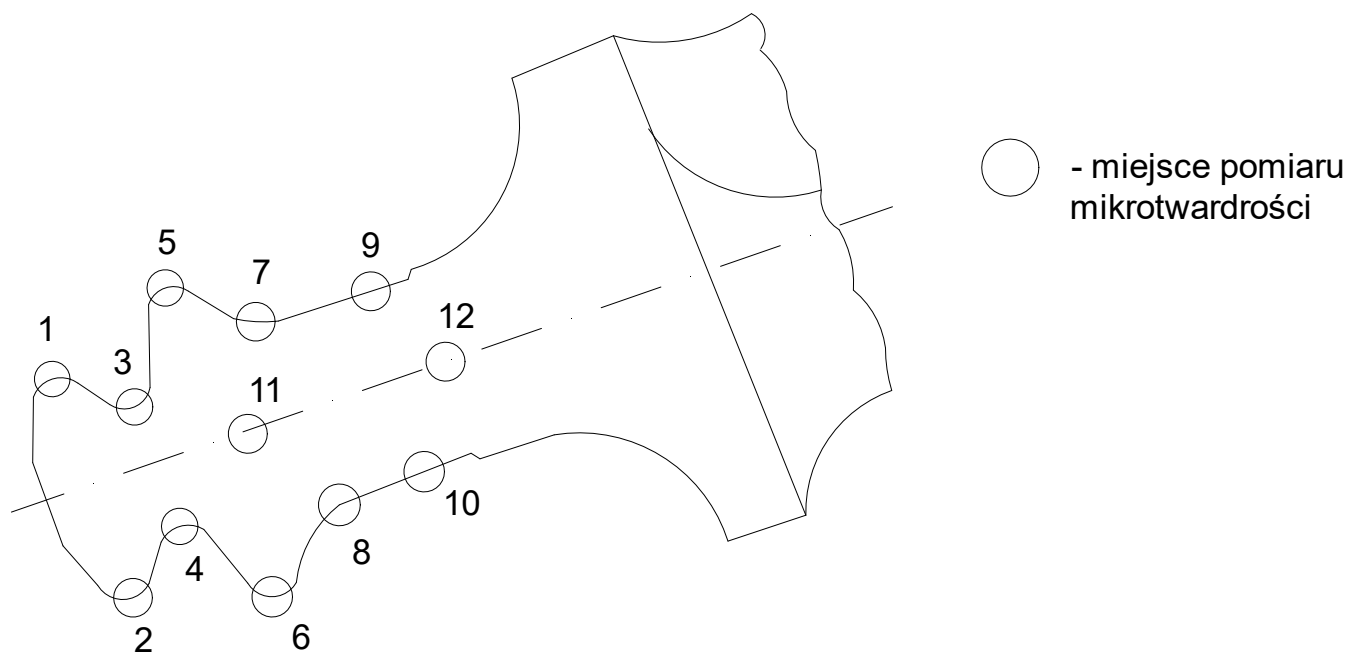
Rys. 13. Próbką stosowaną do badania wytrzymałości na rozciąganie.

2.10.3. Pomiar twardości

Pomiar twardości na zglądach wykonanych z obszarów zamka i szyjki *Łopatki Turbiny Sprężarki I Stopnia* wykonano stosując mikrotwardościomierz ZHV μ -A (HV0,3). Rozkład twardości wykonano na głębokości ok. 0,1 mm od krawędzi zewnętrznej łopatki i wykonano serię 12 odcisków, z której obliczono wartość średnią (rys. 14).



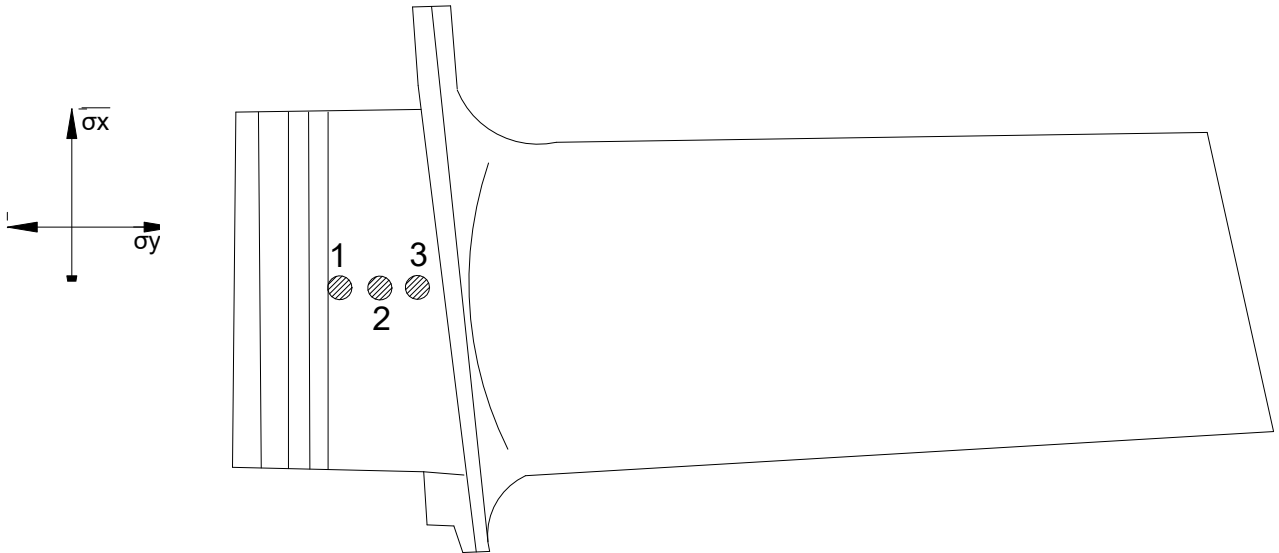
Rys. 14. Schemat położenia miejsc w łopatce, z których pobrano materiał na zgłady do pomiarów twardości Widok od strony koryta łopatki z zaznaczonymi płaszczyznami cięcia



Rys. 15. Przekrój zamka łopatki z zaznaczonymi miejscami pomiaru twardości.

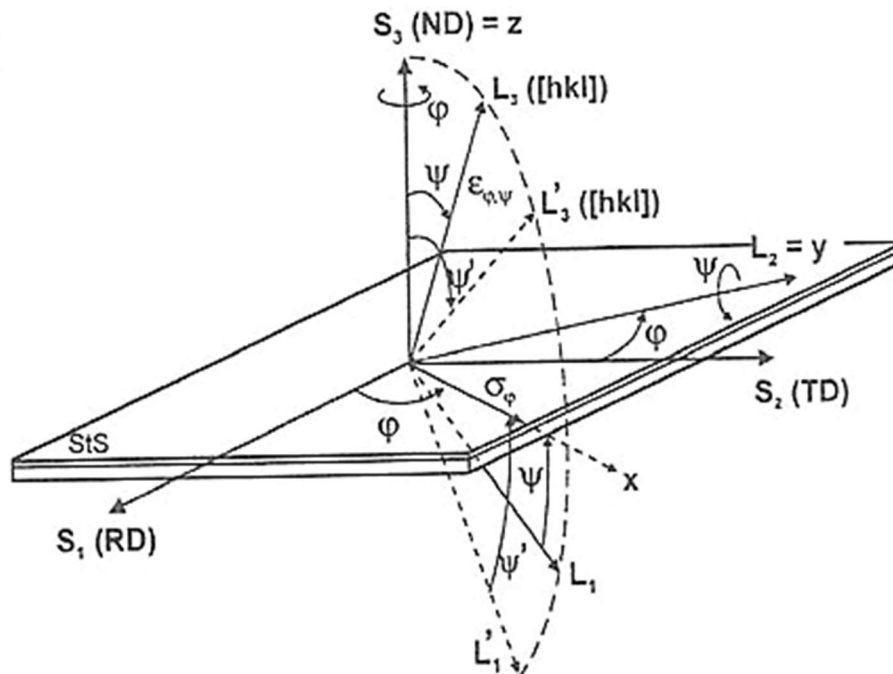
2.10.4. Pomiar naprężeń wewnętrznych.

Odształcenie sprężyste w 3 miejscach w obszarze zamka gotowej łopatki turbiny (rys. 16) określono metodą dyfrakcji rentgenowskiej przy zastosowaniu dyfraktometru ProtoiXRD firmy Proto Manufacturing.



Rys. 16. Schemat łopatki z zaznaczonymi miejscami pomiaru naprężeń wewnętrznych.

W celu ustalenia wartości naprężeń własnych stosowano metodę $\sin^2\psi$. W prowadzonych badaniach wykorzystano promieniowanie charakterystyczne MnK_α o średnicy wiązki 2 mm. Napięcie anodowe i prąd anodowy wynosiły odpowiednio 20 kV i 4 mA.



Rys. 17 . Schemat pomiaru naprężeń wewnętrznych metodą $\sin^2\psi$.

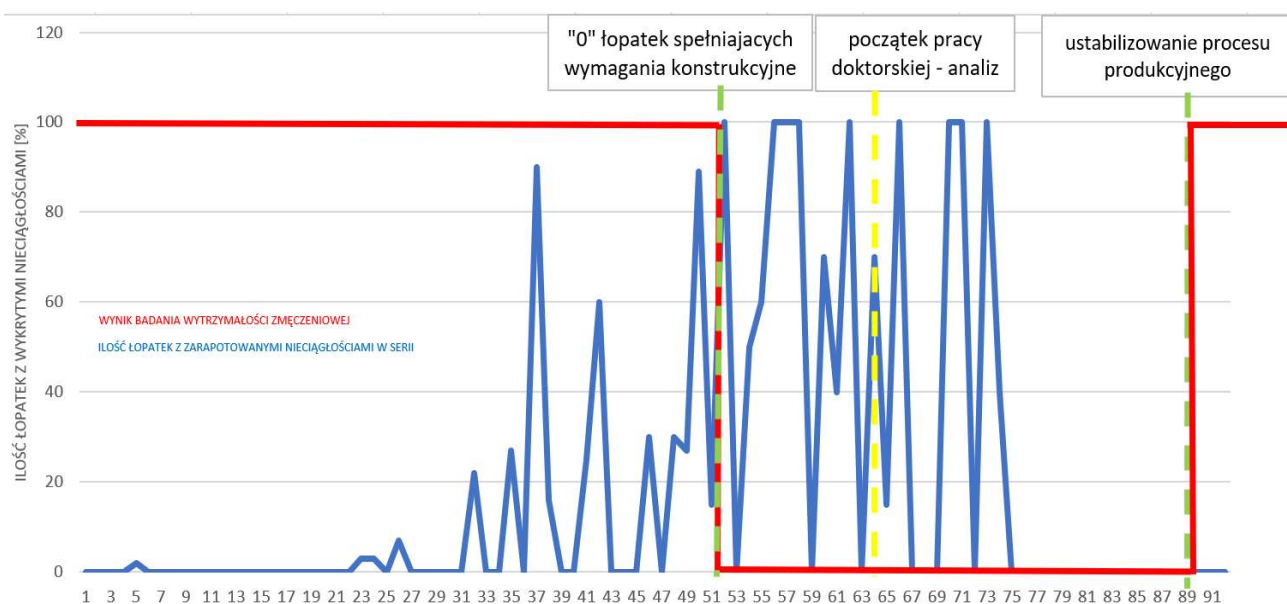
Odkształcenie $\epsilon_{\phi\psi} = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0}$ wyznaczono dla stałych wartości kąta ψ w przedziale od -30° do 30° .

III. BADANIA WŁASNE.

3. Analiza procesu odlewania łopatek z żarowytrzymałego stopu odlewniczego ŻS6U-WI.

3.1. Identyfikacja problemów produkcyjnych w technologii wytwarzania Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia.

Błędy wykonawcze, wady materiałowe oraz wszelkie nieprawidłowości w technologii odlewania mogą powodować inicjowanie powstania wad i defektów. Ich znajomość jest kluczowa na etapie badań odbiorczych, ale i również weryfikacyjnych na każdym etapie produkcji części lotniczej. Identyfikacja wad i defektów jest istotna zwłaszcza w przypadku, gdy istnieją wątpliwości co do jakości wykonanych prac oraz na etapie opracowywania zmian optymalizacyjnych w technologii wytwarzania, umożliwiających wyeliminowanie wszelkich nieciągłości powstałych w danym etapie produkcyjnym części lotniczej. Do jednych z najczęściej występujących wad w łopatkach turbiny są pęknięcia wewnętrzne o wymiarach, które nie pozwalają, przy zastosowaniu klasycznych badań nieniszczących, na ich prawidłową identyfikację. W przypadku produkowania skomplikowanych, pod względem geometrycznym, części, jak łopatki turbiny, obszarami szczególnie narażonymi na występowanie pęknięć (również wewnętrznych) są miejsca, w których następuje zmiana geometrii, co w czasie krystalizacji w formie ceramicznej, może prowadzić do lokalnego spiętrzenia naprężeń wewnętrznych inicjujących pęknięcia. Nowoczesne techniki badawcze oraz wiedza operatorów i dostęp do szerokiej bazy danych umożliwiają wykryć, na każdym etapie cyklu produkcyjnego Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia, wszelkie nieciągłości determinujące ich jakość oraz decydujące o możliwości ich zastosowania praktycznego w aplikacji lotniczej. Ocena przyczyny powstawania oraz opis charakteru pęknięć należy do złożonych zadań technologicznych wymagających wiedzy z obszaru badań metalograficznych oraz doświadczenia produkcyjnego bazującego na wymaganiach odnoszących się do poszczególnych etapów technologii wytwarzania Łopatek Turbiny. Ważne jest, w trakcie realizowanego procesu wytwarzania i wykonywanych w tym czasie ocen weryfikujących jakość produktu, sygnalizowanie wystąpienia każdej niezgodności poprzez wprowadzenie np. w karcie określającej harmonogram produkcji zleceń, danych opisujących zidentyfikowaną wadę, w celu zdefiniowania zaburzeń w strumieniu produkcyjnym, co pozwala ocenić skalę problemu (rys. 29 - przykład karty kontroli produkcji dla łopatek).



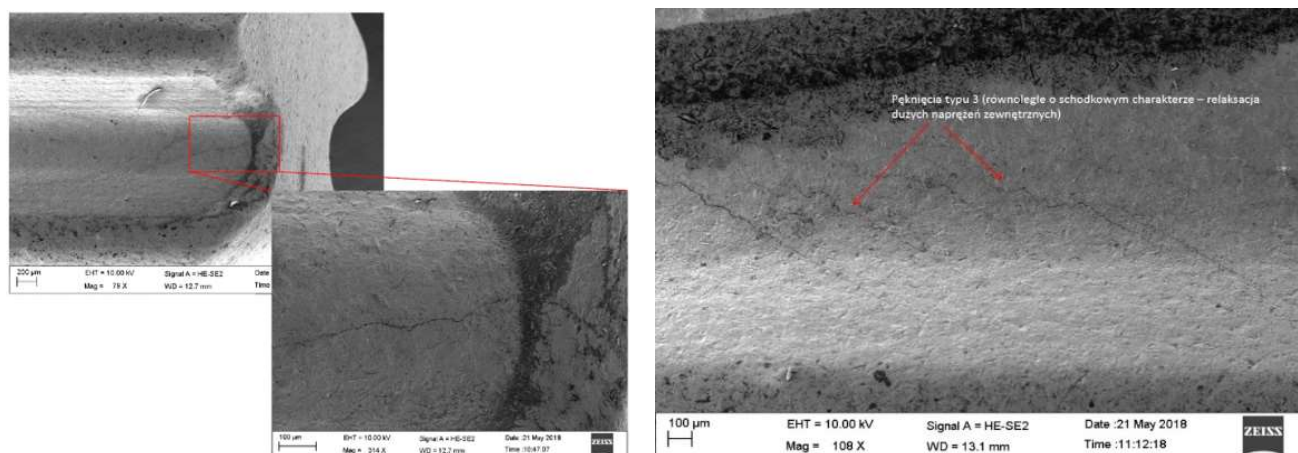
Rys. 29. Karta kontrolna procesu produkcji łopatek turbiny.

Wady w częściach produkowanych na skalę masową to powszechnie występujący problem oddziałujący na jakość wyrobu. Niedopuszczalnym jest zatwierdzenie odlewów do eksploatacji, w przypadku identyfikacji jakichkolwiek nieciągłości, na każdym etapie weryfikacji jakości w technologii ich wytwarzania. Powstające braki powodują nadmierne koszty produkcji i istotnym staje się ustalenie przyczyn powstania wady. Niska jakość wyrobu czy błędy w cyklu produkcyjnym są źródłami dodatkowych, nieprzewidzianych kosztów. Jednym ze sposobów detekcji nieprawidłowości powstających w odlewach łopatek jest prowadzenie badań wyrobów w sposób ciągły, po każdym procesie wymaganym do zrealizowania w ciągu produkcyjnym. Wyniki tych badań prezentowane są w formie diagramu przyczyn i skutków umożliwiającego ocenić charakter rozpatrywanego problemu. Na osi czasu cyklu produkcyjnego części (w pracy - łopatek) raportuje się liczbę wykrytych wad, w tym przypadku pęknięć (niebieska linia na rys. 29) w odniesieniu do uzyskanego wyniku produkcyjnego. Po zakończeniu danego cyklu, warunkiem gwarantującym bezpieczną eksploatację części jest uzyskanie pozytywnego wyniku (zgodnego z normą) odporności na naprężenia zmęczeniowe gotowego wyrobu (wartości wymagane są zamieszczone na rysunku konstrukcyjnym bądź opisane w postaci ostatecznych wymagań w odniesieniu do warunków technicznych odbioru części). Brak uzyskania certyfikatu zgodności części z tym parametrem ma bezpośredni wpływ na obniżony poziom produkcji. Niezgodność tą raportuje się na diagramie kontrolnym, co determinuje rozpoczęcie działań zapobiegawczych w odniesieniu do precyzyjnie wyselekcjonowanych przyczyn ich powstawania (przerywana żółta linia na rys. 29 wyznacza początek prac związanych z określeniem przyczyn powstania odchyłki).

Empirycznie stwierdzone nieprawidłowości umożliwiły opracowanie założeń i celów badawczych stanowiących podstawę prowadzenia prac badawczych związanych z pracą dokorską pt.:

„Wpływ obróbki mechanicznej i morfologii wydzielen węglików w żarowytrzymałych stopach odlewniczych ŻS6U-WI na własności zmęczeniowe Łopatek I Stopnia Turbiny Sprężarki stosowanych w produkcji lotniczej.”

Odchyłki technologiczne raportowane podczas cyklu produkcyjnego części lotniczej mają często złożony charakter. Ocena wizualna jest niewystarczająca do określenia przyczyny powstawania wad konstrukcyjnych czy technologicznych. Przyczynę oraz ocenę charakteru pęknięć określa się za pomocą m.in. badań metalograficznych czy badań nieniszczących. Na rysunku 30 przedstawiono przykład pęknięć widocznych na Łopatkach Turbiny Sprężarki I Stopnia obserwowanych na łopatkach po próbie zmęczeniowej.



Rys. 30. Mikrostruktura z obszaru zamka łopatki, widoczne pęknięcie o schodkowym charakterze, SEM.

W celu określenia przyczyny powstawania wad w częściach lotniczych, na każdym etapie poszczególnych operacji obróbczych, raportowane są wszelkie nieciągłości mające wpływ na jakość finalnego produktu. Do tych nieciągłości zalicza się pęknięcia, które determinują żywotność łopatek. Przeprowadzono zatem badania wstępne mające na celu ocenę mikrostruktury dwóch Łopatek Turbiny sprężarki pod kątem występowania pęknięć oraz określenia ich przyczyn powstawania.

Badania metalograficzne prowadzono na zglądach metalograficznych wykonanych z obszaru zamka (rys. 5. „Metodyka Badań”) łopatki, gdzie stwierdzono, podczas badań FPI (kontroli fluoroscencyjnej) obecność nieciągłości w formie pęknięć (rys. 31).



Rys. 31. Wyniki kontroli FPI ze wskazaniem nieciągłości na zamku Łopatki Turbiny Sprężarki.

Badania prowadzono na dwóch typach odlewów Łopatek Turbiny Sprężarki po próbie zmęczeniowej pochodzących z jednego wytopu:

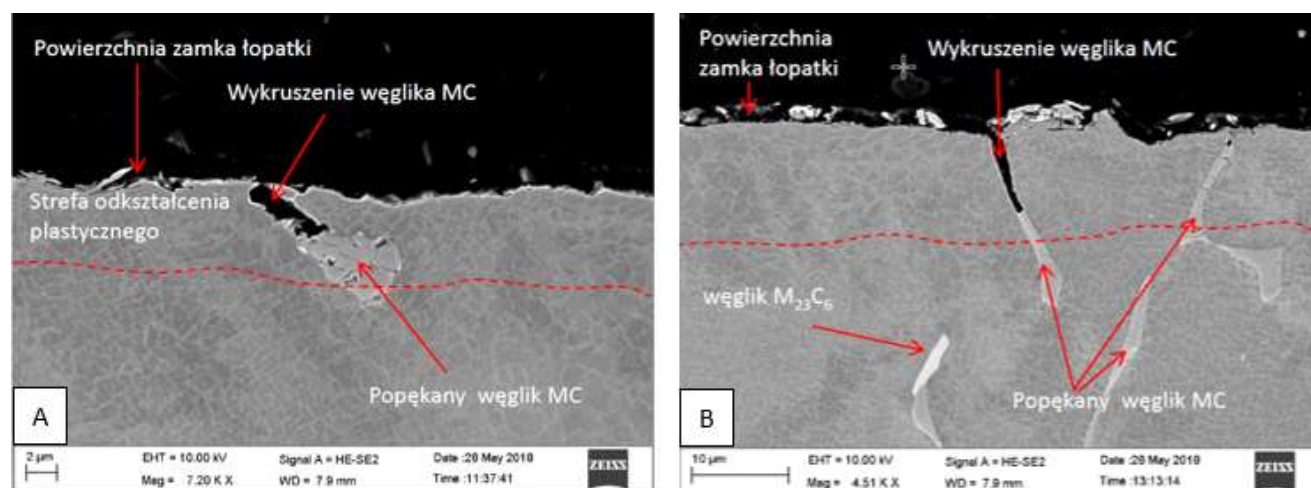
A1 – łopatka bez wskazań nieciągłości (pęknięć)*

A2 – łopatka z pęknięciami*

*badania FPI wykonano po próbie zmęczeniowej.

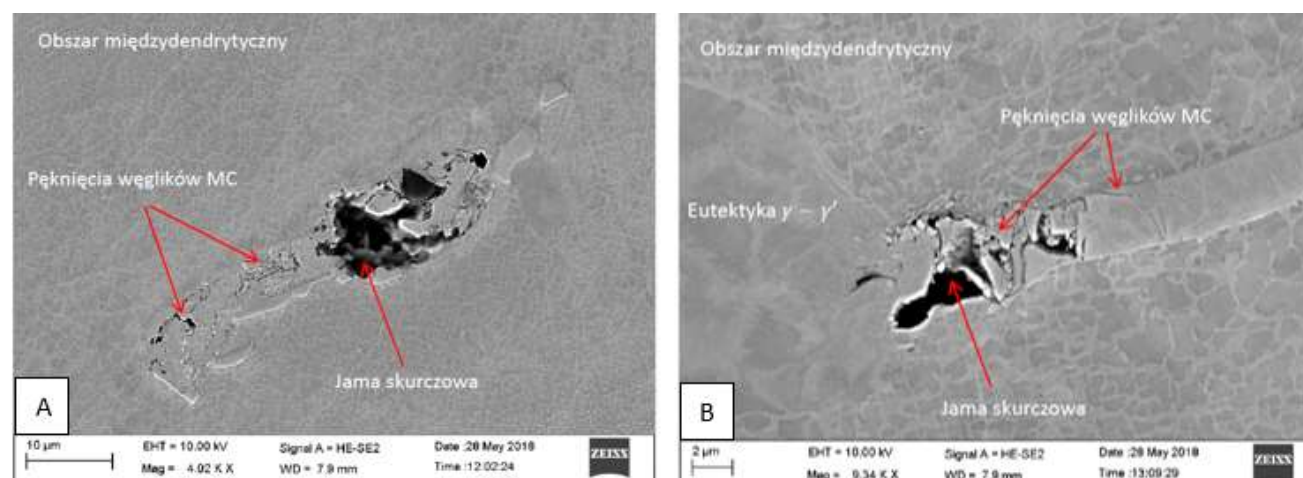
Przeprowadzone obserwacje makro- i mikrostruktury łopatek A1 i A2, po próbach zmęczeniowych, umożliwiły zidentyfikować pęknięcia, które sklasyfikowano wg przyczyny ich powstawania. Wyróżniono **trzy typy pęknięć**, przy czym typ 1 i 2, to pęknięcia, które obserwowano w obu rodzajach łopatek, a pęknięcia typu 3 obserwowano na przekroju zamka łopatki A2 oraz na powierzchni łopatki A1:

TYP 1 – pęknięcie zewnętrzne (powierzchniowe) o głębokości do 20µm, powstałe na skutek wykruszenia wydzielen tj. węglików w czasie obróbki wykończeniowej, tj. obróbki strumieniowo-sciernej, tj. kulowania lub szlifowania (rys. 32). Pęknięcia propagują w wyniku koncentracji naprężeń w mikroszczelinach powstałych w wyniku oddziaływania przeróbki plastycznej na zimno (kulowania) generującej duży poziom odkształceń plastycznych powodujących pęknięcie i oddzielenie się cząstek węglików od osnowy. Pęknięcia typu 1 wykazują charakter lokalny, powierzchniowy o niewielkim zasięgu propagacji i występują głównie w przestrzeniach międzidendrytycznych charakteryzujących się podwyższoną zawartością węglików. Pęknięcia tego typu prowadzą do lokalnej relaksacji naprężeń wewnętrznych.



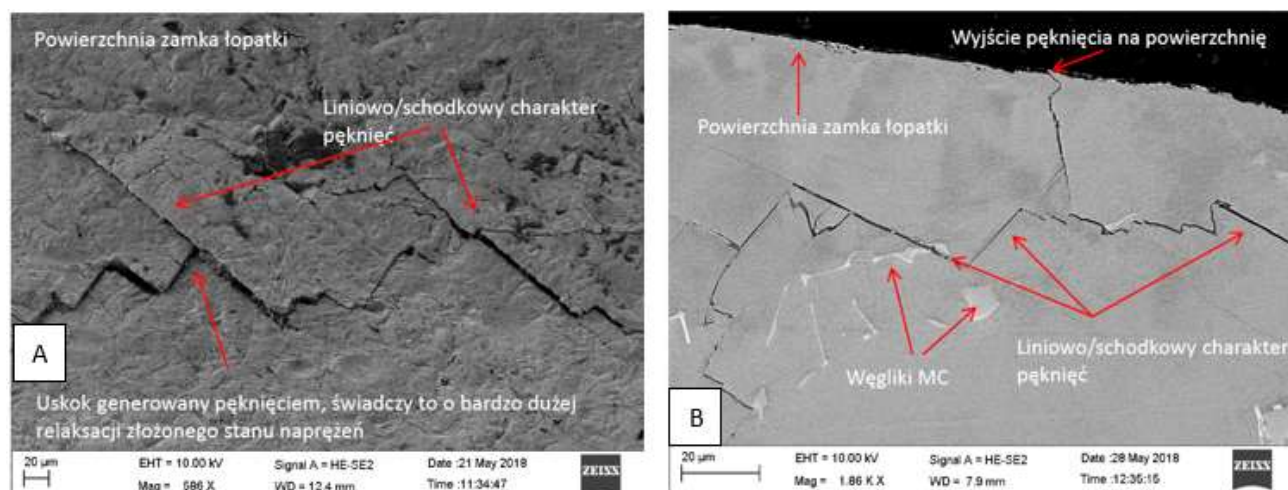
Rys. 32. A – Łopátka A1, przekrój poprzeczny zamka, pęknięcie typu 1, zgląd nietrawiony, SEM. B – łopátka A2, przekrój poprzeczny zamka, pęknięcie typu 1, zgląd nietrawiony SEM.

TYP 2 – pęknięcia wewnętrzne występujące na całym przekroju łopatek. Charakteryzują się długością do kilku µm, powstają w wyniku oddziaływania naprężeń wewnętrznych generowanych przez skurcz (powstanie jamy skurczowej), w trakcie ostatniej fazy krzepnięcia podczas krystalizacji. Występują głównie w obszarach międzidendrytycznych, w bliskiej obecności innych rodzajów nieciągłości, w tym porów, rzadzizn oraz węglików (rys. 33). Pęknięcia tego typu nie są możliwe do wykrycia w badaniach metodą penetracyjną (PT) powierzchni łopatek.



Rys. 33. A – Łopátka A1, przekrój poprzeczny zamka, pęknięcie typu 2, zgląd nietrawiony, SEM. B – łopátka A2, przekrój poprzeczny zamka, pęknięcie typu 2, zgląd nietrawiony SEM.

TYP 3 – Pęknięcia inicjowane naprężeniami zewnętrznymi generowanymi w czasie obróbki mechanicznej. Powstanie pęknięć typu 3 nie jest zależne od czynników metalurgicznych oraz mikrostrukturalnych. Pęknięcia charakteryzują się geometrią/kształtem prostych odcinków często równoległych, o układzie schodkowym (rys. 34). Występują w całej objętości łopatki, w ziarnach dendrytów, w obszarach międzydendrytycznych, na granicach ziarn, w okolicach porów, na granicy osnowa - cząstki węglików różnego typu, wydzielen fazy γ' oraz kanałów fazy γ . Zarodkowanie pęknięć typu 3 oraz ich propagacja w formie schodkowej świadczy o występowaniu bardzo dużych naprężeń zewnętrznych przekraczających wartość naprężenia krytycznego (wytrzymałość materiału). Pęknięcia te prowadzą do relaksacji naprężeń i są charakterystyczne dla materiału kruchego.



Rys. 34. A – Łopatka A2, przekrój poprzeczny zamka, pęknięcie typu 3, zgląd nietrawiony, SEM. B – łopatka A2, przekrój poprzeczny zamka, pęknięcie typu 3, zgląd nietrawiony SEM.

Badania mikrostruktury łopatek potwierdziły, że zastosowanie obróbki wykańczającej w technologii wytwarzania Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia decyduje o finalnej jakości odlewów. Ze względu na złożony charakter pęknięć wynikający z różnych przyczyn inicjacji, konieczne jest przeprowadzenie badań mających na celu określenie wpływu czynników produkcyjnych na jakość gotowego wyrobu poprzez zdefiniowanie mechanizmów ich powstawania, identyfikacji rodzaju wad oraz sposobu zapobiegania ich występowania. Z wykonanych badań wstępnych wynika, że zarówno procesy obróbki półwyrobu, tj. obróbka cieplna oraz powierzchniowa obróbka wykańczająca czy procesy wytwórcze mają wpływ na występowanie pęknięć, co wiąże się z obniżeniem własności zmęczeniowych łopatek. Jednocześnie stwierdzono, że zastosowanie badań nieniszczących NDT, np. metody penetracyjnej, czy metody badań ultradźwiękami nie zapewnia pełnej, rzetelnej identyfikacji wszystkich typów pęknięć, które mogą występować w analizowanych łopatkach.

Ze względu na niewielkie wymiary mikropęknięć oraz ich lokalizację konieczne jest wykonanie badań metalograficznych. Ocena rodzaju pęknięć, identyfikacja przyczyn ich generowania jest krytyczna dla ustalenia modyfikacji warunków produkcyjnych w celu ograniczenia do minimum warunków sprzyjających powstawaniu nieciągłości w odlewach i częściach gotowych (tabela 3). Decyduje to o obniżeniu liczby braków produkcyjnych i pozwala zachować wymaganą od łopatek odporność na naprężenia zmęczeniowe.

Tabela. 3. Charakterystyka pęknięć obserwowanych w Łopatkach Turbiny Sprężarki.

Typ pęknięć	TYP 1	TYP 2	TYP 3
Wymiar mikropęknięcia	do 20µm	do kilku µm	do ok. 1500µm
Mechanizm powstania	Miejscowa koncentracja napreżeń spowodowana odkształceniami powstałymi w trakcie obróbki strumieniowej (kulowanie) lub szlifowania powierzchni odlewu.	Napreżenia wewnętrzne spowodowane skurczem odlewniczym.	Spowodowane procesami obróbki mechanicznej, niezależne od czynników metalurgicznych oraz mikrostrukturalnych
Występowanie	W obszarach międzydendrytycznych w obecności cząstek węglików	W obszarach międzydendrytycznych, w sąsiedztwie innych nieciągłości, tj. porów, rzadzisz oraz cząstek węglików	W całej objętości odlewu.
Metoda identyfikacji	Badania metalograficzne	Badania nieniszczące metodą penetracyjną (PT) powierzchni łopatek.	Badania nieniszczące metodą penetracyjną (PT) powierzchni łopatek.

3.2. Analiza procesu odlewania łopatek z żarowytrzymałego stopu odlewniczego ŻS6U-WI.

3.2.1. Wpływ pierwiastków charakteryzujących się wysokim powinowactwem do węgla na własności zmęczeniowe materiału ŻS6U-WI.

Do badań wybrano półwyrób w postaci odlewu Łopatki Turbiny Sprężarki I Stopnia z żarowytrzymałego stopu odlewniczego ŻS6U-WI. Każdy odlew łopatki poddano cechowaniu (wg poniżej zamieszczonego wzoru), co zapewnia łatwą identyfikację serii odlewniczej oraz korelację wyrobów z numerem formy:

$$\underbrace{(XXXXXX)}_{\text{numer wytopu}} + \underbrace{(XX)}_{\text{numer serii}} + \underbrace{(X)}_{\text{numer formy}}$$

Jakość odlewów, w tym ich trwałość zmęczeniowa, jest zależna od wielu czynników, z których nie wszystkie mogą być modyfikowane na etapie prowadzenia procesu wytwarzania. Wymaganą jakość odlewów definiują warunki techniczne ich odbioru, które stanowią podstawę uznania odlewów za wadliwy. Stwierdzenie, na etapie oceny jakości, iż odlew posiada wady niezgodne z wymaganiami jakościowymi decyduje o jego wyeliminowaniu z produkcji. Przekroczenie wstępnie zdefiniowanej liczby braków jest sygnałem do wykonania badań mających na celu ustalenie przyczyn obserwowanych zmian w celu zmniejszenia wadliwości odlewów. W tym celu prowadzone są badania kontrolne w zakresie stosowanych materiałów wsadowych (tzw. masterheatów) oraz poszczególnych procesów odlewniczych umożliwiającących dokonanie identyfikacji możliwych przyczyn powstawania wad oraz wprowadzenia zmian pozwalających zoptymalizować proces wytwarzania odlewów. Określenie przyczyny powstawania wad oraz ich wpływu na np. trwałość zmęczeniową produktów stanowiących przedmiot badań w ramach pracy doktorskiej jest zadaniem bardzo trudnym, z uwagi na dużą liczbę czynników mogących wpływać na powstanie danej wady. Dlatego spośród czynników mających bezpośredni wpływ na jakość łopatek, które powinny zostać poddane krytycznej analizie w kontekście wpływu na proces wytwarzania odlewów, wybrano wstępnie czynnik materiałowy. Przeprowadzono zatem analizę mającą na celu ocenę wpływu zmian w składzie chemicznym stopów dostarczanych w latach 2015 do 2018 do odlewni, z których wytwarzano łopatki (tabela 4). Wyniki badań składu chemicznego odlewów łopatek wytwarzanych

w tym okresie porównano ze składem chemicznym stopu w stanie dostawy, tj. ze składem chemicznym zgodnym z dostarczonym przez dostawcę certyfikatem jakościowym (tabela 4).

Tabela. 4. Wyniki badań składu chemicznego odlewów wytworzonych w latach 2015÷2018 (% mas.).

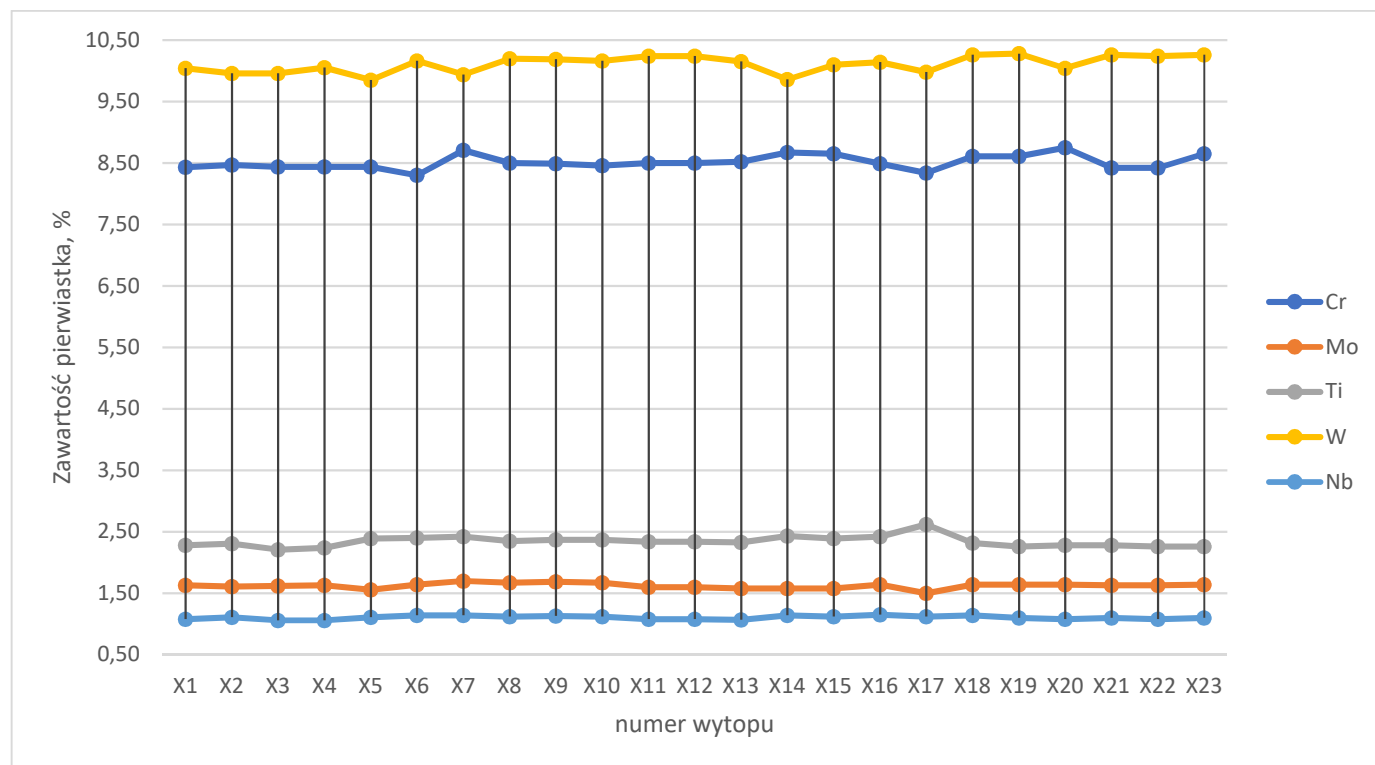
Odlew	C	P	S	Si	Mn	Al	Cr	Co	Mo	Ti	Fe	W	Nb	Ni	Zgodny z WT wynik wytrzymałości zmęczeniowej odlewu*
X1	0,142-0,147	0,003	0,004	0	0,02	0,02	8,43	9,37	1,63	2,28	0,04	10,04	1,08	60,4	TAK
X2	0,149-0,147	0,003	0,005	0	0,02	0,02	8,47	9,37	1,61	2,31	0,04	9,96	1,11	60,1	TAK
X3	0,145-0,140	0,003	0,003	0	0,02	0,02	8,44	9,33	1,62	2,21	0,03	9,96	1,06	60,7	TAK
X4	0,144-0,145	0,003	0,004	0	0,02	0,02	8,44	9,4	1,63	2,24	0,04	10,05	1,06	60,4	TAK
X5	0,151-0,138	0,004	0,003	0	0,02	0,02	8,44	9,35	1,56	2,39	0,04	9,85	1,11	60,1	TAK
X6	0,156-0,160	0,005	0,004	0	0,02	0,02	8,3	9,4	1,64	2,4	0,05	10,16	1,14	59,9	TAK
X7	0,157-0,159	0,004	0,004	0	0,02	0,02	8,71	10,16	1,7	2,42	0,04	9,94	1,14	62	NIE
X8	0,153-0,155	0,005	0,005	0	0,02	0,02	8,5	9,38	1,67	2,35	0,03	10,2	1,12	59,8	TAK
X9	0,150-0,156	0,004	0,004	0	0,02	0,02	8,49	9,39	1,69	2,37	0,03	10,19	1,13	59,8	TAK
X10	0,149-0,152	0,004	0,004	0	0,02	0,02	8,46	9,48	1,67	2,37	0,04	10,16	1,12	59,8	TAK
X11	0,148	0,003	0,003	0	0,02	0,02	8,5	9,51	1,6	2,34	0,04	10,24	1,08	59,6	TAK
X12	0,148	0,003	0,003	0	0,02	0,02	8,5	9,51	1,6	2,34	0,04	10,24	1,08	59,6	TAK
X13	0,142-0,148	0,003	0,003	0	0,02	0,02	8,52	9,56	1,58	2,33	0,04	10,15	1,07	59,7	TAK
X14	0,136-0,132	0,005	0,008	0	0,02	0,02	8,67	9,45	1,58	2,43	0,04	9,86	1,14	59,9	NIE
X15	0,150-0,142	0,004	0,003	0	0,02	0,02	8,65	9,4	1,58	2,39	0,04	10,1	1,12	59,7	NIE
X16	0,155-0,151	0,004	0,006	0	0,02	0,02	8,49	9,56	1,64	2,42	0,04	10,14	1,15	59,5	TAK
X17	0,178-0,158	0,004	0,007	0	0,02	0,02	8,34	9,84	1,5	2,62	0,04	9,98	1,12	59,7	TAK
X18	0,159-0,147	0,003	0,003	0	0,02	0,02	8,61	9,57	1,64	2,32	0,04	10,26	1,14	59,5	NIE
X19	0,152-0,157	0,004	0,004	0	0,02	0,02	8,61	9,53	1,64	2,26	0,04	10,28	1,1	59,7	NIE
X20	0,162-0,164	0,004	0,005	0	0,02	0,02	8,75	9,37	1,63	2,28	0,04	10,04	1,08	59,9	NIE
X21	0,136-0,132	0,004	0,004	0	0,02	0,02	8,42	8,42	1,63	2,28	8,42	10,26	1,1	59,8	TAK
X22	0,155-0,151	0,004	0,005	0	0,02	0,02	8,42	8,42	1,63	2,26	8,42	10,24	1,08	59,7	TAK
X23	0,153-0,155	0,004	0,004	0	0,02	0,02	8,65	8,65	1,64	2,26	8,65	10,26	1,1	59,8	NIE
Skład chemiczny zgodny z normą OST-1-90126-85															
	0,13÷0,20	max. 0,015	max. 0,010	max. 0,4	max. 0,4	5,1÷6,0	8,0÷9,5	9÷10,5	1,2÷2,4	2,0÷2,9	max. 1,0	9,5÷11,0	0,8÷1,2	osnowa	

Uwaga: Wyniki badań składu chemicznego dotyczyły odlewów łopatek pochodzących z odlanych w tym czasie wyrobów z 23 ceramicznych form (tabela 4). Badania prowadzono na cylindrycznych próbkach (tzw. próbkach świadkach) dołączanych do każdego zestawu odlewniczego.

*Wynik wytrzymałości zmęczeniowej finalnego wyrobu spełniający wymagania norm lotniczych i wymagań konstrukcyjnych.

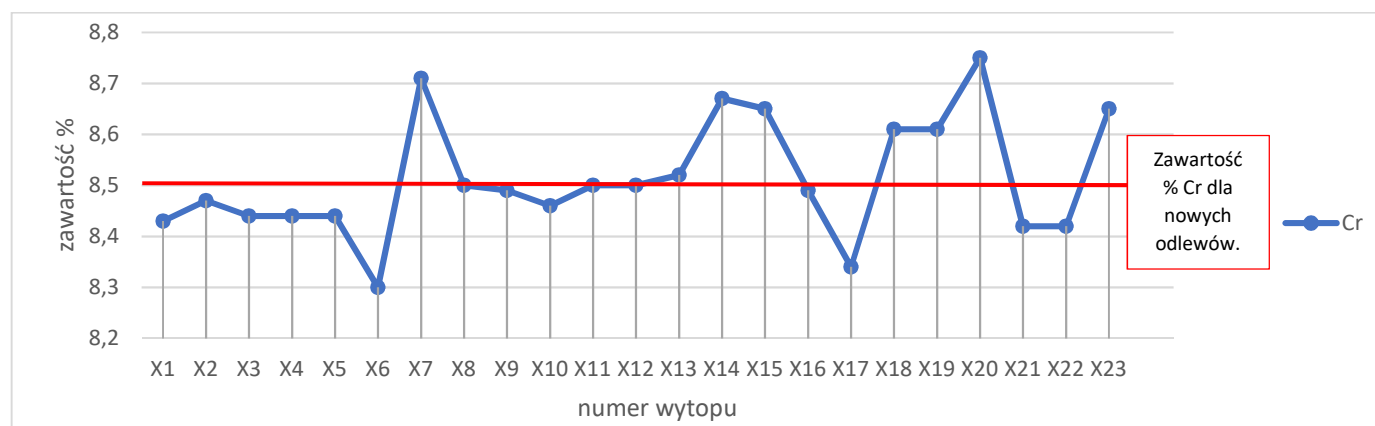
Nieodpowiedni skład chemiczny stopu stosowanego w procesie odlewania krytycznych elementów silnika lotniczego, do których należą łopatki turbiny może powodować powstanie wad determinujących konieczność brakowania dużej liczby odlewów. Dlatego analizując wyniki składu chemicznego stopów używanych w latach 2015÷2018 w procesie wytwarzania łopatek dokonano oceny zmian zawartości w stopie pierwiastków tworzących węgliki tj. *Cr*, *Mo*, *W*, *Nb*, *Ti*. Obserwowane odchyłki w zawartości pierwiastków krytycznych dla inicjowania pęknięć w odlewach

eksploatowanych w warunkach działania naprężeń zmęczeniowych mogły mieć wpływ na własności jakościowe i użytkowe łopatek (rys. 35).



Rys. 35. Zawartość pierwiastków charakteryzujących się dużym powinowactwem do węgla w odlewach wykonanych od 2015 do 2018.

Technologia odlewania precyzyjnego łopatek turbiny wymaga stosowania stopów charakteryzujących się wysoką stabilnością zawartości składników stopowych. Stąd, krytyczne jest, dla wymaganej od łopatki wytrzymałości zmęczeniowej, utrzymanie wysokiego reżimu odchyłek zawartości pierwiastków stopowych kluczowych dla osiągnięcia zakładanych własności stopów, czy odlewów wytwarzanych z tych materiałów. Stąd, ważne jest monitorowanie zmian poziomu zawartości tych pierwiastków, które odpowiadają m.in. za własności żaroodporne i żarowytrzymałe wyrobów lotniczych, ale również za tworzenie się w odlewach cząstek faz międzymetalicznych odpowiadających m.in. za powstawanie wad decydujących o własnościach zmęczeniowych (np. Cr – rys. 36).



Rys. 36. Zawartość Cr w odlewach wykonanych w latach 2015 do 2018 (% mas.).

Analiza wyników pomiarów składu chemicznego stopów stosowanych w procesie odlewania łopatek w okresie od 2015 do 2018 r. potwierdziła właściwą, tj. na odpowiednim poziomie, zawartość pierwiastków Mo, Ti, W oraz Nb (rys. 35). Stwierdzono podwyższone zawartości pierwiastka Cr (rys. 36) dla odlewów, które nie spełniły warunku wytrzymałości zmęczeniowej określonej w warunkach zawartych na rysunku konstrukcyjnym łopatek. Na tej podstawie dla stopów stosowanych w procesie wytwarzania łopatek turbiny dopuszczono graniczną zawartość Cr, determinującą ich wytrzymałość zmęczeniową, tj. <8,5%. Wszystkie wyroby wytworzone w latach 2015÷2018 ze stopów, które charakteryzowały się zawartością Cr >8,5% nie spełniły wymagań norm lotniczych dotyczących wytrzymałości zmęczeniowej finalnego wyrobu, co warunkowało brak możliwości dopuszczenia tych wyrobów do eksploatacji (tabela 4). Warunek dotyczący obniżonej zawartości Cr wprowadzono do Warunków Technicznych Łopatek Turbiny Sprężarki. Wszystkie odlewy wytwarzane w ramach prac badawczych od 2018 roku spełniały warunek zawartości Cr <8,5%. Warunek ten został wprowadzony celem eliminacji ryzyka powstawania kruchych węglików stanowiących miejsce inicjacji pęknięć w procesach wytwórczych gotowego detalu.

3.2.2. Wpływ warunków odlewania na mikrostrukturę i własności odlewów z nadstopu niklu ŻS6U-WI.

Procedury stosowane w celu ustalenia przyczyn obserwowanych zmian w produktach wytwarzanych za pomocą odlewania precyzyjnego, a tym samym w celu obniżenia liczby produkowanych odlewów wadliwych, wymagają kontrolowania warunków poszczególnych procesów w całej technologii. Dlatego, po zidentyfikowaniu problemu wynikającego z zawartości Cr w górnej granicy tolerancji normy w odlewach, wykonano badania trwałości zmęczeniowej na odlewach zakwalifikowanych do produkcji gotowego wyrobu.

Wykonano 3 odlewy (27 łopatek - po 9 z każdego odlewu) przy zastosowaniu różnej temperatury odlewania oraz wygrzewania formy (tabela 8), przy użyciu stopów pochodzących z tego samego wlewka wsadowego (tzw. masterheat). Wszystkie odlane łopatki obrobiono cieplnie, tj. przesycono z temperatury 1220°C (czas wyżarzania w temperaturze 1220°C - 4 h) w warunkach atmosfery ochronnej gazu - argonu).

Obrobione cieplnie łopatki następnie poddano:

- obróbce powierzchniowej (szlifowanie, polerowanie) w obszarze zamka i pióra łopatki w celu uzyskania wymiarów zgodnych z wymaganiami normy odbiorczej,
- procesowi aluminowania (metoda „Above Pack”) dyfuzyjnego w temperaturze 1000°C w czasie 4÷6 h.

Tabela 8. Warunki odlewania łopatek ze stopu ŻS6U-WI.

Nr odlewu	Numer łopatki	Temperatura zalewania formy [°C]	Temperatura Formy [°C]	Zawartość modyfikatora - glinianu kobaltu [%]
1	1÷9	1535	1000	10
2	1÷9	1534÷1536		
3	1÷9	1564		

Łopatki ze wszystkich trzech odlewów (9 łopatek na 1 odlew) poddano próbom zmęczeniowym przy zastosowaniu zmiennych wartości naprężeń średnich (tabela 9, 10 i 11). W celu określenia zmian w mikrostrukturze łopatek po wykonanych próbach zmęczeniowych, przeprowadzono badania mikroskopowe (tabela 12).

Tabela 9. Warunki próby zmęczeniowej Łopatek I Stopnia Turbiny Sprężarki z odlewu nr 1.

