

Nieniszczący sposób określania liczby granic niskokątowych w piórze monokrystalicznej łopatki turbiny gazowej, wykonanej z nadstopu niklu

Przedmiotem wynalazku jest nieniszczący sposób określania liczby granic niskokątowych w piórze monokrystalicznej łopatki turbiny gazowej, wykonanej z nadstopu niklu, poddanej wcześniej obróbce cieplnej stanowiącej ostatni etap produkcji łopatki. Granice niskokątowe stanowią defekty struktury piór łopatek. Rozwiązanie znajduje zastosowanie zwłaszcza do łopatek silników lotniczych i generatorów energetycznych.

Najczęściej stosowanymi obecnie łopatkami wirującymi w gorącej sekcji turbin silników lotniczych czy generatorów energetycznych są łopatki monokrystaliczne wytwarzane z nadstopów niklu. Wynika to głównie z bardzo dobrej wytrzymałości na pełzanie w wysokich temperaturach tego typu materiałów. Monokrystaliczne odlewy łopatek otrzymuje się poprzez kierunkową krystalizację techniką Bridgmana. Struktura łopatek w stanie bezpośrednio po krystalizacji jest typową strukturą dendrytyczną o uporządkowanym rozkładzie przestrzennym, natomiast po obróbce cieplnej struktura się ujednorodnia chemicznie, lecz defekty dendrytyczne pozostają [R.C. Reed, *The Superalloys, Fundamentals and Applications*, Cambridge University Press, Cambridge 2006]. Skomplikowany kształt łopatek wirujących powoduje, że podczas procesu ich otrzymywania mogą tworzyć się w nich defekty struktury, między innymi w postaci bloków mozaiki z rozdzielającymi je granicami niskokątowymi. Granice te, utworzone w zamku łopatki są dziedziczone do pióra [„Subgrain boundaries in single crystal blade airfoil of aircraft engine” W. Bogdanowicz, J. Krawczyk, A. Tondos, and J. Sieniawski, *Crystal Research and Technology*, Vol. 52 (2017) p.1600372]. Defekty te mają niekorzystny wpływ na jakość całego odlewu, w szczególności jego odporność na pełzanie w wysokich temperaturach, a obróbka cieplna nie eliminuje tych defektów [„Influence of Heat Treatment on Defect Structures in Single-Crystalline Blade Roots Studied by X-ray Topography and Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy” J.Krawczyk, W. Bogdanowicz, A. Hanc-Kuczowska, A. Tondos, J. Sieniawski, *Metallurgical And Materials Transactions A* Vol 49A (2018), p.4353], mogą powodować tworzenie nowych granic niskokątowych [„Dendrite Growth in Selector-Root Area of Single Crystal CMSX-4 Turbine Blades” W. Bogdanowicz, A. Tondos, J. Krawczyk, R. Albrecht and J. Sieniawski, *Acta Physica Polonica A*, Vol. 130 (2016) p. 1107].

Łopatki, a w szczególności ich pióra, są podczas pracy poddawane ogromnym obciążeniom, nawet do kilku ton, w temperaturach zbliżonych do temperatury topnienia nadstopów. Obciążenia te powodują koncentrowanie naprężeń mechanicznych na granicach niskokątowych, co może prowadzić do inicjacji procesu pęknięcia i propagacji pęknięć. W efekcie łopatka może zostać zniszczona, co może spowodować duże niebezpieczeństwo i generować wysokie koszty. Monokrystaliczne łopatki są bardzo drogimi elementami silników i generatorów, co jest związane z kosztownym procesem ich otrzymywania techniką Bridgmana, drogim materiałem wsadowym (nadstopy), a także z drogą, złożoną obróbką cieplną oraz kosztami nanoszonych na nie powłok [„Thermal Barrier Coatings for Gas-Turbine Engine Applications” N. P. Padture, M. Gell, E. H. Jordan, Science, Vol. 296, Issue 5566 (2002) p. 280]. Z tego powodu wysoce celowym jest stosowanie w procesie produkcyjnym nieniszczących metod badań ich doskonałości strukturalnej oraz defektów