Nr łopatk	Napężenie średnie [kG/mm ²]	Napężenie niszczące [kG/mm ²]	Wytrzymałość zmęczeniowa [kG/mm ²]	Średnia wartość wytrzymałości zmęczeniowej		Odchylenie standardowe s	
				[kG/mm ²]	MPa	[kG/mm ²]	MPa
P1	22, 24, 26, 28, 30, 32, 34	34	33	34,8	341,27	3,53	34,62
P2	22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36	36	35				
P3	26, 28, 30, 32, 34	34	33				
P4	26, 28, 30, 32	32	31				
P5	26, 28, 30, 32, 34, 36, 38	38	37				
P6	26, 28, 30, ... 42, 44	44	43				
P7	26, 28, 30, 32, 34, 36	36	35				
P8	26, 28, 30, 32, 34	34	33				
P9	26, 28, 30, 32, 34	34	33				

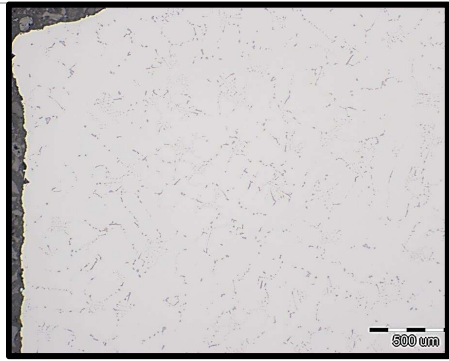
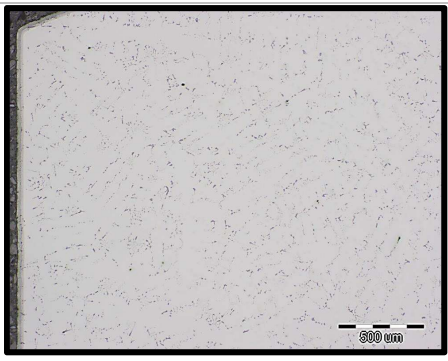
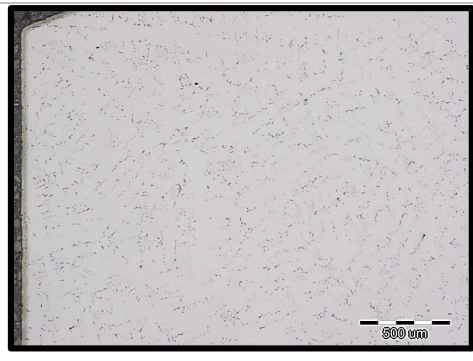
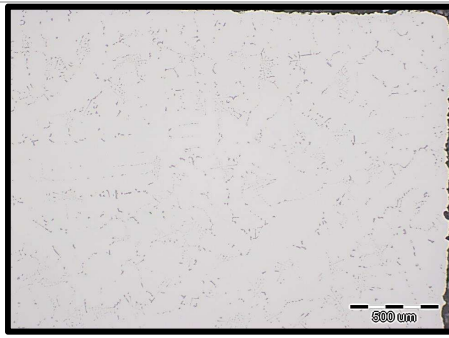
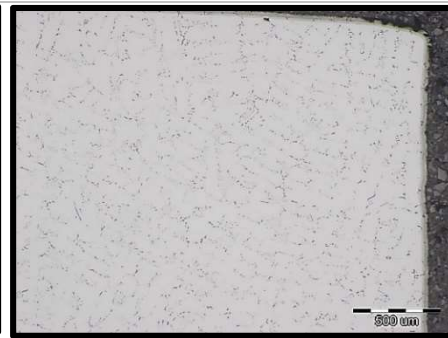
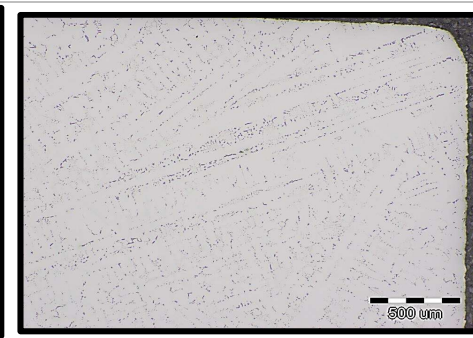
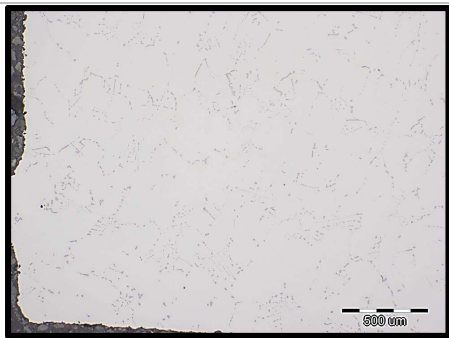

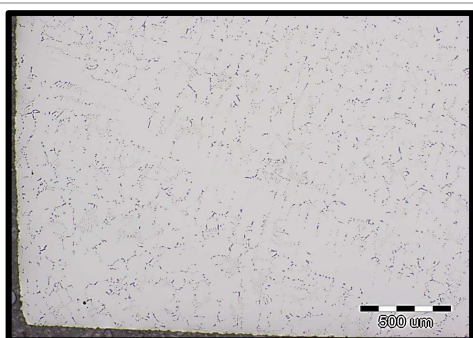

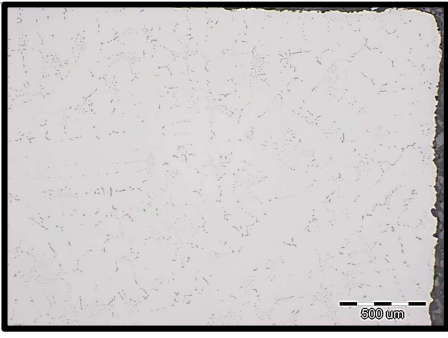
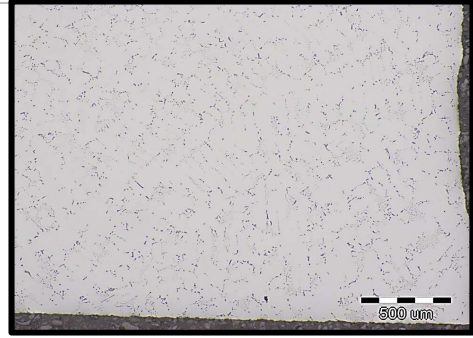
Tabela 10. Warunki próby zmęczeniowej Łopatek I Stopnia Turbiny Sprężarki z odlewu nr 2.

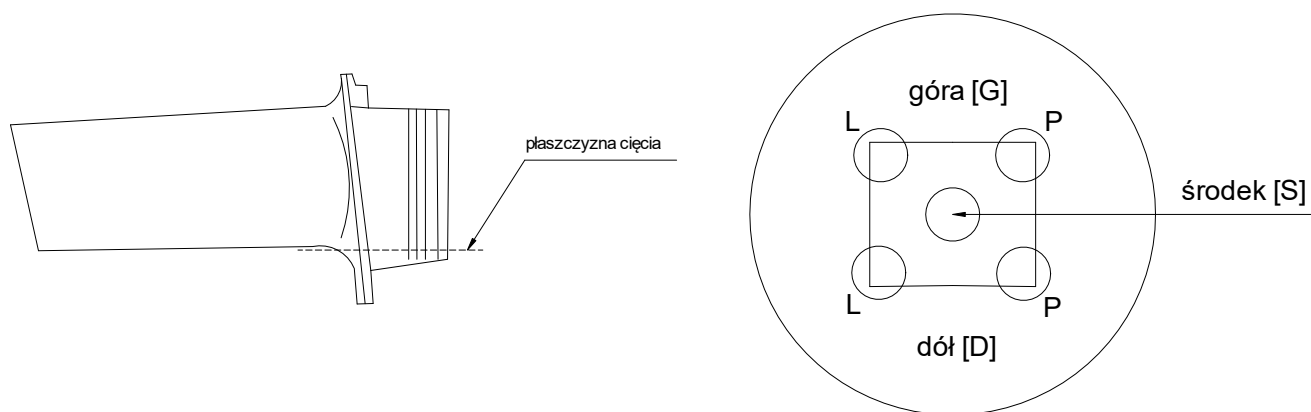
Nr łopatk	Napężenie średnie [kG/mm ²]	Napężenie niszczące [kG/mm ²]	Wytrzymałość zmęczeniowa [kG/mm ²]	Średnia wartość wytrzymałości zmęczeniowej		Odchylenie standardowe s	
				[kG/mm ²]	MPa	[kG/mm ²]	MPa
P1	22, 24, 26, 28, 30, 32, 34	34	33	32,3	316,75	2	19,61
P2	26, 28, 30, 32	32	31				
P3	26, 28, 30, 32, 34, 36	36	35				
P4	26, 28, 30, 32	32	31				
P5	26, 28, 30	30	29				
P6	26, 28, 30, 32, 34	34	33				
P7	26, 28, 30, 32	32	31				
P8	26, 28, 30, 32, 34, 36	36	35				
P9	26, 28, 30, 32, 34	34	33				

Tabela 11. Warunki próby zmęczeniowej Łopatek I Stopnia Turbiny Sprężarki z odlewu nr 3.

Nr łopatk	Napężenie średnie [kG/mm ²]	Napężenie niszczące [kG/mm ²]	Wytrzymałość zmęczeniowa [kG/mm ²]	Średnia wartość wytrzymałości zmęczeniowej		Odchylenie standardowe s	
				[kG/mm ²]	MPa	[kG/mm ²]	MPa
P1	22	22	21	19,7	193,19	2,24	21,97
P2	18	18	17				
P3	18, 20, 22, 24	24	23				
P4	18, 20, 22	22	21				
P5	18, 20, 22	22	21				
P6	18	18	17				
P7	18, 20, 22	22	21				
P8	18	18	17				
P9	18, 20	20	19				

Tabela 12. Mikrostruktura łopatek po próbach zmęczeniowych (z odlewów 1, 2 i 3). Miejsce obserwacji oznaczono symbolami w tabeli, stan nietrawiony.

WYTOP 1	WYTOP 2	WYTOP 3
GL	GL	GL
		
GP	GP	GP
		
DL	DL	DL
		
DP	DP	DP
		



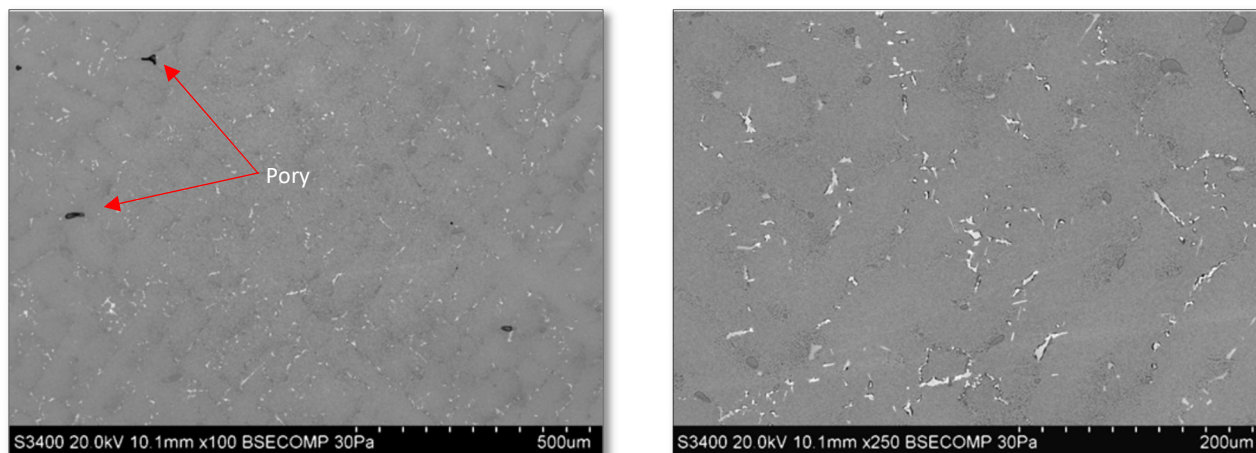
Rys. 37. Łopaska Turbiny Sprężarki I Stopnia ze wskazanym miejscem poboru próbek oraz schematem definiującym strefy poddane badaniom mikrostruktury (przekrój poprzeczny zamka).

Obserwacje mikrostruktury łopatek z odlewów od 1 do 3 wykazały obecność typowych dla stopu ŻS6U-WI składników fazowych - roztwór stały γ pierwiastków stopowych w niklu (osnowa), faza umacniająca γ' - $Ni_3(Al, Ti)$ oraz węgliki typu MC i $M_{23}C_6$. Stwierdzono także obecność eutektyki γ/γ' . Badania nie wykazały różnic w mikrostrukturze łopatek z odlewu 1 oraz z 2. Mikrostruktura łopatek z obu odlewów charakteryzuje się dużą jednorodnością składu fazowego pod względem kształtu, rozmiarów i rozkładu wydzieleni fazy γ' , jak i również cząstek węglików. Wydzielenia umacniającej fazy γ' mają kształt sześcienny, co jest typowe dla tego stopu w stanie lanym, po obróbce cieplnej. Natomiast mikrostruktura łopatek pochodzących z odlewu 3 charakteryzuje się obecnością cząstek węglików typu MC w kształcie płytek o zróżnicowanej wielkości, tworzących skupiska tzw. pisma chińskiego (rys. 52).

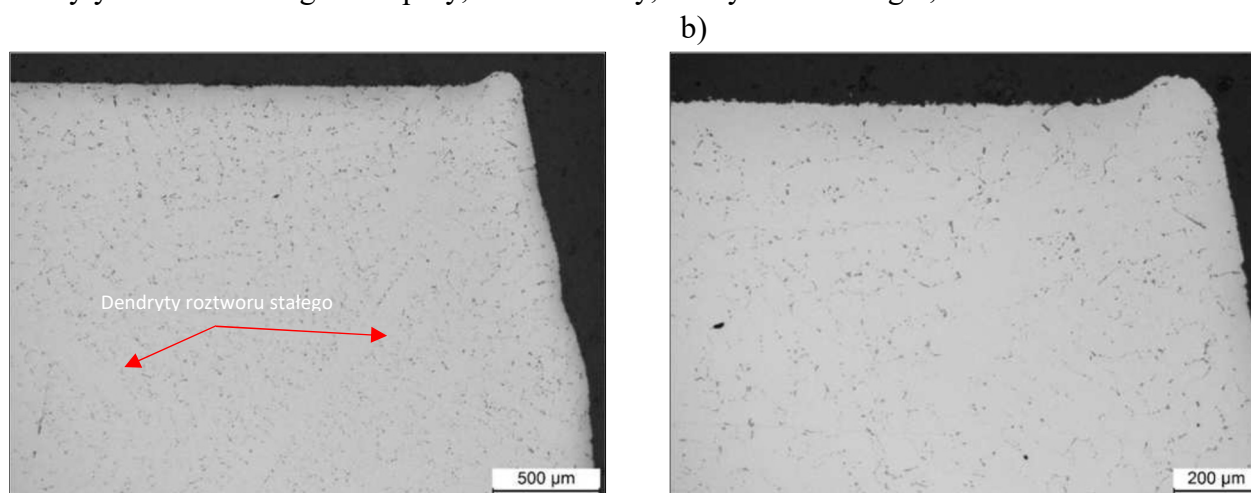
Analiza wyników próby zmęczeniowej wykazała różnice pomiędzy wartością wytrzymałości zmęczeniowej łopatek z odlewów 1 i 2, a wartością wytrzymałości zmęczeniowej łopatek z 3. Łopaski odlewane w zakresie temperatury $1535\div 1536^\circ C$ (odlew 1 i 2) wykazują średnią wartość wytrzymałości zmęczeniowej na poziomie $32,3\div 34,8 \text{ kG/mm}^2$. Natomiast średnia wartość wytrzymałości zmęczeniowej łopatek odlanych z temperatury $1564^\circ C$, (odlew 3) jest niższa o ok. 15 kG/mm^2 od wytrzymałości zmęczeniowej łopatek z odlewów 1 oraz 2 i wynosi $19,7 \text{ kG/mm}^2$. Zastosowanie wyższej temperatury zalewania formy w odlewie 3, tj. $1564^\circ C$ spowodowało wydzielanie się węglików typu MC charakteryzujących się nieregularnym, iglastym kształtem (rys. 53-57). Morfologia tych cząstek węglików miała krytyczny wpływ na obniżenie zmęczeniowej łopatek pochodzących z odlewu nr 3. Analizy wykonane techniką EDS-SEM składu chemicznego cząstek obserwowanych w łopaskach z odlewu 3 wskazują, że są to węgliki wolframu i tytanu typu MC (rys. 58-60). Stwierdzono występowanie miejsc, w których węgliki typu MC wydzieliły się w bliskim sąsiedztwie cząstek węglików typu $M_{23}C_6$ (rys. 57). Węgliki typu MC zlokalizowane są głównie w przestrzeniach międzydendrytycznych. Wykazano ich obecność również wewnątrz i na granicach ziarn (rys. 52-57). Natomiast węgliki typu $M_{23}C_6$ wydzielają się głównie na granicach ziarn (rys. 53). Węgliki posiadają zróżnicowany kształt - od globularnych/równoosiowych, poprzez zwarte o nieregularnym kształcie aż do iglastych.

Osnowę łopatek z odlewu 3 stanowią dendryty roztworu stałego γ . Bez względu na obserwowaną strefę na przekroju zamka, charakteryzuje ona się taką samą mikrostrukturą, typową dla stopów odlewniczych (rys. 42). Stwierdzono w odlewach obecność porów, o przypadkowym rozłożeniu i średniej objętości względnej nie przekraczającej 0,1%, dodatkowo stwierdzono sporadyczne występowanie ziarn eutektyki γ - γ' (rys. 51).

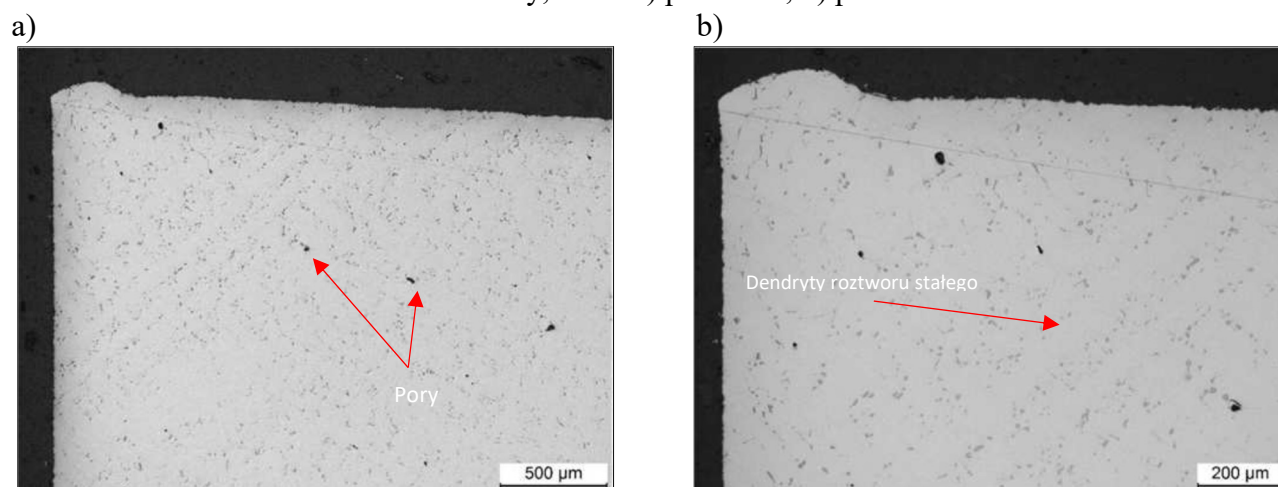
Cząstki fazy międzymetalicznej, umacniającej γ' -Ni₃(AlTi), charakteryzują się kształtem sześciennym, o zróżnicowanych rozmiarach. Obecność bardzo drobnych wydzielań fazy γ' obserwowano głównie wewnątrz dendrytów osnowy. Natomiast cząstki fazy γ' o większych rozmiarach występują głównie w przestrzeniach dendrytycznych (rys. 44÷51).



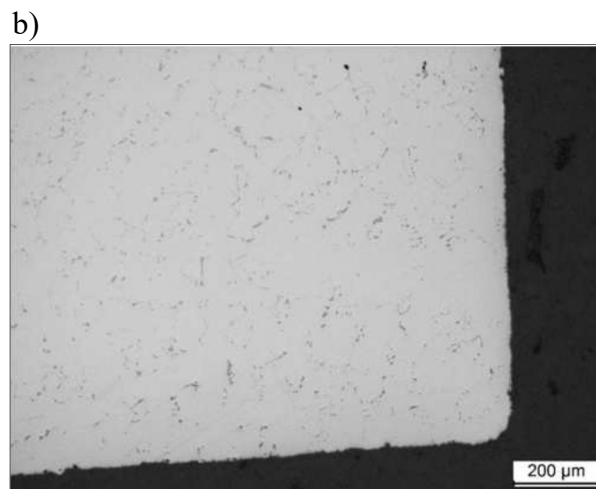
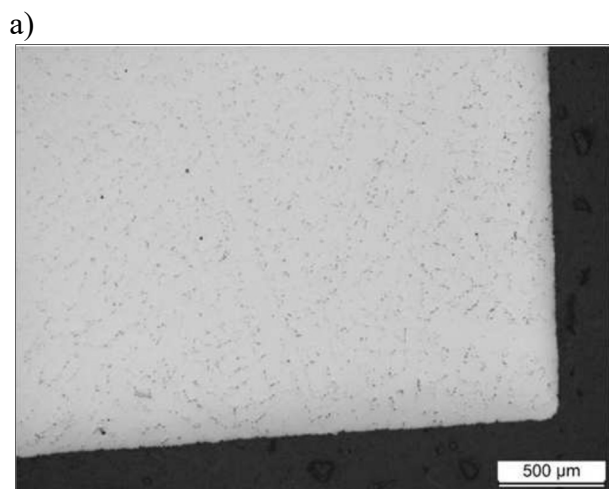
Rys. 38. Mikrostruktura łopatki ze stopu ŻS6U-WI (odlew 3) w obszarze zamka łopatki. Widoczne dendryty roztworu stałego oraz pory, stan trawiony, odczynnik Kalling'a, LM



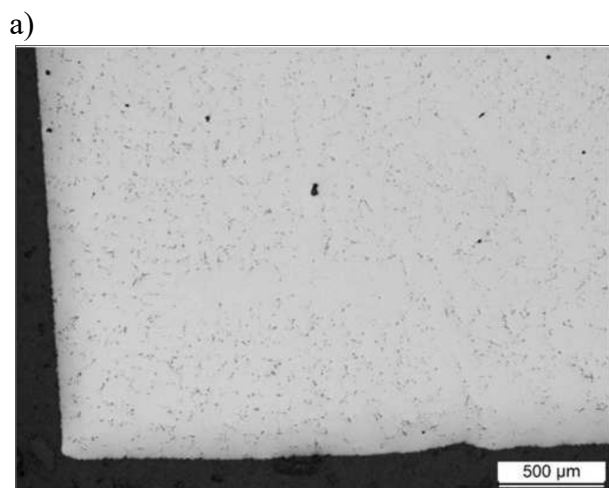
Rys. 39. Mikrostruktura stopu ŻS6U-WI (odlew 3) w obszarze lewego górnego rogu łopatki (LG), stan nietrawiony, LM - a) pow. 50x, b) pow. 100x.



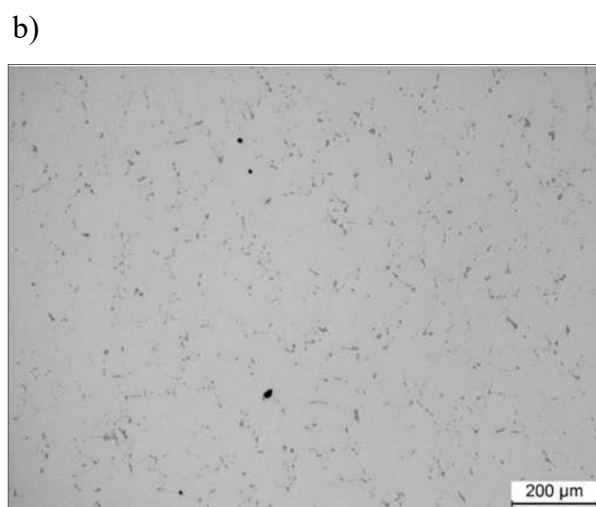
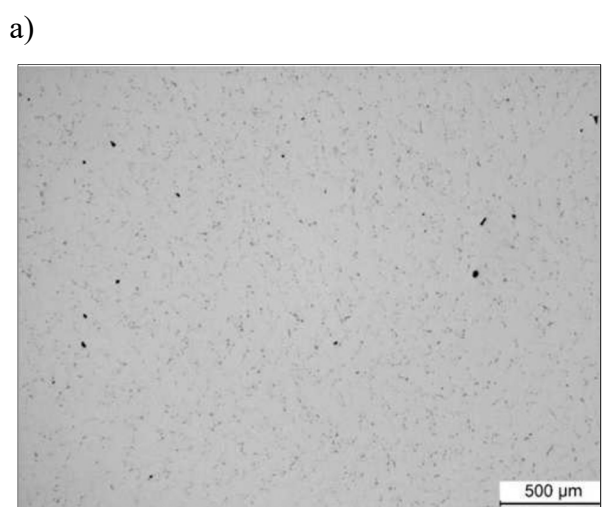
Rys. 40. Mikrostruktura stopu ŻS6U-WI (odlew 3) w obszarze prawego górnego rogu łopatki (PG), stan nietrawiony, LM - a) pow. 50x, b) pow. 100x.



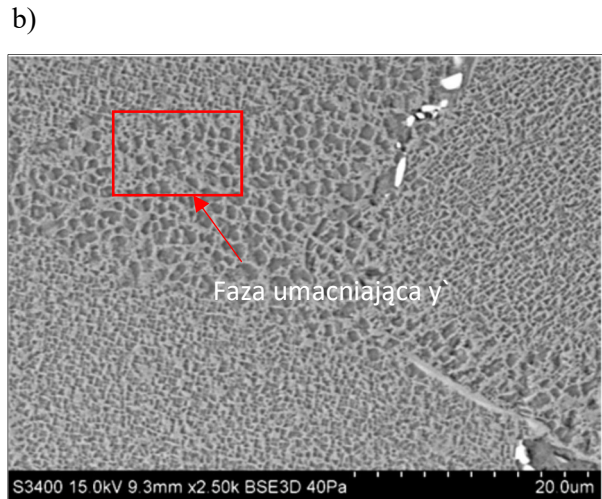
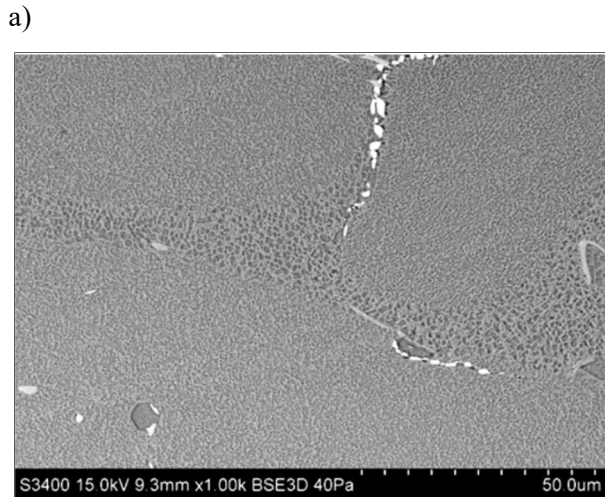
Rys. 41. Mikrostruktura stopu ŻS6U-WI (odlew 3) w obszarze lewego dolnego rogu (LD), stan nietrawiony, LM - a) pow. 50x, b) pow. 100x.



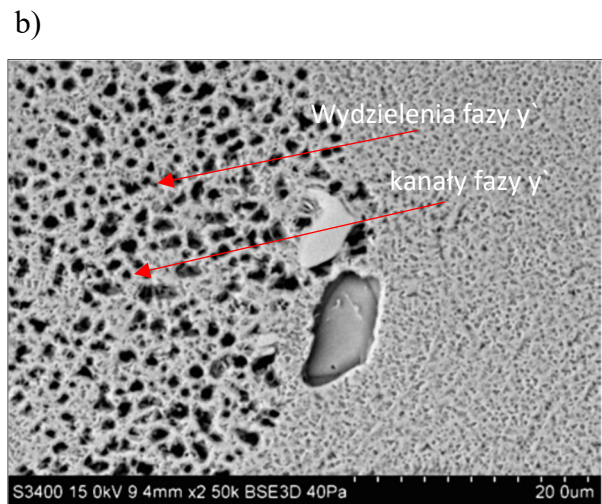
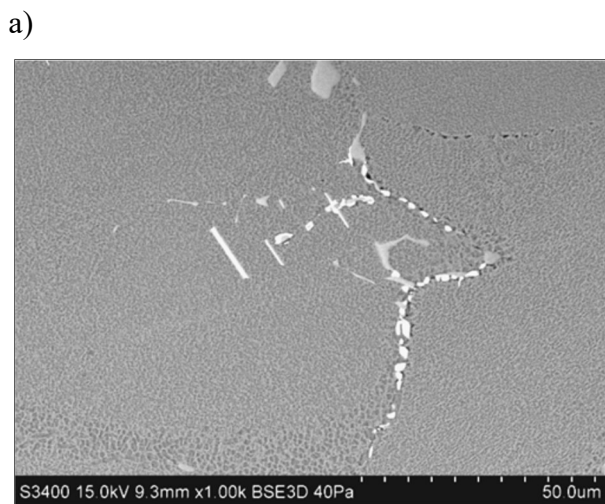
Rys. 42. Mikrostruktura stopu ŻS6U-WI (odlew 3) w obszarze prawego dolnego rogu łopatki (PD), stan nietrawiony, LM - a) pow. 50x, b) pow. 100x.



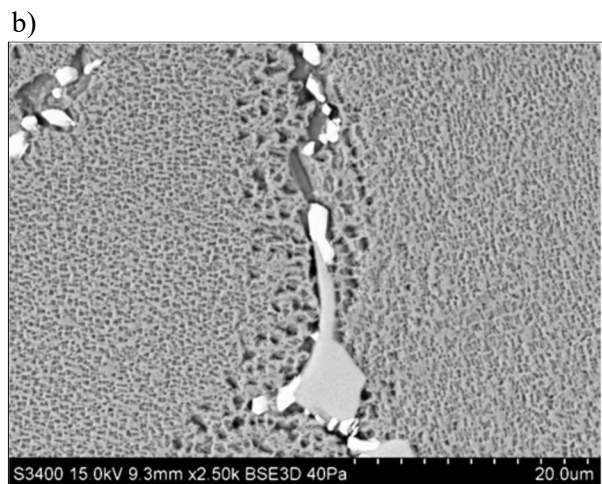
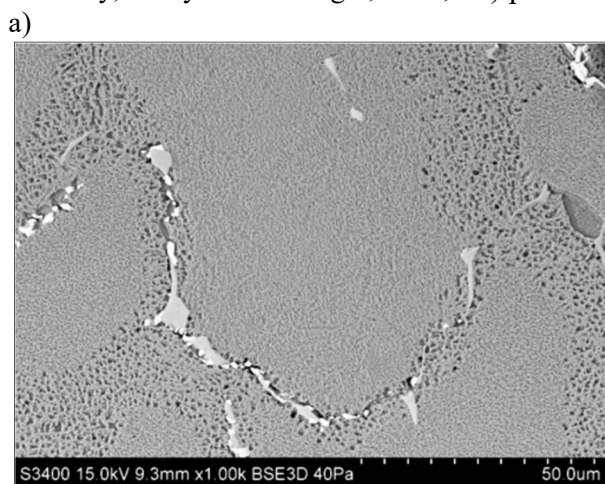
Rys. 43. Mikrostruktura stopu ŻS6U-WI (odlew 3) w środku (S), stan nietrawiony, LM) - a) pow. 50x, b) pow. 100x.



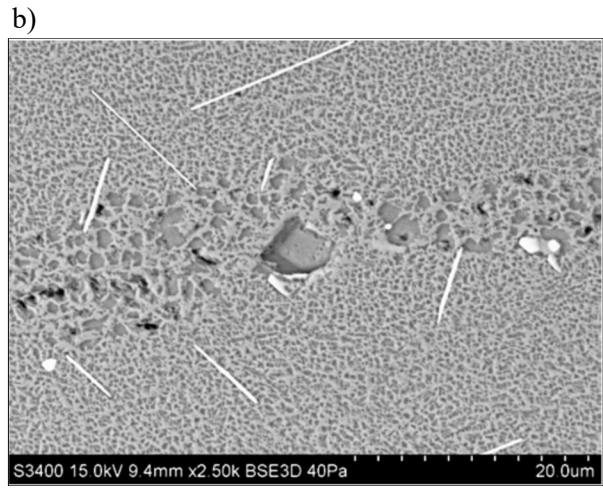
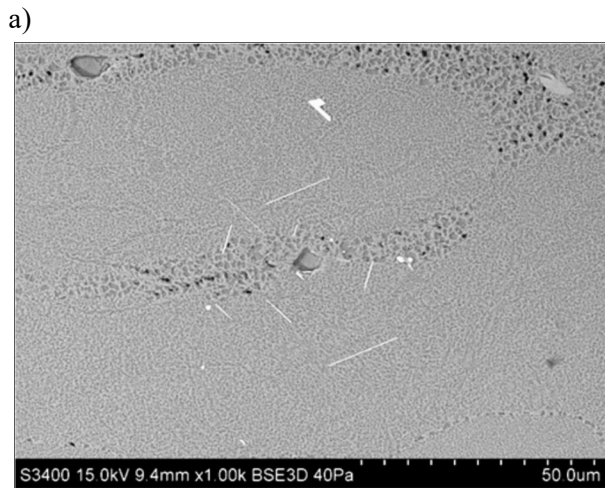
Rys. 44. Mikrostruktura stopu ŻS6U-WI w obszarze lewego górnego rogu łopatki (LG). widoczne bardzo drobne wydzielenia w fazie γ' w ziarnach dendrytów, jak i większe wydzielenia w przestrzeniach międzidendrytycznych, stan trawiony, odczynnik Kalling'a, SEM, (wytop 3) - a) pow. 50x, b) pow. 100x.



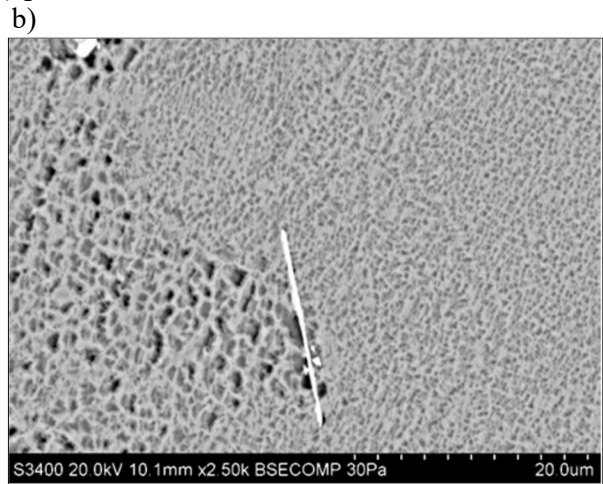
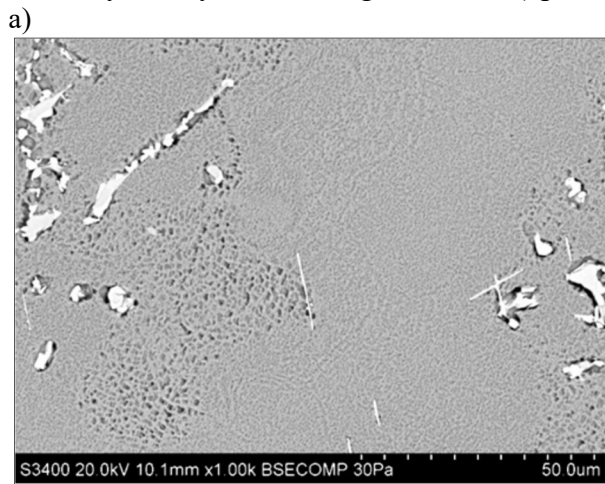
Rys. 45. Mikrostruktura stopu ŻS6U-WI (odlew 3) w obszarze prawego górnego rogu łopatki (PG). stan trawiony, odczynnik Kalling'a, SEM, - a) pow. 50x, b) pow. 100x.



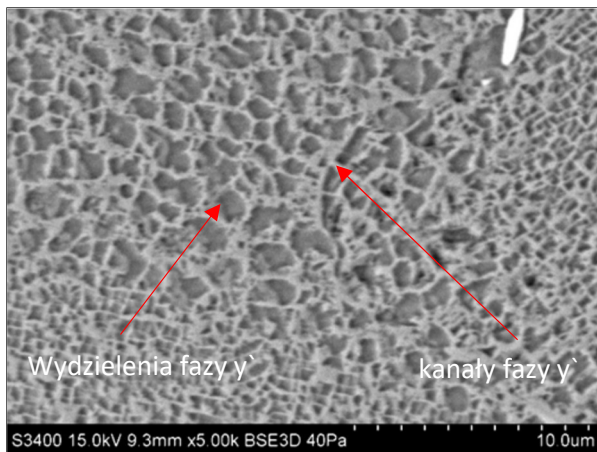
Rys. 46. Mikrostruktura stopu ŻS6U-WI (odlew) w strefie lewego dolnego rogu łopatki (LD), stan trawiony, odczynnik Kalling'a, SEM - a) pow. 50x, b) pow. 100x.



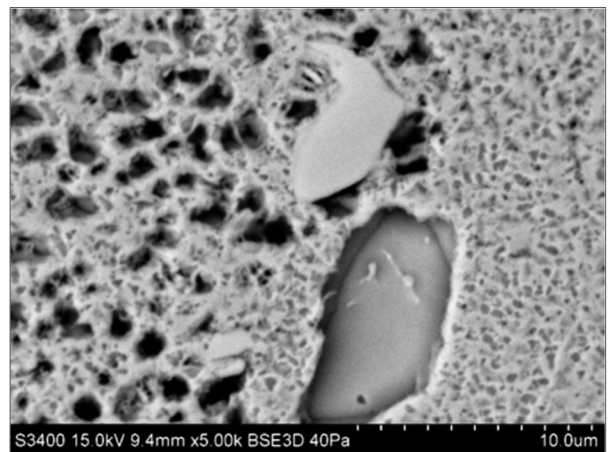
Rys. 47. Mikrostruktura $\dot{Z}S6U-WI$ w strefie prawego dolnego rogu łopatki z odlewu 3 (PD). stan trawiony, odczynnik Kalling'a, SEM - a) pow. 50x, b) pow. 100x.



Rys. 48. Mikrostruktura $\dot{Z}S6U-WI$ w strefie środkowej (S) łopatki z odlewu 3, stan trawiony, odczynnik Kalling'a, SEM, a) pow. 50x, b) pow. 100x.

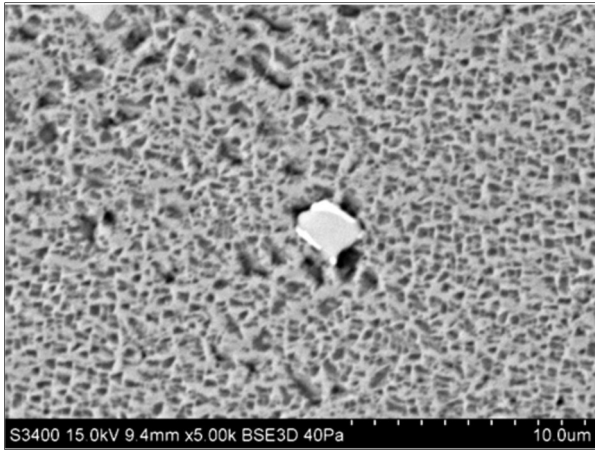


LG

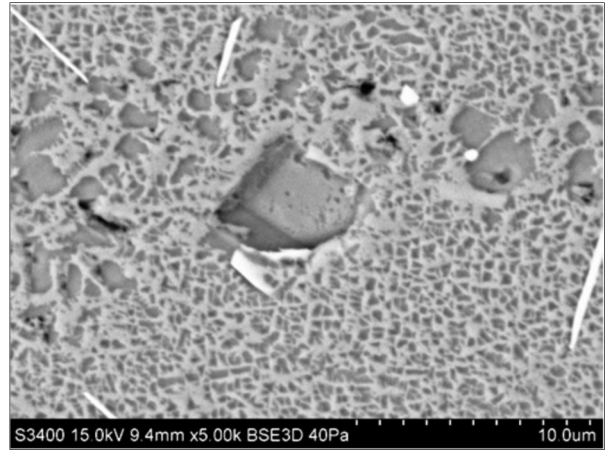


PG

Rys. 49. Mikrostruktura $\dot{Z}S6U-WI$ łopatki z odlewu 3, stan trawiony, odczynnik Kalling'a, SEM.

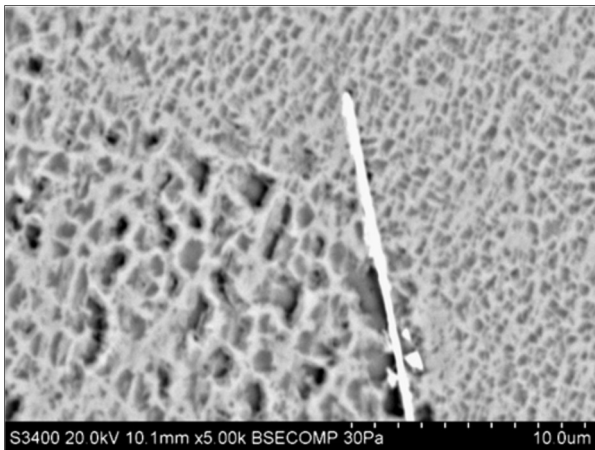


LD

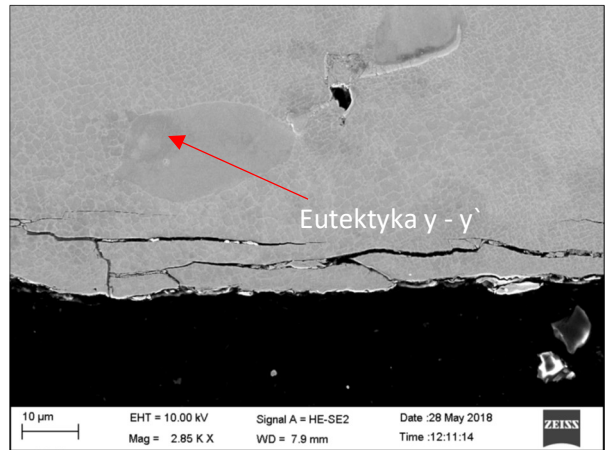


PD

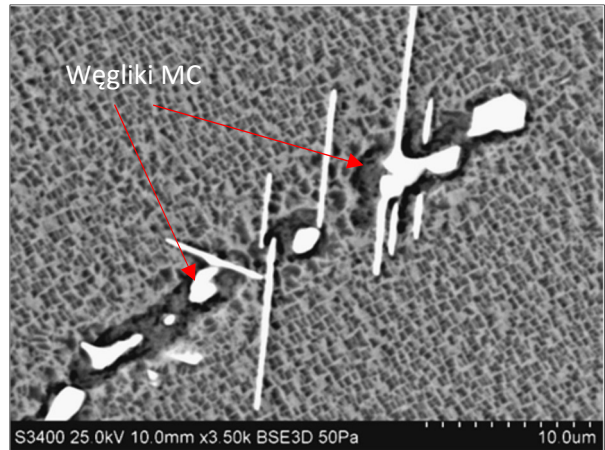
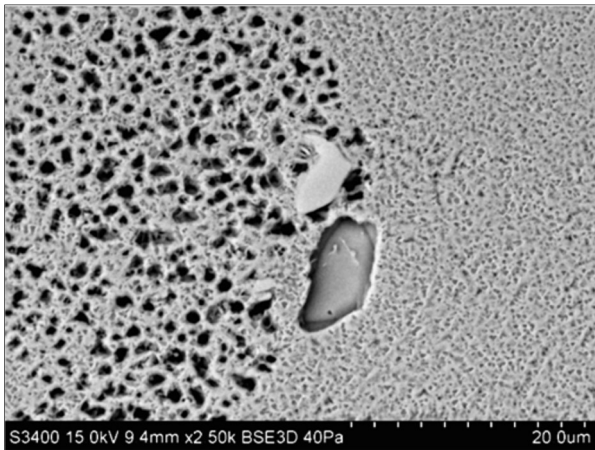
Rys. 50. Mikrostruktura łopatki ŻS6U-WI łopatki z odlewu 3, stan trawiony, odczynnik Kalling'a, SEM.



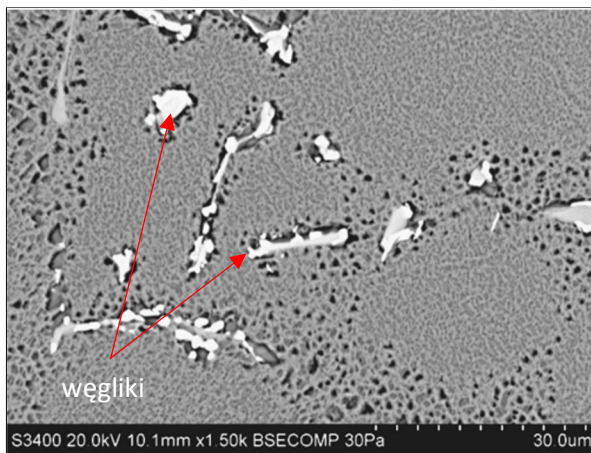
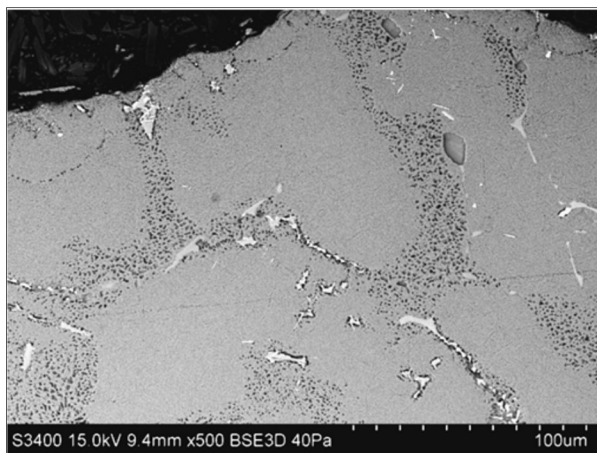
S



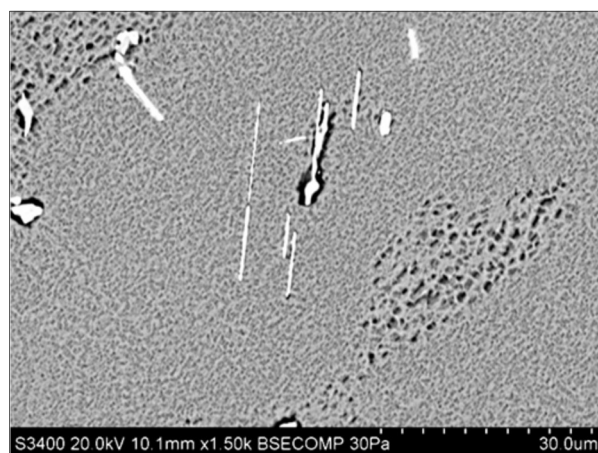
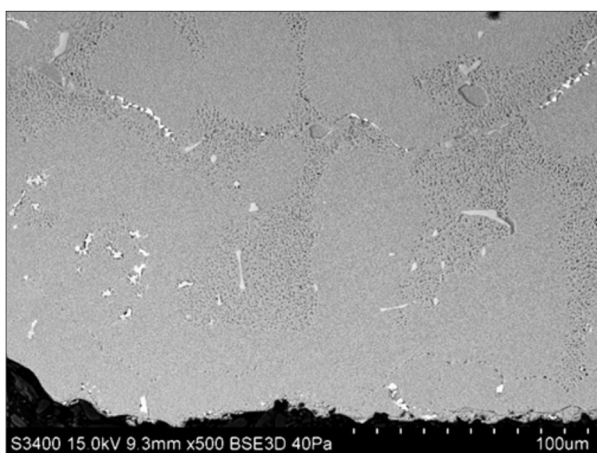
Rys. 51. Mikrostruktura ŻS6U-WI łopatki z odlewu 3, stan trawiony, odczynnik Kalling'a, SEM.



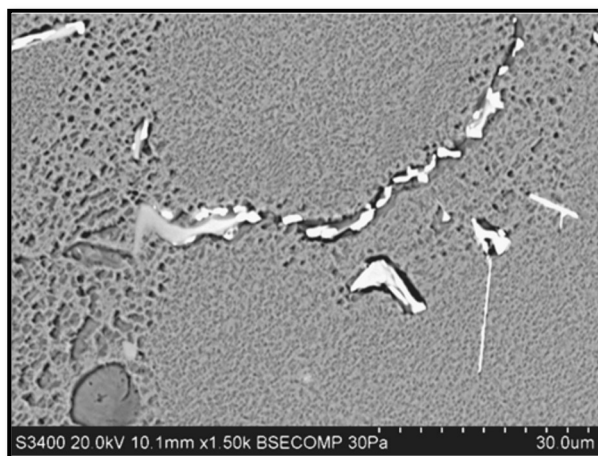
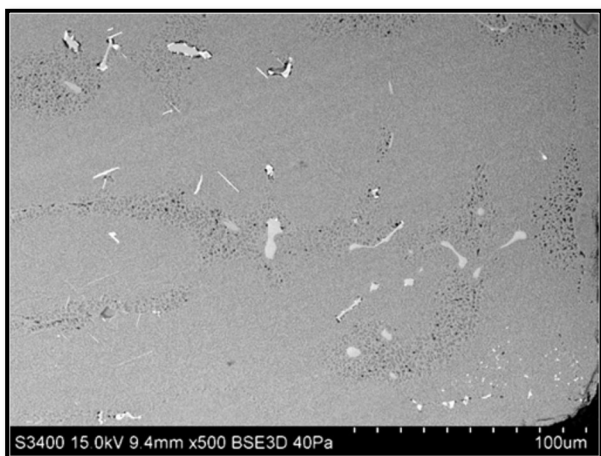
Rys. 52. Mikrostruktura ŻS6U-WI w strefie prawego górnego rogu (PG) łopatki z odlewu 3, stan trawiony, odczynnik Kalling'a, SEM.



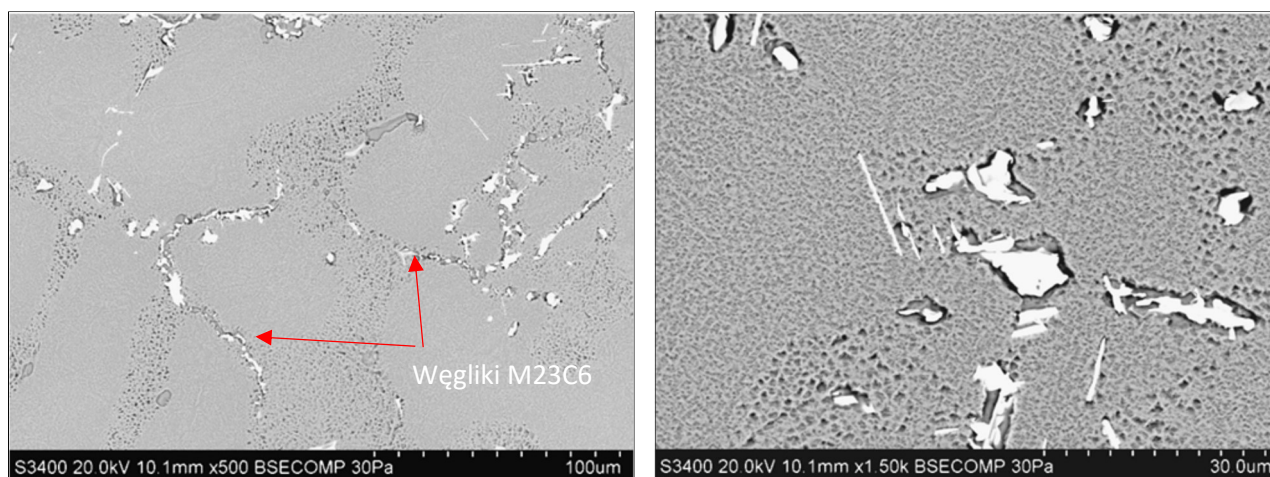
Rys. 53. Mikrostruktura ŻS6U-WI w strefie lewego górnego rogu (LG) łopatkki z odlewu 3, stan trawiony, odczynnik Kalling'a, SEM.



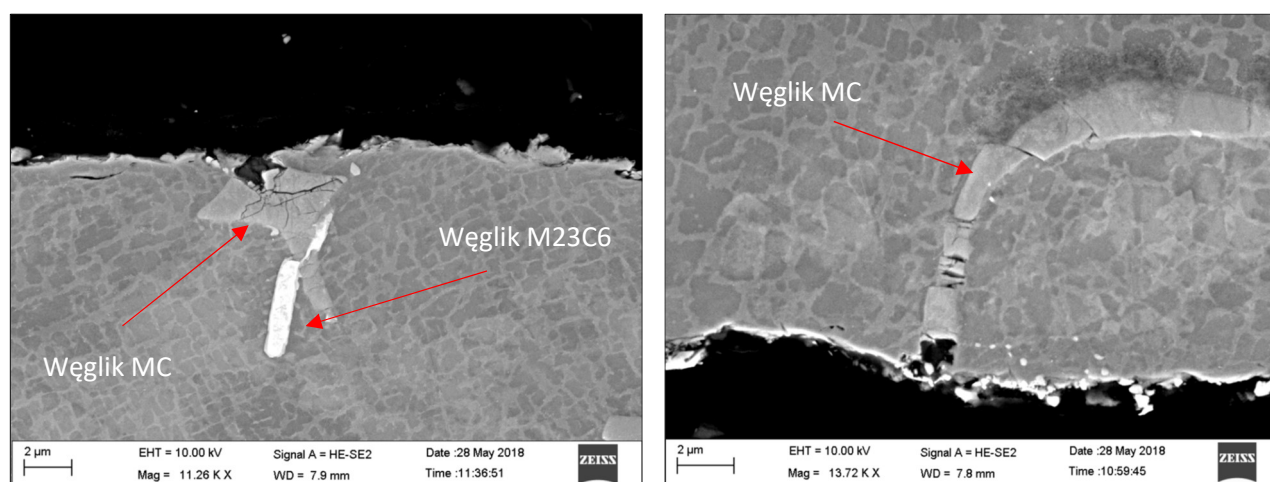
Rys. 54. Mikrostruktura ŻS6U-WI w strefie prawego dolnego rogu (PD) łopatkki z odlewu 3, stan trawiony, odczynnik Kalling'a, SEM.



Rys. 55. Mikrostruktura ŻS6U-WI w strefie lewego dolnego rogu (LD) łopatkki z odlewu 3, stan trawiony, odczynnik Kalling'a, SEM.



Rys. 56. Mikrostruktura ŻS6U-WI w strefie środkowej (S) łopatkki z odlewu 3, stan trawiony, odczynnik Kalling'a, SEM.



Rys. 57. Mikrostruktura ŻS6U-WI w strefie dolnego rogu (DL) łopatkki z odlewu 3, stan trawiony, odczynnik Kalling'a, SEM.

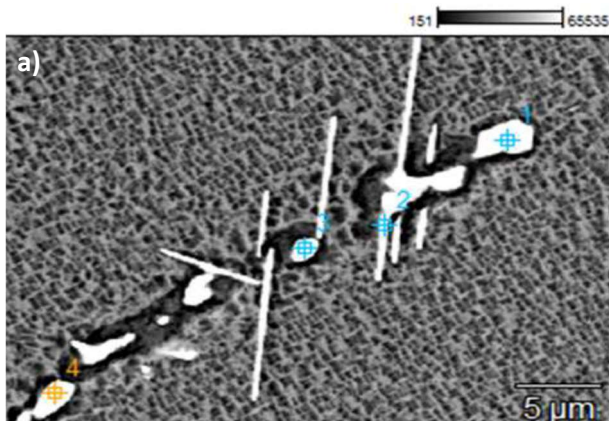
Wyznaczono, z uwagi na zaobserwowane duże ilości węglików w mikrostrukturze odlewu nr 3 – ich objętość względną (V_V). Przy zastosowaniu metody Cavalieri-Hacquerta, tj. na podstawie pomiarów powierzchni względnej (A_A) wydzieleni (tabela 13). Przeprowadzone badania techniką SEM-EDS składu chemicznego wydzieleni obserwowanych w mikrostrukturze stopu ŻS6U-WI (rys. 58a, 59b, 60c) wskazują obecność wydzieleni węglików bogatych w wolfram (rys. 58) i Ti (rys. 60).

Tabela. 13. Objętość względna węglików w mikrostrukturze stopu ŻS6U-WI, przekrój poprzeczny zamka łopatkki z odlewu 3.

Obszar	LG	PG	LD	PD	S
Objętość względna V_V , %	2,2	2,1	1,8	1,7	2,5
Średnia objętość względna V_V , %	2,06 (s=0,3, $W_z=14\%$)*				

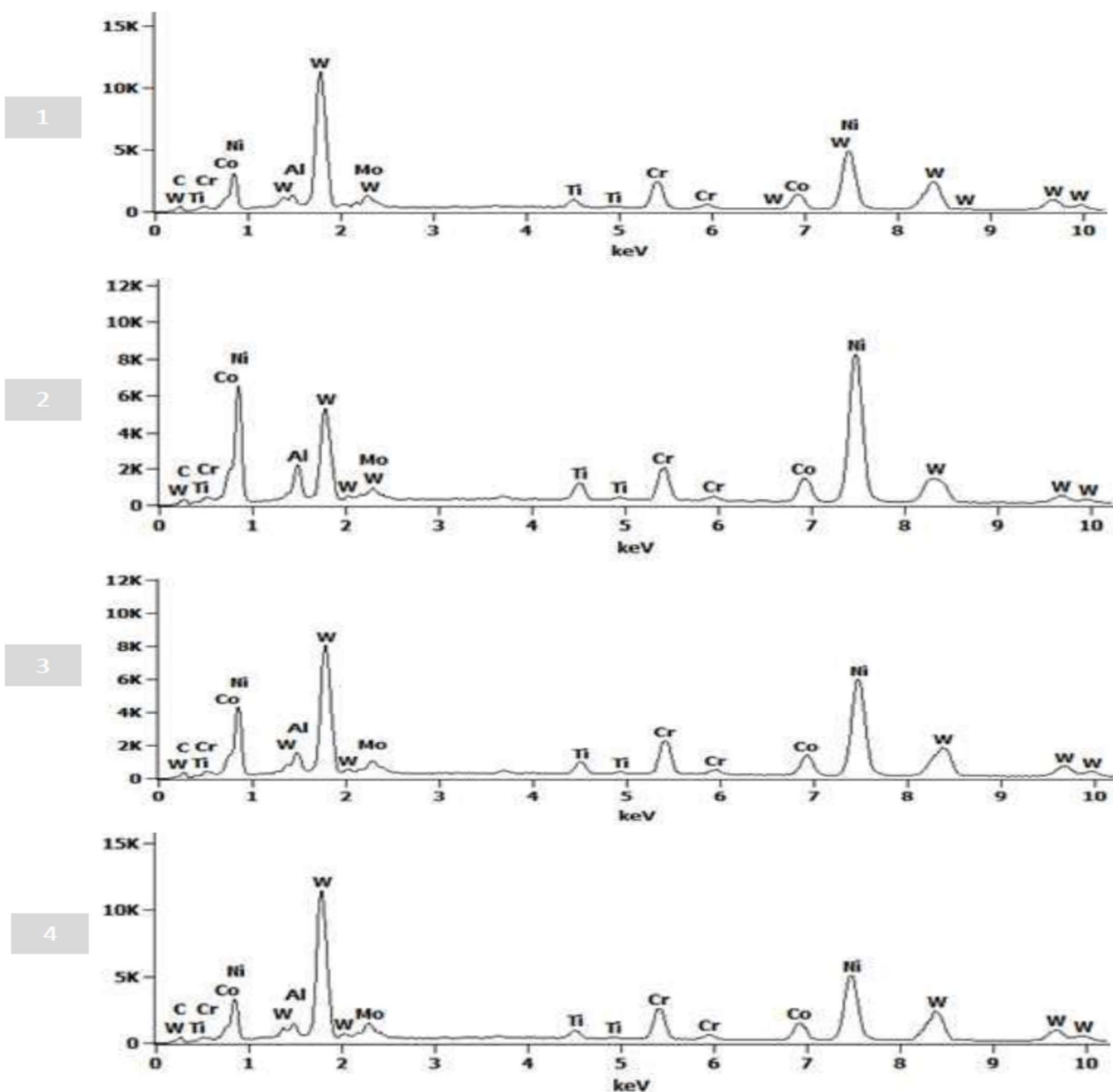
*s- odchylenie standardowe, W_z – współczynnik zmienności

Wartość odchylenia standardowego (s) oraz współczynnika zmienności (W_z) dla średniej wartości objętości względnej wskazuje na brak różnic w rozkładzie węglików w poszczególnych obszarach zamka łopatkki. Jednakże, w środkowej części zamka obserwowano większą zawartość węglików w porównaniu do pozostałych obszarów łopatkki.

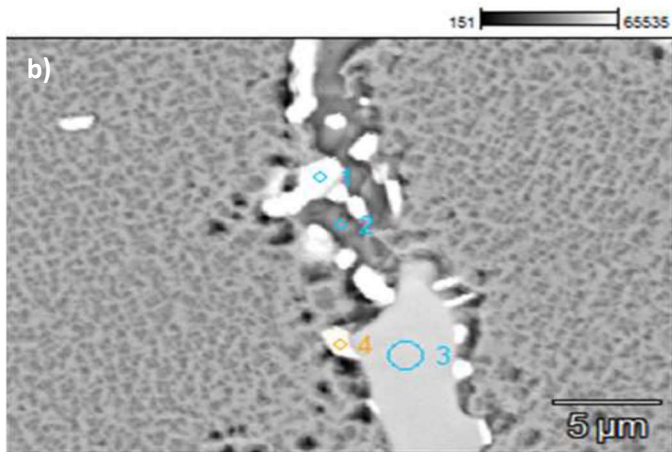


Zawartość pierwiastka, % mas.

Pkt.	Al-K	Ti-K	Cr-K	Co-K	Ni-K	Mo-L	W-L
1	1,9	2,0	7,9	6,4	27,4	4,3	50,1
2	4,9	2,7	6,2	7,3	50,1	2,1	26,5
3	2,9	2,2	7,5	6,7	36,1	3,5	41,1
4	2,1	1,7	8,1	6,6	28,0	5,3	48,1

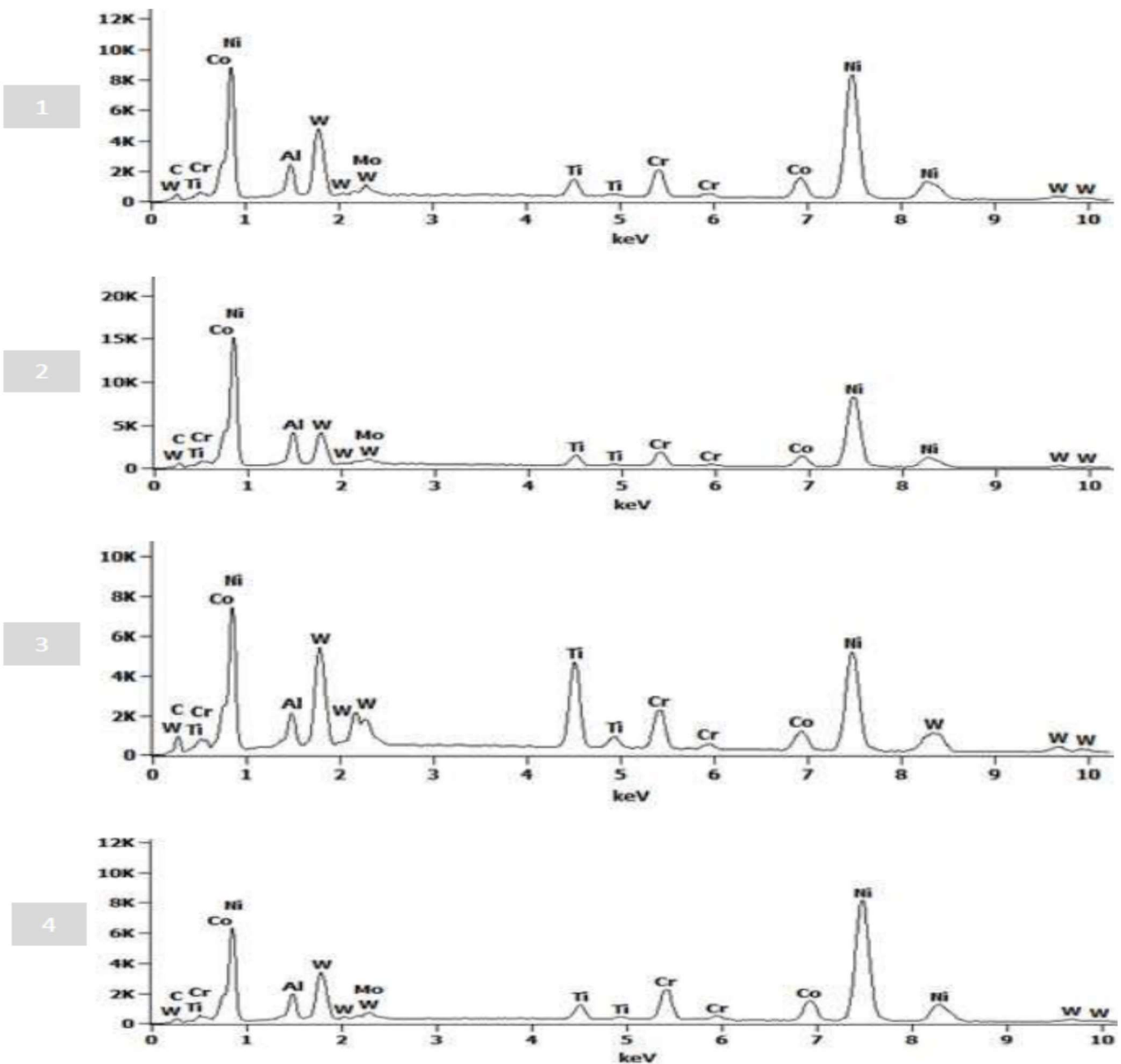


Rys. 58. Analiza składu chemicznego wykonana metodą punktową SEM-EDS dla wydzielen z rys. a. Mikrostruktura stopu ZS6U-WI w strefie prawego górnego rogu łopatki (PG).

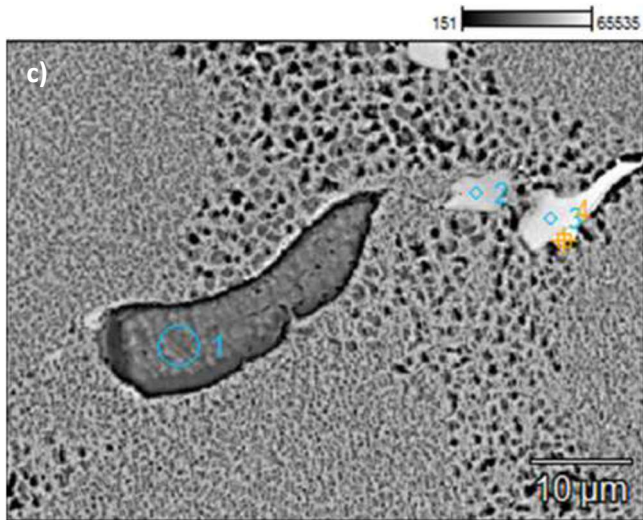


Zawartość pierwiastków, % mas.

Pkt.	Al-K	Ti-K	Cr-K	Co-K	Ni-K	Mo-L	W-L
1	3,7	2,9	6,1	7,7	56,6	1,5	21,6
2	6,6	3,2	5,9	7,7	60,2	1,0	15,4
3	3,0	13,2	8,2	7,3	40,5	-	27,8
4	3,1	2,6	7,2	8,7	61,2	1,1	16,3

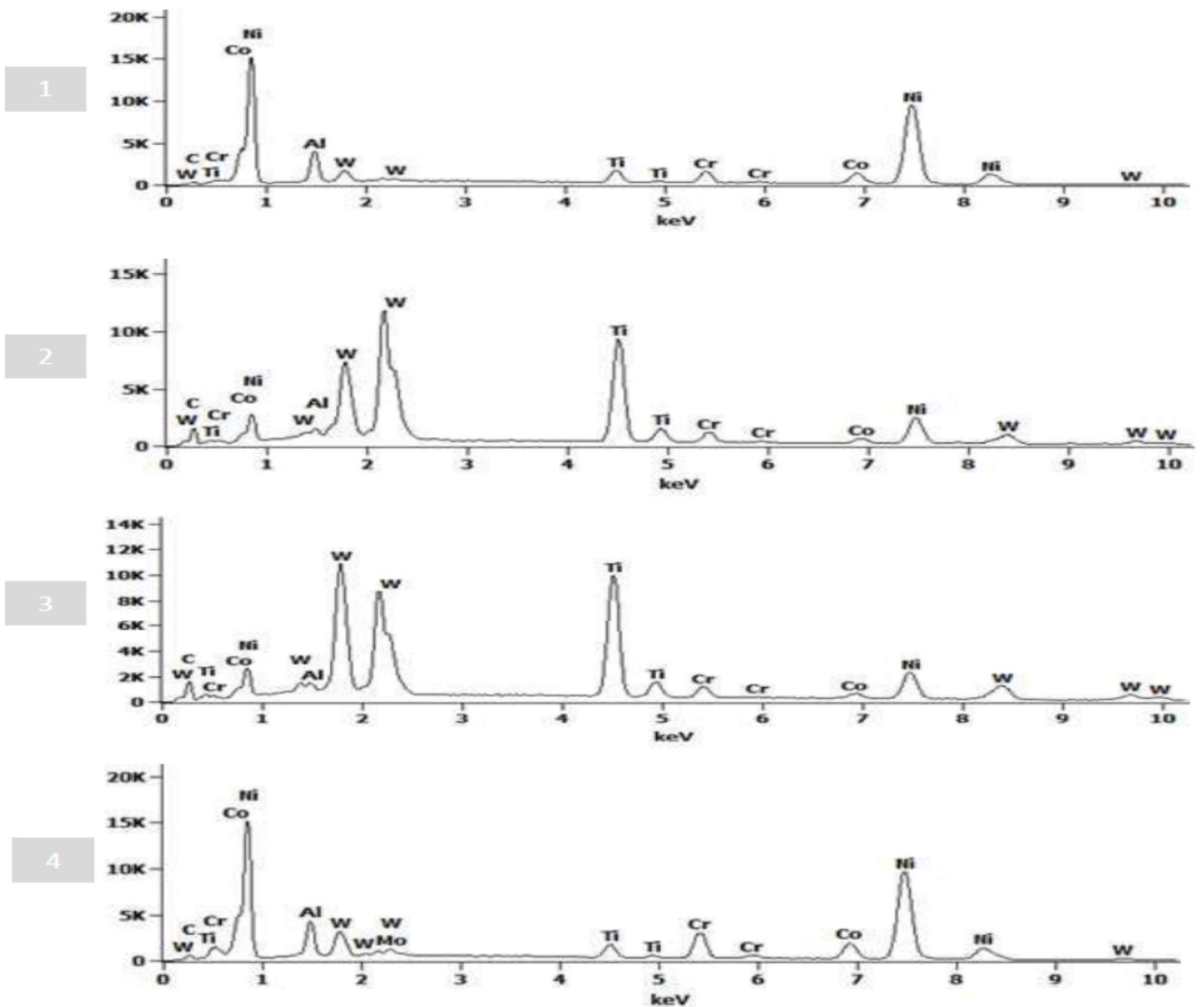


Rys. 59. Analiza składu chemicznego wykonana metodą punktową SEM-EDS dla wydzielań z rys. b. Mikrostruktura stopu ŻS6U-WI w strefie lewego górnego rogu łopatki (LG).



Zawartość pierwiastków, % mas.

Pkt.	Al-K	Ti-K	Cr-K	Co-K	Ni-K	Mo-L	W-L
1	7,1	3,6	4,6	7,7	68,6		8,5
2	0,6	35,4	4,6	3,7	23,8		31,8
3	1,0	34,6	4,0	3,2	19,2		38,0
4	6,0	3,2	8,4	9,5	60,4	0,9	11,6



Rys. 60. Analiza składu chemicznego wykonana metodą punktową SEM-EDS dla wydzielań w strefie lewego dolnego rogu łopatki (LD), z rys. c. (węgliki (2, 3, 4) oraz eutektyka γ - γ').

W toku prowadzonych badań zaobserwowano negatywny wpływ temperatury odlewania w zakresie 1564°C na finalną wartość wytrzymałości zmęczeniowej gotowego wyrobu. Zaobserwowano, iż wysoka temperatura odlewania sprzyja powstawaniu podwyższonej ilości wydzielen kruchych węglików typu MC, które mogą stanowić obszar inicjacji pęknięć zwłaszcza w przypadku, gdy ich objętość względna jest wyższa w obszarach przypowierzchniowych, co ma kluczowe znaczenie na propagację pęknięć w czasie prowadzenia procesów obróbki wykończeniowej (rys. 57). Celem konieczności analizy wszystkich czynników determinujących proces odlewania, mogących mieć wpływ na wartość wytrzymałości zmęczeniowej, podjęto działania mające na celu określenie wpływu rozmiaru ziarna stopu ŻS6U-WI po odlaniu na finalną wartość wytrzymałości zmęczeniowej.

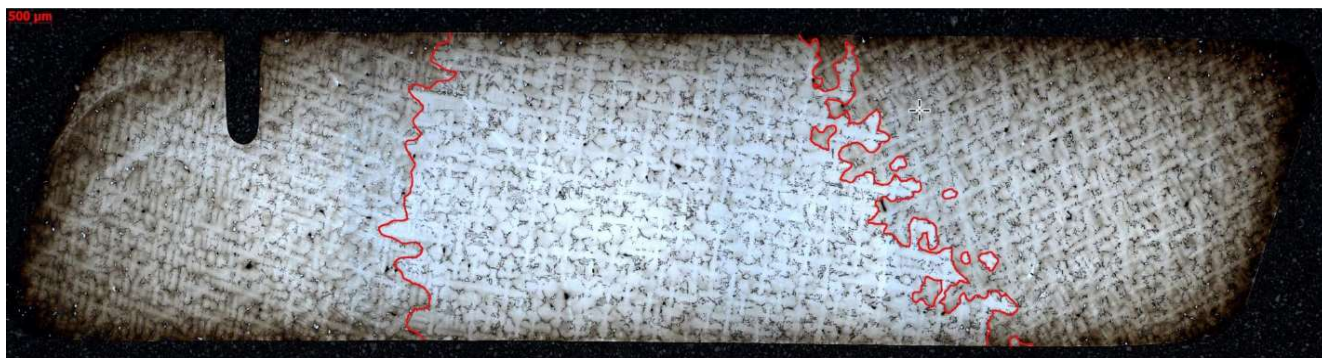
3.2.3. Wpływ warunków procesu odlewania na rozmiar ziarna stopu ŻS6U-WI.

Czynnikiem decydującym o uzyskaniu wymaganych własności użytkowych i niezawodności łopatek wytwarzanych metodą odlewania precyzyjnego jest makro- i mikrostruktura, która powinna charakteryzować się jednorodnym, drobnym i równoosiowym ziarnem w całej objętości odlewu. Krystalizacja odlewów łopatek o zmiennej grubości przekrojów zachodzi w warunkach niesprzyjających tworzeniu takiej makrostruktury. Zróżnicowana geometria łopatki powoduje, że w poszczególnych strefach odlewu obserwuje się występowanie ziaren o zróżnicowanych rozmiarach. Powstanie gruboziarnistej mikrostruktury wiąże się z obniżeniem własności zmęczeniowych Łopatek Turbiny Sprężarki. Bardzo niebezpieczne dla zachowania wymagań jakościowych odlewu jest utworzenie się tzw. ziarn kolumnowych w obszarze zamka łopatki. Dla uzyskania prawidłowej makrostruktury i wymaganych własności odlewów równoosiowych stosuje się techniki odlewania zapewniające możliwie jednoczesną krystalizację w całej objętości odlewu (np. zastosowanie izolacji na odpowiednich elementach formy ceramicznej). Wartość temperatury wygrzewania formy, temperatura ciekłego stopu oraz zastosowanie modyfikatora w odlewach o dużych przekrojach ma również, choć nie tak krytyczny jak konstrukcja formy, wpływ na rozmiar ziarn w odlewie. Części (łopatki) wytworzone z nadstopów niklu, z uwagi na ich zastosowanie i warunki eksploatacji, tj. wysoka temperatura i naprężenia zmiennie-cykliczne, mogą ulegać uszkodzeniom prowadzącym do awarii elementów konstrukcyjnych oprzyrządowania silnika lotniczego. **Prognozowanie trwałości zmęczeniowej wyrobów z nadstopów niklu ma zatem krytyczne znaczenie dla ich niezawodnej pracy.** Wykazano, że trwałość zmęczeniowa jest ściśle związana z wielkością ziarna stopu, z którego element jest wykonany. Wzrost amplitudy odkształcenia również wpływa negatywnie na odporność materiału na zmęczenie. Obszar odlewu charakteryzujący się występowaniem dużych ziaren łatwo kumuluje naprężenia wynikające z oddziaływania cyklicznych odkształceń, co może powodować lokalne obniżenie własności wytrzymałościowych, prowadzących do powstania wad, np. pęknięć determinujących czas użytkowania takich części. Stąd, ważne jest prowadzenie w sposób ciągły analiz mikrostruktury stopów, z których wytwarzano łopatki turbiny, w celu uzyskania danych potwierdzających osiągnięcie wymaganych parametrów odlewu w odniesieniu do wielkości ziarna. Jako badania wstępne wykonano pomiary wielkości ziarna dla dwóch łopatek z odlewów – odlew A (łopatka A1, A2) oraz odlew B (łopatka B1, B2). Do badań wykorzystano łopatki z odlewu A analizowane pod względem obecności pęknięć w rozdziale 3.1. oraz łopatki z odlewu B w celach porównawczych odlane wg zbliżonych parametrów (tabela 14). Badanie miało na celu określenie wpływu jedynie temperatury odlania i temperatury formy na rozmiar ziarna.

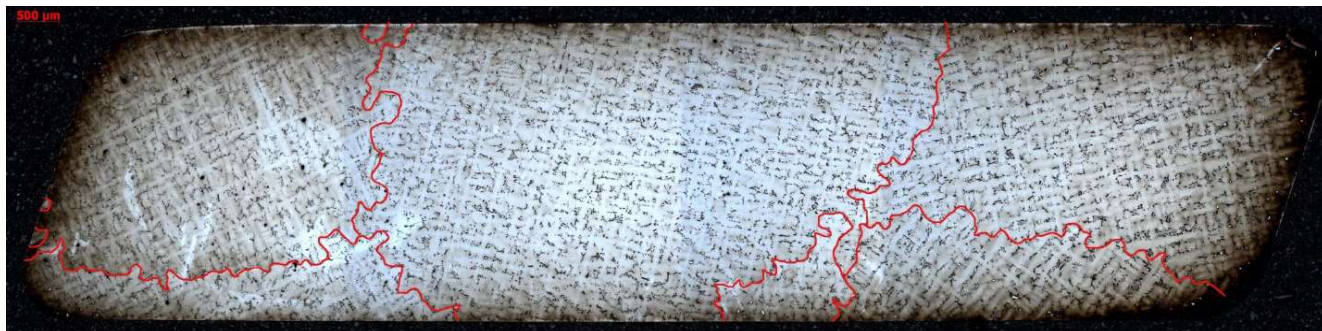
Tabela 14. Warunki procesu odlewania łopatek A1, A2 (odlew A) oraz B1, B2 (odlew B).

Odlew	Temperatura zalewania [°C]	Temperatura formy [°C]
A	1563÷1566	1150
B	1562÷1565	1150

A1

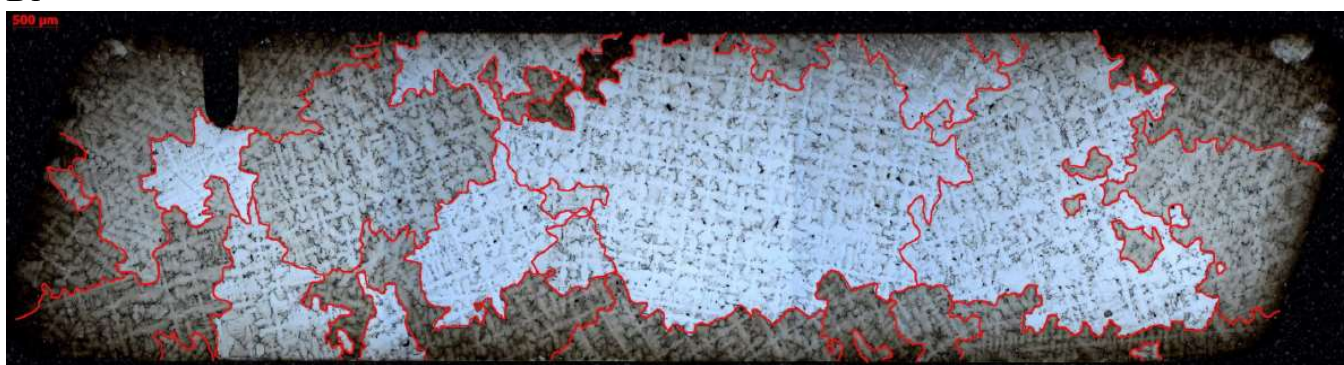


A2

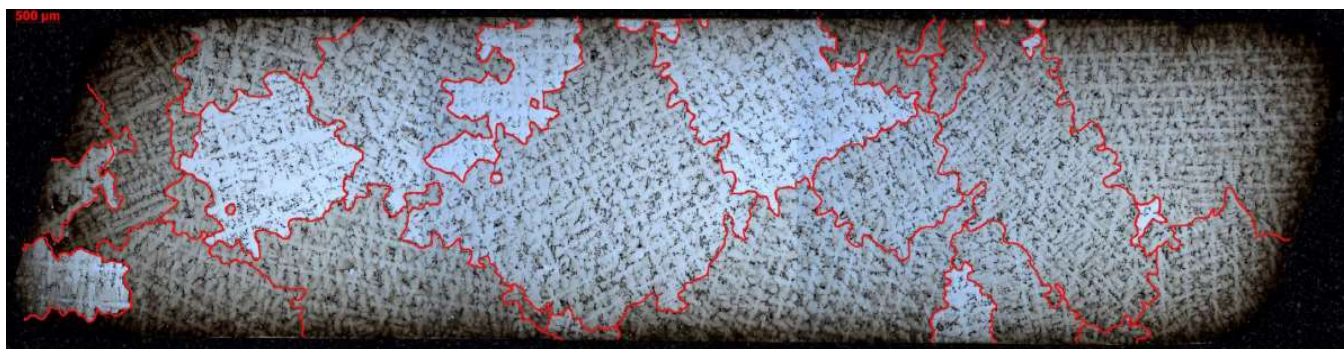


Rys. 61. Mikrostruktura z obszaru zamka łopatkki A1 oraz A2, zgląd trawiony, odczynnik Kalling, LM; czerwoną linią zaznaczono granice ziarn – oddzielające obszary o różnej orientacji krystalograficznej dendrytów.

B1



B2



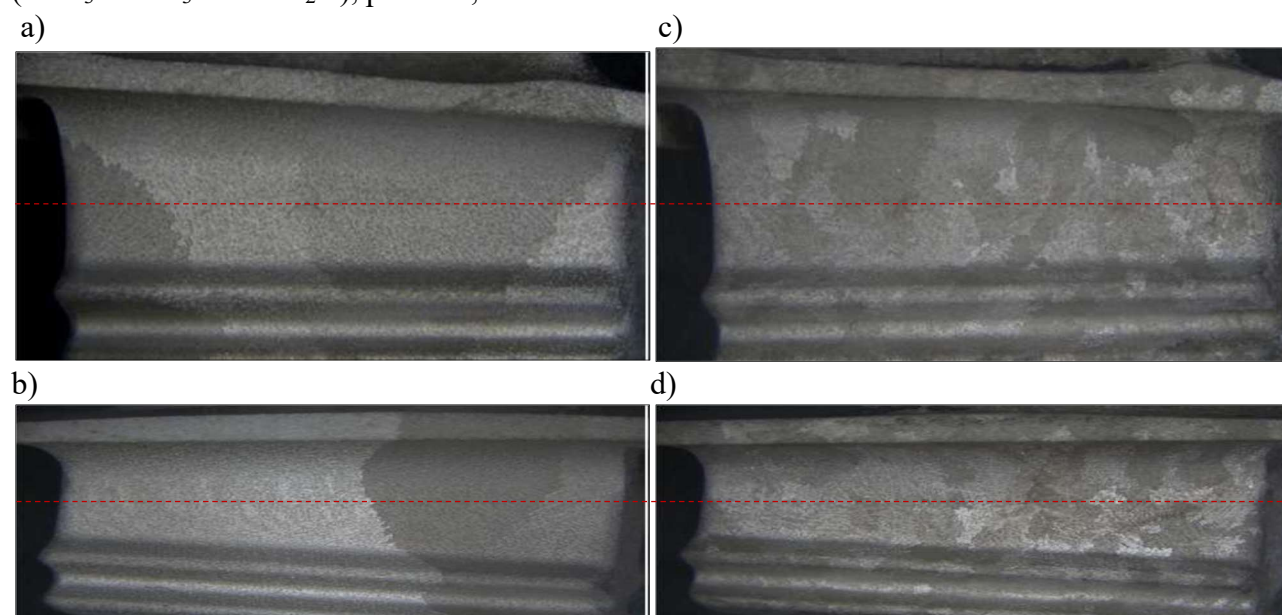
Rys. 62. Mikrostruktura z obszaru zamka łopatkki B1 oraz B2, zgląd trawiony, odczynnik Kalling, LM; czerwoną linią zaznaczono granice ziarn – oddzielające obszary o różnej orientacji krystalograficznej dendrytów.

Nie stwierdzono różnic w wielkości ziarna łopatek pochodzących z tego samego odlewu (rys. 61 i 62). Stwierdzono natomiast, że Łopatki B1 oraz B2 (z odlewu B) mimo zastosowania tych samych warunków odlewania (jak dla odlewu A) charakteryzują się znacznie drobniejszym ziarnem niż łopatki A1 oraz A2 z odlewu A. Zaobserwowano, iż zastosowanie tych samych parametrów temperatury zalewania i temperatury formy nie gwarantuje uzyskanie takiej samej makrostruktury.

W celu weryfikacji stwierdzonych różnic w mikrostrukturze odlewów A i B, wykonano odlew walidujący (odlew C), przy zastosowaniu temperatury zalewania 1560°C oraz formy wygrzewanej w temperaturze 1150°C. Łopatka C1 ze stopu ŻS6U-WI charakteryzuje się, na całej długości łopatki, kilkakrotnie większym wymiarem ziarna w porównaniu do ziarna w łopatce nr C2 (rys. 63). Średni rozmiar ziarna mierzony w połowie wysokości pióra (rys. 64, linia przerywana) wynosi 4,2 mm w przypadku łopatki nr C1 oraz 1,1 mm w przypadku łopatki nr C2.

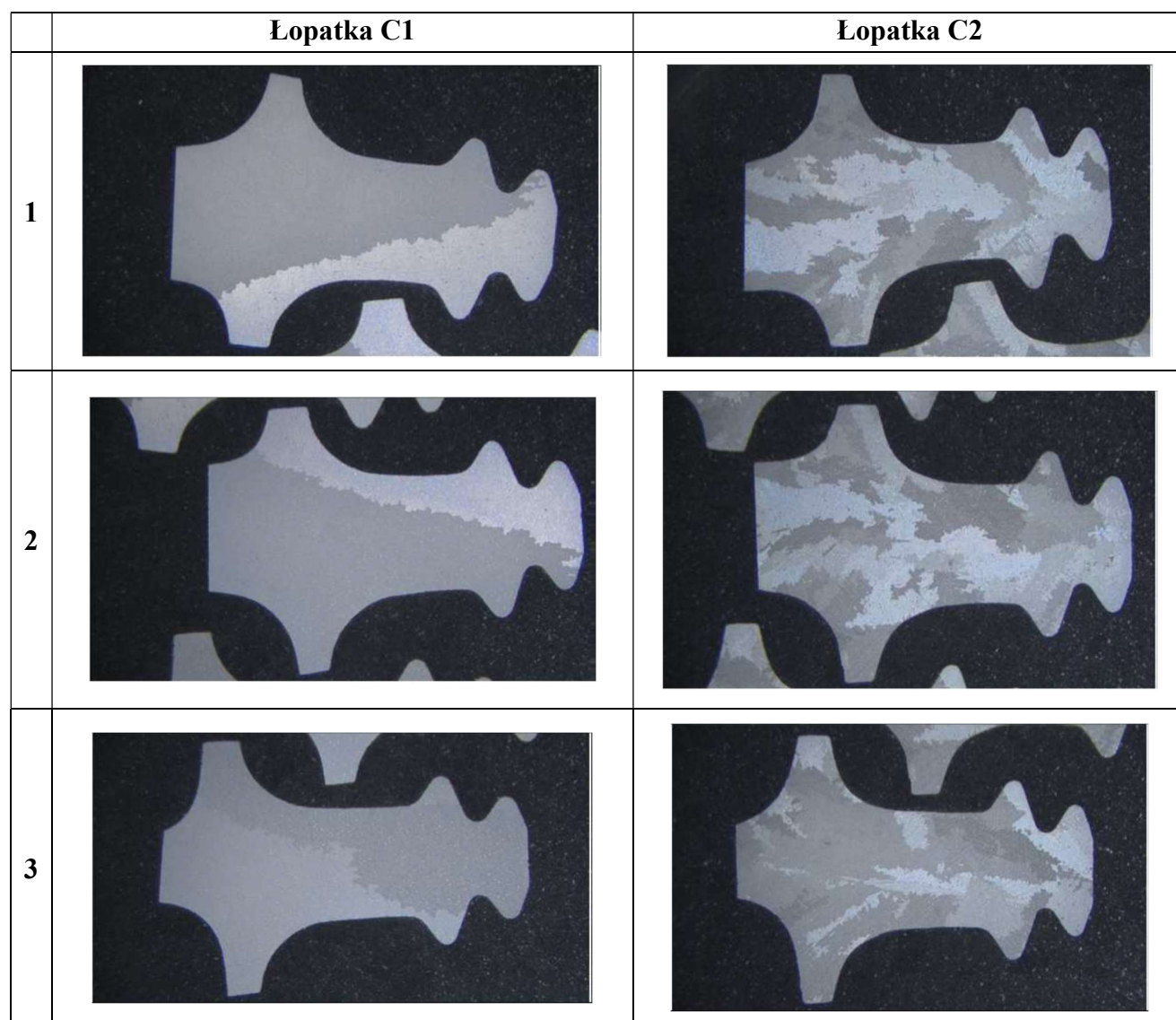


Rys. 63. Makrostruktura Łopatki turbiny napędowej ze stopu ŻS6U-WI, odlew C.: a) powierzchnia od strony koryta, b) powierzchnia od strony grzbietu, stan trawiony odczynnikami ($\text{FeCl}_3+\text{HNO}_3+\text{HCl}+\text{H}_2\text{O}$), pow. $\sim 1,2x$.



Rys. 64. Makrostruktura z obszaru zamka łopatki turbiny napędowej ze stopu: a) łopatka C1 – powierzchnia od strony koryta i c) powierzchnia od strony grzbietu oraz b) łopatka nr C2 – powierzchnia od strony koryta i d) powierzchnia od strony grzbietu, stan trawiony, odczynnik ($\text{FeCl}_3+\text{HNO}_3+\text{HCl}+\text{H}_2\text{O}$), pow. $\sim 4x$.

Rys. 65. Makrostruktura z obszaru zamka łopatki turbiny napędowej ze stopu (przekroje nr 1 do 3, wg Metodyki Badań rys. 5) stan trawiony odczynnik Kalling'a, pow. ~7x.



Badania odlewów A, B oraz C wykazały, że zastosowanie temperatury odlewania, w zakresie (1560÷1566)°C oraz temperatury formy 1150°C, nie gwarantuje wytworzenie w odlewach mikrostruktury charakteryzujących się jednorodną wielkością ziarna w całej ich objętości. Przeprowadzone badania potwierdziły, że temperatura odlewania oraz temperatura formy nie są jedynymi czynnikami mogącymi mieć wpływ na wielkość ziarna determinującego wytrzymałość zmęczeniową Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia. Stwierdzono konieczność prowadzenia dalszych analiz w zakresie opisu wpływu innych warunków procesu odlewania na jakość wytwarzanych łopatek.

3.2.4. Wpływ dodatku modyfikatora na rozmiar ziarna materiału ŻS6U-WI.

Z uwagi na stwierdzone różnice w parametrach makrostruktury odlewów wytworzonych z zastosowaniem tych samych warunków odlewania, zdecydowano o zastosowaniu modyfikatora w celu uzyskania wymaganej, zgodnej z normami makrostruktury odlewów łopatek turbiny. Modyfikator może być wprowadzony bezpośrednio do kąpielii ciekłego stopu, jako substancja zarodkotwórcza lub do wierzchniej warstwy formy ceramicznej mającej bezpośredni kontakt

z ciekłym stopem. Mieszaninę modyfikatora z masą ceramiczną nakłada się na model woskowy jako pierwszą warstwę formy. Jako modyfikatory stosuje się substancje chemiczne oparte na związkach m.in. kobaltu. W odlewach o niewielkich przekrojach, jak Łopatki Turbiny Sprężarki, rozmiar ziarna determinowany jest przede wszystkim przez zawartość modyfikatora w warstwie wierzchniej formy. Wykonano zatem dodatkowe próby odlewnicze (oznaczone literami D, E, F i G) mające na celu określenie wpływu dodatku glinianu kobaltu $CoAl_2O_4$ na wielkość ziarna w zamku Łopatki Turbiny Sprężarki wykonywanej ze stopu ŻS6U-WI (tabela 20).

Tabela 20. Warunki procesu odlewania łopatek ze stopu ŻS6U-WI dla odlewów D, E, F oraz G wykonanych przy zastosowaniu modyfikatora.

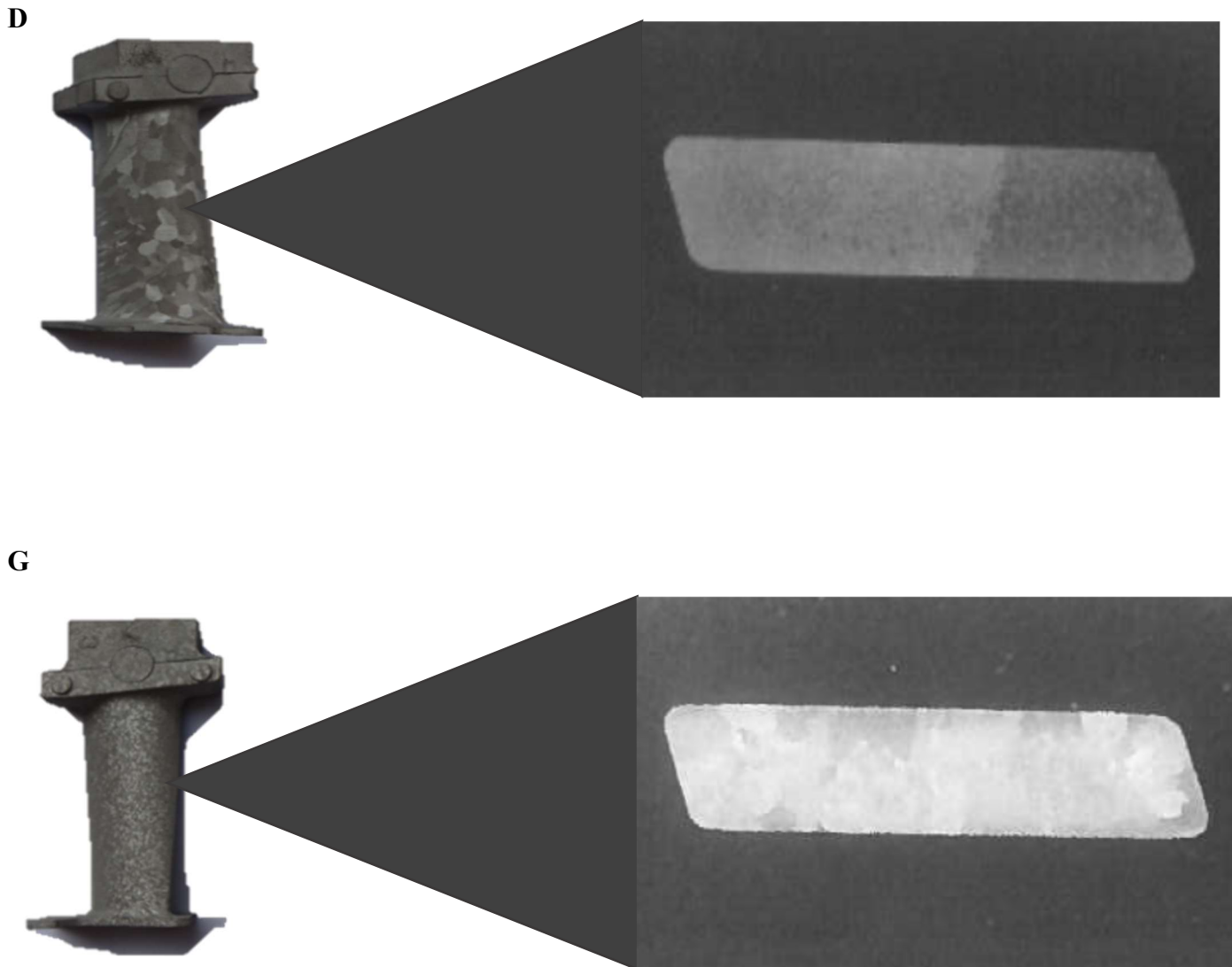
Wytop	Temperatura odlewania [°C]	Temperatura formy [°C]	Zawartość modyfikatora [%]
D	1530	1000	0
E	1530	1000	2
F	1530	1000	5
G	1530	1000	10

Odlew G	Odlew F	Odlew E	Odlew D
---------	---------	---------	---------



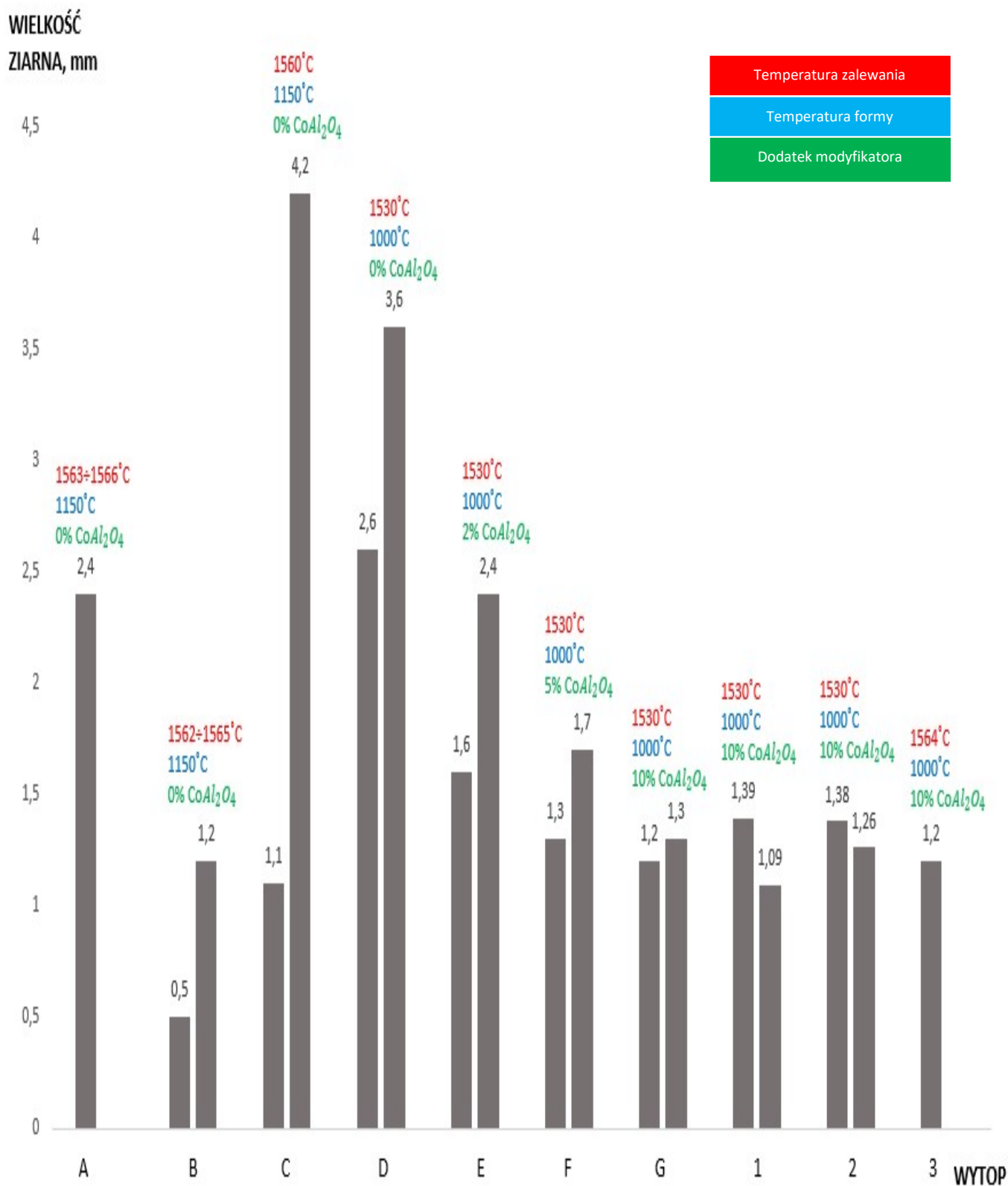
Rys. 66. Makrostruktura Łopatek Turbiny Sprężarki z odlewów: a) G z dodatkiem 10% modyfikatora, b) F z dodatkiem 5% modyfikatora, c) E z dodatkiem 2% modyfikatora i d) D bez dodatku modyfikatora.

Stwierdzono wpływ zastosowanego modyfikatora na wielkość ziarna w łopatkach odlewanych przy zastosowaniu takich samych parametrów odlewania. Łopatka z odlewu G, w którym zastosowano największą zawartość $CoAl_2O_4$, tj. 10% charakteryzuje się najdrobniejszym ziarnem (rys. 66). Wykonano również pomiary wielkości ziarna na przekroju zamka łopatek (rys. 67), z których wynika, że zastosowanie modyfikatora wpływa krytycznie na zarodkowanie ziarn w procesie krystalizacji, co skutkuje uzyskaniem ziarna charakteryzującego się znacznie mniejszym rozmiarem, w porównaniu do łopatki odlewanej bez zastosowania modyfikatora.



Rys.67. Makrostruktura odlewów D i G w obszarze zamka łopatki.

Na podstawie przeprowadzonych prób odlewania z zastosowaniem różnych warunków oraz przy użyciu modyfikatora w postaci glinianu kobaltu stwierdzono, że istnieje możliwość wykonania odlewów charakteryzujących się optymalnymi parametrami mikrostruktury gwarantującymi osiągnięcie zgodnych z normą własności żarowytrzymałych (rys. 68, tabela 21). Wymagane jest jednak prowadzenie procesu w sposób zgodny z osiągniętymi wynikami, co determinuje również konieczność wprowadzenia zmian w technologii wytwarzania łopatek turbiny (tabela nr 22).



Rys. 68. Wpływ zawartości modyfikatora na rozmiar ziarna austenitu γ w odlewach łopatek A, B, C, D, E, F i G (średnia cięciwy) (kolor czerwony – temperatura zalewania, kolor niebieski – temperatura formy, kolor zielony – dodatek modyfikatora).

Tabela 21. Wpływ warunków odlewania na parametry mikrostrukturalne Łopatek Turbiny Sprężarki z odlewu C, 1 oraz 3.

Nr łopatki	Odlew C (C1)			Odlew C (C2)			Odlew 3	Odlew 1		
Temperatura odlewania [°C]	1560			1560			1564	1535		
Temperatura formy [°C]	1150			1150			1000	1000		
Modyfikator [%]	0			0			10	10		
Obszar/przekrój obserwacji	1	2	3	1	2	3	1	1	2	3
Faza γ										
Średnia objętość względna w przekroju VV , %	55,7	57,0	57,3	57,6	55,8	57,5	56,6	60,3	58,76	58,68
Średnia objętość względna dla łopatki, VV , %	56,7			56,65				59,25		
Węgliki										
Średnia objętość względna w przekroju VV , %	2,4	2,5	2,7	2,6	2,4	2,9	1,7÷2,5	2,42	2,53	2,54
Średnia objętość względna dla łopatki, VV , %	2,53			2,63			2,06	2,50		
Rozmiar ziarna										
Średnia cięciwa	4,2 mm			1,1 mm			1,2 mm	1,39	1,38	1,09
Porowatość										
Średnia objętość względna w przekroju VV , %	0,169	0,171	0,170	0,07	0,08	0,06	<0,1	0,08	0,08	0,14
Średnia objętość względna dla łopatki, VV , %	0,17			<0,10				0,10		
Własności mechaniczne odlewów										
Żarowytrzymałość	Czas próby 40 h – próbka nie zerwała się			Czas próby 40 h – próbka nie zerwała się			Czas próby 40 h – próbka nie zerwała się	Czas próby 40 h – próbka nie zerwała się		
Badanie wytrzymałości doraźnej	$R_m = 957 \text{ MPA}$ $A = 4,6 \%$			$R_m = 957 \text{ MPA}$ $A = 4,6 \%$			$R_m = 935 \text{ MPA}$ $A = 3,7 \%$	$R_m = 927 \text{ MPA}$ $A = 3,1 \%$		
Własności zmęczeniowe odlewów										
Próba zmęczeniowa	22 $[\frac{kG}{mm^2}]$			22 $[\frac{kG}{mm^2}]$			19,7 $[\frac{kG}{mm^2}]$	22 $[\frac{kG}{mm^2}]$		

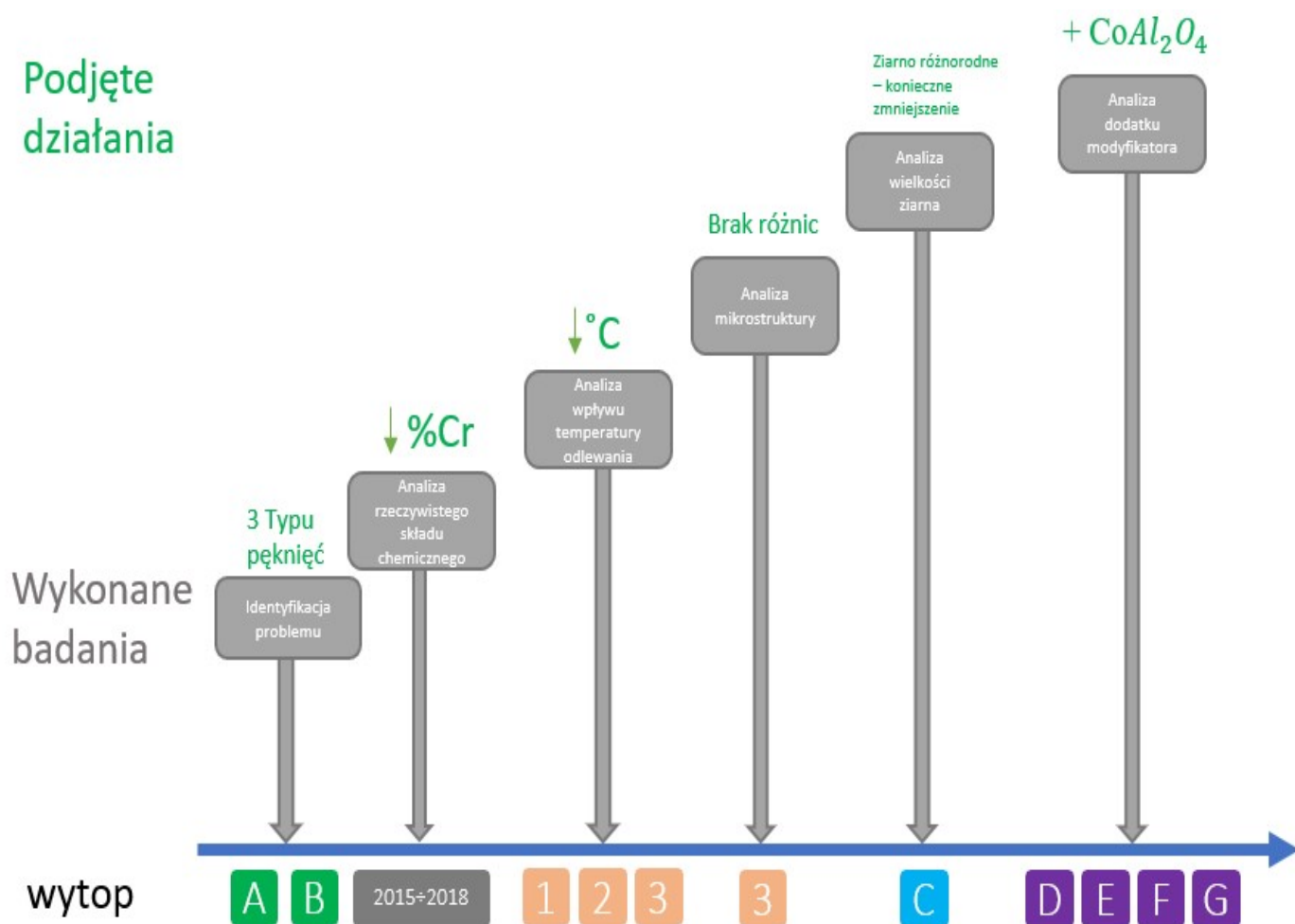
Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

- Mikrostruktura wszystkich Łopatek Turbiny Sprężarki z odlewów 1, 2, 3 po procesie obróbki cieplnej jest typowa dla nadstopu niklu – wykazano obecność osnowy γ , cząstek fazy umacniającej γ' i wydzielen węglików MC.
- Łopatki z odlewu 1 wykonane przy zastosowaniu najniższej temperatury odlewania, tj. 1535°C charakteryzują się większą średnią objętością względną fazy γ' (59,25 %) od łopatek z innych odlewów.
- Zawartość węglików w łopatkach z odlewów C oraz 1 jest zbliżona. Stwierdzono niższą średnią objętość względną węglików w łopatkach odlanych z najwyższej temperaturze - 1564°C (odlew 3), w porównaniu z pozostałymi łopatkami z odlewów C oraz 1.
- Średnia średnica ziaren w łopatkach z odlewu C (łopatka C1- 4,2 mm) jest większa od średniej średnicy ziaren w łopatkach pochodzących z tego samego odlewu, tj. łopatki C2 (1,1 mm) oraz łopatki z odlewu 3 (1,2 mm) i odlewu 1 (1,09÷1,39 mm). Rozmiar ziarna dla odlewu łopatki C2, oraz łopatek z odlewów 1 oraz 3 jest zbliżony.
- Łopatka C1 charakteryzuje się większą porowatością (0,17%) od łopatki C2 oraz łopatek z odlewów 1 oraz 3.
- Łopatki ze wszystkich odlewów spełniają wymagania własności żarowytrzymałych – czas trwania próby powyżej 40 h.
- Łopatki z odlewów 3 i 1 charakteryzowały się niższą wartością wydłużenia ($A=3,1\div 3,7$ %) od pozostałych łopatek z odlewów C1 ($A=4,6\%$) oraz C2 ($A=4,6\%$). Wytrzymałość na rozciąganie dla wszystkich łopatek jest na zbliżonym poziomie (927÷957 MPa)
- Łopatki z odlewów 3 charakteryzował się trwałością zmęczeniową niezapewniającą jej bezpieczną eksploatację, tj. $19,7 \left[\frac{kg}{mm^2} \right]$.
- Podwyższenie temperatury odlewania do wartości 1564°C powoduje obniżenie wytrzymałości zmęczeniowej materiału. Odlewy wykonane przy zastosowaniu tej temperatury zalewania charakteryzowały się większą zawartością węglików typu MC.
- Zastosowanie tych samych parametrów odlewania (odlew C - łopatka C1 oraz C2) nie zapewnia warunków gwarantujących wytworzenie odlewów charakteryzujących się taką samą porowatością oraz wielkością ziarna.

Na podstawie analizy wyników badań opracowano diagram przedstawiający sekwencję prac prowadzonych w ramach wdrażanego procesu odlewania Łopatek Turbiny I Stopnia. Zastosowanie opisanych w diagramie zaleceń procesowych gwarantuje uzyskanie produktów charakteryzujących się wymaganymi własnościami zmęczeniowymi (rys. 69). Kolorem szarym oznaczono kluczowe, dla technologii odlewania łopatek zgodnych z wymaganiami, działania optymalizacyjne (na podstawie wyników badań) pozwalające na stopniową eliminację czynników negatywnie oddziaływujących na własności odlewów, zdefiniowanych w warunkach techniczno- konstrukcyjnych finalnego wyrobu jakim jest Łopatka Turbiny Sprężarki I Stopnia. Kolorem zielonym oznaczono wynik uzyskany w procesie prowadzonych badań oraz działania, które zostały podjęte i wprowadzone w procesie produkcyjnym. Uzyskane wyniki badań stanowiły podstawę opracowania zmian optymalizacyjnych procesu odlewania i zostały wprowadzone do Kart Procesu Wytwarzania (KPW) łopatek (tabela 22). Przyczyną wykonanych prac modyfikacyjnych był zidentyfikowany problem pękania łopatek (pkt. 3.1).

Tabela 22. Zmiany wprowadzone w Karcie Procesu Wytwarzania Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia opracowane na podstawie wyników przeprowadzonych badań.

Wykonane prace optymalizacyjne	Wprowadzone zmiany
Badania składu chemicznego odlewów	Zawartość chromu w stopach w stanie dostawy (masterheat) nie może przekraczać 8,5 % (pkt. 3.2.1)
Analiza wpływu temperatury odlewania i temperatury formy na jakość odlewów	Zdefiniowano wartość temperatury odlewania dla procesu: 1535°C (pkt. 3.2.2).
Analiza mikrostruktury wytworzonych odlewów nr 1, 2, 3.	Brak zmian - nie zaobserwowano różnic w mikrostrukturze łopatek zgodnych i niezgodnych z wymaganiami (pkt. 3.2.2).
Analiza wpływu warunków odlewania na rozmiar ziarna w odlewach A, B, C1, C2.	Zaobserwowano różnorodność uzyskiwanego ziarna pomimo wprowadzenia stałych wartości temperatur odlewania i temperatury formy odlewniczej (pkt. 3.2.3).
Analiza wpływu dodatku modyfikatora na mikrostrukturę odlewów D, E, F, G.	Wymagane stosowanie modyfikatora $CoAl_2O_4$ w ilości 10% (pkt. 3.2.4).



Rys. 69. Diagram przedstawiający sekwencję prac prowadzonych w ramach wdrażanego procesu odlewania łopatek.

3.3. Analiza wlewków w stanie dostawy, tzw. masterheat – krzywa nagrzewania i chłodzenia.

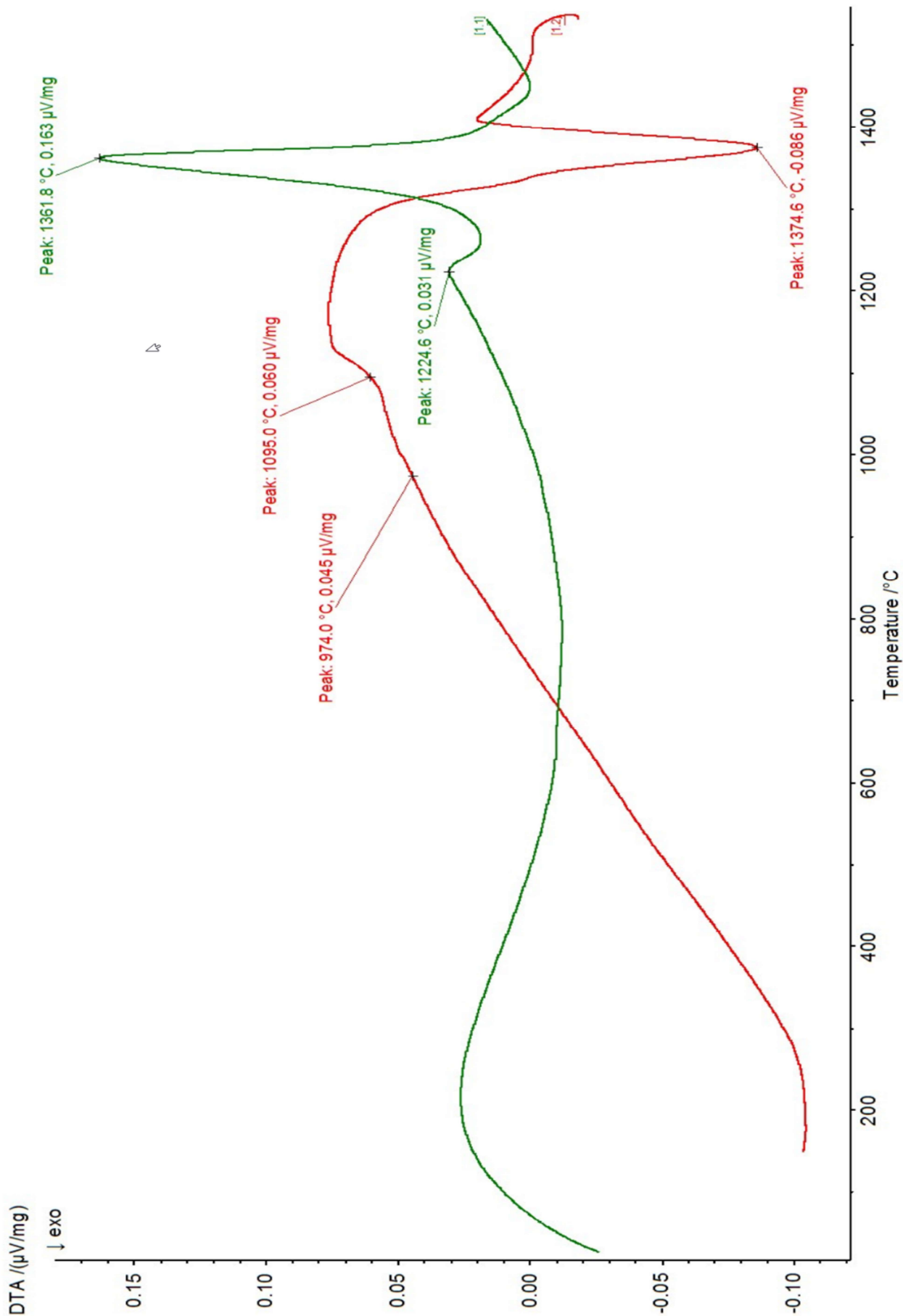
W celu wyznaczenia punktów charakterystycznych dla efektów cieplnych przemian fazowych w czasie nagrzewania i chłodzenia (z prędkością 10°C/min) przeprowadzono analizę cieplną stopu w stanie dostawy (masterheat) przy zastosowaniu metody DTA (termicznej analizy różnicowej). Wyznaczona krzywa DTA (rys. 70÷71) odzwierciedla zmiany w składzie fazowym stopu (wydzielanie i rozpuszczanie składników fazowych) w badanej próbce w warunkach liniowego wzrostu lub obniżania temperatury.

Tabela 23. Temperatura przemian fazowych stopu ŻS6U-WI podczas nagrzewania z prędkością 10°C/min.

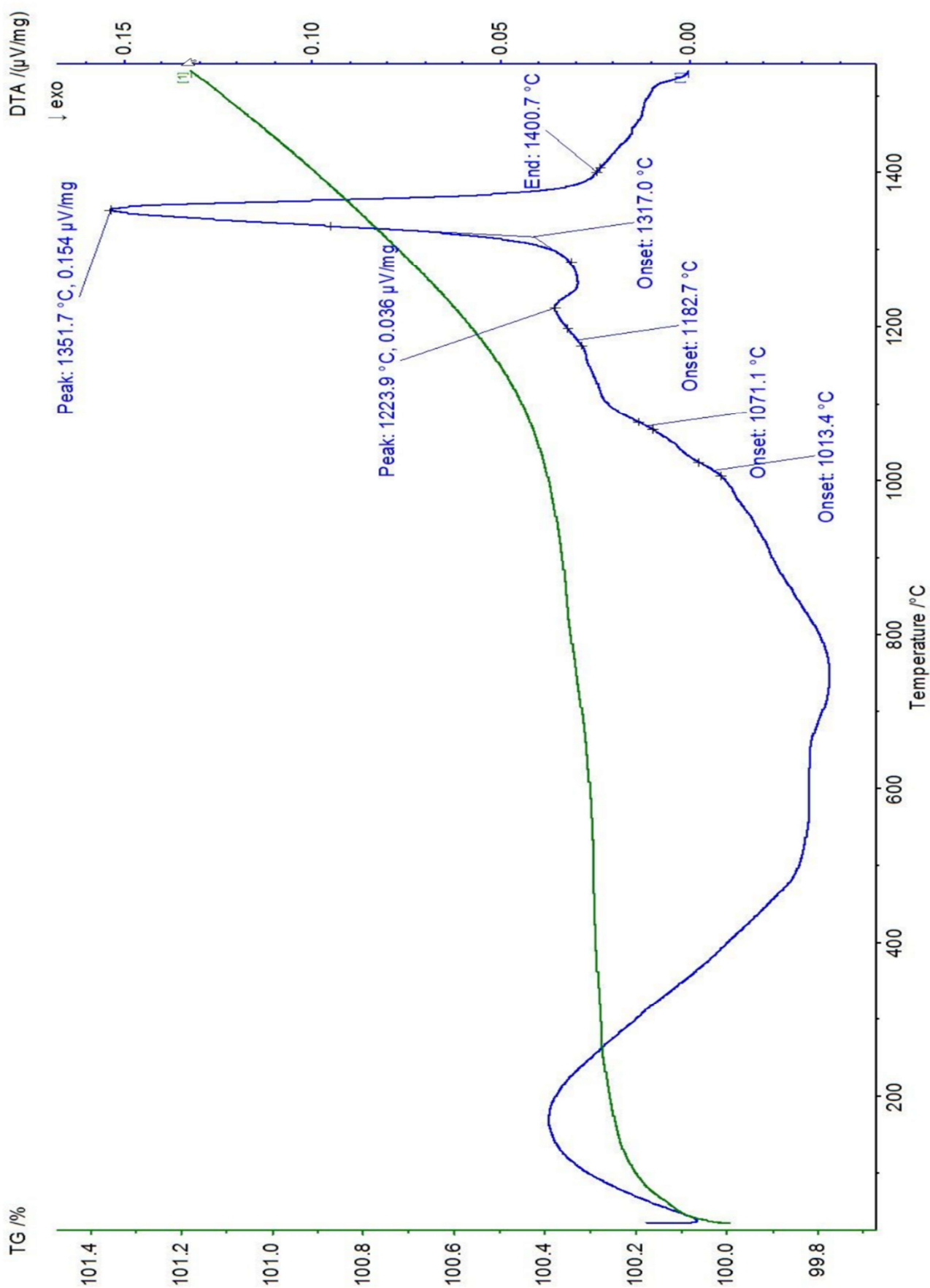
Parametr	Temperatura, °C
T_{lik} – temperatura likwidus, początek krystalizacji	1374,6
T_{MC} – temperatura rozpuszczania węglików typu MC	1321,0
$T_{\gamma/\gamma'E}$ – temperatura końca rozpuszczania eutektyki γ/γ'	1286,0
$T_S (T_{\gamma/\gamma',S})$ – temperatura solidus, temperatura początku rozpuszczania eutektyki γ/γ'	1252,0
$T_{\gamma, S}$ – temperatura początku rozpuszczania fazy γ'	974,0
$T_{\gamma, solvus}$ – temperatura końca rozpuszczania fazy γ'	1100,0

Tabela 24. Temperatury przemian fazowych stopu ŻS6U-WI podczas chłodzenia.

Parametr	Temperatura, °C
T_{lik} – temperatura likwidus, początek krystalizacji	1400,7
T_{MC} – temperatura rozpuszczania węglików typu MC	$T_{MCs}=1223,9$ $T_{MCE}=1247,0$
$T_{\gamma/\gamma'S}$ – temperatura początku rozpuszczania eutektyki γ/γ'	1219
$T_S (T_{\gamma/\gamma',E})$ – temperatura solidus, temperatura końca powstawania eutektyki γ/γ'	1208
$T_{\gamma,E}$ – temperatura końca wydzielania fazy γ'	925
$T_{\gamma, solvus}$ – temperatura początku wydzielania fazy γ'	1182,7



Rys. 70. Krzywa DTA stopu ŻS6U-WI (prędkość nagrzewania 10°C/min) – tab. 23.



Rys. 71. Krzywa DTA stopu ŻS6U-WI (prędkość chłodzenia 10°C/min) – tab. 24.

Na krzywej DTA nagrzewania stopu z prędkością $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ zarejestrowano dwa piki endotermiczne. Pierwszy pik na krzywej wynika z efektu cieplnego rejestrowanego w czasie rozpuszczania fazy γ' . Pik ten można opisać za pomocą charakterystycznych wartości związanych z temperaturą piku, tj. punkt odnoszący się do temperatury początku przemiany ($T_{\gamma, s}$) oraz do temperatury przemiany ($T_{\gamma, solvus}$). Przedział w zakresie temperatury początku i końca przemiany odpowiada procesowi rozpuszczania się fazy γ' i odnosi się prawdopodobnie do procesu rozpuszczania cząstek fazy γ' w obszarze ziarn dendrytów, a także w przestrzeniach międzydendrytycznych. Ponieważ rozpuszczanie cząstek fazy γ' następuje stopniowo, a odpowiadające efekty cieplne są niewielkie, nie można było wyodrębnić dwóch efektów cieplnych na krzywej DTA i jednoznacznie określić temperaturę początku i końca rozpuszczania cząstek tej fazy w ziarnach dendrytów i w przestrzeniach międzydendrytycznych.

Przedział temperatury między $T_{\gamma, solvus}$, a T_e definiuje zakres temperatury, który powinien być stosowany w procesie obróbki cieplnej nadstopu $\dot{Z}S6U-WI$. Drugi pik związany jest z efektami cieplnymi wynikającymi z topienia stopu. Obejmuje kilka procesów, które następują ściśle, jeden po drugim. Przemiany te przebiegają w temperaturze pełnego topnienia stopu, czyli poniżej temperatury likwidus i charakteryzują się niewielkimi efektami cieplnymi. Należy podkreślić, że w trybach nagrzewania i chłodzenia bardzo trudno jest jednoznacznie odczytać wartości temperatury (zdefiniować piki) charakterystycznych dla początku niektórych efektów cieplnych związanych z przemianami (temperatura rozpuszczania fazy γ' czy wartość temperatury wydzielania węglików typu MC), z tego powodu wartości temperatury dla tych efektów podawane są najczęściej jako przedział temperaturowy – początek i koniec przemiany (tabela 23 i 24). Obserwowany na krzywej efekt cieplnych pomiędzy pikiem T_s , a T_L związany jest z procesem rozpuszczania węglików typu MC. Nie można jednak jednoznacznie zdefiniować wartości temperatury początku i końca rozpuszczania tych cząstek, co wynika z wpływu prędkości i temperatury wygrzewania na efekty cieplne spowodowane tą przemianą. Rozpuszczanie węglików jest bardziej intensywne w zakresie wyższej temperatury. Stop $\dot{Z}S6U-WI$ zawiera węgliki typu MC o różnym składzie chemicznym, które prawdopodobnie ulegają stopniowemu rozpuszczaniu. Możliwe, iż w zakresie temperatury od T_s , do T_L następuje rozpuszczanie się innych faz międzymetalicznych, tj. borków, czy fazy Lavesa.

Początek pierwszego piku charakterystycznego dla krzywej DTA w warunkach chłodzenia stopu $\dot{Z}S6U-WI$ odpowiada krystalizacji osnowy γ , tj. powstawaniu dendrytów tej fazy (T_L). Tworzeniu fazy γ towarzyszy segregacja pierwiastków węglikotwórczych do przestrzeni międzydendrytycznych osnowy. Gwałtowny wzrost objętości węglików wiąże się z wyraźnym pikiem cieplnym obserwowanym na krzywej rys. 71. Początek powstawania cząstek węglików oznaczony jest na wykresie jako T_{MCs} . Węgliki powstają najprawdopodobniej w wyniku reakcji eutektycznej $L \rightarrow \gamma + MC$, a ich powstaniu należy przypisać jedną wartość temperatury. Podczas dalszego obniżania temperatury, w przestrzeniach międzydendrytycznych stopu tworzy się eutektyka nierównowagowa γ/γ' . Eutektyka powstaje w wyniku reakcji eutektycznej $L \rightarrow \gamma/\gamma'$, w przedziale temperatury $T_{\gamma/\gamma s}$, a $T_{\gamma/\gamma E}$. Z krzywych DTA wynika, iż krzepnięcie stopu zakończy się w temperaturze T_s . Poniżej temperatury $T_{\gamma, solvus}$ cząstki fazy γ' wydzielają się z osnowy podczas stopniowego chłodzenia stopu.

4. Zastosowanie procesów specjalnych w technologii wytwarzania łopatek z żarowytrzymałego stopu odlewniczego ŻS6U-WI.

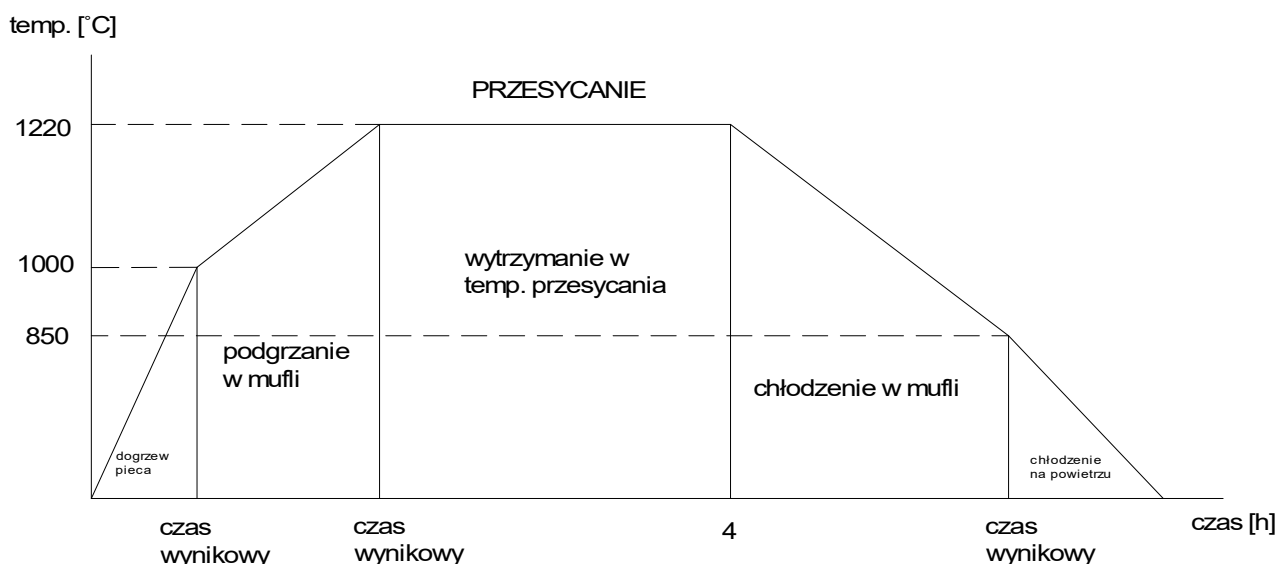
4.1. Wpływ warunków obróbki cieplnej na własności użytkowe Łopatek Turbiny Sprężarki z nadstopu ŻS6U-WI.

Jak wykazano w rozdziale III *Badań Własnych, dotyczących analizy procesu odlewania żarowytrzymałego stopu odlewniczego ŻS6U-WI*, produkcja części krytycznych dla pracy silnika lotniczego, jakim są łopatki wymaga prowadzenia badań z zakresu oceny ich jakości na każdym etapie ich wytwarzania. Łopatki turbiny produkowane są z nadstopów niklu, które dostarczane są w formie tzw. *masterheat* 'ów przez zakłady metalurgiczne, które zapewniają, że zamawiane stopy spełniają zarówno wymagania norm lotniczych, jak i również wymagania wewnętrzne opracowane pod potrzeby produkcji podzespołów lotniczych przez firmę Pratt&Whitney z finalnym ich odbiorcą. W przypadku technologii odlewania precyzyjnego ważne jest stosowanie stopów (*masterheat*) gwarantujących uzyskanie wyrobów o powtarzalnych własnościach fizycznych i mechanicznych. Dlatego, firma Pratt&Whitney realizując zamówienia z obszaru technologii precyzyjnych prowadzi wstępne działania w zakresie opracowania i dostosowania warunków poszczególnych procesów niezbędnych do wytworzenia np. odlewów spełniających własności określone wymaganiami zawartymi w normach lub poprzez zdefiniowane parametry jakościowe dostarczone bezpośrednio przez finalnego odbiorcę produktu. Dotyczy to również technologii kształtowania mikrostruktury materiałów stosowanych w produkcji lotniczej, a więc nadstopów, determinujących własności jakościowe i użytkowe gotowych podzespołów. Konieczne, w ramach prowadzonych prac, było zatem dostosowanie warunków procesu obróbki cieplnej odlanych łopatek z dostarczonego przez firmę zewnętrzną nadstopu ŻS6U-WI do finalnych własności mechanicznych odlewów łopatek w zakresie żywotności i bezpieczeństwa ich użytkowania. Określono zatem wpływ warunków obróbki cieplnej łopatek z nadstopu ŻS6U-WI na ich własności. Dobranie odpowiednich warunków obróbki cieplnej jest kluczowe w kształtowaniu mikrostruktury wyrobów wykonanych z nadstopu ŻS6U-WI determinującej uzyskanie odpowiednich własności wytrzymałościowych (tabela 24). Stop ŻS6U-WI w stanie lanym posiada niejednorodną mikrostrukturę, składającą się z dendrytów fazy γ oraz obszarów eutektycznych γ/γ' i wydzieleni fazy γ' o różnej morfologii. Zgodnie z normą OST 1 90126-85, stop ŻS6U-WI przesycany jest z temperatury $1210\pm 15^\circ\text{C}/4\text{h}$ w warunkach chłodzenia na powietrzu, co zapewnia odlewom osiągnięcie własności mechanicznych na poziomie zgodnym z normą OST 1 90126-85 (tabela 24).

Tabela 24. Własności mechaniczne obrobionego cieplnie stopu ŻS6U-WI wg OST 1 90126-85.

Własności mechaniczne		Żarowytrzymałość	
Rm [MPa]	A [%]	Temperatura procesu [$^\circ\text{C}$]	Czas do zerwania próbki [h]
min. 830	min. 3	975	40

Dla ustalenia prawidłowych warunków prowadzenia planowanych badań, w pierwszym etapie wykonano badania kalorymetryczne dla badanego stopu (rys. 70÷71). Temperaturę początku i końca wydzielenia węglików oraz fazy γ/γ' określono na podstawie analizy DTA. Zgodnie z krzywą DTA dla dostarczonego stopu ŻS6U-WI *masterheat* I, wymagane jest zastosowanie temperatury przesycania $\sim 1220^\circ\text{C}$ (co jest zgodne z normą OST 1 90126-85). W przyjętym do badań cyklu stosowano nagrzewanie do temperatury 1220°C (piec komorowy z muflą), wygrzewanie w czasie 4 h (w warunkach gazu obojętnego) i chłodzenie w powietrzu (rys. 72).



Rys. 72. Schemat procesu obróbki cieplnej odlewów (łopatek) z nadstopu ŻS6U-WI.

Celem określenia wpływu obróbki cieplnej na żarowytrzymałość odlewów Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia przeprowadzono analizę wyników badań własności mechanicznych 20 odlewów po obróbce cieplnej prowadzonej w atmosferze ciśnienia parcjalnego argonu, w piecu komorowym (tabela 25). Wszystkie odlewy przesycały z temperatury $\sim 1220^{\circ}\text{C}$. Stosowano różną (w zależności od wsadu i czasu pracy pieca) prędkość nagrzewania do temperatury wyżarzania tj. $1,4 \div 2,3^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Skład chemiczny odlewów był zgodny z wymaganiami normy OST 1 90126-8 (tab. 1). Sposób wykonywania badań, parametry prób oraz geometrię próbek przedstawiono w pkt. 2.10.2 „Metodyki badań”.

Tabela 25. Warunki obróbki cieplnej, wyniki badań żarowytrzymałości oraz własności mechanicznych dla 20 wytopów łopatek z nadstopu ŻS6U-WI.

Nr odlewu	Warunki obróbki cieplnej (przesykanie)			Własności mechaniczne		Próba żarowytrzymałości
	Prędkość nagrzewania, $^{\circ}\text{C}/\text{min}$	Temperatura przesykania, $^{\circ}\text{C}$	Czas wyżarzania, [h]	Wytrzymałość na rozciąganie, R_m , MPa	Wydłużenie A, %	Czas do zerwania/czas realizacji próby [h]
1	2,10	1220	4	950	4,6	40
2	1,91	1220	4	956	3,8	42
3	2,20	1220	4	961	3,5	40
4	1,57	1220	4	868	2,3	40
5	2,10	1220	4	927	3,1	40
6	1,91	1220	4	958	4,4	40
7	1,83	1220	4	887	3,4	41
8	1,42	1220	4	881	2,8	34,7
9	2,00	1220	4	896	2,1	40
10	2,32	1220	4	1015	6,4	40
11	2,20	1220	4	962	4,5	47,7
12	2,00	1220	4	924	4	40
13	1,38	1220	4	943	4,6	40
14	1,91	1220	4	979	4,4	40
15	2,20	1220	4	921	3	40
16	2,20	1220	4	917	3	40
17	1,52	1220	4	917	3	40
18	1,52	1220	4	983	3,1	40
19	1,69	1220	4	979	6,2	40
20	1,83	1220	4	969	6,4	40

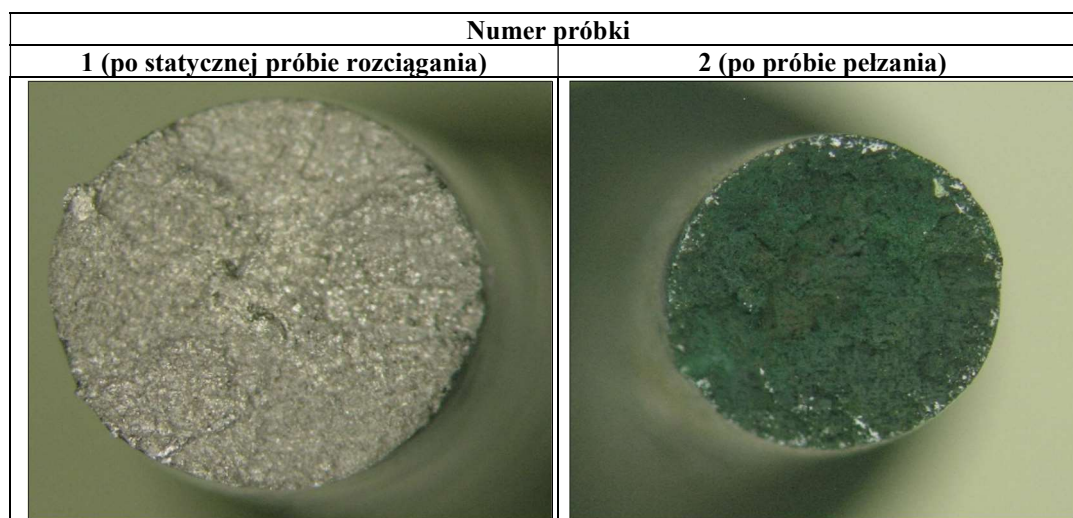
Odlewy 1÷20 (zgodnie z tabelą 25) po obróbce cieplnej tj. przesycaaniu z temperatury 1220°C/4h charakteryzują się własnościami mechanicznymi zgodnymi z normą OST 1 90126-85, tj. wytrzymałość na rozciąganie Rm w zakresie od 868 do 1015 MPa (min. 830 MPa), wydłużenie A w zakresie od 2,1÷6,4 % (min. 3%). Stwierdzono, że odlewy nr 4, 8 oraz 9 po obróbce cieplnej nie spełniają wymagań normy w odniesieniu do własności plastycznych, tj. wydłużenie A<3%. Wszystkie odlewy, z wyjątkiem odlewu nr 8 (zerwanie próbki nastąpiło po 34,7 h), spełniają wymagania normy definiujące wytrzymałość łopatek na pełzanie (min. 40 h). Wyniki badań własności wszystkich odlewów wskazują, iż mimo zastosowania takich samych warunków obróbki cieplnej (krytycznych dla procesu, tj. temperatury wyznaczonej w badaniach DTA oraz czasu przesycaania) nie wszystkie próby zakończyły się uzyskaniem wartości potwierdzającej zgodność z wymaganiami normy OST 1 90126-85. Brak możliwości osiągnięcia minimalnej wartości wydłużenia (A) oraz wytrzymałości na pełzanie wynika prawdopodobnie z niejednorodnej mikrostruktury stopu (w stanie dostawy – masterheat), z którego wykonano odlewy. Wykonano badania makro- i mikroskopowe próbek z odlewu nr 8 po przeprowadzonej statycznej próbie rozciągania oraz próbie pełzania do zerwania mające na celu ocenę wpływu czynników mikrostrukturalnych na własności mechaniczne badanych odlewów (zdjęcia próbek po badaniu przedstawiono w tabeli nr 26). Dokonano oceny przełomu na dwóch próbkach. Sposób przeprowadzenia badania wykonano zgodnie z pkt. 2.9.2. „Metodyki Badań”. Wygląd przełomów przedstawiono w tabeli nr 27. Nalot w kolorze zielonym, widoczny na powierzchni przełomu, na próbce nr 2 (z odlewu nr 8) świadczy o utlenieniu powierzchni.

Tabela 26. Obraz próbek po statycznej próbie rozciągania 1) oraz po próbie pełzania 2).

l.p.	Niegodny parametr	Widok próbki po badaniu	
		Część „A”	Część „B”
1	Wydłużenie A [%]		
2	Żarowytrzymałość		

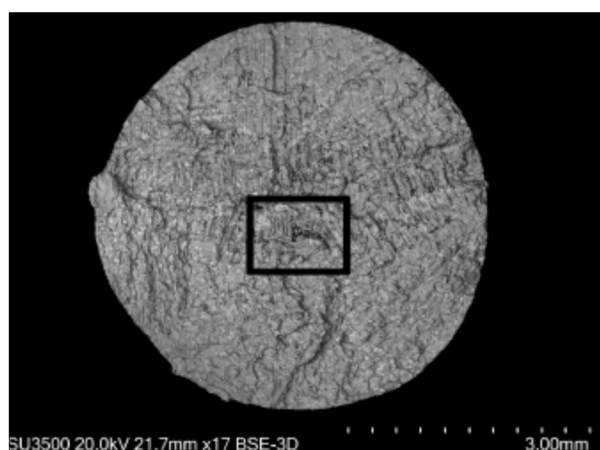
Przeprowadzono badania makroskopowe przełomów (fraktografia) próbek po badaniach własności mechanicznych (tab. 27). Metodykę badań opisano w pkt. 2.9.2. rozdziału „Metodyka Badań” pracy. Badania makroskopowe przełomów próbek po badaniach wytrzymałościowych umożliwiają wstępną jakościową ocenę charakteru zniszczenia materiału. Przełom przebiega przez miejsca najsłabsze i ujawnia tym samym charakter wad materiałowych determinujących degradację odlewów w symulowanych w czasie próby warunkach eksploatacji. Badania powierzchni przełomów umożliwiają dokonać oceny na temat rodzaju obciążeń, prędkości wzrostu pęknięcia, kierunku propagacji, czy wpływie warunków pracy elementów.

Tabela 27. Przełom próbki 1: po statycznej próbie rozciągania oraz próbki 2: po próbie pełzania, mikroskop stereoskopowy pow. 20x.

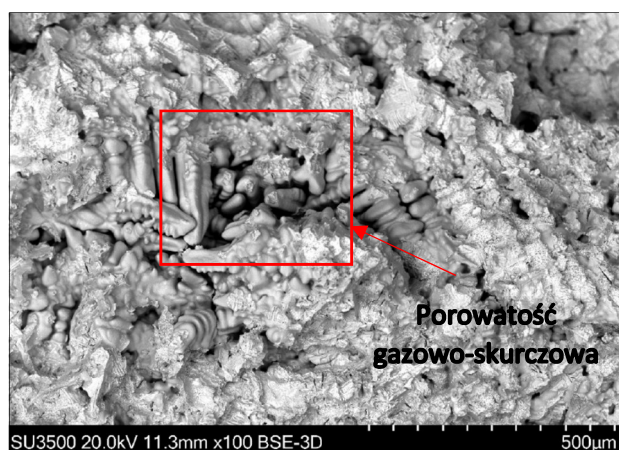


Powierzchnia przełomu próbki po statycznej próbie rozciągania wykazuje typowy charakter pęknięcia kruchego, powstałego przy równoczesnym udziale naprężeń rozciągających, agresywnego środowiska i wysokiej temperatury. Obserwacje mikroskopowe przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego potwierdziły obecność porów w stopie. Makro i mikroporowatość w badanych odlewach występuje najczęściej w postaci skupisk małych jam, które powstały podczas krzepnięcia lokalnych objętości, izolowanych w czasie krystalizacji od miejsca zasilania ciekłym stopem. W obu próbkach (1 i 2), a więc zerwanych w czasie statycznej próby rozciągania oraz próby pełzania stwierdzono obecność porów (rys. 73b, 75), w których widoczne są główki gałęzi dendrytów (rys. 74, 80b). Taki kształt powierzchni wskazuje, że jest to porowatość skurczowa, lub gazowo-skurczowa.

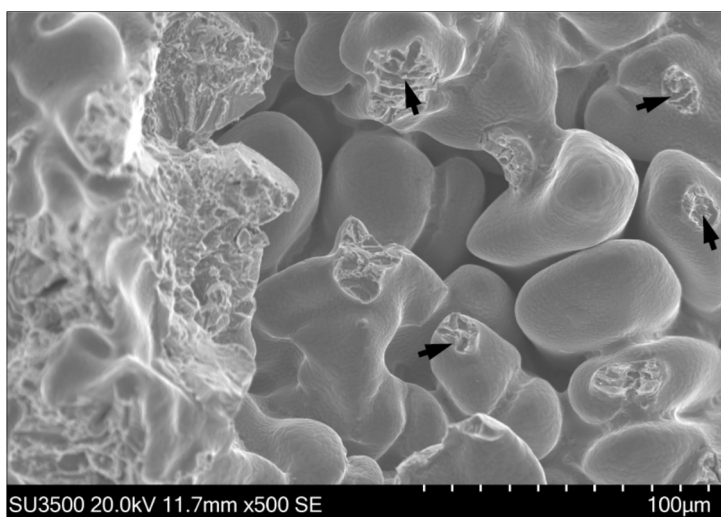
a)



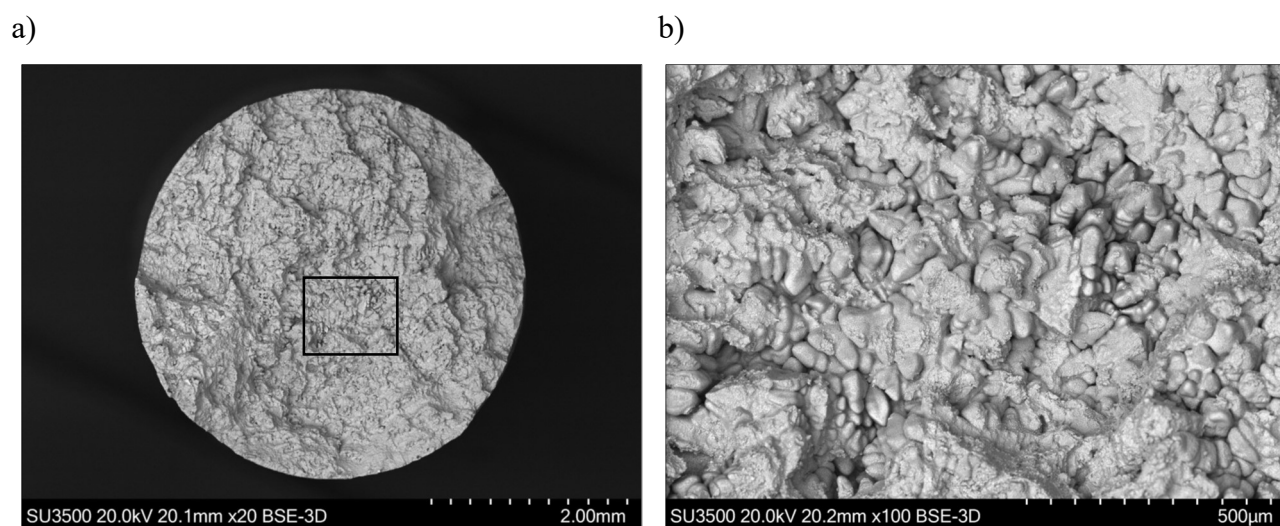
b)



Rys. 73. Powierzchnia przełomu próbki nr 1 a) po zerwaniu w statycznej próbie rozciągania, b) widoczne pory skurczowe lub gazowo-skurczowe.



Rys. 74. Główki gałęzi dendrytów z mikroobszaru zaznaczonego czerwoną ramką na rys. 73b. SEM.



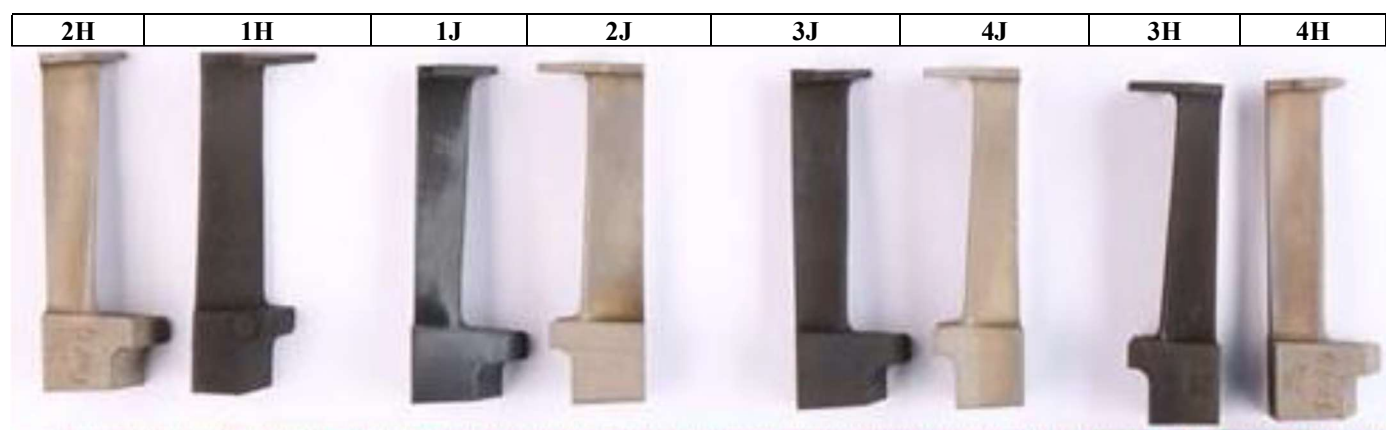
Rys. 75. Porowatość skurczowa lub gazowo-skurczowa, próbka nr 2, obszar środka przełomu, SEM.

Na własności mechaniczne odlewów (w tym przypadku odlewu nr 8) ma wpływ, poza parametrami mikrostruktury stopu, również udział porowatości. Wykazane w badaniach makro i mikroskopowych przełomów obszary, w których występuje porowatość skurczowa lub gazowo-skurczowa, potwierdzają wpływ tych wad odlewniczych na obniżone własności plastyczne oraz mniejszą odporność na procesy pełzania próbek z odlewu nr 8. Niezgodność z wymaganiami z normy nie jest zatem efektem błędnie zdefiniowanych na podstawie krzywych DTA (rys. 70 i 71) warunków procesu obróbki cieplnej, ale są wynikiem wad powstałych w czasie odlewania. Wykonanie obróbki cieplnej z zastosowaniem warunków wybranych na podstawie badań kalorymetrycznych pozwala osiągnąć własności wytrzymałościowe, plastyczność oraz odporność na pełzanie zgodne z wymaganiami normy OST 1 90126-85.

4.2. Wpływ temperatury przesycań na mikrostrukturę odlewów łopatek z nadstopu ŻS6U-WI.

Optymalne parametry mikrostruktury uzyskuje się poprzez zastosowanie odpowiedniej temperatury przesycań, umożliwiającej rozpuszczenie wszystkich lub większości węglików i innych wtrąceń faz międzymetalicznych. Rozmiar i morfologia, objętość względna i rozkład fazy γ' oraz węglików w osnowie to najbardziej istotne parametry mikrostruktury umożliwiające kontrolę własności stopu, tj. wytrzymałości na pełzanie, odporność na relaksację naprężeń w warunkach

wysokich i średnich obciążeniach podczas pracy elementów wykonanych z nadstopu niklu ŻS6U-WI. Przeprowadzono badania zmierzające do ustalenia wpływu warunków obróbki cieplnej na mikrostrukturę odlewów. Zastosowanie elementu wykonanego z nadstopu niklu (w tym przypadku łopatki) charakteryzującego się odpowiednią mikrostrukturą po przeprowadzonej obróbce cieplnej zapewnia stabilność fazową i wysoką wytrzymałość oraz dobrą plastyczność po długotrwałej eksploatacji w warunkach wysokiej temperatury. Wykonano procesy obróbki cieplnej z zastosowaniem różnej temperatury przesycań, które umożliwiły opracować optymalne warunki obróbki cieplnej zapewniające osiągnięcie przed odlewem najlepszych właściwości wytrzymałościowych. Do badań wybrano 8 Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia (rys. 76) z odlewu J oraz H (po 4 sztuki z każdego odlewu). Przeprowadzono badania mikrostruktury łopatek po obróbce cieplnej, techniką mikroskopii świetlnej w celu oceny wpływu temperatury przesycań na morfologię składników fazowych, rozmiar wydzieleni fazy γ' oraz na udział objętościowy węglików (tabela 28).

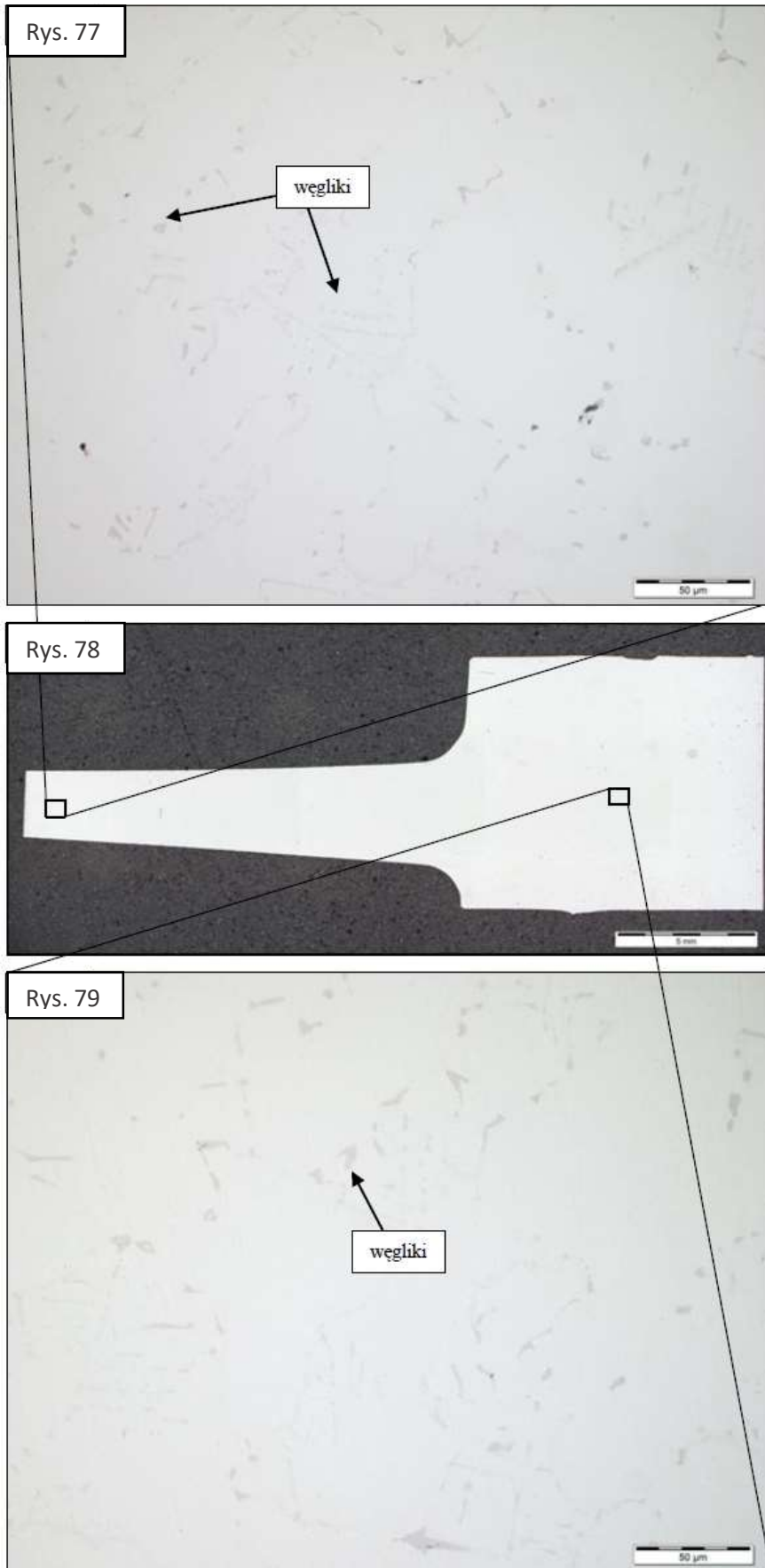


Rys. 76. Łopatki – wytopy J oraz H.

Tabela 28. Zakres badań łopatek z nadstopu ŻS6U-WI w stanie lanym i po obróbce cieplnej.

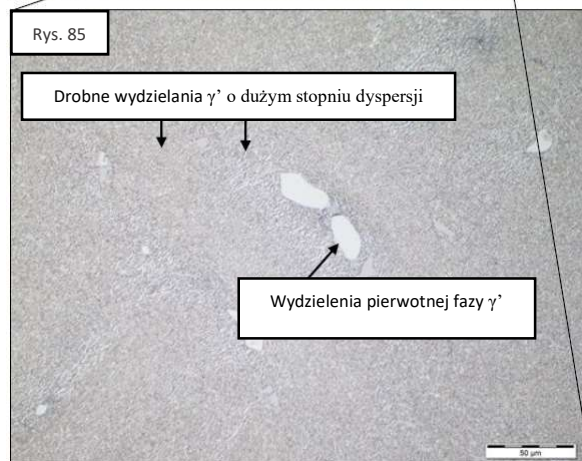
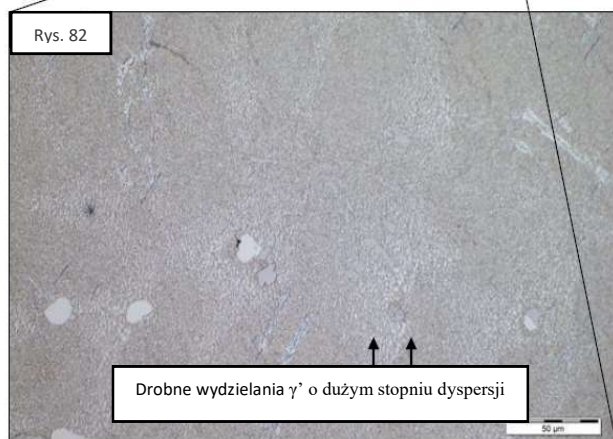
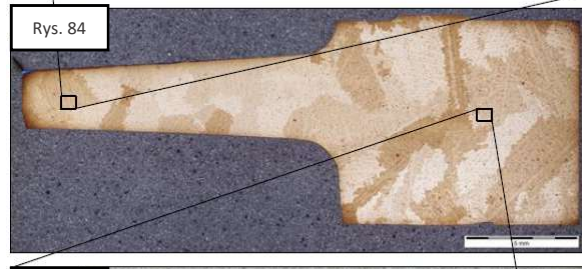
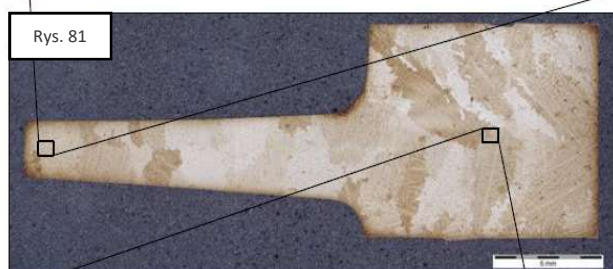
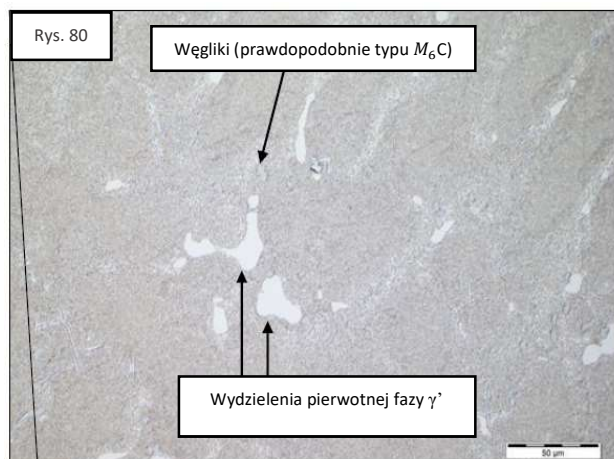
Odlew	Oznaczenie łopatki	Warunki obróbki cieplnej	Wykonane badania
H	1H	Temperatura przesycań 1210°C	Badania mikrostrukturalne: morfologia składników fazowych oraz udział objętościowy węglików i fazy γ' .
	2H	W stanie lanym	
	3H	Temperatura przesycań 1225 °C	
	4H	W stanie lanym	
J	1J	Temperatura przesycań 1210°C	
	2J	W stanie lanym	
	3J	Temperatura przesycań 1225 °C	
	4J	W stanie lanym	

Na rysunkach 82÷84 przedstawiono obrazy nietrawionej łopatki **1H**. Powiększone obrazy przekroju łopatki z dwóch obszarów (pióra i zamka) umożliwiają ocenić morfologię i rozmieszczenie węglików (typu MC) po granicy dendrytów, co jest typowe dla materiału ŻS6U-WI. Węglik w obszarze zamka łopatki charakteryzują się nieznacznie większą wielkością. Morfologia oraz rozkład węglików w osnowie jest podobna w mikrostrukturze wszystkich badanych łopatek (2H, 3H, 4H, 1J, 2J, 3J, 4J).



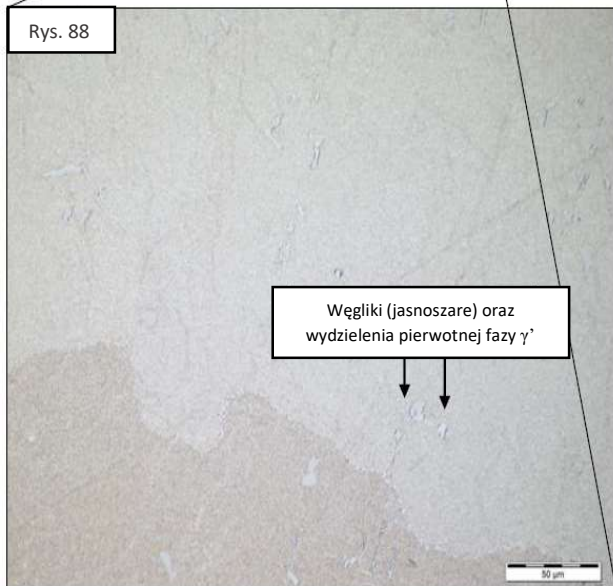
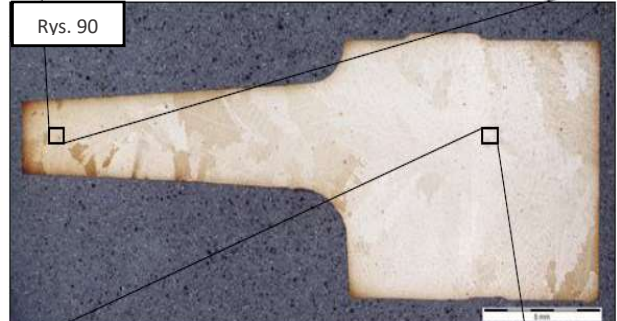
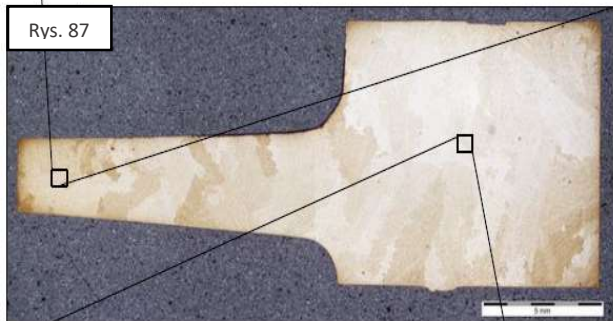
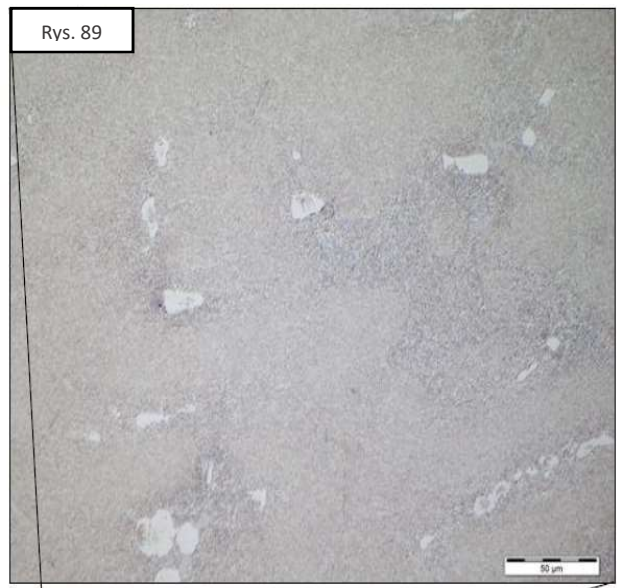
Rys. 82÷84. Mikrostruktura łopatkki 1H ze stopu ŻS6U-WI, zgląd nietrawiony.

Wykonano również obserwację zglądów metalograficznych trawionych odczynnikiem AG21 (rys. 80÷103). Mikrostruktura łopatek w stanie lanym oraz po przesycaaniu charakteryzuje się obecnością typowych składników fazowych dla nadstopu ŻS6U-WI - osnowy austenitycznej γ umocnionej drobnymi wydzieleniami fazy γ' charakteryzującej się wysokim stopniem dyspersji. W obszarach międzydendrytycznych i na granicach ziaren we wszystkich badanych łopatkach stwierdzono występowanie wydzielań pierwotnej (eutektycznej) fazy γ' (kolor jasny) (rys. 80÷85).



Rys. 80÷82. Mikrostruktura łopatki z odlewu **1H** po przesycaaniu z temperatury 1210°C.

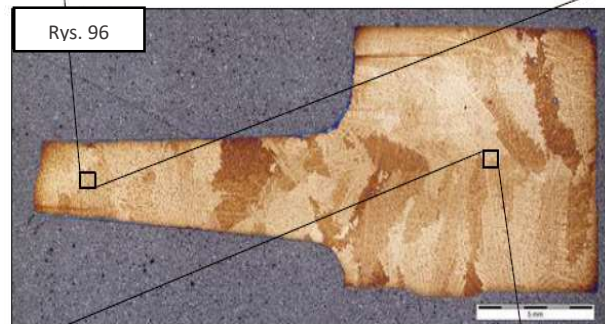
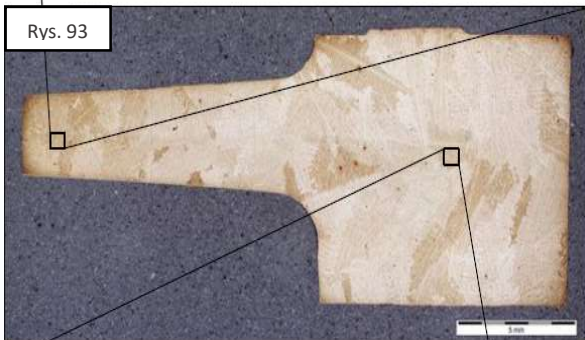
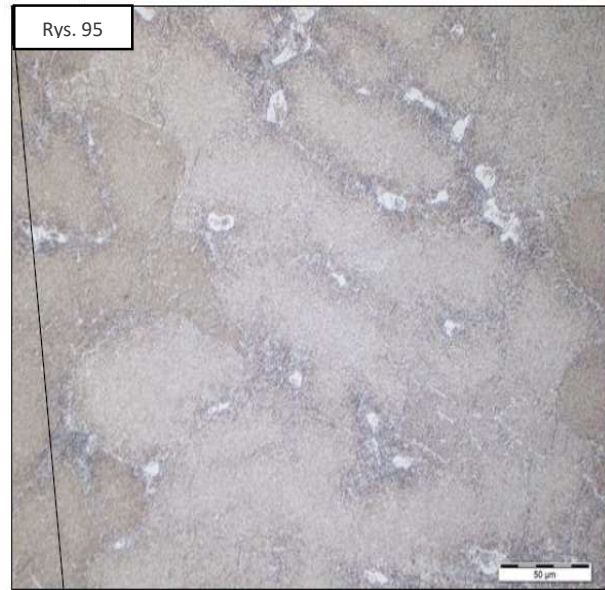
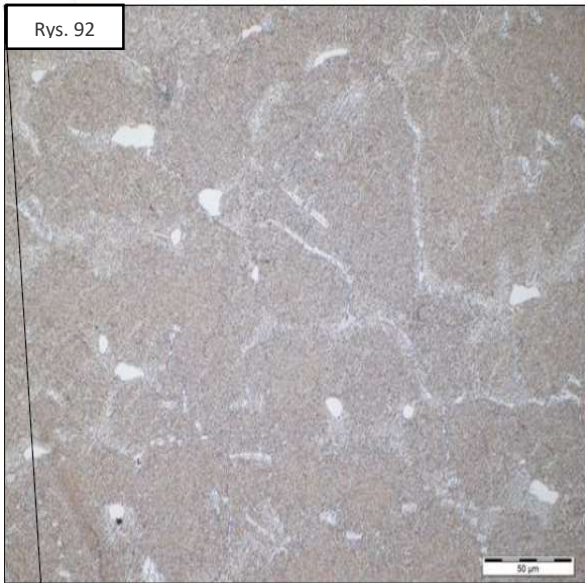
Rys. 83÷85. Mikrostruktura łopatki z odlewu **2H** w stanie lanym.



Rys. 86÷88. Mikrostruktura łopatki z odlewu **3H** po przesycaaniu z temperatury 1225°C

Rys. 89÷91. Mikrostruktura łopatki z odlewu **4H** w stanie lanym.

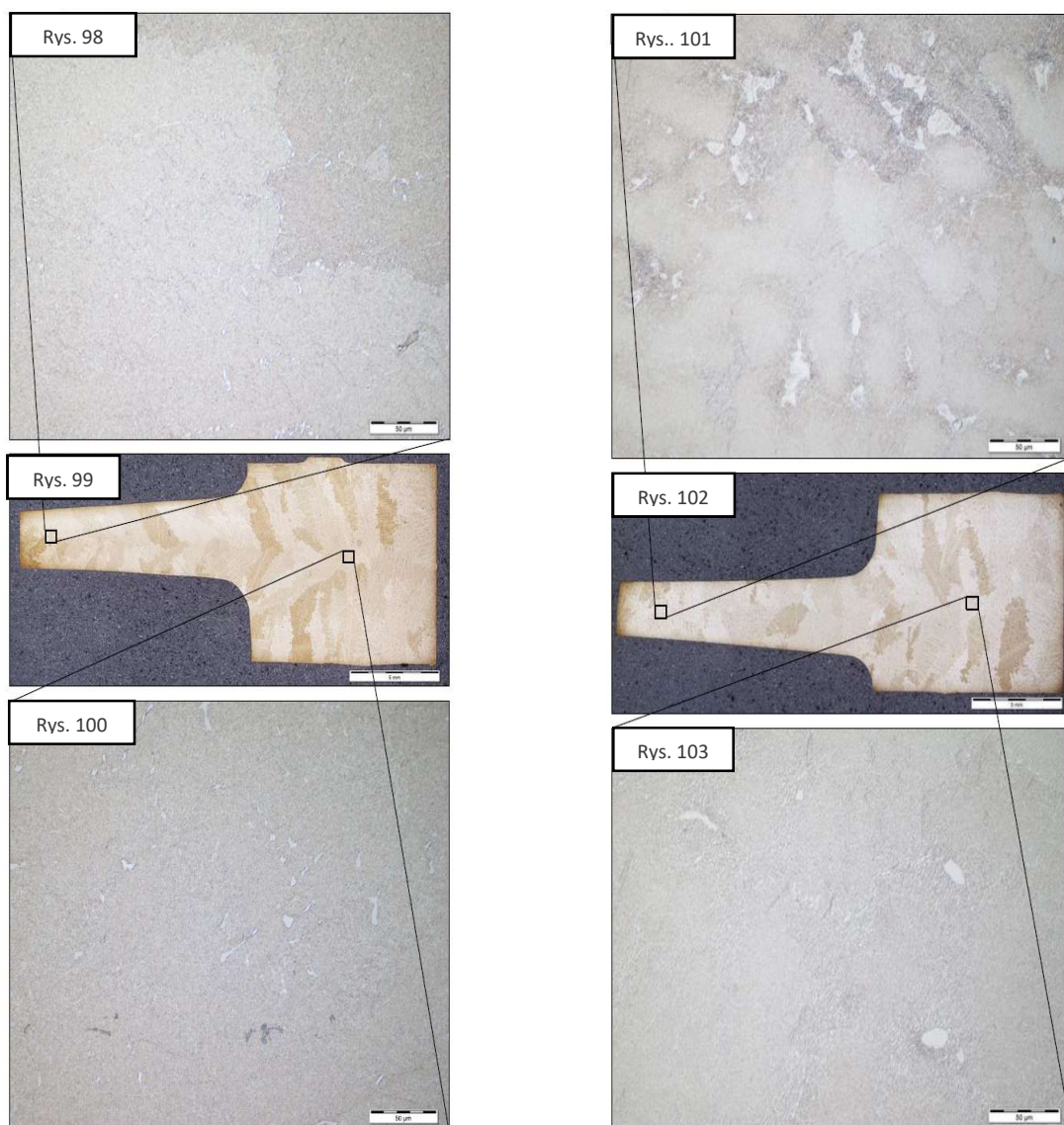
Stop ŻS6U-WI w stanie lanym posiada niejednorodną mikrostrukturę, składającą się z dendrytów fazy γ oraz obszarów eutektycznych γ/γ' i wydzieleni fazy γ' o różnej morfologii (rys. 83÷85, 89÷91, 95÷97, 101÷103).



Rys. 92÷94. Mikrostruktura łożatki z odlewu **1J** po przesycaniu z temperatury 1210°C.

Rys. 95÷97. Mikrostruktura łożatki z odlewu **2J** w stanie lanym.

Obróbka cieplna ma wpływ na jednorodność mikrostruktury stopu ŻS6U-WI. Stop nie wykazuje obecności wyraźnej mikrostruktury dendrytycznej, natomiast widoczne są pozostałości obszarów międzydendrytycznych, o szerszych kanałach osnowy γ (rys. 95÷97). Obróbka cieplna powoduje rozpuszczenie eutektyki γ/γ' (rys. 95÷97, 101÷103).



Rys. 98÷100. Mikrostruktura łopatki z odlewu 3J po przesycaniu z temperatury 1225°C

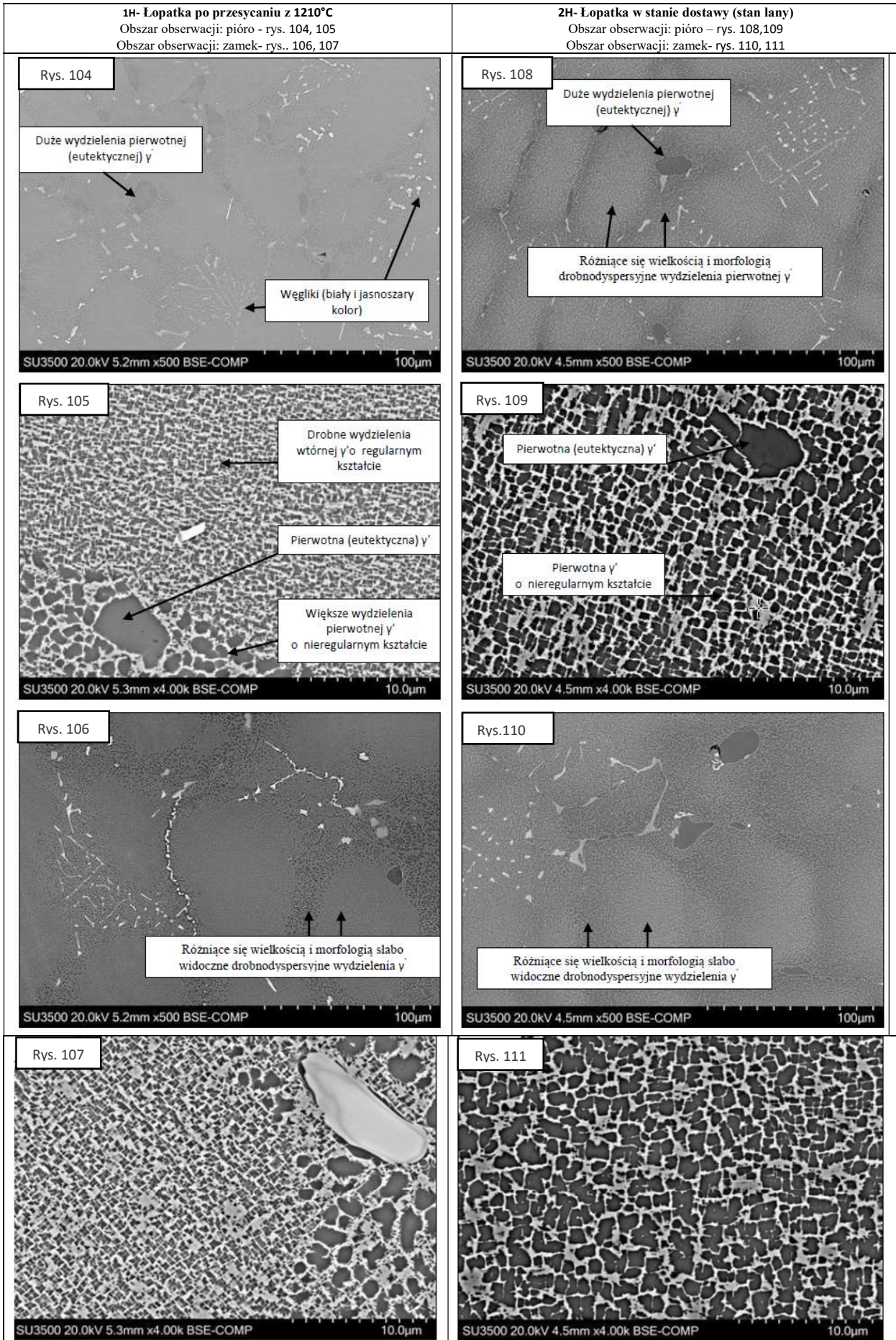
Rys. 101÷103. Mikrostruktura łopatki z odlewu 4J w stanie lanym.

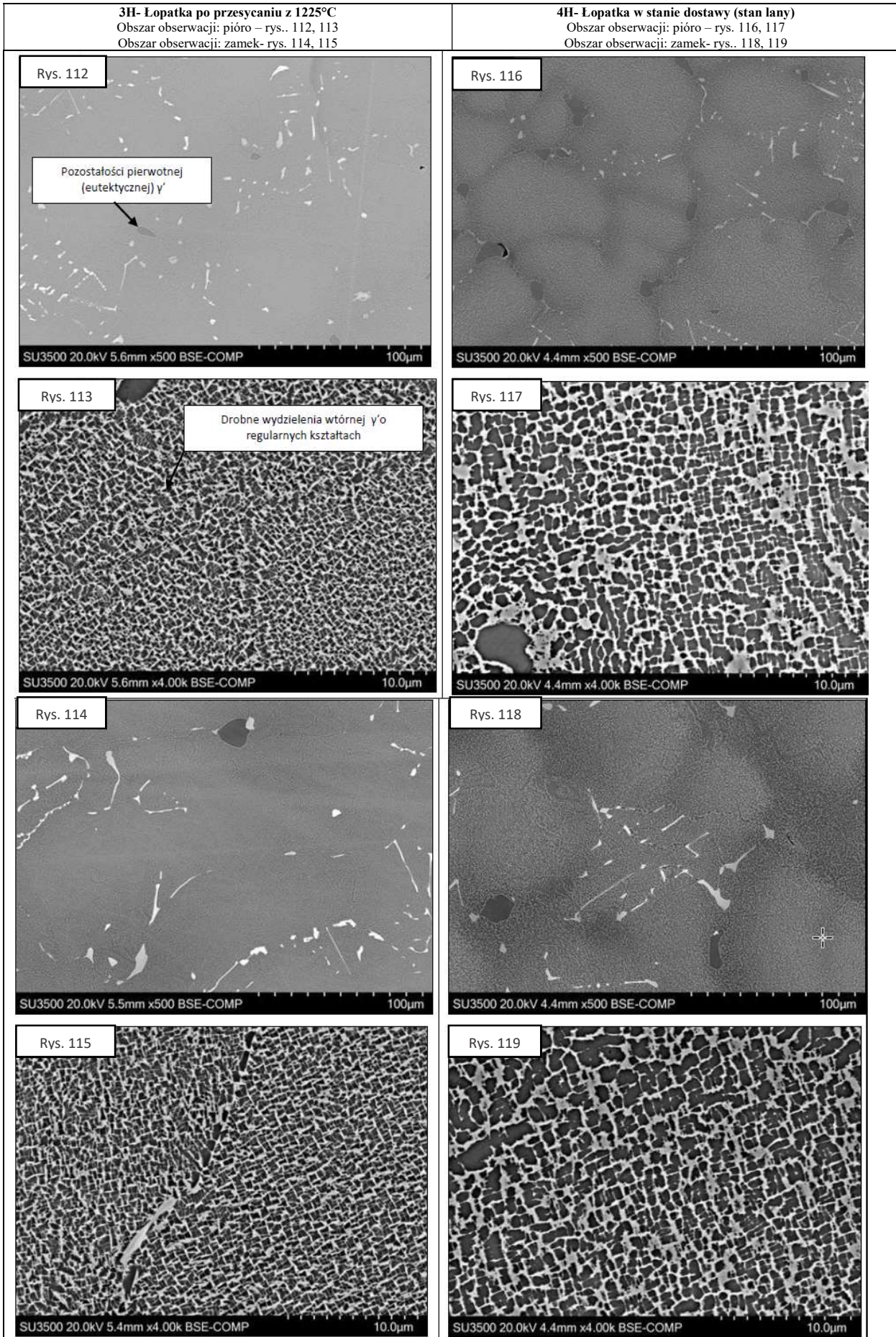
Węgliki występujące w obszarach międzydendrytycznych i na granicach ziaren, charakteryzują się kształtem nieregularnym lub zbliżonym do kulistego. Zastosowany czas (4h) i temperatura przesycania (1210°C i 1225°C) jest niewystarczająca do pełnego usunięcia z mikrostruktury stopu pierwotnych cząstek faz międzymetalicznych. Nie stwierdzono znaczących różnic w mikrostrukturze odlewów przesycanych z dwóch temperatur (1210 oraz 1225°C).

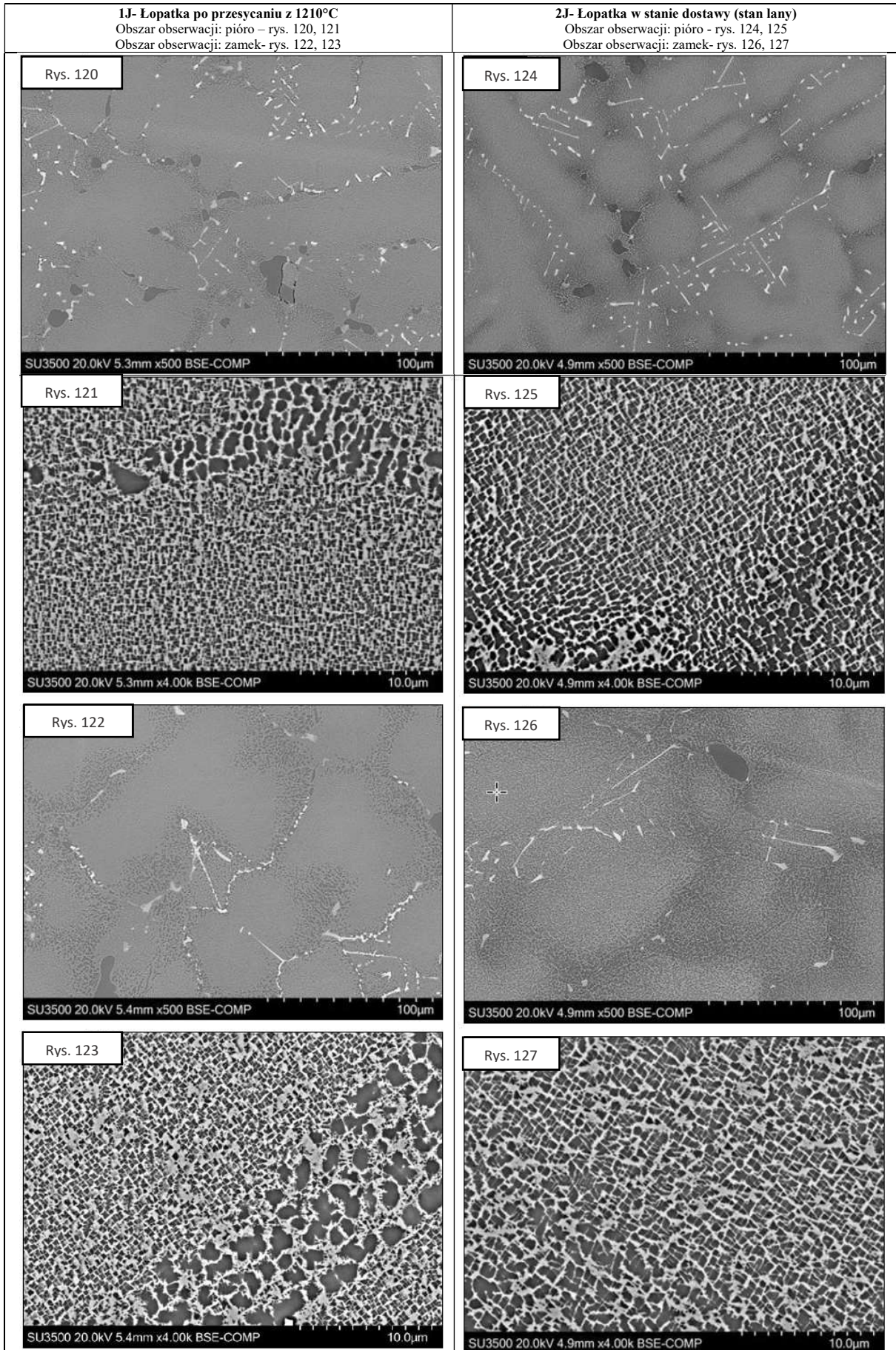
Zmiany mikrostruktury stopu w stanie po obróbce cieplnej, tj. przesycaniu oraz w stanie lanym obserwowano pod mikroskopem skaningowym SEM. Wyniki obserwacji przedstawiono na rysunku 104÷135 oraz zestawiono tabelarycznie – tabela nr 29.

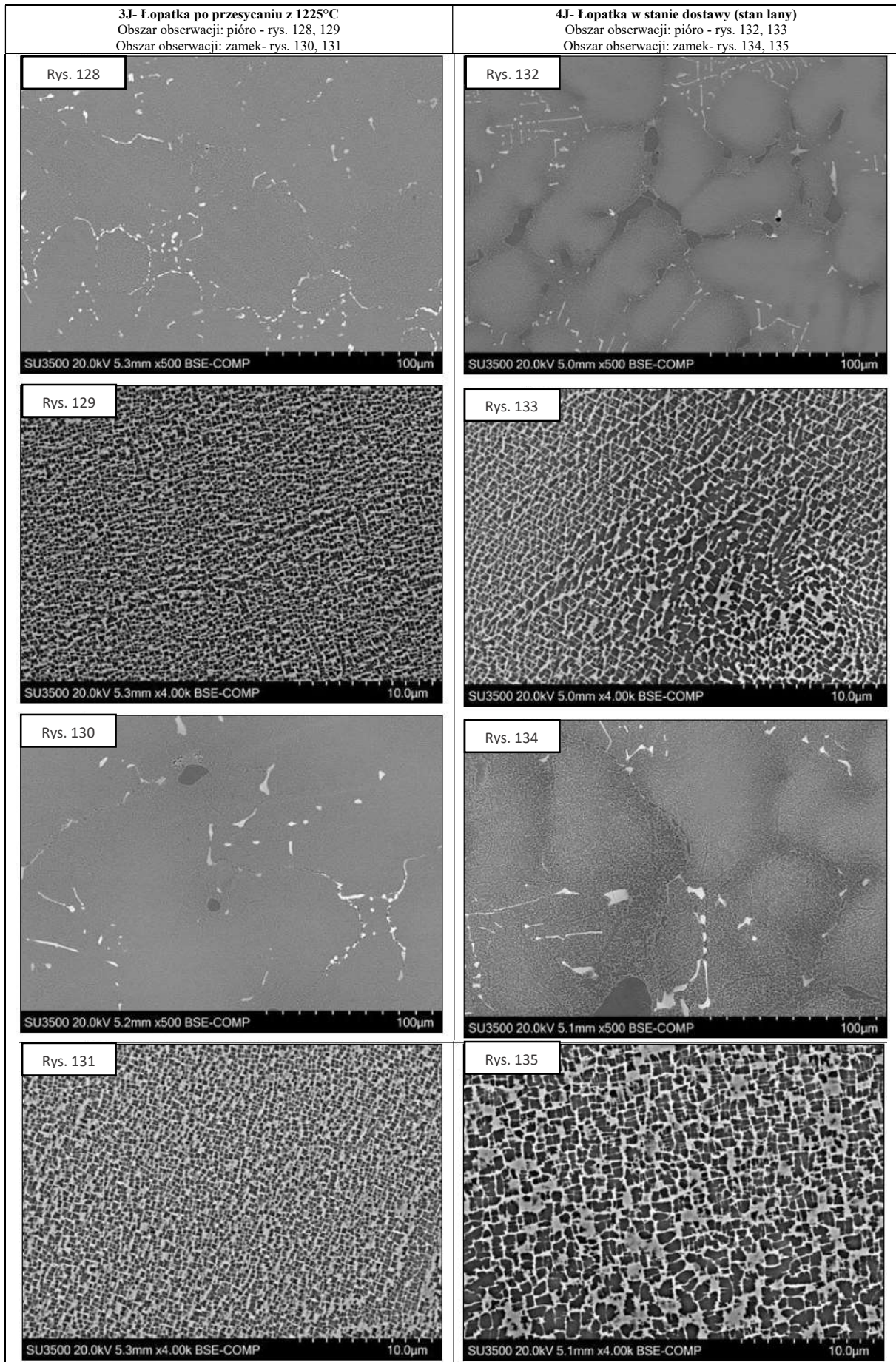
Tabela 29. Opis mikrostruktury łopatek z odlewów H i J.

Łopatka	Opis mikrostruktury – faza γ'	Podsumowanie
1H Odlew: H Przesycony z temperatury 1210 °C	Mikrostruktura łopatki po obróbce cieplnej, a więc po przesycaniu z temperatury 1210°C charakteryzuje się obecnością pierwotnych wydzieleni fazy γ' o dużych rozmiarach, jak i również dużej ilości wtórnych cząstek fazy umacniającej, o dużym stopniu dyspersji i nieregularnych kształtach. Występowanie wydzieleni fazy γ' o różnej morfologii wynika z częściowego rozpuszczenia się cząstek w czasie przesycania, prowadzonego powyżej temperatury solvus i ich wydzielenia się w osnowie γ podczas chłodzenia z temperatury przesycania. (rys. 80, 82, 105, 106).	Wyżarzanie stopu w temperaturze 1210 °C spowodowało częściowe rozpuszczenie cząstek fazy γ' w osnowie. Obecne w mikrostrukturze łopatek po chłodzeniu z temperatury przesycania cząstki fazy umacniającej są efektem wydzielenia po przesycaniu (rys. 105, 106).
2H Odlew: H Stan lany	Drobnodispersyjne wydzielenia fazy γ' charakteryzują się niejednorodnym kształtem i rozmiarem, zróżnicowaną morfologią w zależności od występowania w osnowie. Im dalej od osi ziarn dendrytów w kierunku obszaru eutektycznego, wydzielenia stają się większe i tracą swój regularny, sześcienny kształt. Zjawisko to jest wynikiem mikrosegregacji występującej podczas krzepnięcia stopów. (rys. 83, 85, 108, 109).	
3H Odlew: H Przesycony z temperatury 1225 °C	Mikrostruktura łopatki po przesycaniu składa się w całości z wtórnych drobnych wydzieleni fazy γ' o regularnych kształtach i znacznie drobniejszej w odróżnieniu od mikrostruktury łopatki 4H fazy pierwotnej (eutektycznej) γ' (rys. 86, 88, 112, 113).	W wyniku zastosowania obróbki cieplnej przesycania w 1225 °C, nastąpiło ujednorodnienie mikrostruktury. Faza γ' uległa kompletnemu rozpuszczeniu i następnie wtórnemu wydzieleniu w postaci drobnych wydzieleni o regularnych kształtach. Również faza pierwotna (eutektyczna) γ' uległa znacznemu rozpuszczeniu (rys. 112, 113).
4H Odlew: H Stan lany	Drobnodispersyjne wydzielenia γ' charakteryzują się niejednorodnym kształtem i rozmiarem, zróżnicowaną morfologią w zależności od położenia. Im dalej od osi dendrytów w kierunku obszaru eutektycznego, wydzielenia stają się większe i tracą swój regularny kształt. Zjawisko to jest wynikiem mikrosegregacji występującej podczas krzepnięcia stopów (rys. 89, 91, 116, 117).	
1J Odlew: J Przesycony z temperatury 1210 °C	Mikrostruktura łopatki po obróbce cieplnej, a więc po przesycaniu z temperatury 1210°C charakteryzuje się obecnością pierwotnych wydzieleni fazy γ' o dużych rozmiarach, jak i również dużej ilości wtórnych cząstek fazy umacniającej, o dużym stopniu dyspersji i nieregularnych kształtach. Występowanie wydzieleni fazy γ' o różnej morfologii wynika z częściowego rozpuszczenia się cząstek w czasie przesycania, prowadzonego powyżej temperatury solvus i ich wydzielenia się w osnowie γ podczas chłodzenia z temperatury przesycania (rys. 92, 94, 120, 121).	W wyniku zastosowania obróbki cieplnej przesycania w 1210 °C, faza γ' uległa częściowemu rozpuszczeniu i następnie wtórnemu wydzieleniu w postaci drobnych wydzieleni o regularnych kształtach (rys. 120, 121).
2J Odlew: J Stan lany	Drobnodispersyjne wydzielenia γ' charakteryzują się niejednorodnym kształtem i rozmiarem, zróżnicowaną morfologią w zależności od położenia. Im dalej od osi dendrytów w kierunku obszaru eutektycznego, wydzielenia stają się większe i tracą swój regularny kształt. Zjawisko to jest wynikiem mikrosegregacji występującej podczas krzepnięcia stopów. (rys. 100, 102, 129, 130).	
3J Odlew: J Przesycony z temperatury 1225 °C	Mikrostruktura łopatki po przesycaniu składa się głównie z wtórnych drobnych wydzieleni γ' o regularnych kształtach i znacznie drobniejszej w odróżnieniu od mikrostruktury łopatki 4J fazy pierwotnej (eutektycznej) γ' (rys. 98, 100, 128, 129).	W wyniku zastosowania obróbki cieplnej przesycania w 1225 °C, mikrostruktura uległa ujednorodnieniu. Faza γ' uległa rozpuszczeniu i następnie wtórnemu wydzieleniu w postaci drobnych wydzieleni o regularnych kształtach. Również faza pierwotna (eutektyczna) γ' uległa znacznemu rozpuszczeniu (rys. 128, 129).
4J Odlew: J Stan lany	Drobnodispersyjne wydzielenia fazy γ' charakteryzują się niejednorodnym kształtem i rozmiarem, zróżnicowaną morfologią w zależności od położenia. Im dalej od osi dendrytów w kierunku obszaru eutektycznego, wydzielenia stają się większe i tracą swój regularny kształt. Zjawisko to jest wynikiem mikrosegregacji występującej podczas krzepnięcia stopów (rys. 101, 103, 132, 133).	







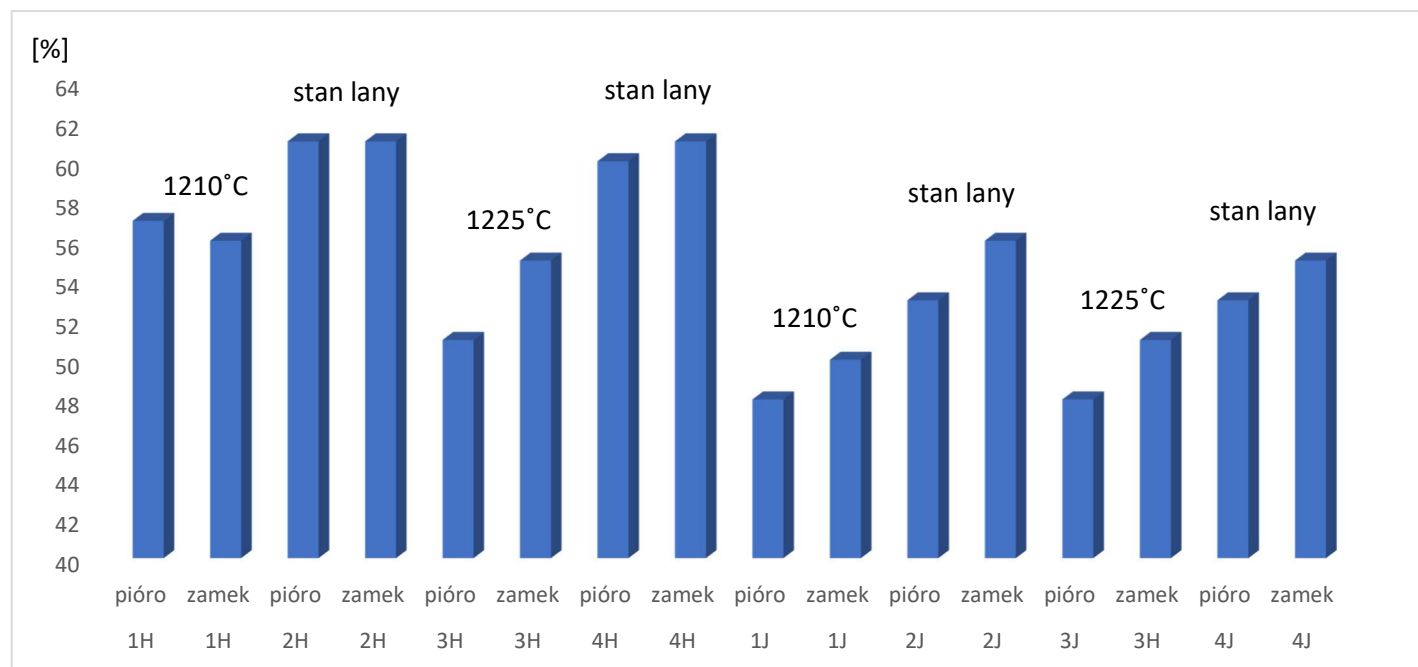


Na podstawie badań mikrostrukturalnych z użyciem skaningowej mikroskopii elektronowej SEM BSE (pow. 4000x) dokonano oceny rozkładu i objętości względnej wydzieleni fazy γ' dla łopatek z odlewów J i H (tabela 30).

Tabela 30. Wpływ obróbki cieplnej na objętość względną wydzieleni fazy γ' .

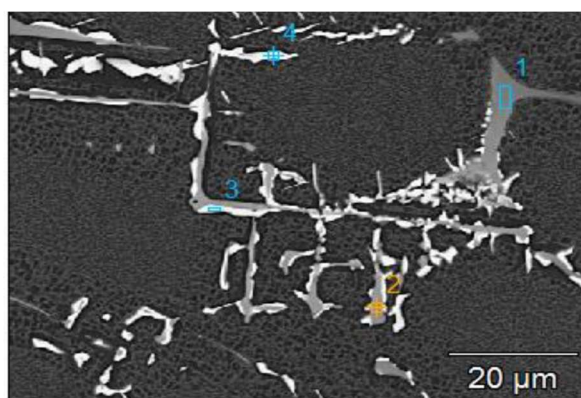
Oznaczenie łopatki i miejsce pomiaru	Mikroobszar	Objętość względna fazy γ' [%]	Wartość średnia [%]
1H Odlew: H Przesycanie z temperatury 1210 °C	Pióro	1	57
		2	54
		3	59
		4	56
	Zamek	1	53
		2	56
		3	62
		4	54
2H Odlew: H Bez obróbki cieplnej	Pióro	1	62
		2	61
		3	59
		4	62
	Zamek	1	59
		2	63
		3	55
		4	66
3H Odlew: H Przesycanie z temperatury 1225 °C	Pióro	1	49
		2	52
		3	50
		4	52
	Zamek	1	54
		2	54
		3	57
		4	54
4H Odlew: H Bez obróbki cieplnej	Pióro	1	60
		2	59
		3	60
		4	59
	Zamek	1	59
		2	58
		3	66
		4	62
1J Odlew: J Przesycanie z temperatury 1210 °C	Pióro	1	42
		2	53
		3	49
		4	49
	Zamek	1	52
		2	56
		3	44
		4	49
2J Odlew: J Bez obróbki cieplnej	Pióro	1	58
		2	48
		3	55
		4	50
	Zamek	1	57
		2	53
		3	60
		4	55
3J Odlew: J Przesycanie z temperatury 1225 °C	Pióro	1	44
		2	53
		3	45
		4	51
	Zamek	1	49
		2	49
		3	51
		4	54
4J Odlew: J Bez obróbki cieplnej	Pióro	1	49
		2	56
		3	56
		4	50
	Zamek	1	57
		2	54
		3	61
		4	49

Łopatkki po przesycaniu charakteryzują się mniejszą zawartością wydzieleni fazy γ' od łopatek w stanie lanym (różnica kilku procent). Objętość względna fazy γ' w łopatkach w stanie wyjściowym wynosiła 53÷61%, a po przesycaniu ok. 48÷56% (rys. 136, tabela 30). Nie stwierdzono wpływu temperatury przesycania na zawartość w odlewach cząstek umacniającej fazy γ' .



Rys. 136. Wpływ obróbki cieplnej na zawartość fazy γ' w odlewach 1H÷4J z nadstopu ŻS6U-WI.

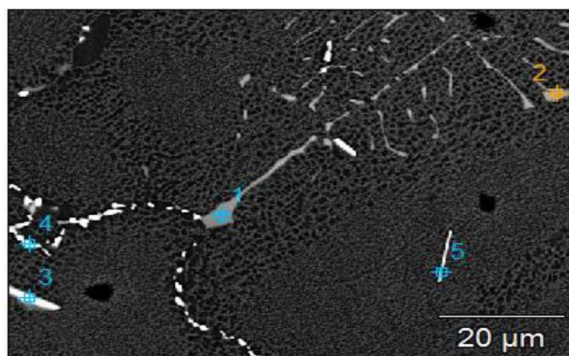
Na podstawie obserwacji mikrostruktury oraz badań SEM/EDS określono skład chemiczny wydzieleni w mikroobszarach oraz w punktach w mikrostrukturze łopatek z odlewu 3H po przesycaniu z temperatury 1225°C (rys. 137, 138).



Zawartość pierwiastków, % mas.

Lp.	Ti	Cr	Co	Ni	Nb	Mo	W
1	27,6	1,7	0,9	4,9	30,0	-	35,0
2	23,9	2,6	1,1	6,3	21,0	-	45,2
3	1,8	6,7	5,7	23,4	4,9	4,7	52,7
4	1,6	7,0	5,3	16,2	5,1	5,8	59,0

Rys. 137 Wyniki analizy składu chemicznego w mikroobszarach 1÷4 łopatki 3H po przesycaniu z temperatury 1225°C.



Zawartość pierwiastków, % mas.

Lp.	Al	Ti	Cr	Co	Ni	Nb	Mo	W
1	-	28,1	1,6	0,6	4,1	28,5	-	37,2
2	-	25,8	2,1	1,2	6,9	23,3	-	40,6
3	1,4	1,6	8,4	7,0	28,8	4,5	4,5	44,0
4	-	2,8	6,6	5,4	24,4	5,7	5,9	49,3
5	3,1	1,8	8,1	5,9	42,8	3,4	2,3	30,5

Rys. 138. Wyniki analizy składu chemicznego w mikroobszarach 1÷5 łopatki 3H po przesycaniu z temperatury 1225°C.

Badania mikrostruktury łopatek ze stopu ŻS6U-WI z odlewów J oraz H potwierdziły wpływ obróbki cieplnej na udział objętościowy poszczególnych składników fazowych. Mikrostruktura łopatek po obróbce cieplnej (przesycaniu) jest jednorodna, złożona z osnowy roztworu γ -Ni oraz wydzieleni umacniających fazy międzymetalicznej typu $L1_2 \gamma'$ oraz węglików. Łopatki w stanie lanym charakteryzują się dendrytyczną osnową austenityczną γ , w której widoczne są drobne, o dużym stopniu dyspersji wydzielenia fazy umacniającej γ'' , węgliki typu $M_{23}C_6$, M_6C oraz cząstki pierwotnej fazy γ'' . Nie stwierdzono znaczących różnic w morfologii, rozkładzie składników fazowych w obszarze pióra i zamka łopatki. Eutektyka γ - γ' występuje głównie na granicach ziaren i w obszarach międzydendrytycznych i charakteryzuje się kształtem globularnym. Ulega częściowemu rozpuszczeniu w wyniku obróbki cieplnej. Wydzielenia fazy γ (związku międzymetalicznego $Ni_3(Al, Ti)$) w osnowie wykazują kształt zbliżony do sześciątów. Cechą charakterystyczną wydzieleni γ' w badanych łopatkach jest ich zróżnicowana wielkość w zależności od obszaru obserwacji – większe wydzielenia fazy γ' znajdują się w obszarach międzydendrytycznych. Wydzielenia w łopatkach w stanie wyjściowym, w obszarze ziaren eutektyki charakteryzują się bardziej złożonym, nieregularnym kształtem. Jest to wynik mikrosegregacji pierwiastków stopowych podczas krystalizacji stopu. W wyniku przesycania, faza umacniająca γ' ulega częściowemu lub całkowitemu rozpuszczeniu. Stwierdzono, że w mikrostrukturze łopatek przesycanych z wyższej temperatury (z 1225°C) widoczne są bardzo drobne wydzielenia fazy umacniającej, wydzielające się w czasie chłodzenia. Wielkość i kształt wynika z zastosowanego chłodzenia na powietrzu. W łopatkach w stanie dostawy dominującym składnikiem w mikrostrukturze są wydzielenia węglików pierwotnych typu MC (węgliki tytanu i niobu), które tworzą się na początku krystalizacji w przestrzeniach międzydendrytycznych oraz na granicach ziaren i przyjmują charakterystyczny nieregularny lub globularny kształt. Zastosowana obróbka cieplna spowodowała zwiększenie udziału objętościowego węglików wtórnych typu $M_{23}C_6$ i M_6C (wydzielenia bogate w wolfram i chrom), które wydzielają się głównie na granicach ziaren i na granicach węglików pierwotnych typu MC. Węgliki wtórne nie tworzą ciągłej siatki wydzieleni, występują w postaci izolowanych cząstek globularnych i płytkowych, co zwiększa wytrzymałość na pełzanie i nie obniża udarnośći stopu. Nie stwierdzono różnic w udziale oraz morfologii węglików w odlewach J i H. Nie wszystkie węgliki typu MC uległy rozpuszczeniu w czasie przesycaniem co mogło spowodować, że w wyniku dyfuzji pierwiastków stopowych nastąpił ich rozpad na wydzielenia wtórne typu $M_{23}C_6$ i M_6C . Wpływ temperatury przesycania na mikrostrukturę zestawiono w tabeli nr 31.

Tabela. 31. Wpływ temperatury przesycań na mikrostrukturę materiału ŻS6U-WI.

Temperatura przesycań	Charakterystyka			Uwagi		
	Faza	Kształt	Występowanie			
1210°C	Pióro i zamek	Faza γ'	$Ni_3(Al, Ti)$	Cząstki wtórne sześciennie, Cząstki Pierwotne – nieregularny kształt	Wydzielenia o większych rozmiarach na granicach dendrytów, drobne wydzielenia w obszarach międzidendrytycznych - lub wewnątrz kanałów osnowy.	W wyniku zastosowania obróbki cieplnej - przesycań z temperatury 1210 °C (pierwotna faza γ' uległa częściowemu rozpuszczeniu i następnie wtórnemu wydzieleniu w postaci drobnych wydzielen o regularnym sześciennym kształcie.
		eutektyka	$\gamma-\gamma'$	Globularne ziarna o nieregularnym kształcie kształtach	Obserwowane najczęściej w przestrzeniach międzidendrytycznych i na granicach ziaren	-
		węgliki	MC, $M_{23}C_6$, M_6C	MC- nieregularny kształt o zróżnicowanej morfologii, M23C6, M6C- cząstki globularne lub w kształcie płytek	Na granicach ziaren i w obszarach międzidendrytycznych. M23C6, M6C występują w postaci cząstek równomiernie rozłożonych w stopie, nie tworzą łańcuchów wydzielen	Wzrost udziału węglików wtórnych typu M23C6, M6C, tworzących się w osnowie w wyniku obróbki cieplnej. Węgliki typu MC nie uległy rozpuszczeniu po przesycań, w wyniku dyfuzji pierwiastków stopowych mogą ulegać rozpadowi i brać udział w tworzeniu wtórnych węglików typu M23C6 i M6C.
W stanie dostawy – w stanie lanym	Pióro i zamek	Faza γ'	$Ni_3(Al, Ti)$	Cząstki o nieregularnym kształcie	Duże wydzielenia na granicach ziarn dendrytów, drobne wewnątrz kanałów osnowy	-
		eutektyka	$\gamma-\gamma'$	Duże ziarna o nieregularnym kształcie	W przestrzeniach międzidendrytycznych i na granicach ziaren osnowy	-
		węgliki	MC, $M_{23}C_6$, M_6C	MC- kształt nieregularny. M23C6, M6C- cząstki globularne lub płytkowe	Na granicach ziaren	Dominującymi w mikrostrukturze stopu są węgliki typu MC.
1225°C	Pióro i zamek	Faza γ'	$Ni_3(Al, Ti)$	Tworzące się w czasie obróbki cieplnej wydzielenia w kształcie zbliżonym do sześcianu	MC- nieregularny kształt, lub globularne. M23C6, M6C- cząstki globularne lub płytkowe	W wyniku zastosowania obróbki cieplnej przesycań z temperatury 1225 °C, mikrostruktura uległa ujednorodnieniu. Pierwotna faza γ' uległa rozpuszczeniu. W czasie obróbki cieplnej powstają drobne wydzielenia fazy γ' o regularnych kształtach.
		eutektyka	$\gamma-\gamma'$	Duże ziarna o nieregularnym kształcie	W przestrzeniach międzidendrytycznych i na granicach ziaren osnowy	Eutektyka uległa rozpuszczeniu w czasie obróbki cieplnej.
		węgliki	MC, $M_{23}C_6$, M_6C	MC- kształt nieregularny lub globularny M23C6, M6C- cząstki o kształcie globularnym lub płytkowym	Na granicach ziaren i w obszarach międzidendrytycznych. M23C6, M6C występują w postaci cząstek równomiernie rozłożonych w stopie, nie tworzą łańcuchów wydzielen	Wzrost objętości względnej węglików wtórnych typu M23C6, M6C, wydzielających się w osnowie w czasie obróbki cieplnej (przesycań). Węgliki typu MC nie uległy rozpuszczeniu po przesycań, w wyniku dyfuzji pierwiastków stopowych mogą ulegać rozpadowi i brać udział w tworzeniu wtórnych węglików typu M23C6 i M6C.

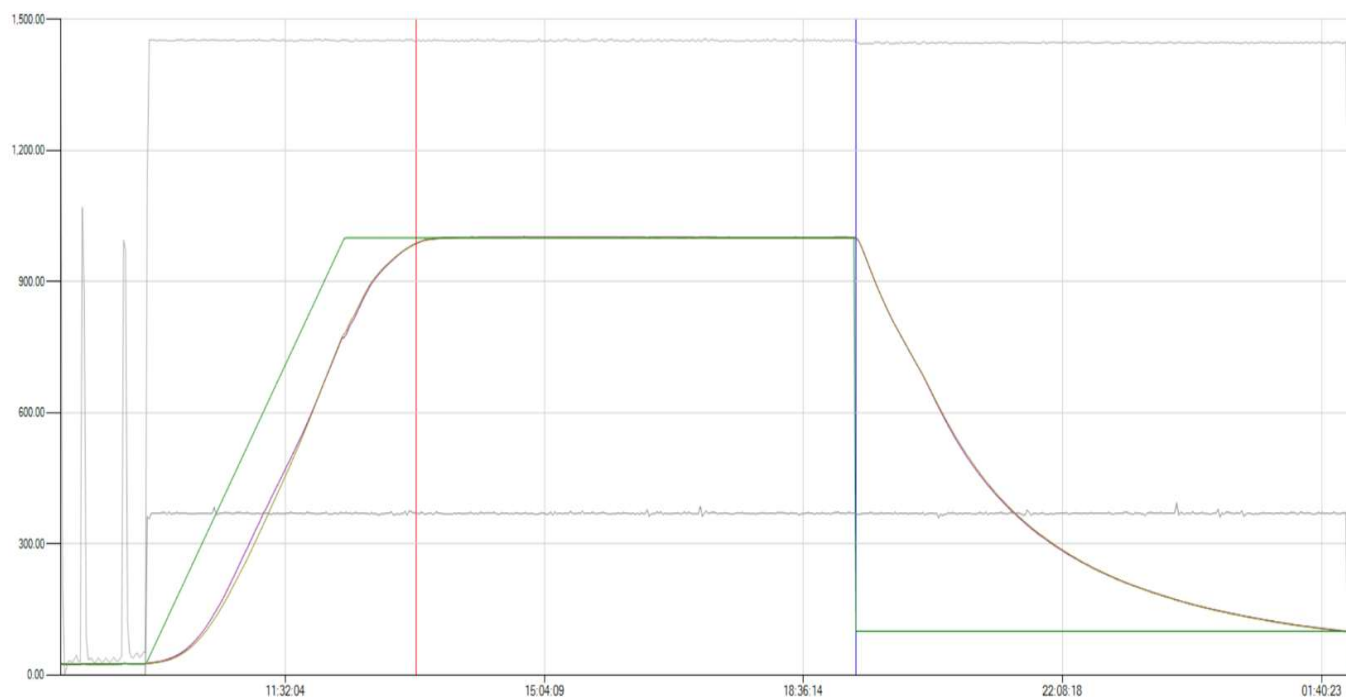
4.3. Proces aluminowania Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia z nadstopu ŻS6U-WI.

W celu podwyższenia żarowytrzymałości i odporności na korozję, Łopatki Turbiny Sprężarki I Stopnia, w cyklu procesu technologicznego poddaje się procesowi aluminowania. Aluminowanie zwiększa odporność na korozję elementów eksploatowanych w środowisku roztworów wodnych, w gazach spalinowych i w płynnej siarce. Łopatki Turbiny Sprężarki aluminowane są przy zastosowaniu metody gazowej bezkontaktowej (z ang. *above the pack*), prowadzonej w piecu retortowym z płukaniem próżniowym (tabela 32, rys. 139). Do badań przeznaczono 3 łopatki z odlewu J.

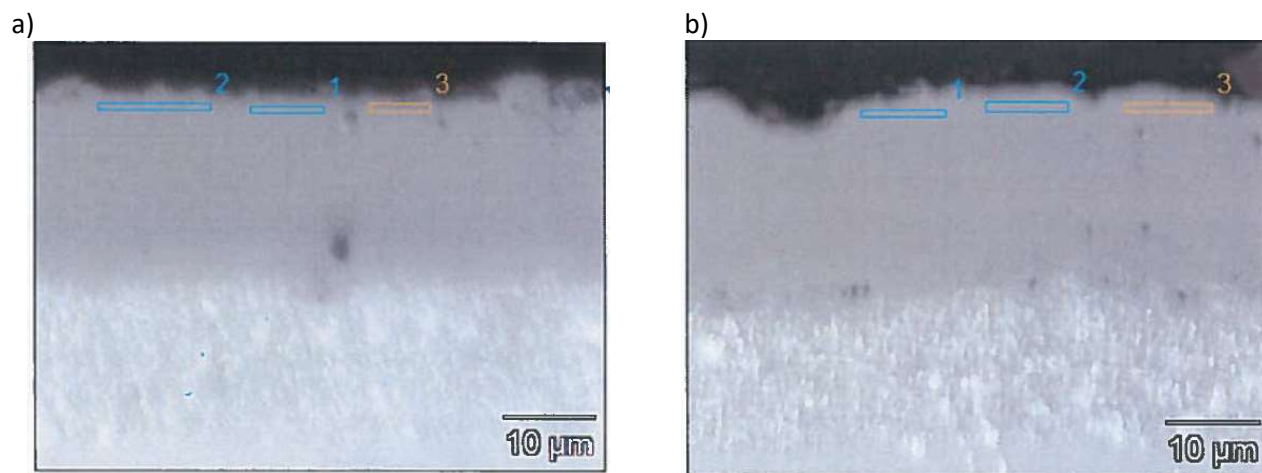
Tabela 32. Warunki procesu aluminowania łopatek z nadstopu ŻS6U-WI.

Kolejność czynności	Opis działań
1	Próżnia min. 50 Torra.
2	Dwukrotne płukanie argonem. Łączny czas płukania: 30÷120 minut.
3	Przepływ argonu 4÷6 l/min.
4	Nagrzewania do 1000±14°C z prędkością 2÷6°C/min.
5	Czas procesu 5÷7h.
6	Chłodzenie w osłonie argonu do temperatury ok. 100°C z prędkością 2÷4°C/min .

Na podstawie badań mikroskopowych stwierdzono, że warstwa aluminidkowa na pierwszej badanej łopatkce z odlewu J po procesie aluminowania za pomocą metody bezkontaktowej charakteryzowała się głębokością w zakresie od 0,035 do 0,044 mm. Na podstawie badań z użyciem skaningowego mikroskopu elektronowego wyposażonego w analizator EDS określono procentową, przybliżoną zawartość aluminium w aluminidkowej warstwie wierzchniej na kolejnej łopatkce (rys. 140). Pomiar wykonano na zglądzie metalograficznym z wycinka pobranego z grzbietu i z koryta łopatki (rys. 140).



Rys. 139. Protokół z procesu aluminowania Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia z nadstopu ŻS6U-WI.



Miejsce pomiaru		Al-K	Cr-K	Co-K	Ni-K
Grzbiet	Pkt 1	31,3	1,4	5,2	62,1
	Pkt 2	31,1	1,5	4,9	62,5
	Pkt 3	31,0	1,5	4,9	62,6
Koryto	Pkt 1	30,6	1,4	4,7	63,3
	Pkt 2	31,1	1,6	4,9	62,4
	Pkt 3	31,3	1,2	4,8	62,7

Rys. 140. Mikrostruktura warstwy aluminidkowej na łopacie z odlewu J. Na rysunku zaznaczono mikroobszary, w których dokonano oceny składu chemicznego z użyciem SEM/EDS: a) warstwa wierzchnia na grzbiecie oraz b) w korycie łopatki, pow. 2000x.

Trzecią łopatkę z odlewu J, z wytworzoną warstwą aluminidkową poddano próbie utleniania w piecu elektrycznym CARBOLITE 4.OC.03.2017 w temperaturze $1121 \pm 14^\circ\text{C}$ przez 23 h. Powierzchnia warstwy wierzchniej/tlenkowej posiada jednorodną strukturę, nie zaobserwowano niezgodności wykraczających poza zakres wymagań zawartych w normie. Zaobserwowano pojedyncze wżery tlenkowe mieszczące się w zakresie wymagania normy (rys. 141).



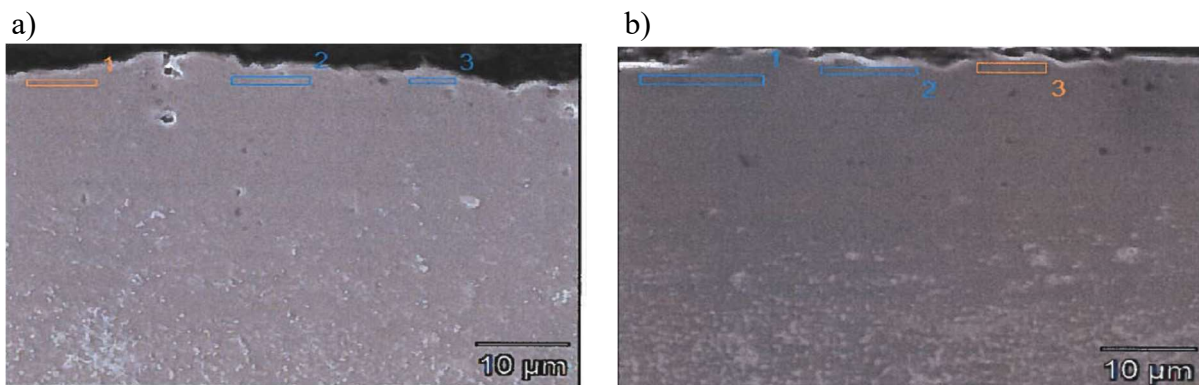
Rys. 141. Powierzchnia warstwy aluminiowanej – czerwoną strzałką wskazano wżer tlenkowy.

W celu potwierdzenia zgodności wytworzonej w procesie aluminiowania warstwy aluminidkowej na Łopatkach Turbiny Sprężarki I Stopnia z odlewu J, poddanych aluminiowaniu wg parametrów podanych w tabeli nr 32, przeprowadzono 150-godzinną próbę długotrwałą (PD). Podczas PD Łopatkę Turbiny Sprężarki z odlewu J zamontowano na silniku technologicznym do 150 godzinnej próby trwałościowej. Badania miało na celu weryfikację jakości łopatek w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków eksploatacji, tj. wygrzewanie w temperaturze pracy silnika (rys. 2b), w środowisku gazów utleniających. Trzy losowo wybrane łopatki po PD poddano badaniom mikroskopowym celem oceny jakości powierzchni warstwy tlenkowej, badań składu chemicznego i głębokości warstwy wierzchniej (tabela 33, rys. 142÷144).

Tabela 33. Wyniki pomiarów głębokości warstwy aluminiowanej po 150-godzinnej próbie długotrwałej.

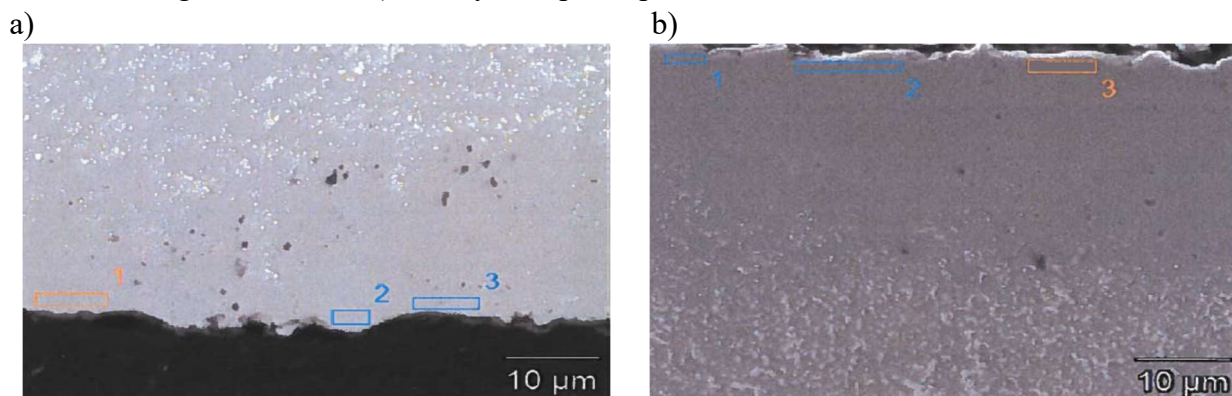
Nr łopatki z odlewu J	Głębokość warstwy aluminiowanej po PD [mm]	Głębokość warstwy aluminiowanej po aluminiowaniu [mm]
1	0,056 ÷ 0,062	0,035 ÷ 0,044
2	0,054 ÷ 0,062	
3	0,056 ÷ 0,064	

Zawartość aluminium w warstwie wierzchniej łopatek 1, 2 i 3 z odlewu J po próbie długotrwałej eksploatacji w czasie 150h w temperaturze pracy silnika (rysunek 2b).



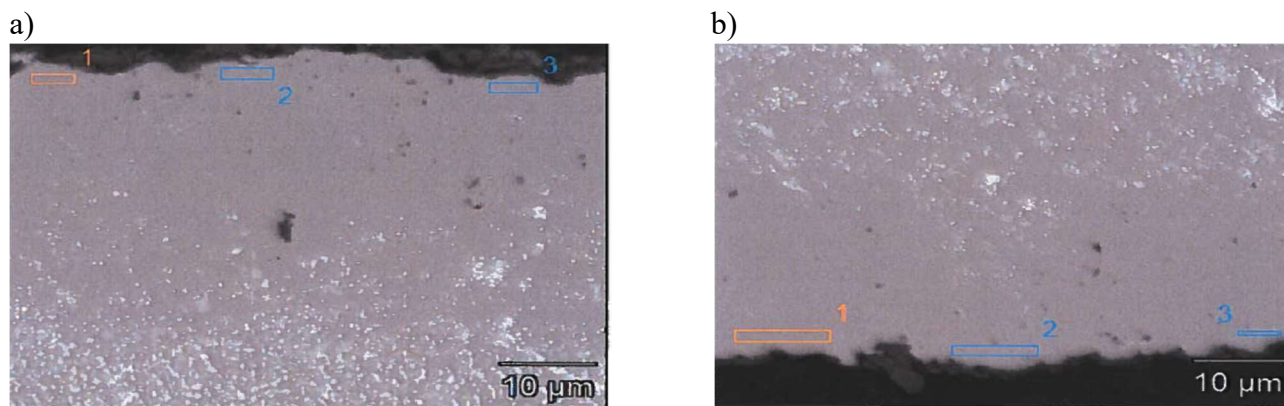
Miejsce pomiaru	Zawartość pierwiastków (% wag.)			
	Al-K	Cr-K	Co-K	Ni-K
Pkt 1	27,0	1,9	6,4	64,8
Pkt 2	27,1	2,1	7,5	63,3
Pkt 3	27,4	3,1	6,8	62,8
Pkt 1	26,4	1,9	7,0	64,7
Pkt 2	27,0	1,8	6,9	64,4
Pkt 3	26,5	1,7	6,8	65,1

Rys. 142. Mikrostruktura warstwy aluminidkowej na łopatce nr 1 z odlewu J. Na rysunku zaznaczono mikroobszary 1÷3, w których dokonano oceny składu chemicznego z użyciem SEM/EDS: a) warstwa wierzchnia na grzbiecie oraz b) w korycie łopatki, pow. 2000x.



Miejsce pomiaru	Zawartość pierwiastków (% wag.)			
	Al-K	Cr-K	Co-K	Ni-K
Pkt 1	27,6	1,5	6,7	64,1
Pkt 2	27,7	1,6	6,9	63,8
Pkt 3	28,0	1,6	6,5	63,9
Pkt 1	26,5	1,7	6,2	65,6
Pkt 2	25,9	1,5	6,2	66,4
Pkt 3	25,2	1,4	7,6	65,7

Rys. 143. Mikrostruktura warstwy aluminidkowej na łopatce nr 2 z odlewu J. Na rysunku zaznaczono mikroobszary 1÷3, w których dokonano oceny składu chemicznego z użyciem SEM/EDS: a) warstwa wierzchnia na grzbiecie oraz b) w korycie łopatki, pow. 2000x.



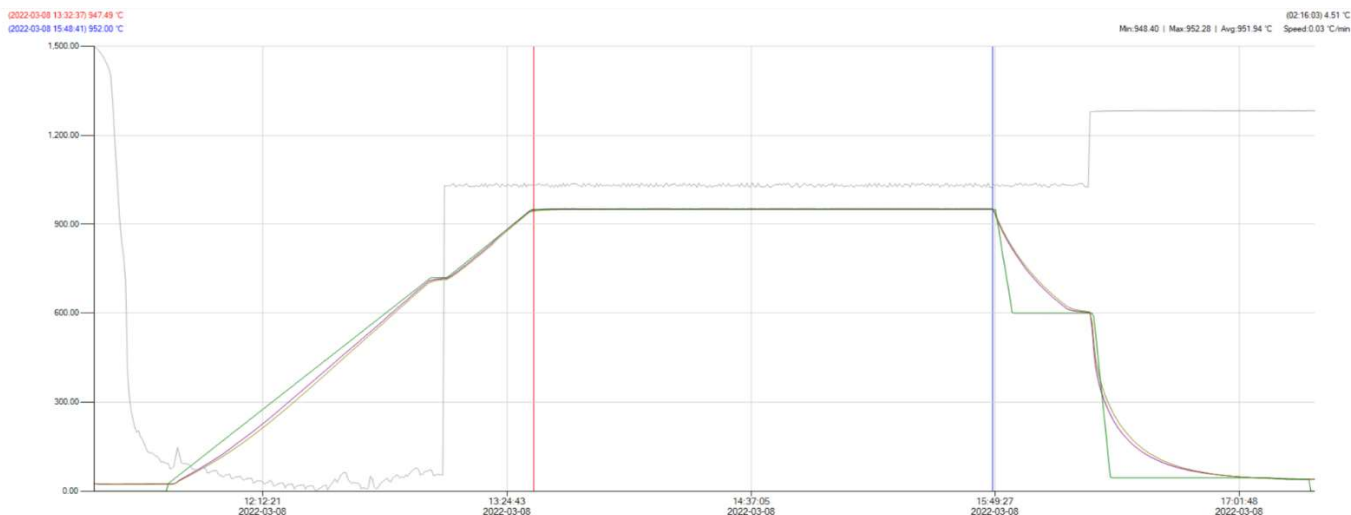
Miejsce pomiaru	Zawartość pierwiastków (% wag.)			
	Al-K	Cr-K	Co-K	Ni-K
Pkt 1	27,7	2,0	6,9	63,4
Pkt 2	27,3	2,2	7,1	63,5
Pkt 3	28,6	2,1	7,0	62,3
Pkt 1	25,9	1,6	7,1	65,5
Pkt 2	25,0	3,1	7,1	64,7
Pkt 3	25,9	2,3	7,0	64,9

Rys. 144. Mikrostruktura warstwy aluminidkowej na łopatkę nr 3 z odlewu J. Na rysunku zaznaczono mikroobszary 1÷3, w których dokonano oceny składu chemicznego z użyciem SEM/EDS: a) warstwa wierzchnia na grzbiecie oraz b) w korycie łopatki, pow. 2000x.

Maksymalna głębokość warstwy aluminidkowej po próbie długotrwałego wynosi 0,064 mm. Przyczyną zwiększenia się głębokości warstwy aluminiowanej jest działanie wysokiej temperatury na silniku, która podwyższa współczynnik dyfuzji aluminium w głąb materiału rodzimego. Powstała zgorzelina tlenkowa na powierzchni warstwy aluminidkowej charakteryzuje się wymaganą trwałością i szczelnością, co gwarantuje bezpieczną eksploatację łopatek w warunkach rzeczywistych pracy silnika. Obniżenie zawartości Al w warstwie aluminidkowej wynika z dyfuzji Al w kierunku powierzchni w trakcie działania wysokich temperatur na silniku (rys. 2b). Stwierdzona, w czasie wykonanych badań, zgodność jakości warstwy aluminidkowej z wymaganiami normy wskazuje na prawidłowy dobór warunków aluminiowania łopatek z nadstopu ŻS6U-WI. Zastosowanie warstwy poprawiło własności żaroodporne łopatki. Brak pęknięć oraz nieciągłości na powierzchni warstwy aluminidkowej zapewnia bezpieczną eksploatację części. Nie wprowadzono zmian w procesie aluminiowania części produkcyjnych.

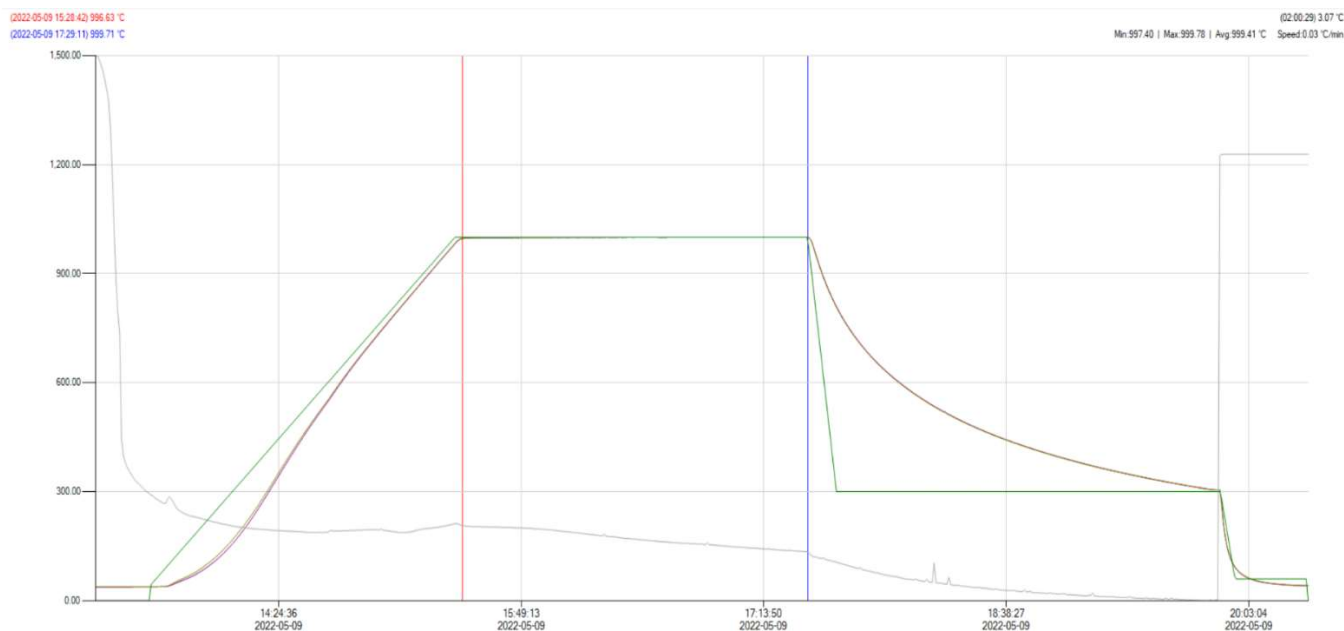
4.4. Wyżarzanie Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia.

Łopatki z wytworzoną warstwą wierzchnią podlegają dalszym procesom kształtującym właściwości finalnych produktów determinujących możliwość ich eksploatacji w warunkach wysokiej temperatury i korozyjnego środowiska gazów spalinowych. Kolejnym etapem w technologii wytwarzania gotowych łopatek po procesie aluminiowania jest proces obróbki cieplnej, podczas której zachodzi reakcja przemiany w wierzchniej warstwie aluminidkowej kruchej fazy δ -Ni₂Al₃ w fazę β -NiAl. Proces ten prowadzi się w zakresie temperatury 980÷1050°C (rys. 145).



Rys. 145. Schemat obróbki cieplnej Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia **po procesie aluminiowania**.

Kolejnym procesem cieplnym wykonywanym przed procesami kontroli nieniszczącej tj. kontroli FPI odlewów łopatek z nadstopu ŻS6U-WI jest wyżarzanie. Proces ten prowadzi się w piecu próżniowym w temperaturze ok. $1000 \pm 14^\circ\text{C}$. Celem tego zabiegu jest odprężanie materiału (usunięcie naprężeń rozciągających) po procesach obróbki mechanicznej – powierzchniowej obróbki wykańczającej (szlifowanie, polerowanie). Wyżarzanie powoduje usunięcie naprężeń rozciągających powstałych w czasie prowadzonych wcześniej procesów obróbki mechanicznej. Proces ten zastępuje, przed kontrolą fluorescencyjną, standardowy etap trawienia chemicznego.



Rys. 146. Wykres wyżarzania Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia **po obróbce mechanicznej** – trawienie termiczne.

Wyżarzanie stosowane w procesie produkcyjnym Łopatek Turbiny Sprężarki nie wpływa na trwałość zmęczeniową finalnych wyrobów. Jest to jeden z procesów technologicznych wymaganych przez zamawiającego do przeprowadzenia na koniec cyklu produkcyjnego.

4.5. Badania nieniszczące Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia.

Wykonano badania nieniszczące – penetracyjne z użyciem penetrantów fluorescencyjnych (z ang. Fluorescent Penetrant Inspection FPI) 18 gotowych do eksploatacji łopatek, po badaniach zmęczeniowych, z losowo wybranych odlewów (tabela 34, rys. 147).

Tabela 34. Wyniki kontroli fluorescencyjnej po badaniach zmęczeniowych.

Badanie wytrzymałości zmęczeniowej				Kontrola fluorescencyjna	
Nr próbki	Częstotliwość [Hz]	Założona liczba cykli podczas badania	Założona liczba cykli podczas badania	Wynik próby	Opis wyniku
1	3443	2x10 ⁶	Częstotliwość po próbie bez zmian	zgodne	Brak pęknięć
2	3383		Częstotliwość po próbie spadła o 20 Hz	4 pęknięcia	Pęknięcie nr 1 – pęknięcie na piórze łopatki o długości 1,5 mm Pęknięcie nr 2 – pęknięcie od krawędzi natarcia w promieniu przejścia między szyjką a zamkiem jodełkowym o dł. 2 mm Pęknięcie nr 3 – pęknięcie od strony krawędzi splotu na piórze długości 3 mm Pęknięcie nr 4 – pęknięcie od strony splotu na jodełce o dł. 2 mm
3	3414		Częstotliwość po próbie spadła o 30 Hz	2 pęknięcia	Pęknięcie nr 1 – pęknięcie od strony krawędzi natarcia na przejściu szyjki w zamek jodełkowy o długości 2,5 mm Pęknięcie nr 2 – pęknięcie od strony krawędzi splotu na szyjce przechodzącej w ząb w zamku jodełkowym o długości 4 mm
4	3360		Częstotliwość po próbie bez zmian	zgodne	Brak pęknięć
5	3415		Częstotliwość po próbie bez zmian	zgodne	Brak pęknięć
6	3385		Częstotliwość po próbie spadła o 3 Hz	3 pęknięcia	Pęknięcie nr 1 – pęknięcie na zębnie w zamku jodełkowym od strony krawędzi natarcia o długości 5 mm Pęknięcie nr 2 – pęknięcie od strony splotu na promieniu szyjki przechodzącej na ząb łopatki o dł. 2 mm Pęknięcie nr 3 – pęknięcie od strony splotu na promień szyjki przechodzący na ząb łopatki o dł. 3 mm Wszystkie pęknięcia zaobserwowano od strony koryta łopatki
7	3349		Częstotliwość po próbie spadła o 25 Hz	2 pęknięcia	Pęknięcie nr 1 - pęknięcie na jodełce przechodzące przez promień, szyjkę do czoła łopatki o dł. 8,5 mm – koryto łopatki. Pęknięcie nr 2 - pęknięcie na jodełce o dł. 2,5 mm grzbiet łopatki.
8	3438		Częstotliwość po próbie spadła o 70 Hz	2 pęknięcia	Pęknięcie nr 1 - Pęknięcie na jodełce przechodzące przez promień do czoła dł. 7,5 mm koryto łopatki. Pęknięcie nr 2 - Pęknięcie na jodełce o dł. 2 mm koryto łopatki. Pęknięcie nr 3 - Pęknięcie na jodełce przechodzące przez promień, szyjkę do czoła łopatki dł. 4 mm.
9	3461		Częstotliwość po próbie spadła o 16 Hz	2 pęknięcia	Pęknięcie nr 1 - Pęknięcie na jodełce przechodzące przez promień, szyjkę do czoła łopatki dł. 14 mm koryto łopatki. Pęknięcie nr 2 - Pęknięcie na jodełce przechodzące w promień o dł. 4 mm grzbiet łopatki.
10	3437		Częstotliwość po próbie spadła o 100 Hz	2 pęknięcia	Pęknięcie nr 1 - Pęknięcie na jodełce przechodzące przez promień, szyjkę do czoła łopatki dł. 13 mm koryto łopatki Pęknięcie nr 2 - Pęknięcie na jodełce dł. 2,5 mm grzbiet łopatki
11	3395		Pękła na poziomie 16 kG/mm ²	2 pęknięcia	Pęknięcie nr 1 - Pęknięcie na jodełce przechodzące przez promień, szyjkę do czoła łopatki o dł. 8mm koryto łopatki. Pęknięcie nr 2 - Pęknięcie na jodełce dł. 1mm koryta łopatki
12	3494		Częstotliwość po próbie spadła o 50 Hz	2 pęknięcia	Pęknięcie nr 1 - Pęknięcie na jodełce przechodzące przez promień, szyjkę do czoła łopatki dł. 133 mm koryto łopatki. Pęknięcie nr 2 - Pęknięcie na jodełce o dł. 2,5 mm grzbiet łopatki.
13	3293		Częstotliwość po próbie bez zmian	zgodne	Brak pęknięć na FPI
14	3344		Częstotliwość po próbie bez zmian	zgodne	Brak pęknięć na FPI
15	3351		Częstotliwość po próbie bez zmian	zgodne	Brak pęknięć na FPI
16	3371		Częstotliwość po próbie bez zmian	zgodne	Brak pęknięć na FPI
17	3377		Częstotliwość po próbie bez zmian	zgodne	Brak pęknięć na FPI
18	3327		Częstotliwość po próbie bez zmian	zgodne	Brak pęknięć na FPI



Rys. 147. Wyniki kontroli FPI ze wskazaniem nieciągłości na Łopatkach Turbiny Sprężarki.

Wyniki badań nieniszczących potwierdzają przebieg prowadzonych prób trwałości zmęczeniowej łopatek. Pękanie łopatek w czasie próby zmęczeniowej powoduje obniżenie częstotliwość zmian obciążenia, co zostało potwierdzono badaniami FPI, z których wynika, że przebieg procesu zmęczeniowego łopatek, na powierzchniach, których nie stwierdzono występowania pęknięć miał zupełnie inny charakter od łopatek, na których obserwowano nieciągłości w postaci pęknięć.

Badania penetracyjne łopatek po badaniach trwałości zmęczeniowej potwierdzają jakość wytworzonych w technologii odlewania precyzyjnego łopatek turbiny z nadstopu ŻS6U-WI. Wykryte w czasie badań nieniszczących nieciągłości materiałowe, powierzchnie otwarte, pęknięcia eksploatacyjne propagujące w czasie próby obciążeniowej pozwalają ocenić charakter zmian strukturalnych łopatek, przewidując tym samym ich czas pracy w warunkach rzeczywistych. Stąd badania FPI prowadzone są na końcowym etapie produkcji krytycznych elementów, do których należą łopatki, gwarantując tym samym brak możliwości wdrożenia ich do eksploatacji w silniku przeznaczonym do pracy ze statkiem lotniczym. Z uwagi na prawidłowy przebieg badań, uzyskane wyniki pozwalające zidentyfikować wady łopatek na ostatnim etapie ich procesu wytwarzania (tabela nr 34), zdecydowano o braku konieczności wprowadzenia zmian w metodyce badań nieniszczących.

5. Obróbka strumieniowo-ścierna oraz mechaniczna łopatek z żarowytrzymałego stopu odlewniczego ŻS6U-WI.

5.1. Wpływ warunków obróbki strumieniowo-ścierniej na własności zmęczeniowe łopatek.

W celu usunięcia niekorzystnych, dla części pracujących w warunkach obciążeń zmiennocyklicznych oraz w środowisku gazów spalinowych, naprężeń wewnętrznych o charakterze rozciągającym, powstałych w trakcie wykończającej obróbki, powierzchnia Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia poddawana jest procesowi kulowania (z ang. *shot-peening*). Proces ten pozwala na wytworzenie w warstwie wierzchniej łopatek szczytkowych naprężeń ścisających

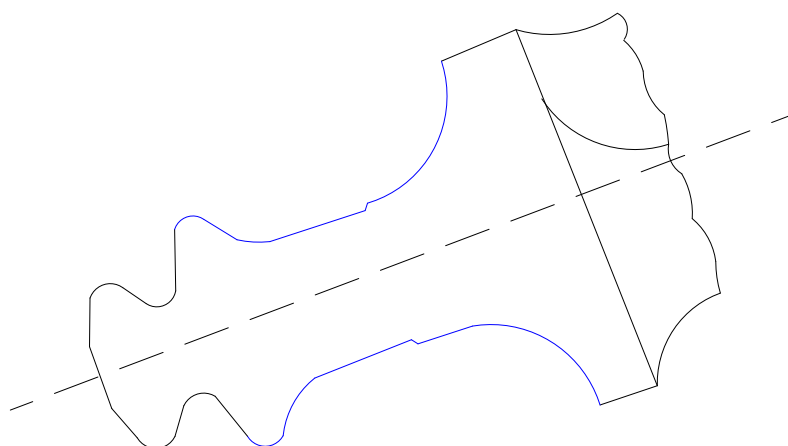
umożliwiających poprawę ich własności wytrzymałościowych, zwłaszcza wytrzymałości zmęczeniowej. Ważne jest zatem określenie wpływu warunków kulowania na własności zmęczeniowe łopatek z nadstopu ŻS6U-WI po wykończeniowej przeróbce plastycznej na zimno ich powierzchni. Jest to jeden z elementów technologii wytwarzania łopatek, który podlega monitorowaniu zgodności, zapewniającemu wytworzenie wyrobu spełniającego wymagania odbiorcze. Głównym celem obróbki strumieniowo-ścierniej (kulowania) jest umocnienie warstwy wierzchniej elementów narażonych na działanie obciążeń zmiennie-cyklicznych oraz na ścieranie. Źródłem energii kinetycznej kulek (w tym przypadku kulek szklanych) jest czynnik roboczy – powietrze. Powietrze pod ciśnieniem wypycha ścierniwo z komory magazynowej urządzenia do przewodów ciśnieniowych, na końcu, których znajduje się dysza. Medium umacniające zderzając się z powierzchnią obrabianego elementu przekazuje swoją energię kinetyczną powodując powstanie w warstwie wierzchniej naprężeń ściskających, które są korzystne dla łopatki eksploatowanej w warunkach zmiennych obciążeń cyklicznych.

Prowadzono badania z użyciem Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia pochodzących z odlewów L oraz M (25 sztuk) w stanie gotowym do eksploatacji. Proces kulowania prowadzono na kulownicy **OSU-800**, przy użyciu ścierniwa w postaci szklanych kulek o symbolu **AGB9** (średnica kulek $0,0025 \div 0,104$ mm) zgodnie z warunkami zgodnymi z normą **AMS2431/6**. Obróbka strumieniowo-ścierna powierzchni łopatek z odlewu L oraz M prowadzona była na mokro (hydrościerna/hydrostrumieniowa obróbka) (tabela 35).

Tabela 35. Warunki obróbki strumieniowo-ścierniej odlewu L i M.

Rodzaj ścierniwa (granulacja)	AGB9 - średnica $0,0025 \div 0,104$ mm
Ciśnienie czynnika roboczego - powietrza [atm]	5
Czas kulowania (na stronę) [s]	70
Odległość dyszy od powierzchni [mm]	$80 \div 100$
Kąt nachylenia strumienia ścierniwa	70
Skład mieszanki ścierniej	20 kg kulek szklanych/60 l wody

Kulowaniu poddano powierzchnie zewnętrzne na zamku łopatek (rys. 148) pochodzących z odlewów L (łopatki odcinane od L1 do L12) oraz z odlewu M (łopatki od M13 do M25).



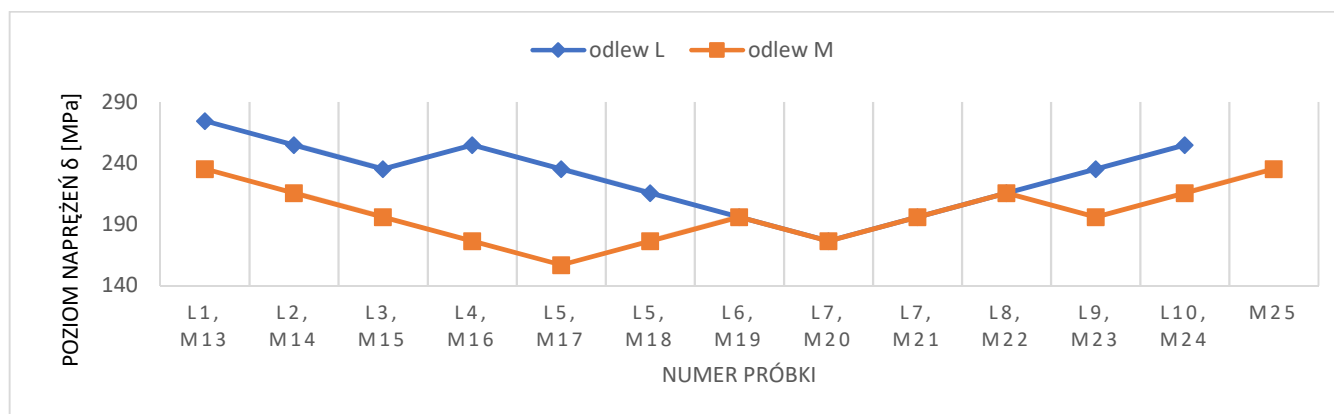
Rys. 148. Powierzchnie zamka łopatek poddane obróbce strumieniowo-ścierniej (zaznaczone niebieską linią).

Łopatki z odlewu L i M po obróbce hydrostrumieniowej poddano próbom zmęczeniowym przy stałym obciążeniu (zgodnie z pkt. 2.10.1. „Metodyki Badań”) (tabela 36).

Tabela 36. Wyniki badań trwałości zmęczeniowej Łopatek Turbiny Sprężarki z odlewu L oraz M, poddanych obróbce strumieniowo-ściernej.

Odlew	Nr łopatki	Lp	Częstotliwość f [Hz]	Napężenie maksymalne cyklu [MPa]	Średnia wytrzymałość zmęczeniowa σ_{-1} [MPa]	Napężenie maksymalne cyklu σ [$\frac{kg}{mm^2}$]	Liczba cykli N	Uwagi: Próbkę uległą pęknięciu - T Próbka bez pęknięć - N
L	L1	1	3251	274,58	228,49	28	$0,03 \times 10^{-7}$	T
	L2	2	3305	254,97		26	$0,7 \times 10^{-7}$	T
	L3	3	3256	235,36		24	1×10^{-7}	N
	L4	4	3276	254,97		26	$0,82 \times 10^{-7}$	T
	L5	5	3225	235,36		24	$0,82 \times 10^{-7}$	T
	L6	6	3346	215,75		22	1×10^{-7}	T
	L7	7	3299	196,13		20	$0,52 \times 10^{-7}$	T
	L8	8	3321	176,52		18	1×10^{-7}	N
	L9	9	3249	196,13		20	1×10^{-7}	N
	L10	10	3241	215,75		22	1×10^{-7}	N
	L11	11	3230	235,36		24	1×10^{-7}	N
	L12	12	3085	254,97		26	$0,34 \times 10^{-7}$	T
M	M13	13	3372	274,58	199,07	24	$0,52 \times 10^{-7}$	T
	M14	14	3336	254,97		22	1×10^{-7}	T
	M15	15	3343	235,36		20	$0,88 \times 10^{-7}$	T
	M16	16	3400	254,97		18	$0,85 \times 10^{-7}$	T
	M17	17	3398	235,36		16	1×10^{-7}	N
	M18	18	3396	215,75		18	1×10^{-7}	N
	M19	19	3351	196,13		20	$0,8 \times 10^{-7}$	T
	M20	20	3338	176,52		18	1×10^{-7}	N
	M21	21	3295	196,13		20	1×10^{-7}	N
	M22	22	3270	215,75		22	$0,82 \times 10^{-7}$	T
	M23	23	3206	235,36		20	1×10^{-7}	N
	M24	24	3216	254,97		22	1×10^{-7}	N
	M25	25	3213	274,58		24	1×10^{-7}	N

Ustalono, na podstawie badań zmęczeniowych, że łopatki z odlewu M wykazują mniejszą trwałość zmęczeniową od łopatek z odlewu L, mimo zastosowania tych samych warunków obróbki hydrostrumieniowej (ciśnienie 5 atm oraz czas 70 sekund na każdą obrabianą stronę zamka). Średnia wartość (dla 25 badanych łopatek z każdego odlewu) wytrzymałości zmęczeniowej dla łopatek L wynosiła 228,49 MPa, natomiast dla łopatek M wartość średnia była niższa o ok. 30 MPa i wynosiła 199,07 MPa (tabela 36, rys. 149).

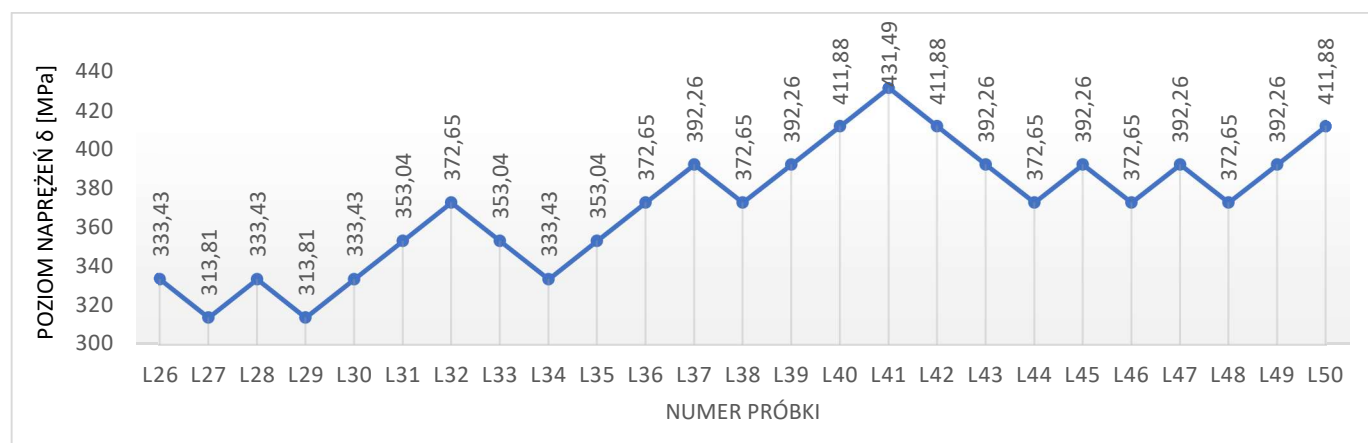


Rys. 149. Wytrzymałość zmęczeniowa łopatek z odlewów L i M, poddanych obróbce strumieniowo-ściernej.

Z uwagi na różnice w trwałości zmęczeniowej odlewów L i M wytworzonych przy zastosowaniu tych samych warunków zarówno odlewania i procesu obróbki hydrostrumieniowej, wykonano kolejne próby zmęczeniowe na łopatkach pochodzących z odlewu L (od L26 do L50), które charakteryzowały się mikrostrukturą z rozmiarem ziarna ($\leq 1,3 \text{ mm}$) (tabela 37, rys. 150).

Tabela 37. Wyniki badań trwałości zmęczeniowej Łopatek Turbiny Sprężarki, po obróbce strumieniowo-ściernej, odlew L.

Nr łopatki	Częstotliwość f [Hz]	Napężenie maksymalne cyklu σ [$\frac{kg}{mm^2}$]	Napężenie maksymalne cyklu σ [MPa]	Średnia wytrzymałość zmęczeniowa σ_{-1} [MPa]	Liczba cykli N	Uwagi: Próbka uległa pęknięciu – T Próbka bez pęknięć – N
L26	3296	34	333,43	373,8	$0,08 \times 10^{-7}$	T
L27	3237	32	313,81		1×10^{-7}	N
L28	3276	34	333,43		$0,88 \times 10^{-7}$	T
L29	3195	32	313,81		1×10^{-7}	N
L30	3217	34	333,43		1×10^{-7}	N
L31	3287	36	353,04		1×10^{-7}	N
L32	3209	38	372,65		1×10^{-7}	T
L33	3193	36	353,04		1×10^{-7}	T
L34	3239	34	333,43		1×10^{-7}	N
L35	3284	36	353,04		1×10^{-7}	N
L36	3278	38	372,65		1×10^{-7}	N
L37	3253	40	392,26		$0,81 \times 10^{-7}$	T
L38	3240	38	372,65		1×10^{-7}	N
L39	3179	40	392,26		1×10^{-7}	N
L40	3227	42	411,88		1×10^{-7}	N
L41	3236	44	431,49		$0,28 \times 10^{-7}$	T
L42	3320	42	411,88		$0,007 \times 10^{-7}$	T
L43	3293	40	392,26		$0,55 \times 10^{-7}$	T
L44	3244	38	372,65		1×10^{-7}	N
L45	3283	40	392,26		$0,73 \times 10^{-7}$	T
L46	3257	38	372,65		1×10^{-7}	N
L47	3219	40	392,26		$0,58 \times 10^{-7}$	T
L48	3260	38	372,65		1×10^{-7}	N
L49	3247	40	392,26		1×10^{-7}	N
L50	3287	42	411,88		$0,08 \times 10^{-7}$	T



Rys. 150. Wytrzymałość zmęczeniowa łopatek z odlewu L – od L26 do L50, poddanych obróbce strumieniowo-ściernej

Na podstawie wyników badań wytrzymałościowych łopatek z odlewu L (od L26 do L50) wytworzonych przy zastosowaniu takich samych warunków odlewania, jak i również poddanych procesowi obróbki hydrostrumieniowej z wykorzystaniem identycznych parametrów, jak łopatki od L1 do L26 oraz łopatki z odlewu M, stwierdzono, że o trwałości zmęczeniowej decyduje przede wszystkim rozmiar ziarna. Dodatkowo wykazano, że jednorodność mikrostruktury w poszczególnych odlewach determinuje zachowanie trwałości wytrzymałościowej na podobnym poziomie dla każdego wyrobu pochodzącego z tego samego odlewu wykazującego podobną wartość średniej średnicy ziarna w całej objętości. Stwierdzono, że łopatki L26 do L50 charakteryzują się średnią wytrzymałością zmęczeniową na poziomie 373,8 MPa), a więc wyższą od średniej wytrzymałości zmęczeniowej dla łopatek L (L1÷L12) o ok. 145 MPa, a od łopatek z odlewów M o ok. 175 MPa. Brak zachowania jednorodności w mikrostrukturze odlewów łopatek L i M decyduje o braku zachowania stabilnych własności wytrzymałościowych. Potwierdza to wniosek uzyskany na podstawie wyników badań opisanych w rozdziale I Badań Własnych (tabela 21), w którym wykazano, że w celu zachowania wysokich własności jakościowych konieczne jest wytwarzanie odlewów charakteryzujących się drobnym, jednorodnym ziarnem w całej jego objętości.

Do dalszych badań wpływu warunków obróbki hydrostrumieniowej na wartość wytrzymałości zmęczeniowej Łopatek Turbiny Sprężarki użyto łopatek z odlewu spełniającego wszystkie wymagania zdefiniowane na podstawie przeprowadzonych badań opisanych w pkt. III i IV Badań Własnych. Wyniki tych badań umożliwiły opracowanie warunków technologii wytwarzania łopatek zgodnych z założeniami odbiorczymi w zakresie mikrostruktury, a więc i własności mechanicznych (tabela 38). Odlew N wykonano więc zgodnie z założeniami pracy doktorskiej mającej na celu wyeliminowanie tych elementów, czy warunków prowadzonych procesów w technologii wytwarzania gotowych łopatek, które negatywnie oddziaływały na ich własności wytrzymałościowe. Umożliwi to uzyskanie wiarygodnych wyników pozwalających opisać wpływ procesu kulowania na wytrzymałość zmęczeniową łopatek turbiny.

Tabela 38. Warunki procesów w technologii wytwarzania łopatek – odlew N.

Temperatura odlewania [°C]	1530
Temperatura formy [°C]	1000
Rozmiar ziarna [mm]	≤1,3
Mikrostruktura	Zgodna z Tabela 36 [1225°C]
Zawartość modyfikatora [%]	10
Temperatura przesycania [°C]	1225
Zawartość Cr, % wag.	≤8,5
Temperatura aluminiowania[°C]	1000
Temperatura wyżarzania I[°C]	950
Temperatura wyżarzania II[°C]	1000
Temperatura odlewania [°C]	1530
Wszystkie łopatki muszą być poddane badaniom nieniszczącym NDT- FPI	

Gotowe, wytworzone przy zastosowaniu opracowanej technologii (tabela 38) łopatkki z odlewu N poddano obróbce strumieniowo-ścierniej przy wykorzystaniu tego samego ścierniwa, jak w przypadku obrabianych powierzchniowo odlewów z L i M. Kulowanie prowadzono na powierzchni zewnętrznej zamka 25 Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia przy zastosowaniu krótszego czasu, tj. 30 s (tabela 39). Wyniki badań zmęczeniowych przedstawiono w tabeli 40.

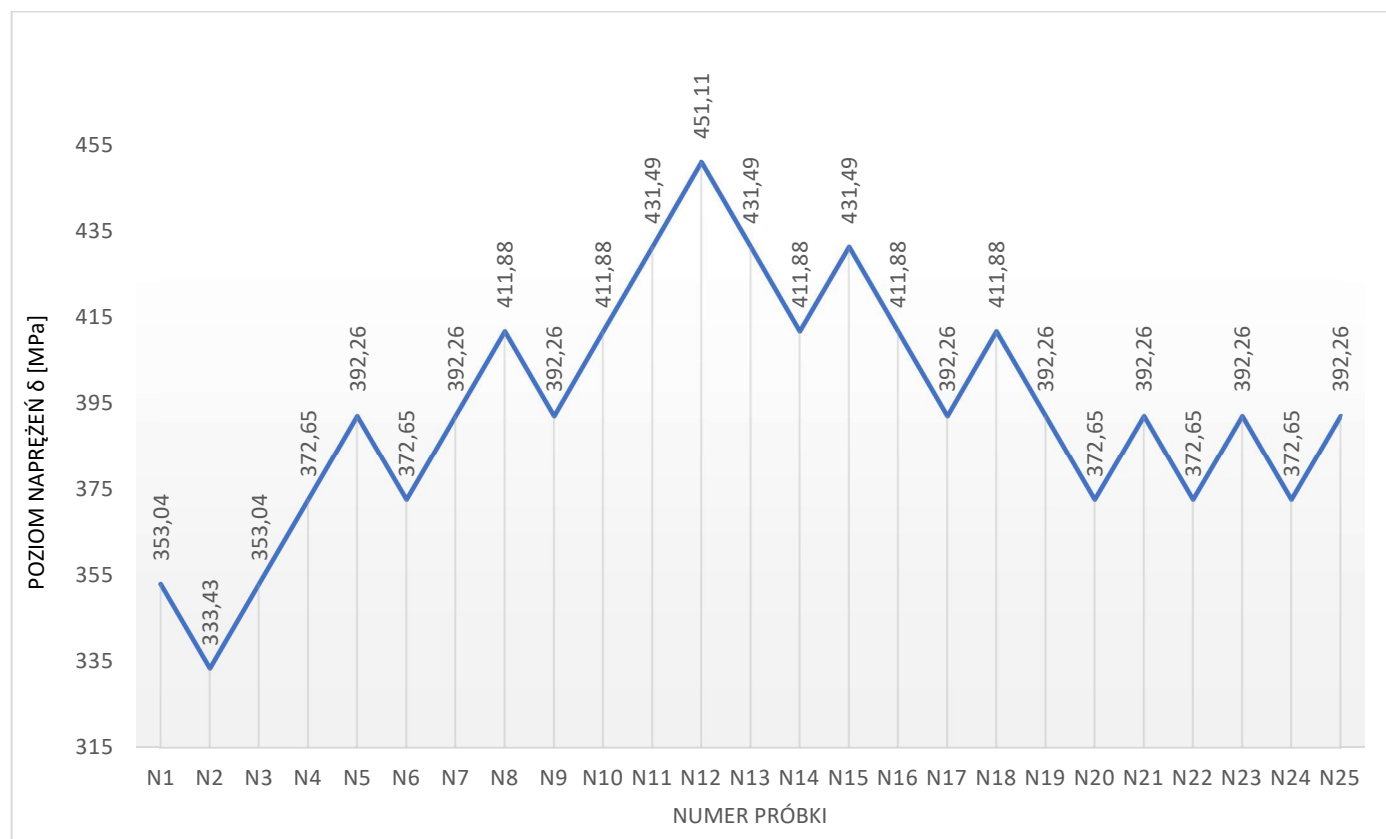
Tabela 39. Warunki obróbki strumieniowo-ścierniej łopatek od N1 do N25.

Rodzaj ścierniwa (granulacja)	AGB9 (średnica kulek 0,0025÷0,104 mm)
Ciśnienie czynnika roboczego - powietrza [atm]	5
Czas kulowania (na stronę) [s]	30
Odległość dyszy od powierzchni [mm]	80÷100
Kąt nachylenia strumienia ścierniwa	70
Skład mieszanki ścierniej	20 kg kulek szklanych/60 l wody

Tabela 40. Wyniki badań wytrzymałości zmęczeniowej Łopatek Turbiny Sprężarki, odlew N, łopatkki N1÷N25.

Nr łopatki	Częstotliwość f [Hz]	Naprężenie maksymalne cyklu σ [$\frac{kg}{mm^2}$]	Średnia wytrzymałość zmęczeniowa σ_{-1} [MPa]	Naprężenie maksymalne cyklu [MPa]	Liczba cykli N	Wynik próby
N1	3329	36	393,83	353,04	$0,64 \times 10^{-7}$	pękła
N2	3285	34		333,43	1×10^{-7}	nie pękła
N3	3266	36		353,04	1×10^{-7}	nie pękła
N4	3343	38		372,65	1×10^{-7}	nie pękła
N5	3291	40		392,26	$0,67 \times 10^{-7}$	pękła
N6	3311	38		372,65	1×10^{-7}	nie pękła
N7	3357	40		392,26	1×10^{-7}	nie pękła
N8	3297	42		411,88	$0,6 \times 10^{-7}$	pękła
N9	3293	40		392,26	1×10^{-7}	nie pękła
N10	3324	42		411,88	1×10^{-7}	nie pękła
N11	3398	44		431,49	1×10^{-7}	nie pękła
N12	3342	46		451,11	$0,23 \times 10^{-7}$	pękła
N13	3358	44		431,49	$0,71 \times 10^{-7}$	pękła
N14	3370	42		411,88	1×10^{-7}	nie pękła
N15	3381	44		431,49	$0,33 \times 10^{-7}$	pękła
N16	3285	42		411,88	$0,52 \times 10^{-7}$	pękła
N17	3297	40		392,26	1×10^{-7}	nie pękła
N18	3354	42		411,88	$0,38 \times 10^{-7}$	pękła
N19	3274	40		392,26	$0,69 \times 10^{-7}$	pękła
N20	3343	38		372,65	1×10^{-7}	nie pękła
N21	3312	40		392,26	$0,53 \times 10^{-7}$	pękła
N22	3318	38		372,65	1×10^{-7}	nie pękła
N23	3334	40		392,26	$0,35 \times 10^{-7}$	pękła
N24	3326	38		372,65	1×10^{-7}	nie pękła
N25	3327	40		392,26	$0,98 \times 10^{-7}$	pękła

Wartość średniej wytrzymałości zmęczeniowej dla odlewów łopatek N (N1÷N25), po kulowaniu w czasie 30 s, wynosiła 393,83MPa (tabela 40) i jest wyższa od wartości średniej wytrzymałości zmęczeniowej dla łopatek L (228,49 MPa) i M (199,07 MPa), które poddano kulowaniu w czasie 70 s.



Rys. 151. Wytrzymałość zmęczeniowa łopatek z odlewu N – od N1 do N25, poddanych obróbce strumieniowo-ścierniej

W celu potwierdzenia wpływu warunków obróbki hydrostrumieniowej na własności wytrzymałościowe odlewów łopatek, kolejne 23 łopatki z odlewu N poddano procesowi kulowania przy zastosowaniu niższego ciśnienia czynnika roboczego 3 atm (dla odlewów L i M oraz N1 do N25 stosowano ciśnienie 5 atm) oraz krótszego czasu kulowania na stronę (25 s) (tabela 41).

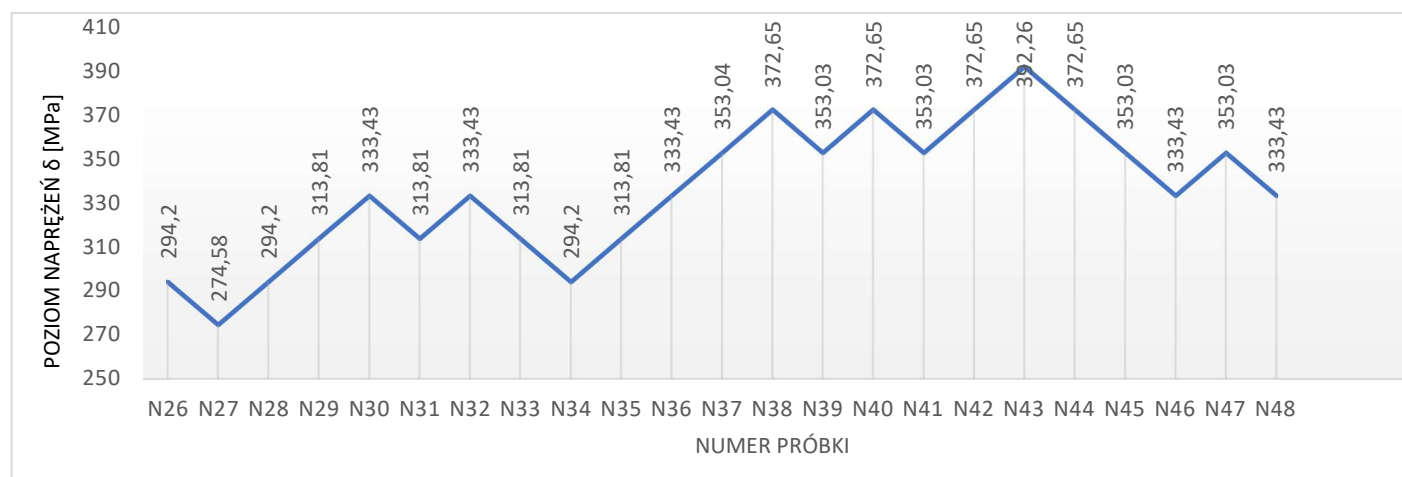
Tabela 41. Warunki obróbki strumieniowo ścierniej łopatek z odlewu N (łopatki od N26 do N48).

Rodzaj kulek	AGB9
Ciśnienie [atm]	3
Czas (na stronę) [s]	25
Odległość dyszy od pow. kulowanej [mm]	80÷100
Kąt nachylenia dyszy	70
Kulownica	OSU-800
Skład czynnika roboczego	20kg kulek szklanych/60 l wody

Z przeprowadzonych badań zmęczeniowych na łopatkach N26 do N48 pochodzących z odlewu N wynika, że zastosowanie krótszego czasu kulowania: 25 s w porównaniu do łopatek N1÷N25 kulowanych przez 30 s powoduje obniżenie wytrzymałości zmęczeniowej o ok. 15%. Średnia wartość wytrzymałości zmęczeniowej dla łopatek N26 do N48 wynosiła 335,98 MPa.

Tabela 41. Wyniki badań wytrzymałości zmęczeniowej Łopatek Turbiny Sprężarki, odlew N, łopatki N26÷48.

Nr łopatki	Częstotliwość f [Hz]	Napężenie maksymalne cyklu σ [$\frac{kG}{mm^2}$]	Napężenie maksymalne cyklu [MPa]	Średnia wytrzymałość zmęczeniowa σ_{-1} [MPa]	Liczba cykli N	Wynik próby
N26	3329	30	294,20	335,98	$0,06 \times 10^{-7}$	pękła
N27	3285	28	274,58		1×10^{-7}	nie pękła
N28	3266	30	294,20		1×10^{-7}	nie pękła
N29	3343	32	313,81		1×10^{-7}	nie pękła
N30	3291	34	333,43		$0,17 \times 10^{-7}$	pękła
N31	3311	32	313,81		1×10^{-7}	nie pękła
N32	3357	34	333,43		$0,85 \times 10^{-7}$	pękła
N33	3297	32	313,81		$0,95 \times 10^{-7}$	pękła
N34	3293	30	294,20		1×10^{-7}	nie pękła
N35	3324	32	313,81		1×10^{-7}	nie pękła
N36	3398	34	333,43		1×10^{-7}	nie pękła
N37	3342	36	353,04		1×10^{-7}	nie pękła
N38	3358	38	372,65		$0,21 \times 10^{-7}$	pękła
N39	3370	36	353,03		1×10^{-7}	nie pękła
N40	3381	38	372,65		1×10^{-7}	nie pękła
N41	3385	36	353,03		$0,19 \times 10^{-7}$	pękła
N42	3297	38	372,65		$0,18 \times 10^{-7}$	pękła
N43	3354	40	392,26		$0,38 \times 10^{-7}$	pękła
N44	3274	38	372,65		1×10^{-7}	nie pękła
N45	3343	36	353,03		$0,95 \times 10^{-7}$	pękła
N46	3312	34	333,43		1×10^{-7}	nie pękła
N47	3318	36	353,03		$0,85 \times 10^{-7}$	pękła
N48	3334	34	333,43		1×10^{-7}	nie pękła



Rys. 152. Wytrzymałość zmęczeniowa łopatek z odlewu N – od N26 do N48, poddanych obróbce strumieniowo-ścierniej.

Przeprowadzone badania zmęczeniowe na łopatkach z odlewów L, M i N, poddanych procesowi obróbki hydrustrumieniowej z zastosowaniem różnej wartości ciśnienia czynnika roboczego oraz czasu kulowania na jedną stronę zamka każdej łopatki potwierdziły korzystny wpływ obróbki plastycznej na zimno na trwałość zmęczeniową odlewów. Kulowanie wprowadza naprężenia

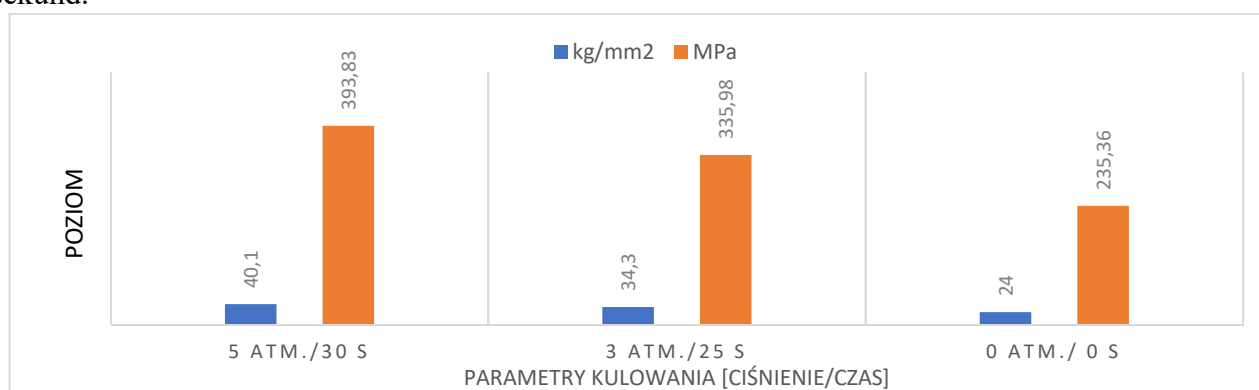
ściskające do materiału, które pozytywnie oddziałują na wytrzymałość łopatek w czasie ich eksploatacji w warunkach obciążeń zmiennie-cyklicznych. Podwyższenie własności wytrzymałościowych jest proporcjonalne do intensywności procesu kulowania tj. im dłuższy czas kulowania i wyższe ciśnienie czynnika roboczego, tym wyższa trwałość zmęczeniowa łopatek. Na wartość wytrzymałości zmęczeniowej mają również wpływ parametry mikrostruktury odlewu, co potwierdzono w badaniach zmęczeniowych łopatek z odlewów L i M, które charakteryzowały się zróżnicowaną wielkością ziarna. Ważne jest zatem, dla zachowania stabilnych własności zmęczeniowych, dla łopatek pochodzących z tego samego odlewu zachowanie warunków odlewania gwarantujących uzyskanie wyrobów o podobnej mikrostrukturze, z jednorodnym rozmiarem ziarna w całej objętości.

Potwierdzenie pozytywnego wpływu odkształcania powierzchni zamka łopatek w procesie kulowania na ich trwałość zmęczeniową wymagało wykonania próby zmęczeniowej na łopatkach gotowych, które nie obrabiano plastycznie na zimno. 3 Łopatki Turbiny Sprężarki z odlewu N (warunki wytwarzania zgodne z tabelą 38) N49÷N51 (nie kulowane), poddano próbom zmęczeniowym. Uzyskano wyniki wytrzymałości zmęczeniowej niższe od trwałości zmęczeniowej dla odlewów łopatek poddanych obróbce hydrostrumieniowej (tabela 42).

Tabela 42. Wyniki badań wytrzymałości zmęczeniowej Łopatek Turbiny Sprężarki, odlew N, łopatki N49÷N51.

Nr łopatki	Naprężenie maksymalne cyklu σ [$\frac{kg}{mm^2}$].	Poziom naprężeń, MPa	Wynik próby
N49	22	215,75	pękła
N50	24	235,36	pękła
N51	24	235,36	pękła

Łopatki Turbiny Sprężarki I Stopnia z odlewu N (N49÷N51) bez przeprowadzonego procesu kulowania powodującego umocnienie powierzchni wykazały poziom naprężeń 215,75 do 235,36 MPa. Wyniki badań zmęczeniowych łopatek po kulowaniu umożliwiły zdefiniować optymalne warunki obróbki strumieniowo-ścierniej zapewniające osiągnięcie wymaganej trwałości zmęczeniowej (rys. 153), tj. ciśnienie czynnika roboczego 3 atm., czas prowadzenia procesu: 25 sekund.



Rys. 153. Wpływ warunków kulowania (ciśnienie oraz czas) na wytrzymałość zmęczeniową Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia (odlew N).

Umocnianie warstwy wierzchniej łopatek za pomocą kulowania na mokro z użyciem ścierniwa w postaci kulek szklanych, z zastosowaniem ciśnienia 5 atm. oraz czasu 30 sekund na stronę pozwoliło uzyskać średnią wytrzymałość zmęczeniową na poziomie 393,83 MPa. Natomiast łopatki poddane

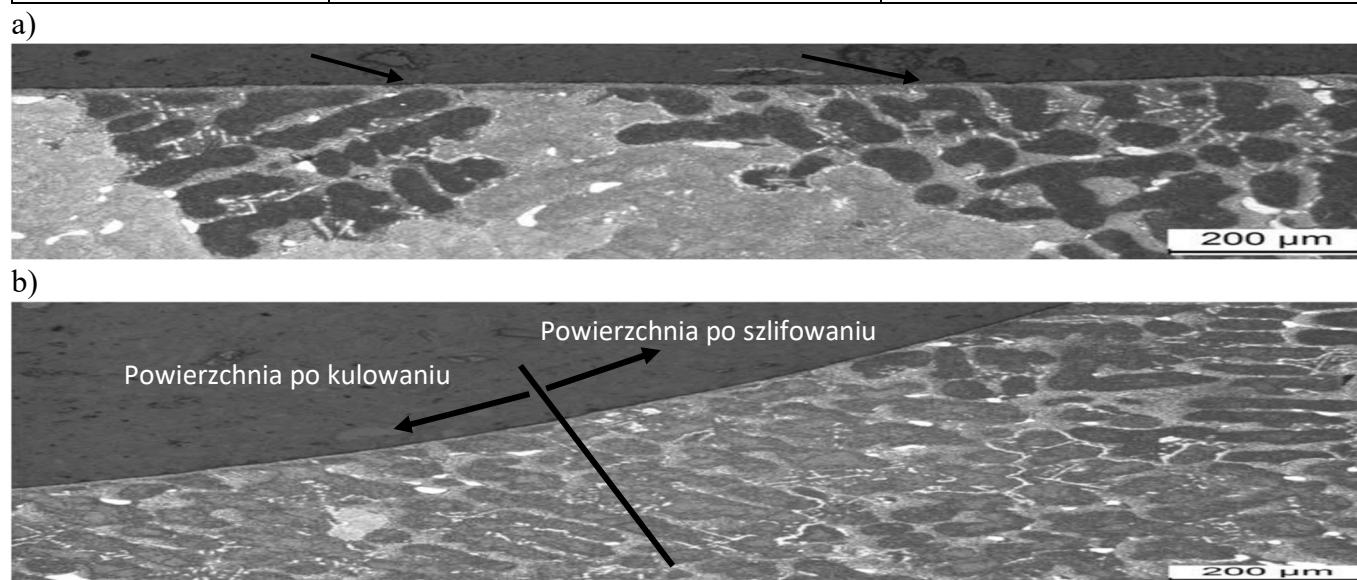
procesowi kulowania z zastosowaniem ciśnienia 3 atm. oraz czasu 25 sekund na stronę spowodowało osiągnięcie przez odlew łopatki w próbie zmęczeniowej średniej wartości wytrzymałości zmęczeniowej na poziomie 335,98 MPa. Stwierdzono, że obniżenie ciśnienia czynnika roboczego w procesie kulowania powierzchni powoduje obniżenie średniej wytrzymałości zmęczeniowej Łopatek Turbiny Sprężarki. Obniżenie ciśnienia z 5 do 3 atm oraz czasu kulowania na stronę z 30 do 25 sekund powoduje obniżenie średniej wytrzymałości zmęczeniowej Łopatek Turbiny Sprężarki o 57,85 MPa.

5.1.1. Analiza mikrostruktury Łopatek Turbiny Sprężarki po obróbce strumieniowo-ściernej i po próbach zmęczeniowych.

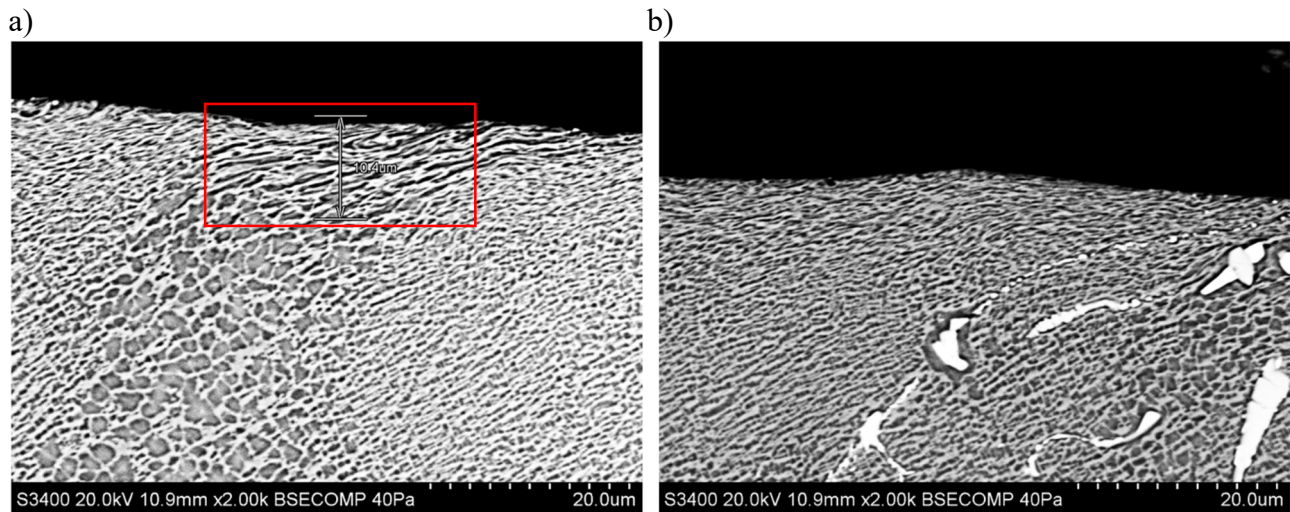
Proces kulowania odgrywa istotną rolę w kształtowaniu morfologii mikrostruktury w warstwie wierzchniej łopatek z nadstopu stopu ŻS6U-WI. W celu oceny wpływu warunków przeróbki plastycznej na zimno na zmiany w mikrostrukturze łopatek, jak i również ocenę możliwości powstawania wad (np. pęknięć) determinujących możliwość dopuszczenia odlewów do eksploatacji, przeprowadzono badania mikroskopowe łopatek z odlewu N (łopatki od N52 do N55) poddanych kulowaniu z zastosowaniem różnej wartości czasu i ciśnienia czynnika roboczego. Badania wykonano przy zastosowaniu mikroskopu świetlnego Nikon Epiphot 300 (LM) oraz elektronowego mikroskopu skaningowego Hitachi S-3400N (SEM) (rys. 154÷159).

Tabela 43. Warunki obróbki hydrostrumieniowej łopatek N52÷N55.

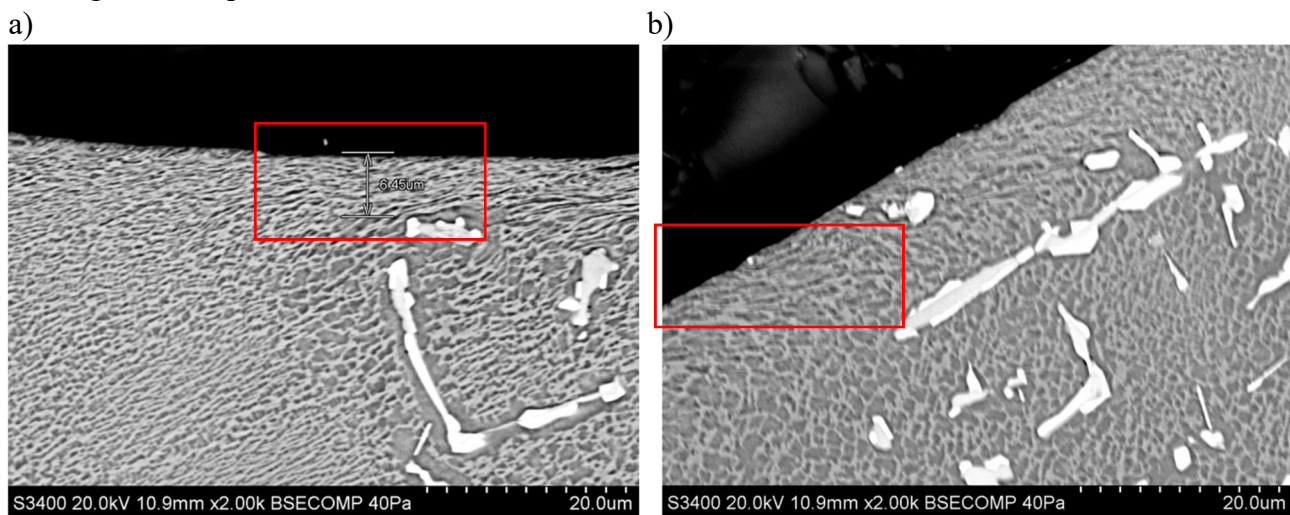
Oznaczenie łopatki	Ciśnienie czynnika roboczego [atm]	Czas kulowania [s]
N52	5	30
N53	5	30
N54	3	25
N55	2	25



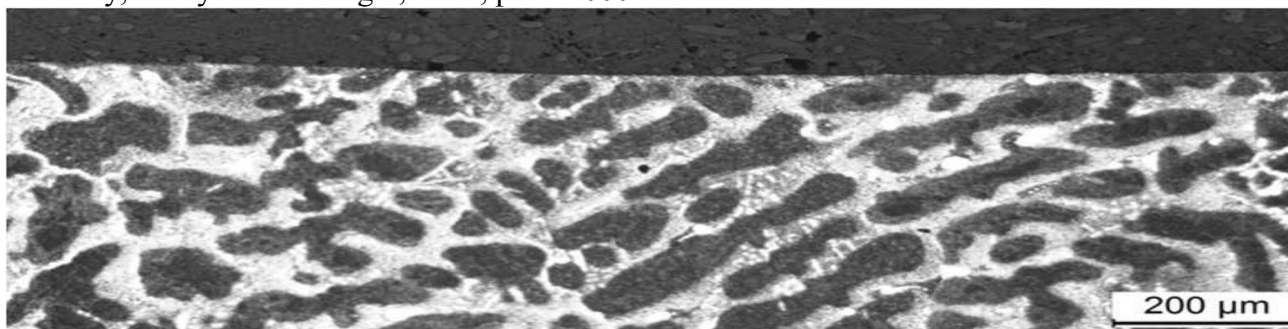
Rys. 154. Mikrostruktura łopatki nr N52, a) w obszarze szyjki zamka, widoczne zmiany mikrostruktury w obszarze przypowierzchniowym, b) w obszarze przejścia szyjki w półkę zamka, zaznaczono czarną linią granicę pomiędzy powierzchnią po kulowaniu i po szlifowaniu. Stan trawiony, odczynnik Kalling`a, LM, pow. 100x.



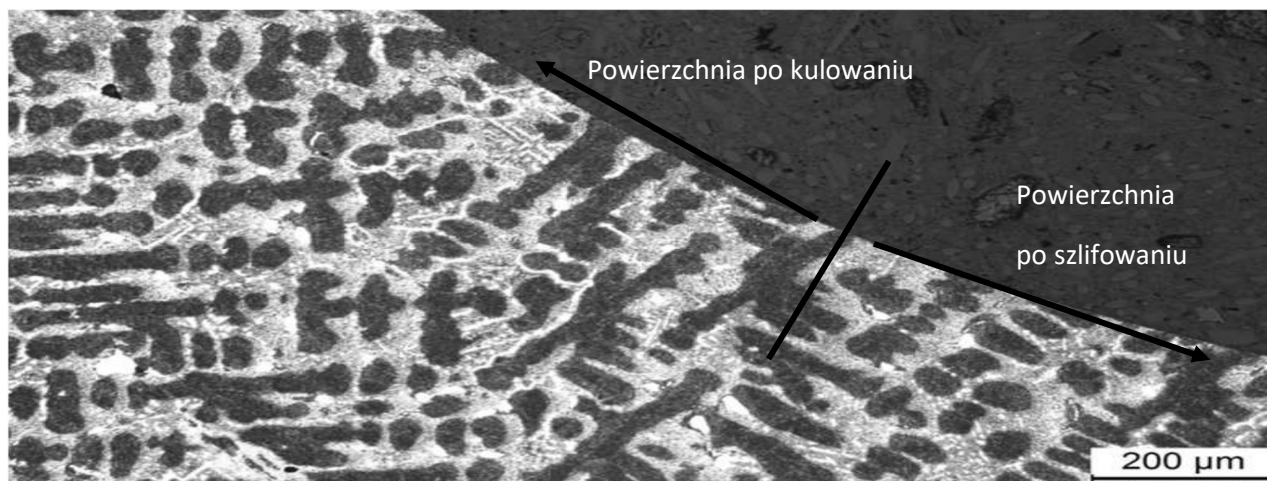
Rys. 155. Łopátka nr N52, mikrostruktura stopu ZS6U-WI w obszarze po kulowaniu. a) odkształcone ziarna na głębokość $10,4 \mu\text{m}$ b) przypowierzchniowe odkształcenie ziarna, stan trawiony, odczynnik Kalling'a, SEM, pow. $2000\times$.



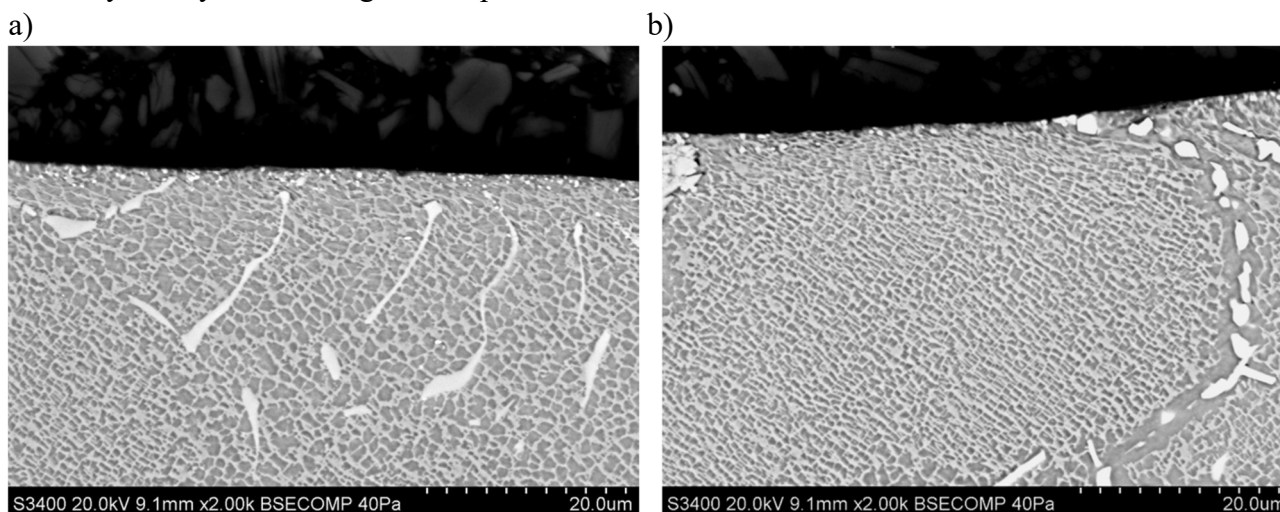
Rys. 156. a) Łopátka nr N53 a) mikrostruktura stopu ZS6U-WI w obszarze po kulowaniu, odkształcone ziarna na głębokości $6,45 \mu\text{m}$, b) mikrostruktura na powierzchni zamka łopátki nie poddanej procesowi kulowania, nieznaczne odkształcenie powstałe w procesie szlifowania stan trawiony, odczynnik Kalling'a, SEM, pow. $2000\times$.



Rys. 157. Łopátka nr N54. Mikrostruktura stopu ZS6U-WI w obszarze kulowania, stan trawiony, odczynnik Kalling'a, LM, pow. $100\times$.



Rys. 158. Łopátka nr N54, mikrostruktura stopu ŻS6U-WI w obszarze promienia przejścia szyjki w półkę zamka. Linia wskazuje granicę pomiędzy kulowaną i szlifowaną powierzchnią zamka, stan trawiony, odczynnik Kalling'a, LM, pow. 100x.



Rys. 159. Łopátka N55, mikrostruktura stopu ŻS6U-WI w obszarze po kulowaniu., stan trawiony, odczynnik Kalling'a, SEM, pow. 2000x.

Obserwacje mikrostruktury łopatek nr N52 oraz N53 po obróbce hydrostrumieniowej wykazały obecność w obszarze przypowierzchniowym odkształconych ziarn austenitu oraz wydzieleni fazy γ' na głębokości do ok. 11 μm (głębokość średnia na całej długości powierzchni po kulowaniu to ok. 6÷7 μm). Na powierzchni po procesie kulowania nie stwierdzono występowania nieciągłości eliminujących łopátki z eksploatacji. Odkształcone ziarna osnowy oraz odkształcone wydzielania fazy umacniającej są charakterystyczne dla powierzchni poddanej procesowi kulowania, przy zastosowaniu najwyższej wartości ciśnienia czynnika roboczego (5 atm) i długiego czasu kulowania (30 s). W mikrostrukturze Łopatek N54 oraz N55 po kulowaniu przy zastosowaniu ciśnienia czynnika roboczego 2÷3 atm oraz czasu 25s nie wykazano obecności odkształconych ziarn austenitu. Mikrostruktura wszystkich łopatek charakteryzuje się obecnością składników fazowych typowych dla nadstopu ŻS6U-WI – roztwór stały γ , wydzielania fazy γ' oraz węglików.

5.1.2. Badania naprężeń wewnętrznych łopatek w stanie wyjściowym oraz po obróbce hydrostrumieniowej (kulowaniu).

Podczas obróbki strumieniowo-ścierniej następuje częściowa zamiana energii kinetycznej ścierniwa na pracę powodującą odkształcenie plastyczne powierzchni obrabianego elementu. Głębokość warstwy odkształconej zależy od ciśnienia czynnika roboczego oraz czasu kulowania.

Warstwa wierzchnia po nagniataniu ścierniwem charakteryzuje się znacznym odkształceniem plastycznym, występującym poniżej strefy odkształcenia sprężystego. Istnienie strefy odkształceń sprężystych wynika z braku możliwości relaksacji naprężeń wprowadzonych w czasie kulowania, ze względu na oddziaływanie górnej strefy odkształconej plastycznie, powodującej powstanie korzystnego rozkładu naprężeń własnych, głównie o charakterze ściskającym. Badania naprężeń wewnętrznych metodą dyfrakcji rentgenowskiej prowadzono na 9 łopatkach z odlewu N. Pomiarów wykonano na łopatkach poddanych kulowaniu przy zastosowaniu różnego ciśnienia strumienia czynnika roboczego: 3, 5 i 2 atm (po 3 sztuki łopatek dla każdego ciśnienia), kolejno z zastosowaniem czasu 25, 70, 15 s. Pozostałe warunki były takie same, jak podczas prowadzenia obróbki strumieniowo-ściernej łopatek L, M i N (tabela 35, 39, 41).

Przeprowadzone badania wykazały występowanie naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej wszystkich kulowanych łopatek (tabela 46).

Tabela 44. Wyniki naprężeń wewnętrznych w powierzchni zamka łopatek poddanych kulowaniu.

Numer łopatki	Naprężenie wewnętrzne*, MPa	
	σ_x	σ_y
N56	-925	-996
N57	-941	-1016
N58	-1070	-1040
N59	-881	-1282
N60	-941	-1349
N61	-897	-1446
N62	-915	-1037
N63	-720	-1543
N64	-921	-1461

*Wartość naprężeń wewnętrznych σ_x oraz σ_y podano jako wartość średnią z trzech punktów pomiarowych.

5.2. Wpływ warunków obróbki mechanicznej (szlifowanie, polerowanie) na jakość powierzchni Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia.

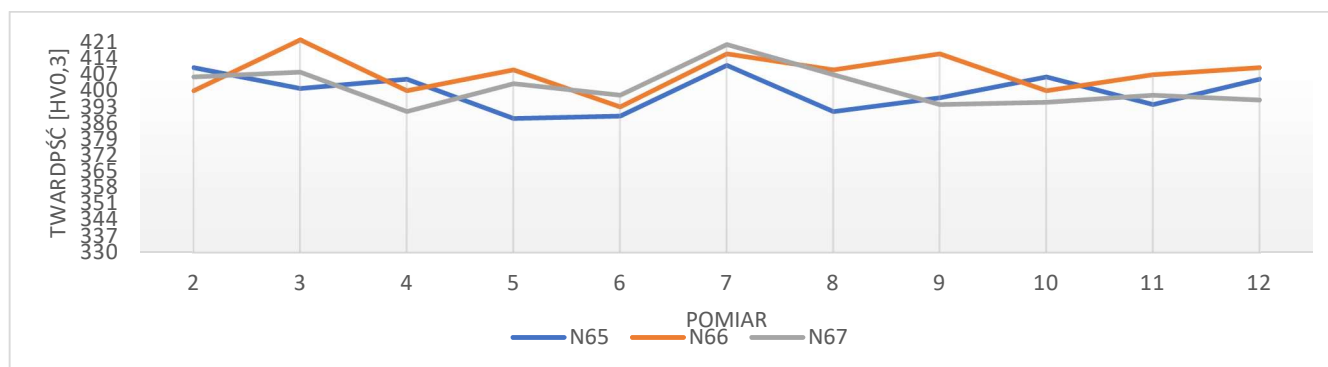
Finalnym, bardzo ważnym etapem w cyklu produkcyjnym Łopatek Turbiny Sprężarki jest ich obróbka wykończeniowa. Uzyskanie zakładanych własności jakościowych, zwłaszcza w odniesieniu do powierzchni możliwe jest poprzez zastosowanie procesów (szlifowanie i polerowanie) umożliwiających uzyskanie wymaganej geometrii i chropowatości powierzchni odlewów. Gwarantuje to bezpieczeństwo eksploatacji części w ekstremalnie trudnych warunkach. Powstanie w trakcie obróbki wykańczającej wady na powierzchni odlewu, stanowiącej karb strukturalny, nie wykrytej w czasie badań weryfikujących jego jakość, może wpłynąć na spiętrzenie naprężeń w trakcie eksploatacji i powstanie nieciągłości (np. pęknięć) powodujących zniszczenie uszkodzonego elementu lub nawet awarię całego systemu sprężarki. Łopatki turbiny silnika lotniczego wytwarzane są z trudnoobrabialnych materiałów, tj. z nadstopów na osnowie niklu, które wymagają stosowania w procesach obróbki mechanicznej narzędzi specjalnych, charakteryzujących się wyższą żywotnością od narzędzi stosowanych podczas obróbki innych rodzajów stopów metali. O długości czasu stosowania narzędzi w procesie obróbki wykańczającej odlewy z nadstopów niklu decyduje również wysoki reżim w odniesieniu do jakości powierzchni oraz dokładności wymiarowej detali, co w tym przypadku wymusza brakowanie narzędzi w czasie krótszym od czasu stosowania ich w procesie obróbki mechanicznej mniej wymagających podzespołów. W ramach pracy przeprowadzono analizę wpływu warunków obróbki mechanicznej na mikrostrukturę odlewów w warstwie wierzchniej oraz na wartość naprężeń wewnętrznych oraz własności mechaniczne Łopatek Turbiny.

5.2.1. Analiza wpływu warunków obróbki mechanicznej na stan powierzchni zamka i szyjki Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia.

Pomiary twardości prowadzone na powierzchni zamka i szyjki na 3 odlewach łopatek gotowych (po wykonaniu pełnego cyklu produkcyjnego) miały na celu ocenę wpływu obróbki mechanicznej na własności fizyczne i mechaniczne odlewów łopatek (tabela 45). Normy procesowe oraz branżowe nie definiują wartości twardości, którą ma wykazywać odlew z materiału ŻS6U-WI. Badania twardości wykonano zgodnie z pkt. 2.10.3 „Metodyki Badań”.

Tabela 45. Twardość HV 0,3 na powierzchni zamka i szyjki łopatek po obróbce mechanicznej.

Łopaska	Przekrój	Numer pomiaru											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
N65	I	409	402	395	414	394	380	409	405	387	398	392	402
	II	367	412	391	407	405	386	407	377	409	413	392	409
	III	389	416	418	393	364	402	417	392	396	407	398	403
	Śr.	388	410	401	405	388	389	411	391	397	406	394	405
N66	I	423	404	426	409	440	395	423	416	418	398	417	422
	II	401	392	419	382	403	382	418	399	423	397	392	414
	III	410	405	421	409	383	403	407	412	407	405	413	394
	Śr.	411	400	422	400	409	393	416	409	416	400	407	410
N67	I	432	416	417	402	405	402	415	431	398	380	402	400
	II	408	407	404	384	412	402	420	405	384	396	409	394
	III	403	394	404	387	391	390	426	385	400	410	382	393
	Śr.	414	406	408	391	403	398	420	407	394	395	398	396



Rys. 160. Twardość HV0,3 na powierzchni Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia nr N65, N66 oraz N67.

Nie stwierdzono znaczących różnic w twardości mierzonej na powierzchni łopatek w stanie końcowym. Stosowane w produkcji Łopatek Turbiny Sprężarki technologiczne zabiegi wykańczające nie powodują zmian w mikrostrukturze łopatek, które mogłyby mieć wpływ na powstawanie nieciągłości decydujących o podwyższeniu lub obniżeniu własności mechanicznych w strefie zamka. Twardość mierzona w 10 punktach na powierzchni łopatki po obróbce mechanicznej wynosi od 364 do 418 HV0,3.

5.2.2. Wpływ obróbki wykańczającej na mikrostrukturę warstwy wierzchniej Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia.

Łopatki N68 oraz N69 poddano procesowi obróbki mechanicznej wg parametrów:

a) Badania mikroskopowe warstwy wierzchniej Łopatki nr N68

szlifowana półka zamka przy użyciu tarczy o geometrii T1 54A80F15VPMF904W (ns = 20, pb = 0,1) oraz szlifowany zamek łopatki w 2 przejściach tarczą profilowaną 54A80F15VPMF904W (ns1 = 15, pb1 = 0,005, ns2 = 15, pb2 = 0,002).

b) Pomiary twardości i badania mikroskopowe warstwy wierzchniej Łopatka nr N69

szlifowany zamek w 6 przejściach tarczą profilowaną F13A80FF21V. Parametry procesu dla każdego przejścia (p1=30, V1=30, p2=40, V2=30, p3=40, V3=30, p4=50, V4=30, p5=60, V5=30, p6=80, V6=30). Po każdym przejściu narzędzie poddano dwukrotnemu diamentowaniu.

Wykonano badania mikroskopowe w warstwie wierzchniej w celu oceny wpływu procesu obróbki mechanicznej na stan naprężeń spowodowany odkształceniem powierzchni Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia. Do badań wybrano dwie łopatki z odlewu N: N68 i N69. Obróbka mechaniczna odlewów powoduje zmiany w mikrostrukturze warstwy wierzchniej, których ocena wpływu na jakość łopatki przeznaczonej do eksploatacji decyduje o potwierdzeniu uzyskania przez produkt własności zgodnych z wymaganiami zamawiającego. W tym celu prowadząc ocenę mikrostruktury w obszarze, który uległ zmianie w wyniku odkształcenia spowodowanego oddziaływaniem narzędzi na warstwę wierzchnią łopatki, zastosowano opis wskazujący na wpływ obróbki mechanicznej na jakość powierzchni decydujący o trwałości eksploatacyjnej (wskazujący na stan odkształceń przy powierzchni odlewu).

Silnie odkształcona mikrostruktura- - brak możliwości zdefiniowania kształtu oraz rozmiarów ziarna.

Słabo odkształcona mikrostruktura – widoczne granice ziarn.

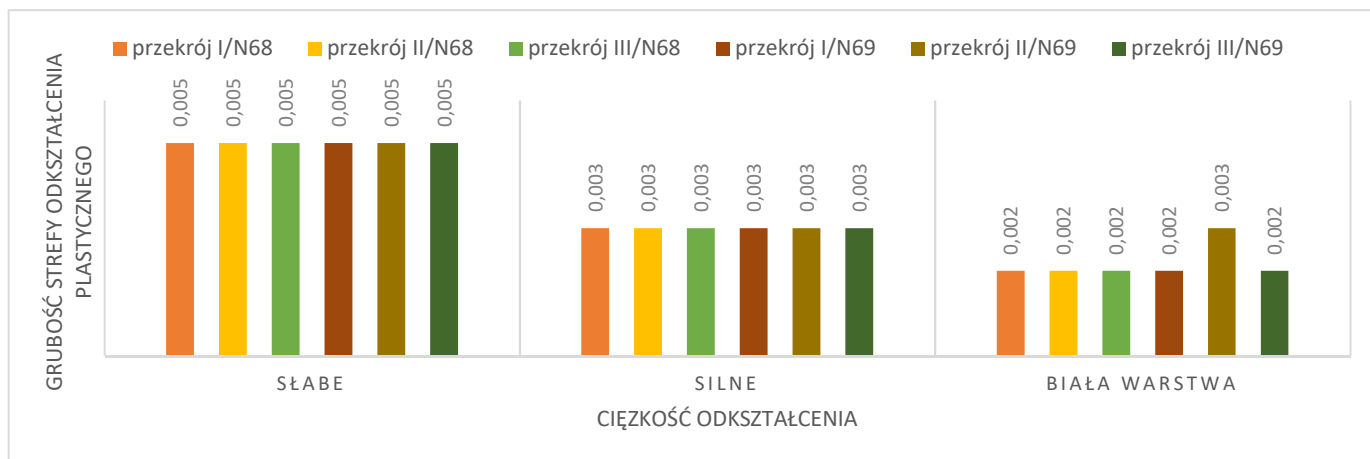
Biała warstwa – odporna na trawienie twarda i krucha warstwa, występująca na powierzchni materiału (widoczna pod mikroskopem świetlnym warstwa w kolorze białym), .

Badania wykonano w trzech przekrojach (rysunek nr 5 „Metodyki Badań”). Wyniki obserwacji mikrostruktury wskazującej na odkształcenie warstwy wierzchniej obrabianego odlewu zestawiono tabelarycznie (tabela nr 46).

Tabela 46. Stan mikrostruktury po procesie obróbki mechanicznej łopatki z odlewu N (N69 i N68).

Przekrój	Stan odkształceń w warstwie wierzchniej odlewu	Łopatka N68		Łopatka N69	
		Maksymalna głębokość [mm]	Częstotliwość występowania [% badanej powierzchni]	Maksymalna głębokość [mm]	Częstotliwość występowania [% badanej powierzchni]
I	Słabo odkształcona mikrostruktura	0,005	40 ÷ 90	0,005	40 ÷ 90
	Silnie odkształcona mikrostruktura	0,003	5 ÷ 16	0,003	5 ÷ 16
	Biała warstwa	0,002	40 ÷ 90	0,002	40 ÷ 90
II	Słabo odkształcona mikrostruktura	0,005	40 ÷ 90	0,005	40 ÷ 90
	Silnie odkształcona mikrostruktura	0,003	5 ÷ 16	0,003	5 ÷ 16
	Biała warstwa	0,002	40 ÷ 90	0,003	40 ÷ 90
III	Słabo odkształcona mikrostruktura	0,005	40 ÷ 90	0,005	40 ÷ 90
	Silnie odkształcona mikrostruktura	0,003	5 ÷ 16	0,003	5 ÷ 16
	Biała warstwa	0,002	40 ÷ 90	0,002	40 ÷ 90

Mikrostruktury łopatek nr N68 i N69, dla trzech miejsc obserwacji, przedstawiono na rysunku nr 162÷167. Wartość grubości strefy odkształcenia plastycznego przedstawiono na wykresie (rys. 169).

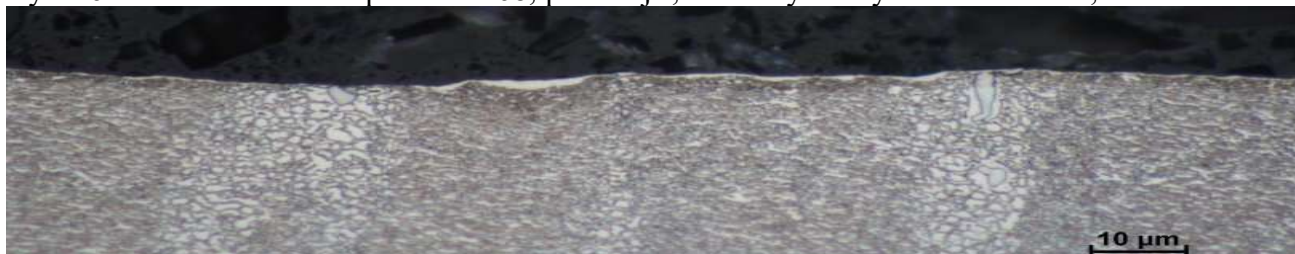


Rys. 161. Wpływ obróbki mechanicznej (wykańczającej) na grubość strefy odkształcenia plastycznego warstwy wierzchniej Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia N56 oraz N57.

W ramach procedur stosowanych do opisu technologii wytwarzania produktów, firma PWR opisuje wpływ grubości strefy odkształcenia plastycznego na własności odlewów z użyciem wyrażenia: „ciężkość odkształcenia”. Wyrażenie to odzwierciedla oddziaływanie procesu kształtującego powierzchnię elementów, w tym przypadku odlewów za pomocą np. odkształcenia na trwałość eksploatacyjną odlewów.



Rys. 162. Mikrostruktura łopatki nr N68, przekrój I, trawiony odczynnikiem AG-21, biała warstwa.



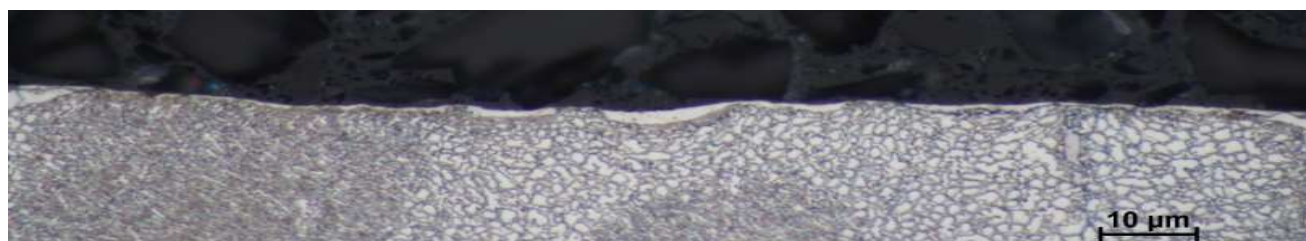
Rys. 163. Mikrostruktura łopatki nr N68, przekrój II, trawiony odczynnikiem AG-21, biała warstwa.



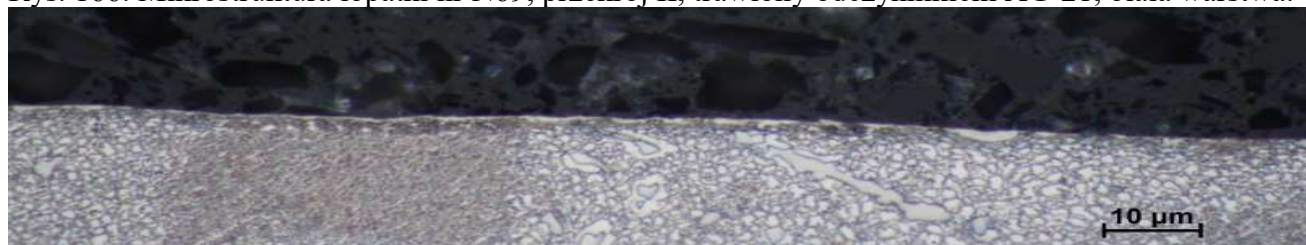
Rys. 164. Mikrostruktura łopatki nr N68, przekrój III, trawiony odczynnikiem AG-21, biała warstwa.



Rys. 165. Mikrostruktura łopatki nr N69, przekrój I, trawiony odczynnikiem AG-21, biała warstwa.



Rys. 166. Mikrostruktura łopatyki nr N69, przekrój II, trawiony odczynnikiem AG-21, biała warstwa.



Rys. 167. Mikrostruktura łopatyki nr N69, przekrój III, trawiony odczynnikiem AG-21, biała warstwa.

Dodatkowo wykonano badanie mikrotwardości wg pkt. 2.10.3. „Metodyki Badań”. Wyniki przedstawiono w tabeli nr 47.

Głębokość strefy odkształceń plastycznych w warstwie wierzchniej obu badanych łopatek wynosi $0,002 \pm 0,005$ mm. Stwierdzono na całej długości badanego przekroju łopatek występowanie stref w przedziale $> 5 \div 16$ % charakteryzujących się wysoką grubością strefy odkształceń plastycznych. W mikrostrukturze przeważają obszary, w których stwierdzono brak znaczącego wpływu procesu obróbki mechanicznej na rozmiar i kształt ziarna osnowy. W tych miejscach głębokość strefy odkształceń plastycznych nie przekraczała wartości $0,005$ mm. Dodatkowo na obrabianej powierzchni obu łopatek zaobserwowano występowanie białej warstwy. Na łopatce N68 wartość grubości białej warstwy nie przekracza $0,002$ mm, natomiast na łopatce N69 wartość ta sięga max. $0,003$ mm – w obu przypadkach biała warstwa występuje na przeważającej długości badanego obszaru. Nie zaobserwowano różnic w twardości mierzonej na powierzchni obu łopatek (tabela 47).

Tabela 47. Wyniki badania mikrotwardości łopatyki N68 oraz N69, w trzech przekrojach.

Miejsce pomiaru	Wyniki twardości HV0,3					
	Próbka N56			Próbka N57		
	Przekrój I	Przekrój II	Przekrój III	Przekrój I	Przekrój II	Przekrój III
1	421	402	438	415	438	426
2	421	427	413	416	435	432
3	416	416	413	422	416	407
4	410	429	405	402	408	414
5	414	421	424	442	443	448
6	410	394	458	382	431	439
7	432	400	408	402	413	407
8	403	422	424	412	399	391
9	415	427	421	401	416	397
10	416	428	406	431	404	420
11	410	388	426	392	382	428
12	402	405	394	412	387	396
Śr.	414	413	419	410	414	417

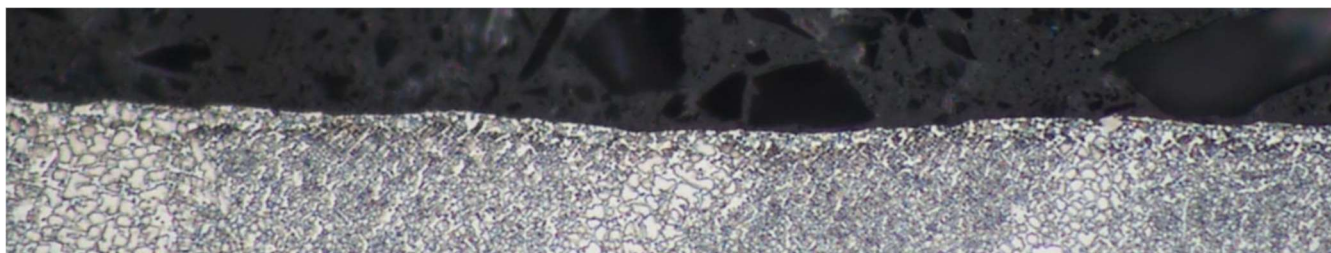
Wykonane badania na łopatkach N68 i N69 po procesie szlifowania półki oraz zamka (w 6 przejściach tarczą profilowaną) wykazały obecność silnie odkształconej mikrostruktury oraz białej warstwy na obrabianej mechanicznie powierzchni elementów. Zgodnie z normami lotniczymi oraz procedurami stosowanymi w firmie Pratt&Whitney Rzeszów obecność tych zmian w mikrostrukturze stanowi podstawę brakowania takich Łopatek Turbiny Sprężarki. Występowanie tych wad nie pozwala na bezpieczną eksploatację części krytycznie oddziaływujących na pracę silnika lotniczego. Ze względu na uzyskane wyniki wykonano dodatkowe badanie Łopatki Turbiny Sprężarki I Stopnia po **zakończonym cyklu produkcyjnym** (odlew N70). Badanie to miało na celu potwierdzenie, że po zakończonym cyklu produkcyjnym łopatek zmiany w ich mikrostrukturze są w granicach dopuszczalnych przez normę zakładową. Badane Łopatki Turbiny Sprężarki poddano analogicznym analizom jak łopatki N68 i N69 (tabela nr 48 oraz 49).

Tabela 48. Stan mikrostruktury po procesie obróbki mechanicznej łopatki z odlewu N (N70)

Przekrój	Odkształcenie mikrostruktury powierzchni	Próbka N70	
		Maksymalna głębokość [mm]	Częstotliwość występowania [% badanej powierzchni]
I	Słabo odkształcona mikrostruktura	0,004	40 ÷ 90
	Silnie odkształcona mikrostruktura	-	-
	Biała warstwa	-	-
II	Słabo odkształcona mikrostruktura	0,004	40 ÷ 90
	Silnie odkształcona mikrostruktura	-	-
	Biała warstwa	-	-
III	Słabo odkształcona mikrostruktura	0,004	40 ÷ 90
	Silnie odkształcona mikrostruktura	-	-
	Biała warstwa	-	-

Tabela 49. Wyniki pomiarów twardości łopatki N70.

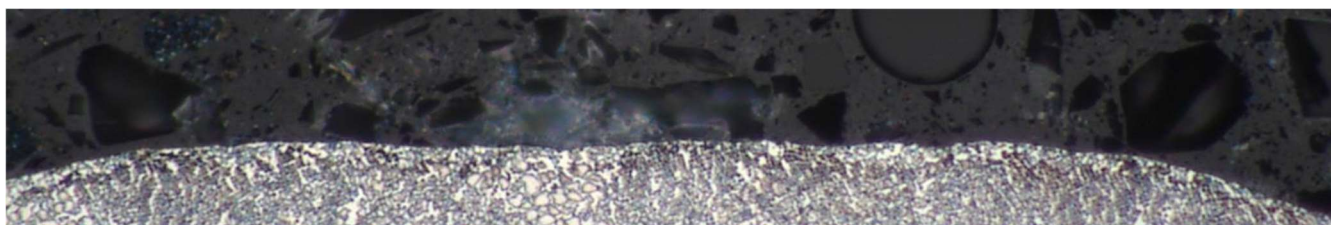
Miejsce pomiaru	Twardość HV0,3		
	Przekrój I	Przekrój II	Przekrój III
1	395	406	409
2	412	422	404
3	404	406	395
4	394	422	384
5	401	392	409
6	409	382	385
7	391	426	393
8	406	409	396
9	414	402	391
10	416	422	392
11	411	391	416
12	393	397	407
Śr.	403	406	398



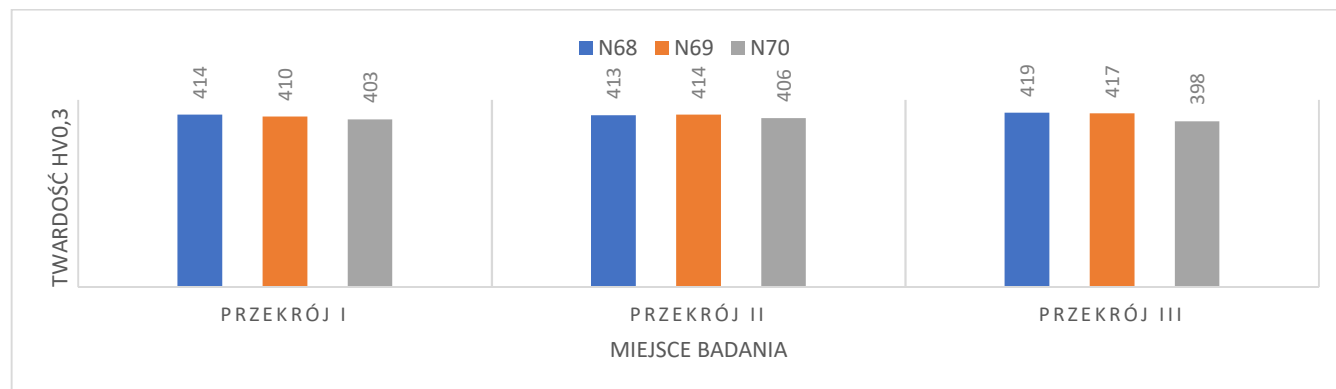
Rys. 168. Mikrostruktura łopatki nr N70, przekrój I, trawiony odczynnikiem AG-21, słabe odkształcenie.



Rys. 169. Mikrostruktura łopatki nr N70, przekrój II, trawiony odczynnikiem AG-21, słabe odkształcenie.



Rys. 170. Mikrostruktura łopatki nr N70, przekrój III, trawiony odczynnikiem AG-21, słabe odkształcenie.



Rys. 179. Wykres twardości łopatek N68, N69, N70.



Rys. 171. Wykres wpływu procesów powierzchniowej obróbki wykańczającej na odkształcenie powierzchni łopatki nr N70.

Na powierzchni 4 łopatek z odlewu N (od N71 do N75) przeprowadzono pomiary naprężeń wewnętrznych po pełnym cyklu powierzchniowej obróbki wykańczającej bez obróbki hydrostrumieniowej. W celu określenia wpływu zastosowanego narzędzia na stan naprężeń w warstwie wierzchniej obrabianych łopatek, powierzchnię zamka **Łopatek N71 i N72 szlifowano tarczą J, a łopatek N73 i N74 tarczą H** (tabela 50). W opisie charakteryzujących tarcze zastosowano symbole literowe oznaczające twardość, zgodnie z normą zakładową ZN-98 LR-426006 (tablica 1).

Tablica 1. Symbole literowe określające twardość narzędzi ściernych wg normy ZN-98 LR-426006.

Symbol twardości																									
miękka								średnia								twarda									
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	R	S	T	U	W	X	Y	Z		

Tabela 52. Naprężenia wewnętrzne na powierzchni obrabianego mechanicznie zamka łopatek z odlewów N bez kulowania.

Numer łopatki	Naprężenia własne, MPa		Tarcza szlifierska
	σ_x	σ_y	
N71	-454	32	Tarcza J
N72	-338	66	Tarcza J
N73	-345	-5	Tarcza H
N74	-472	95	Tarcza H

Analiza naprężeń własnych wykazała obecność naprężeń zarówno ściskających (w kierunku osi x), jak i rozciągających (w kierunku osi y) na powierzchni Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia. Jedynie w łopacie N73 poddanej obróbce mechanicznej tarczą H stwierdzono obecność naprężeń ściskających w kierunku osi y. Wartość naprężeń rozciągających (w kierunku σ_y) na powierzchni wszystkich czterech łopatek nie przekracza wartości 100 MPa. Wartość naprężeń ściskających (w kierunku σ_x) w Łopatkach szlifowanych (bez zastosowania procesu kulowania powierzchni) jest znacznie niższa niż w przypadku łopatek po dodatkowej obróbce strumieniowo-ścierniej, tj. po kulowaniu (tabela 46). Brak znaczącego wpływu zastosowanego narzędzia na proces szlifowania decyduje o braku konieczności prowadzenia dodatkowych badań z użyciem narzędzi charakteryzujących się zróżnicowaną żywotnością w odniesieniu do prowadzonego procesu obróbki mechanicznej. Wykonanie procesu kulowania, pozwala na zmianę powstałych w czasie procesu powierzchniowej obróbki wykańczającej naprężeń rozciągających na naprężenia ściskające (tabela nr 44).

Analiza mikrostruktury łopatek po szlifowaniu wykazała obecność w niektórych miejscach na powierzchni obrabianego mechanicznie zamka, warstwy, w której stwierdzono występowanie silnie odkształconych ziarn, niemożliwych do wytrawienia przy zastosowaniu standardowych dla stopu ŻS6U-WI odczynników. Warstwa ta ze względu na to, że została ukształtowana w procesie obróbki mechanicznej, jak i również z uwagi na jej głębokość (nie przekraczającą kilkudziesięciu mikrometrów) ma charakter tzw. **białej warstwy**, którą obserwowano podczas badań obrabianych mechanicznie elementów wytworzonych z nadstopów na osnowie niklu [94, 95, 96]. Biała warstwa, ze względu na swoje własności, stanowi o obniżonych własnościach eksploatacyjnych części maszyn. Warstwa ta charakteryzuje się dużą kruchością oraz twardością. Powstaje na skutek szybkiego nagrzewania materiału do wysokiej temperatury, której towarzyszy bardzo silne odkształcenie mikrostruktury, a następnie natychmiastowe schłodzenie powierzchni obrabianej do temperatury otoczenia [97]. Występowanie białej warstwy zaobserwowano w elementach ze stopów metali poddawanych procesom obróbki mechanicznej, w szczególności: wierceniu, toczeniu, frezowaniu, szlifowaniu oraz obróbce elektroerozyjnej [97]. Intensywność występowania białej warstwy może

wzrastać wraz z zużyciem narzędzia czy podwyższeniem wartości posuwu. W trakcie szlifowania występują zjawiska sprzyjające powstawaniu białej warstwy, tj.:

- a) plastyczne płynięcie materiału oddziałujące na powstanie jednorodnej warstwy na niewielkiej głębokości obrabianego elementu, charakteryzującej się mikrostrukturą z drobnym ziarnem;
- b) zjawisko gwałtownego nagrzewania i chłodzenia powierzchni obrabianego elementu;
- c) oddziaływanie chemiczne warstwy wierzchniej elementu obrabianego z narzędziem oraz ze środowiskiem.

Autorzy pracy [97] twierdzą, że problem występowania białej warstwy na powierzchni obrabianych mechanicznie elementów dotyczy szczególnej grupy stopów, podatnych na zmiany składników fazowych w mikrostrukturze, spowodowane działaniem wysokiej wartości temperatury i/lub naprężeń, a więc czynników podwyższających siłę pędną przemian fazowych. Szlifowanie tarczą 54A80F15VPMF904W w dwóch przejściach oraz szlifowanie tarczą F13A80FF21V w 6 przejściach powoduje pojawienie się na powierzchni łopatek niekorzystnej białej warstwy o głębokości ok. 0,002÷0,003 mm, w zależności od miejsca szlifowania. Obszary w obrabianych mechanicznie elementach z nadstopów niklu, które można nazwać białą warstwą, to silnie odkształcona mikrostruktura, z wydłużonymi ziarnami austenitu oraz odkształconymi wydzieleniami fazy γ' . Analiza mikrostruktury łopatek poddanych obróbce wykazała, że obszar przypowierzchniowy w obszarze zamka łopatki składa się z kilku stref, o różnym stopniu odkształcenia i cech mikroskopowych:

- warstwa biała, którą można odróżnić za pomocą mikroskopu SEM od pozostałej strefy nieodkształconej – nie trawi się,
- strefa dużego odkształcenia z silnie odkształconymi ziarnami i niewidocznymi granicami ziarn,
- strefa małego odkształcenia, z odkształconymi ziarnami, ale z widocznymi granicami ziarn.

Występowanie białej warstwy zaobserwowano na wszystkich przekrojach zamka łopatki N68 oraz N69. Głębokość warstwy zmienia się na długości obrabianej powierzchni, w zakresie do max. 0,003 mm dla obszaru silnie odkształconego dla łopatki N69 (po szlifowaniu tarczą profilowaną F13A80FF21V w 6 przejściach). Na powierzchni obu obrabianych łopatek o numerach N68 oraz N69 stwierdzono obecność białej warstwy charakteryzującej się grubością ok. 0,002 mm. Powstanie białej warstwy w przypadku Łopatek Turbiny Sprężarki może wynikać z zużycia narzędzia skrawającego. Zmieniająca się głębokość białej warstwy na obrabianej powierzchni łopatek może wynikać z niejednorodnego odkształcenia powierzchni spowodowanego tzw. zaciąganiem materiału przez narzędzie w czasie prowadzonego procesu szlifowania. Narzędzia, o wyraźnym stopniu zużycia mogą generować powstawanie białej warstwy jako efekt plastycznego odkształcenia materiału w obszarze, w którym mogą występować nieciągłości materiału. Badania Łopatki Turbiny sprężarki poddanej polerowaniu końcowym zamka tarczą polerską (elektrokorund) 125x20x20 99a150PBPE, a następnie 80x20x20 99a60PBPE nie wykazały obecności białej warstwy na żadnej z badanych powierzchni.

IV. WNIOSKI I PODSUMOWANIE.

Główny cel pracy to optymalizacja technologii wytwarzania Łopatek Turbiny Sprężarki, z uwzględnieniem czynników wpływających na jakość wyrobu, celem uzyskania stabilnego i powtarzalnego procesu. Cel pracy został osiągnięty poprzez realizację trzech zadań o charakterze badawczym:

1. Ocena wpływu parametrów procesu technologicznego na własności wytwarzanych półwyrobów metodą odlewania precyzyjnego (etap I).

Wykonane badania wstępne umożliwiły dokonać charakterystyki stopu stosowanego w procesie wytwarzania odlewów łopatek. W ramach przeprowadzonych zadań badawczych opracowano wytyczne procesu wytwarzania półwyrobu łopatki metodą odlewania precyzyjnego. Dokonano krytycznej oceny wpływu warunków procesu odlewania na trwałość zmęczeniową Łopatek Turbiny sprężarki. Motywacją do realizacji prac było wykluczenie kosztów wynikających z wytwarzania odlewów charakteryzujących się własnościami zmęczeniowymi niezgodnymi z wymaganiami stawianymi wyrobom z nadstopu na osnowie niklu ŻS6U-WI. Optymalizacja technologii umożliwiła usunąć wszelkie niezgodności z procesu odlewania, co zagwarantowało osiągnąć wydajność wytwarzania półwyrobów bliską 100%, dokumentowaną w latach 2020÷2023 (całkowite wyeliminowanie wad odlewniczych determinujących brakowanie półwyrobów). Analizowano wpływ temperatury zalewania formy, temperatury formy, dodatku czynnika modyfikującego mikrostrukturę stopu, tj. CoAl_2O_4 , rozmiaru ziarna oraz wartości wytrzymałości zmęczeniowej na jakość odlewów z nadstopu ŻS6U-WI. Wyniki badań stanowiły podstawę wprowadzenia działań optymalizujących proces odlewniczy, co pozwoliło na wyeliminowanie konieczności badań i działań korygujących z udziałem dostawcy odlewów dla Pratt&Whitney. Efektem wykonanych badań było również wprowadzenie do praktyki odlewniczej nowego stopu typu masterheat (MASTERHEAT II) oraz wprowadzenie modyfikacji warunków wytwarzania półwyrobu łopatki.

2. Ocena wpływu parametrów obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej na jakość łopatek (etap II).

Dokonano oceny wpływu parametrów procesów specjalnych na mikrostrukturę i własności fizyczne i mechaniczne łopatek. Wykazano wpływ warunków obróbki cieplnej (stan lany, 1210°C, 1225°C) na morfologię i rozkład składników fazowych w stopie ŻS6U-WI. Przeprowadzono próby aluminiowania w celu zweryfikowania zdefiniowanych parametrów obróbki cieplno-chemicznej i oceny wpływu procesów aluminiowania na jakość wytworzonej warstwy aluminidkowej. Dodatkowo dokonano analizy wpływu procesu wyżarzania po obróbce mechanicznej i wykluczono jego negatywny wpływ na wytrzymałość zmęczeniową wyrobu. Badania realizowane w ramach etapu II potwierdziły konieczność wykonania cieplnej analizy różnicowej (DTA) stopu w stanie dostawy (tj. masterheat) w celu wyznaczenia punktów charakterystycznych dla efektów cieplnych przemian fazowych. Krzywa chłodzenia i nagrzewania stopu stanowiła podstawę prawidłowego doboru parametrów obróbki cieplnej odlewów łopatek.

3. Opracowanie warunków procesów obróbki strumieniowo-ścierniej oraz powierzchniowej obróbki wykańczającej (etap III).

Dokonano oceny wpływu parametrów przeróbki plastycznej na zimno w warunkach obróbki strumieniowo-ścierniej, tj. kulowania na trwałość zmęczeniową odlewów łopatek. Potwierdzono pozytywne oddziaływanie procesu kulowania w eliminacji niekorzystnych (w warunkach eksploatacji) naprężeń rozciągających powstających w procesie wykańczającej obróbki mechanicznej powierzchni odlewów łopatek turbiny. Na podstawie badań mikroskopowych oraz wykonanych prób zmęczeniowych określono wpływ parametrów obróbki hydrościerniej, tj. ciśnienia czynnika roboczego (5 atm, 3 atm, 2 atm) oraz czasu kulowania (70 s, 30 s, 25 s) na wartość wytrzymałości zmęczeniowej determinowanej zmianami w mikrostrukturze warstwy wierzchniej spowodowanej procesem kulowania. Przeprowadzone badania stanowiły podstawę wdrożenia działań modyfikujących warunki prowadzenia procesu przeróbki plastycznej na zimno w zakresie parametrów procesu obróbki strumieniowo-ścierniej. W końcowym etapie prowadzonych analiz i badań realizowanych w ramach pracy doktorskiej, określono wpływ procesów szlifowania i polerowania na mikrostrukturę warstwy wierzchniej zamka Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia. Dokonano oceny wpływu obróbki mechanicznej na stopień zgniotu (tzw. Stopień ciężkości odkształcenia) oraz występowanie białej warstwy determinującej trwałość eksploatacyjną odlewów łopatek. Wykonane pomiary twardości oraz naprężeń wewnętrznych umożliwiły zweryfikować wprowadzone zmiany w technologii wytwarzania odlewów łopatek z obszaru obróbki wykończeniowej. Otrzymane wyniki badań stanowiły podstawę analiz zmierzających do wprowadzenia zmian w procesie wytwarzania w obszarze obróbki strumieniowo-ścierniej oraz powierzchniowej obróbki wykańczającej odlewów łopatek turbiny z nadstopu ŻS6U-WI.

Wdrożone zmiany w technologii wytwarzania łopatek:

Procesy stosowane w technologii produkcji łopatek turbin lotniczych charakteryzuje wysoki stopień złożoności i zaawansowania, co determinuje czasochłonność ich realizacji. Ocenę skuteczności wprowadzanych zmian optymalizujących wytwarzanie łopatek turbiny I stopnia dokonano na podstawie badań prowadzonych na serii odlewów próbnych wykonanych w warunkach zmodyfikowanej technologii. Sprawdzano poprawność wdrożonych zmian w poszczególnych procesach specjalnych, na każdym etapie wytwarzania łopatek, poprzez ocenę wpływu zmodyfikowanych, na podstawie wykonanych w ramach pracy doktorskiej badań, parametrów w odniesieniu do własności fizycznych i wytrzymałościowych gotowego detalu. Weryfikowano jakość odlewów na każdym etapie wdrażanych zmian w poszczególnych procesach determinujących finalną jakość łopatki, w celu wyeliminowania produkcyjnych czynników pośrednich. Taki schemat prowadzonych działań z obszaru prac badawczo-rozwojowych znajduje szerokie zastosowanie w procesach zmierzających do rozwiązywania problemów produkcyjnych w przemyśle lotniczym. Wszystkie zrealizowane zadania badawcze miały pozytywny wpływ na sprawność podjętych działań optymalizacyjnych podwyższających wydajność procesu wytwarzania Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia. Stanowiły podstawę wprowadzenia metodycznego podejścia do działań mających na celu usystematyzowanie technologii produkcji, nie tylko łopatek, ale i również innych wyrobów lotniczych wytwarzanych metodą odlewania precyzyjnego w firmie Pratt&Whitney. Istotność oraz wpływ poszczególnych procesów produkcyjnych na jakość uzyskiwanych w procesie odlewania precyzyjnego wyrobów przedstawiono w tabeli nr 51.

Tabela 51. Wpływ parametrów wytwarzania na jakość Łopatek Turbiny Sprężarki wytwarzanych ze stopu ŻS6U-WI.

Etap	Czynnik	Wpływ	Komentarz
Proces odlewania	Skład chemiczny	+	Zastosowanie stopu (tzw. masterheat) z obniżoną zawartością pierwiastków węglcotwórczych (m.in. Cr>8,5%). Obniżenie ryzyka powstawania kruchych węglków stanowiących miejsce inicjacji pęknięć w procesach wytwórczych gotowego detalu.
	Temperatura odlewania	+	Zastosowanie temperatury zalewania formy na poziomie 1564°C gwarantuje uzyskanie odlewów charakteryzujących się wytrzymałością zmęczeniową wynoszącą 193,19 MPa. Średnia objętość względna węglków w mikrostrukturze odlanych z tej temperatury łopatek wynosi 2,06 %, przy czym obserwuje się obecność węglków typu MC w kształcie płytek o zróżnicowanej morfologii tworzących skupiska tzw. pisma chińskiego.
	Temperatura formy odlewniczej	+	Nie stwierdzono istotnego wpływu temperatury formy odlewniczej (wykonano badania z wygrzewaniem formy w temperaturze 1150°C oraz 1000°C) na Rozmiar ziarna. Średnia średnica ziarna austenitu w mikrostrukturze łopatek odlanych w formie wyżarzanej w temperaturze 1150°C wyniosła 1,1 mm, a w 1000°C 1,2 mm.
	Porowatość	+	Obserwowana w mikrostrukturze łopatek porowatość skurczowa lub gazowo-skurczowa ma istotny wpływ na własności mechaniczne odlewu (A [%]) oraz żarowytrzymałość (czas do zerwania). Odlewy, w których nie wykazano obecności porów charakteryzowały się wydłużeniem A= 3÷6,4%, dla próby realizowanej w czasie: 40÷47,7 h; natomiast odlewy z porowatością (pory o średnicy ≥0,5 mm) charakteryzowały się A=2,1÷2,8%, czas próby: 34,7 h.
	Rozmiar ziarna (średnia średnica ziarna)	+	Na rozmiar ziarna ma wpływ: temperatura zalewania, temperatura formy oraz dodatek modyfikatora. W celu uzyskania wymaganej trwałości zmęczeniowej wymagane jest uzyskanie jednorodnego ziarna w całej objętości odlewu. Zalecana wielkość ziarna ($\sim \leq 1,3$ mm).
	Dodatek modyfikatora CoAl ₂ O ₄	+	Dodatek modyfikatora CoAl ₂ O ₄ w istotny sposób wpływa na wielkość ziarna odlewu ze stopu ŻS6U-WI: Zawartość 0% - rozmiar ziarna: 2,6÷3,6 mm, Zawartość 2% - rozmiar ziarna: 1,6÷2,4 mm, Zawartość 5% - rozmiar ziarna: 1,3÷1,7 mm, Zawartość 10% - rozmiar ziarna: 1,09÷1,39 mm.
	Mikrostruktura	-	Stop ŻS6U-WI powinien charakteryzować się jednorodną mikrostrukturą pod względem składu fazowego, w odniesieniu do kształtu, rozmiarów i rozkładu wydzieleni fazy γ' , jak i również cząstek węglków.

Procesy specjalne	Krzywe DTA		+	Ciepłna analiza różnicowa pozwala na wyznaczenie odpowiedniej dla odlewu ze stopu MASTERHEAT ŻS6U-WI temperatury przesycaenia (1223,9°C).
	Temperatura przesycaenia 1210°C		-	W mikrostrukturze występują pierwotne wydzielania fazy γ' o dużych rozmiarach oraz wtórne wydzielania cząstek fazy γ' o dużym stopniu dyspersji i nieregularnych kształtach. Występowanie wydzieleni fazy γ' o różnej morfologii wynika z częściowego rozpuszczenia się cząstek w czasie przesycaenia, prowadzonego powyżej temperatury solvus i ich wydzielania się w osnowie γ podczas chłodzenia z temperatury przesycaenia.
	Temperatura przesycaenia 1225°C		+	Mikrostruktura łopatek po przesycaeniu składa się (w całej objętości odlewu) z wtórnych drobnych wydzieleni fazy γ' o regularnych kształtach i drobnej fazy pierwotnej (eutektycznej) γ' .
	Stan wyjściowy (stan lany)		-	Występowanie niejednorodnych pod względem kształtu i rozkładu drobnodispersyjnych wydzieleni fazy γ' , charakteryzujących się zróżnicowanym rozmiarem i morfologią w zależności od miejsca obserwacji. Im dalej od osi dendrytów w kierunku obszaru eutektycznego, wydzielania stają się większe i tracą swój regularny kształt. Zjawisko to jest wynikiem mikrosegregacji występującej podczas krzepnięcia stopów
	Proces aluminiowania		-	Nie stwierdzono wpływu na wytrzymałość zmęczeniową. Wytworzona warstwa aluminidkowa spełnia wymagania dla bezpiecznej eksploatacji Łopatek Turbiny Sprężarki.
	Proces aluminiowania z obróbką cieplną		-	Stwierdzono wytrzymałość zmęczeniową łopatek aluminiowanych po obróbce cieplnej na poziomie 211,4 MPa. Nie kontynuowano badań określających wpływ procesu na wytrzymałość zmęczeniową.
	Badania nieniszczące – kontrola FPI fluorescencyjna		+	Potwierdzono prawidłowość zastosowanej metody penetracyjnej identyfikowania wad w odlewach łopatek .

Obróbka strumieniowo-ścierna	Ciśnienie czynnika roboczego w procesie kulowania		+	Ciśnienie czynnika roboczego oraz czas kulowania znacząco wpływa na podwyższenie wytrzymałości zmęczeniowej detalu. 5 atm/70s – 373,8÷395,3 MPa, 3 atm/25÷30s – 337,5 MPa, 0 atm/0s – 235,36 MPa.
	Czas kulowania		+	
	Odkształcenie mikrostruktury		—	Proces kulowania nie powoduje występowania mikropęknięć. Kulowanie z użyciem czynnika roboczego pod ciśnieniem 2÷3 atm w czasie 25s nie powoduje zmian mikrostruktury w warstwie wierzchniej odlewów. Kulowanie z użyciem ciśnienia czynnika 5 atm w czasie 30 s powoduje odkształcanie wydzieleni fazy γ' co potwierdza wpływ kulowania na stopień odkształcenia w obszarach przypowierzchniowych odlewów łopatek.
	Badania naprężeń wewnętrznych metodą XRD		—	Zastosowanie procesu kulowania przy ciśnieniu czynnika roboczego w zakresie od 3 do 5 atm oraz czasie od 15 do 70 s powoduje całkowite usunięcie naprężeń o charakterze rozciągającym, powstałych w czasie procesu powierzchniowej obróbki wykańczającej.
	Twardość		—	Twardość mierzona na powierzchni łopatek po procesie kulowania mierzona na przekroju oraz w niewielkiej odległości od krawędzi nie zmienia się. Nie zaobserwowano odstępstw mogących wskazywać na zmiany w mikrostrukturze obszarów w warstwie wierzchniej odlewów.
Obróbka mechaniczna	Stopień zgniotu (wg terminologii stosowanej w Pratt&Whitney - ciężkość odkształcenia)		—	Wykazano wpływ stopnia zgniotu na głębokości (0,005 mm – odkształcenie słabe) oraz (0,003 mm – odkształcenie silne), a także na występowanie białej warstwy (na głębokości 0,002 mm) na powierzchniach po zgrubnym szlifowaniu oraz frezowaniu zamka łopatki. Nie zaobserwowano silnego odkształcenia oraz białej warstwy na powierzchniach po obróbce mechanicznej wykańczającej (polerowanie), głębokość strefy odkształcenia plastycznego wynosi maksymalnie 0,004 mm.
	Twardość		—	Twardość łopatek po obróbce mechanicznej mierzona na przekroju oraz w niewielkiej odległości od krawędzi nie zmienia się. Nie zaobserwowano odstępstw mogących wskazywać na zmiany w mikrostrukturze obszarów w warstwie wierzchniej odlewów.
	Badania naprężeń wewnętrznych metodą XRD		—	Wartość naprężeń wewnętrznych o charakterze rozciągającym mierzona w odlewach po obróbce mechanicznej nie przekracza wartości σ_x -472 MPa. W wyniku zastosowania obróbki cieplnej – wyżarzania nastąpiła relaksacja naprężeń wewnętrznych wprowadzonych na etapie obróbki wykańczającej.

Wpływ na powstawanie odchyłek/nieciągłości w procesie technologicznym:

mały	średni	duży	bardzo duży
------	--------	------	-------------

+	Wymagane zmiany w procesie technologicznym	—	Nie wymagane zmiany w procesie technologicznym
---	--	---	--

Przeprowadzone badania umożliwiły opracować i wdrożyć, zoptymalizowaną pod kątem trwałości eksploatacyjnej i mierzoną m.in. wytrzymałością zmęczeniową odlewów, technologię wytwarzania Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia. Wyniki wykonanych w ramach pracy badań stanowią uniwersalną procedurę dla wdrażanych nowych technologii wyrobów wytwarzanych z nadstopów niklu.

Na podstawie zrealizowanych badań i przeprowadzonej krytycznej analizy wyników, sformułowano następujące wnioski o charakterze poznawczym i aplikacyjnym:

- Duży wpływ na stabilność procesu odlewania, własności fizyczne oraz na własności wytrzymałościowe odlewanych łopatek ma jakość materiału wsadowego (tzw. masterheat).
- Parametry procesu odlewania mają istotny wpływ na wytrzymałość zmęczeniową odlewów z nadstopu ŻS6U-WI.
- Zastosowanie relatywnie niskiej temperatury zalewania formy (1530°C) oraz temperatury formy (1000°C) podczas odlewania łopatek nie gwarantuje uzyskania jednorodnej mikrostruktury charakteryzującej się drobnym ziarnem w całej objętości odlewanej z nadstopu ŻS6U-WI detalu.
- Stwierdzono, że wytworzenie odlewu charakteryzującego się wysokim stopniem jednorodności mikrostruktury, wykazującego równomierny rozmiar ziarna w całej jego objętości determinuje osiągnięcie przez odlewany detal wymaganej trwałości zmęczeniowej.
- Zastosowanie odpowiednich parametrów odlewania (temperatury zalania, temperatury formy, dodatku modyfikatora) istotnie wpływa na własności fizyczne i mechaniczne odlewów ze stopu ŻS6U-WI.
- Parametry obróbki cieplnej, tj. przesycania i starzenia odlanych detali ze stopu ŻS6U-WI powinny być opracowywane na podstawie badań kalorymetrycznych (np. różnicowej analizy cieplnej DTA).
- Zastosowanie zbyt niskiej temperatury przesycania stopu ŻS6U-WI (1210°C) nie pozwala na wytworzenie mikrostruktury charakteryzującej się wymaganą objętością względną wtórnych, drobnych, kubicznych wydzieleni fazy γ' .
- Niezgodna z wymaganiami lotniczymi niejednorodna mikrostruktura negatywnie wpływa na wytrzymałość zmęczeniową odlewów ze stopu ŻS6U-WI.
- Ciśnienie czynnika roboczego oraz czas obróbki strumieniowo-ścierniej (kulowania) istotnie wpływa na wartość wytrzymałości zmęczeniowej odlewów ze stopu ŻS6U-WI.
- Prowadzenie procesu kulowania przy zastosowaniu zbyt dużego ciśnienia czynnika roboczego (powyżej 3 atm) lub zbyt długiego czasu ma wpływ na zmiany w mikrostrukturze warstwy wierzchniej w odlewach łopatek ze stopu ŻS6U-WI, co decyduje o ich trwałości zmęczeniowej.
- Usunięcie tzw. białej warstwy powstałej w czasie prowadzenia procesów obróbki mechanicznej możliwe jest poprzez wykonanie polerowania odkształconej powierzchni odlewów ze stopu ŻS6U-WI.
- Zastosowanie procesu kulowania oraz procesów obróbki mechanicznej nie ma znaczącego wpływu na twardość mierzoną na powierzchni odlewów łopatek ze stopu ŻS6U-WI.

V. BIBLIOGRAFIA.

Literatura:

- [1] Golewski P., *Obciążenia cieplno-mechaniczne łopatek silników turbinowych z ceramicznymi powłokami ochronnymi*. Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 2015.
- [2] Tomczak A., *Influence of casting parameters on fatigue properties of the ZS6U-WI alloy*, Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej, 302, Mechanika 93, RUTMech, t. XXXVIII, z. 93 (2021), s. 53-64.
- [3] Pirowski Z., Uhl W., Wodnicki J., Andrzej Gwiżdż, Krzysztof Jaśkowiec, *Wpływ obróbki cieplnej na strukturę stopu typu inconel 740*. Instytutu Odlewnictwa, rok 2011, zeszyt 2., TOM LI.
- [4] Dvirna O., *Wpływ stosowanych technologii obróbki powierzchni zamka tarczy sprężarki i turbiny gazowej*, Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej 298, Mechanika 90, RUMech, t. XXXV, z. 90 (4/18), październik-grudzień 2018, s. 433-440.
- [5] Grodzimirski J., *Nowe Technologie Lotniczych Silników Turbinowych*, Prace Instytutu Lotnictwa 213, s. 22-36, Warszawa 2011.
- [6] Błachnio J., Dzięgieloski W., Kułaszka A., Zadasa D., *Wpływ czynników eksploatacyjnych na stan żaroodpornej powłoki łopatek turbiny gazowej*.
- [7] Gopala Krishna M.S., Pandey M.C., *On the tensile creep behaviour of a directionally-solidified Ni₃Al – based alloy*. Defene Meallurgical Research Laboraory., P.O. Kanchangbagh, hyderabad 500 258 India.
- [8] Harris K., Erikson G.L., Schwer R.R., Cannon-Muskegon Corporation., *Directionally Solidified and Single-Crystal Superalloys*.
- [9] Cieśla M., Binczyk F., Mańka M., Fidziński R. *The Influence of Macrostructure of Nickel-based Superalloys IN713C and MAR 247 on Characteristics of High-temperature Creep*. Archives of Foundry Engineering, ISSN (1897-3310) Volume 14, issue 4/2014.
- [10] Wee Sungkuk., Do Jeonghyeon, Kim Kyomin., Lee Changho., Seok Changsung., Choi Baig-Gyu, Choi Yoonsuk, Kim Woochul. *Review on Mechanical Thermal Properties of Superalloys and Thermal Barrier Coating Used in Gas Turbines*. Applied Sciences, MDPI.
- [11] Przeliorz R., Piętkowski J., *Thermophysical properties of nickel-based cast superalloys*. ISSN 0543-5846, METABK 54(3) 543-546 (2015).
- [12] Esin-Ern, Koo Chun-Hao. *Characteristic and mechanical properties of Polycrystalline CM 247 LC Superalloy casting*. Material Transation, vol. 45. No. 2 (2004) pp. 562 to 568.
- [13] Cieśla M., Mańka M., Binczyk F., Gradoń P., *Creep behaviour of modified MAR-247 superalloy*. Arch Metall Mater, vol. 61 (2016) No 2. P. 701-704.
- [14] Kozakiewicz A., Kachel S., Kozakiweicz K., *Budowa modelu łopatki turbiny wysokiego ciśnienia Lotniczego Silnika Turbinowego*, Mechanika w Lotnictwie, ML-XIX, 2020, <https://doi.org/10.15632/ML2020/95-108>.
- [15] Szczepanowski A., Szymczak J., *Uszkodzenia cieplne Lotniczych Silników Turbinowych*. Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Prace Naukowe ITWL, Zeszyt 38, s. 21-32, Warszawa 2016.

- [16] Godzimierski J., *Nowe technologie Lotniczych Silników Turbinowych. Prace Instytutu Lotnictwa.* 213, s. 22-36, Warszawa 2011.
- [17] Błachnio J., Dziegielewski W., Kułaczka A., Zadasa D. *Wpływ Czynn timerów Eksploatacyjnych na stan żaroodpornej powłoki Łopatek Turbiny Gazowej.* Studies&Proceeding of Polish Association for Knowledge Management, nr 68, 2014.
- [18] Gancarczyk K., Albrecht R., Olesch C., Kubiak K., Sieniawski J. *Sposób oceny doskonałości struktury krystalicznej monokrystalicznych odlewów łopatek z nadstopów niklu CMSX-4.* Inżynieria Materiałowa 6 (208) (2015) 356-362.
- [19] Grawoński Z., Łażewski R. *Wpływ synergizmu obróbki cieplno-chemicznej i ubytkowej na wytrzymałość zmęczeniową stykową rolek łożyskowych.* Inżynieria Materiałowa, nr 4, 2011.
- [20] Przeliorz R., Piątkowski J., *Application of DSC Method in Studies on Phase Transitions of Ni Superalloys.* Archives of Foundry Engineering, Volume 17, Issue 4/2017, s. 133-136.
- [21] Nowotnik A., Rokicki P., Mrówka-Nowotnik G., Sieniawski J. *Dynamic precipitation of nickel-based superalloys undergoing severe deformation below the solvus temperature.* Paper presented at "XV International Conference on Electron Microscopy", 15-18 September 2014, Cracow, Poland. Department of Material Science, Rzeszów University of Technology, Rzeszów, Poland.
- [22] Pirowski Z., Uhl W., Wodnicki J., Gwiżdż A., Jaśkowiec K., *Wpływ obróbki cieplnej na strukturę stopu typu inconel 740.* Prace Instytutu Odlewnictwa, Tom LI, Zeszyt 2, 2011.
- [23] Nowotnik A., Rokicki P., Pędrak P., Kotowski S., Sieniawski J., Mrówka-Nowotnik G. *Mechanical aspects of plastic deformation of nickel based superalloy.* Key Engineering Material Vols. 592-593 (2014) pp. 724-727.
- [24] Zalecki W., Łapaczyński Z., Rońda J., Gnot A. *Charakterystyki wysokotemperaturowe stopów Inconel 625 i 718.* Prace IMŻ 3, 2013.
- [25] Godzimierski J., *Nowe Technologie Lotniczych Silników Turbinowych.* Prace Instytutu Lotnictwa, 213, s. 22-36, Warszawa 2011.
- [26] Welkens T., *Odlewnictwo, rozdz. IV. Stopy o specjalnym zastosowaniu.,* Poradnik Inżyniera, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- [27] Burek J., Buk J., Płodzień M., Turek P., *Wpływ strategii wycinania elektroerozyjnego na dokładność zamka łopatki wirnika.* Aparatura Badawcza i Dydaktyczna, Politechnika Rzeszowska, Katedra technik wytwarzania i automatyzacji.
- [28] Godzimierski J., *Nowe technologie lotniczych silników turbinowych,* Prace Instytutu Lotnictwa 213, s. 22-36, Warszawa 2011.
- [29] Reed C.R.: *The superalloys: Fundamentals and applications.* Cambridge University Press, Cambridge 2006.
- [30] Sieniawski J.: *Kryteria i sposoby oceny materiałów na elementy lotniczych silników turbinowych.* Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1995.
- [31] Sims C. T.: *A history of superalloy metallurgy for superalloy metallurgist.* Superalloys, The Mineral Metals and Materials Society, (1984) 399-419.

- [32] Dubiel B.: *Zmiany mikrostruktury podczas pelzania monokrystalicznych nadstopów niklu*. Wydawnictwa AGH, Kraków 2011.
- [33] Gancarczyk K., Gradzik A., Sieniawski J.: *Wpływ doskonałości struktury monokryształów nadstopu niklu na ich wytrzymałość na pelzanie*. Hutnik, Wiadomości Hutnicze, 83 (2016) 10, 449-451.
- [34] Szeliga D., *Effect of Processing Parameters and Shape of Blade on the Solidification of Single-Crystal CMSX-4 Ni-Based Superalloy*. Metallurgical and Materials Transactions B, 49 (2018) 5, 2250-2570.
- [35] Blicharski M., *Inżynieria powierzchni*. Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa 2009.
- [36] Szolwinski M. P., Farris T. N.: *Mechanics of fretting fatigue crack formation*. Wear, 198 (1998) 1-2, 93-107.
- [37] J. W. Wyrzykowski, E. Pleszakow, J. Sieniawski: *Odształcanie i pęknięcie metali*, Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa (1999).
- [38] Dvirna O., Shumilov A., *Podnoszenie jakości tarcz turbiny gazowej poprzez udoskonalenie technologii ich obróbki*. Technologiczne Centrum, 15 (2014) 4-8].
- [39] Witoś M., *Zwiększenie żywotności silników turbinowych poprzez aktywne diagnozowanie i sterowanie*. Prace Naukowe ITWL, zeszyt 29, 2011, s. 1-324, ISSN 1234-3544.
- [40] Kozakiewicz A., Józniak S., Józwiak P., Kachel S. *Materiałowe tendencje rozwojowe łopatek turbiny silników lotniczych na przykładzie DTSO RD-33*. Mechanika w lotnictwie, ML-XIX 2020/<https://doi.org/10.15632/ML2020/75-93>.
- [41] Pirowski Z., Uhl w., Wodnicki J., Gwiżdż A., Jaśkowiec K. *Wpływ obróbki cieplnej na strukturę stopu typu inconel 740*. Instytut Odlewnictwa, Prace instytutu odlewnictwa. Tol LI, rok 2011, zeszyt 2.
- [42] Sińczak J., Łukaszek-Solek A., Bednarek S., Chyła P. *Wytwarzanie łopatek turbiny metodami przeróbki plastycznej – analiza numeryczna*. Mechanik, nr 8-9/2010.
- [43] Gradzik A., *Kształtowanie mikrostruktury i własności użytkowych warstw ochronnych C-Co-Cr-W i WC-Ni-Cr-Co-Ta-Al. na podłożu nadstopu Inconel 738LC wytworzonych wiązką promieniowania laserowego*. Rozprawa doktorska. Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Rzeszów 2020.
- [44] Kobiela K., *Opracowani technologii addytywnej obróbki wiązką elektronów stopu Ti-55511 (Ti-5Al-5V-5Mo-1Cr-1Fe)*. Rozprawa doktorska. Politechnika Wrocławka, Wrocław 2022.
- [45] Albrecht R., *Defekty strukturalne oraz ich związek z krystalizacją monokrystalicznych łopatek silników lotniczych*. Rozprawa doktorska. Uniwersytet Śląski. Katowice 2017.
- [46] Witoś M., *Zwiększenie żywotności silników turbinowych poprzez aktywne diagnozowanie i sterowanie*. Praca doktorska. Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa 2010.
- [47] Roger C. *The Superalloys Fundamentals and Applications*. Cambridge University Press, New York, 2006.

- [48] Blaine Geddes, Hugo Leon, Xiao Huang., *Superalloys Alloying and Performance*. ASM International, USA, 2010.
- [49] M. Gell, D. N. Duhal and A. F. Giamei, *The Development of Single Crystal Superalloy Turbine Blades*. Fourth International Symposium of Superalloys, 1980, s. 205-214.
- [50] Jabłoński S., *Mały poradnik hartownika*. Wydawnictwo Naukowo- Techniczne, Warszawa.
- [51] Bathias C. (2003), *An understading of very high cycle fatigue of metals*. Int. Journ. Fatigue Nr 25, pp. 1101-1107.
- [52] Beuseroy P., Lengellé R.(2007): Nonintrusive turbomachine blade vibration measurement system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21, Issue 4, pp. 1717-1738.
- [53] Blicharski M. (2004): *Inżynieria Materiałowa. Stal*. WNT.
- [54] Blicharski M. (2001): *Wstęp do Inżynierii Materiałowej*. WNT.
- [55] Błachnio J. (1994): *Badania porównawcze naprężeń własnych metodą rentgenowską w łopatkach sprężarki osiowej*. Seminarium nt. „Metodyczne problemy pomiarów naprężeń własnych”, Poznań, s. 39-44.
- [56] Błachnio J., Dutkiewicz J. (1998): *Effect of fatigue test on Barkhausen noise level and microstructure of compressor blade*. The 15th Physical Metallurgy and Materials Science Conference, Kraków – Krynica, pp. 388-391.
- [57] Boguslayev V.A., Oboden N.J., Ogorodnikov D.A. (1992): *Residual stresses in compressor blades*. Residual stresses III, Science and Technology, London and New York, pp. 865-868.
- [58] Bovishanskii K.N. et.al. (2000). *A method for continously monitoring the vibrational state of the rotating blades of turbo-machines*. Thermal engineering” (Teploenegetika), Vol. 47, No. 5, pp. 427-434.
- [59] Brüel&Kjær (1988): *Structural Testing. Part 1 - Mechanical Mobility Measurements. Part 2 – Modal Analysis and Simulation*. 44. Brüel&Kjær.
- [60] Buch A. (1964). *Zagadnienia wytrzymałości zmęczeniowej*. PWN, Warszawa.
- [61] Bucior J. (1999). *Kształtowanie niezawodności łopatek wirnika sprężarki lotniczych silników turbinowych metodami technologicznymi*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów.
- [62] Carrington I.B., Wright J. R., Cooper J. E., Dimitriadis G. (2001). *A comparison of blade tip timing data analysis methods*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. Part G: Journal of Aerospace Engineering, Volume 215, Number 5, pp. 301-312.
- [63] Dzygadło Zb., Łyżwiński M., Otyś J., Szczeciński S., Wiatrek R. (1982). *Zespoły wirnikowe silników turbinowych*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- [64] Kłysz S. (1999). *Szacowanie trwałości wybranych materiałów i elementów konstrukcji lotniczych w zakresie rozwoju pęknięć zmęczeniowych*. Wydawnictwo ITWL, Warszawa.
- [65] Kocańda S. (1985). *Zmęczeniowe pękanie metali*. WNT, Warszawa.

- [66] Kowalski M., Szczepanik R., Witoś M., Podskarbi S. (2000): *Condition-based maintenance of turbojet engines based on compressor blade vibration measurement method*. Symposium on Condition-Based Maintenance for Highly Engineered Systems, 25-27.09. 2000, Pisa, Italy, Università Degli Studi di Pisa.
- [67] Lewitowicz J. (2006). *Podstawy eksploatacji statków powietrznych*. Tom 3. Systemy eksploatacji statków powietrznych. Wydawnictwo ITWL, Warszawa.
- [68] Indstedt P., Rokicki E., Borowczyk H., Majewski P. (2009): *Ocena stanu technicznego łopatki maszyny wirnikowej w procesie użytkowania z eliminacją sygnału otoczenia*. Prace Naukowe ITWL, Zeszyt 25, s. 5-14.
- [69] Macha E. (1979). *Modele matematyczne trwałości zmęczeniowej materiałów w warunkach losowego złożonego stanu naprężeń*. Prace Naukowe Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, Nr 41, Monografie nr 13, Wrocław.
- [70] Merrington G. (1988). *Fault Diagnosis of Gas Turbine Engine From Transient Data*. ASME 88-GT-209.
- [71] Morawiecki M., Sadok L., Wosiek L. (1986). *Przeróbka plastyczna. Podstaw teoretyczne*. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice.
- [72] Neimitz A., Dzioba I., Graba M., Okrajni J. (2008). *Ocena wytrzymałości, trwałości i bezpieczeństwa pracy elementów konstrukcyjnych zawierających defekty*. Politechnika Świętokrzyska, Kielce.
- [73] Trelka M., *Monitorowanie uszkodzeń zespołu napędowego w zmiennych warunkach działania samolotu MiG-29*. Rozprawa doktorska. Politechnika Poznańska, Poznań 2017.
- [74] Orkisz M. (red.) (2002). *Podstawy doboru turbinowych silników odrzutowych do płatowca*. Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Nr 18, ILot, Warszawa.
- [75] Pawlak W., Wiklik K., Morawski J. (1996). *Synteza i badanie układów sterowania lotniczych silników turbinowych metodami symulacji komputerowej*. Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Nr 4, ILot, Warszawa.
- [76] Przysowa R. (2007). *Ocen stanu technicznego zespołu wirnikowego turbinowego silnika lotniczego z wykorzystaniem cyfrowych metod przetwarzania sygnału pomiarowego pochodzących od łopatek*. Rozprawa doktorska, ITWL Warszawa.
- [77] Sabak R. (2002). *Ocena uszkodzeń łopatek wirnikowych silników turbinowych na podstawie zmian ich częstotliwości drgań własnych*. Rozprawa doktorska, ITWL, Warszawa.
- [78] Shaniavski A.A. (2007): *Modeling of fatigue cracking of metals. Synergetics for aviation*. Publishing House of Scientific and Technical Literature “Monography”, Ufa (ros.).
- [79] Stamatias A., Mathioudakis K., Papailiou K. (1990). *Gas turbine component fault identification by means of adaptive performance modeling*. ASME Paper 90GT-376.
- [80] Szala J. (1998). *Hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych*. ATR, Bydgoszcz.
- [81] Szczeciński S., Balicki Wł. (2001). *Diagnozowanie lotniczych silników turbinowych*. Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Nr 15, Pilot, Warszawa.

- [82] Szczepanik R., Kudelski R. (1988). *Opracowanie i wykonanie aparatury SAD do badania drgań łopatkowych wirników silników turbinowych*. Sprawozdanie ITWL, Warszawa (niepublikowane).
- [83] Szczepanik R., Witoś M. (1993). *Wpływ procesu eksploatacji turbinowego silnika odrzutowego na żywotność łopatek wirnikowych*. VII Konferencja Naukowo-Techniczna „Przepływowe Maszyny Wirnikowe”, Rzeszów.
- [84] Szczepanik R., Witoś M. (1995). *Praktyczne możliwości oceny propagacji pęknięć zmęczeniowych wirujących łopatek sprężarki lotniczego silnika turbinowego*. Zeszyty Naukowe Mechanika Nr 57, s. 221-228, Politechnika Świętokrzyska, Kielce.
- [85] Szczepanik R., Witoś M. (2000). *Monitorowanie stanu technicznego turbinowych silników lotniczych w oparciu o metodę dyskretno-fazową i metodę portretów fazowych*. Prace Naukowe ITWL, Zeszyt nr 10, s. 119-129.
- [86] Szczepankowski A. (1999). *Diagnozowanie stanu technicznego silnika turbinowego metodą portretu fazowego prędkości obrotowej*. Rozprawa doktorska, ITWL, Warszawa.
- [87] Tomaszek H., Żurek J., Jaształ M. (2008). *Prognozowanie uszkodzeń zagrażających bezpieczeństwu lotów statków powietrznych*. Biblioteka Problemów Eksploatacji, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Eksploatacji – PIB, Radom.
- [88] Wala K., Łagoda T. (2009). *Trwałość zmęczeniowa stopów aluminium w płaszczyźnie krytycznej wyznaczonej przez ekstremum kowariancji naprężeń normalnych i stycznych*. Energetyka, Zeszyt tematyczny XIX, s. 136-138.
- [89] Wang W. (2006). *Disk Crack Detection And Diagnosis For Gas Turbine Engines*. Aerospace Conference, 2006 IEEE.
- [90] Witoś M. (1994). *Diagnozowanie stanu technicznego łopatek sprężarki turbinowego silnika spalinowego metodą bezdotykowego pomiaru drgań*. Rozprawa doktorska, ITWL Warszawa.
- [91] Witoś M. (1999). *Drgania łopatek jako symptom diagnostyczny oceny stanu technicznego silnika lotniczego*, rozdział 14, s.297-316 [w:] „Problemy badań i eksploatacji techniki lotniczej”, tom 4, Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa.
- [92] Witoś M., Olzak B. (2007). *Turbine engine health/maintenance status monitoring with use of phase-discrete method of blade vibration monitoring* [w:] Bouckaert J.F. “Tip timing and tip clearance problem in turbomachines”, VKI Lecture Series 2007-03, von Karman Institute for Fluid Dynamics.
- [93] Witoś M. (2008). *Diagnozowanie turbinowego silnika lotniczego i aktywne sterowanie procesem zmęczenia materiału na podstawie analizy drgań i własności modalnych wirujących łopatek sprężarki*. Konferencja Naukowa „Nowoczesne Technologie Systemów Uzbrojenia”, 18.09.2008 WAT, Warszawa, materiały pokonferencyjne (CD-ROM).
- [94] Bushlya V., Zhou J. M., Lenrick F., Avdovic P., Stål J-E., *Characterization of White Layer Generated when Turning Aged Inconel 718*. 1st CIRP Conference on Surface Integrity (CSI), Procedia Engineering 19, 2011, s. 60–66.
- [95] Burakowski T., Wierzchoń T., *Inżynieria powierzchni metali*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, ISBN 83-204-1812-7, Warszawa, 1995.

[96] Bosheh S. S., Mativenga P.T., *White layer formation in hard turning of H13 tool steel at high cutting speeds using CBN tooling*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 46, 2006, s. 225–233.)

[97] Chwalczuk T., *Warstwa wierzchnia stopu inconel 718 po toczeniu ze wspomaganie laserowym*. Rozprawa Doktorska. Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, Poznań 2019.

[98] Albrecht R., *Defekty strukturalne oraz ich związek z krystalizacją monokrystaliczną łopatek silników lotniczych*. Praca doktorska. Uniwersytet Śląski, Wydział Informatyki i Nauki o Materiałach. Instytut Nauki o Materiałach, Katowice, 2017.

Normy:

[99] OST-1-90126-85

[100] GOST 12344-78

[101] GOST 10145-81

[102] ASTM E8/E83

[103] PN-EN ISO 6892-1

[104] AMS 2750

[105] ASTM E663

[106] ZN-98 LR-426006

[107] GOST 1497-84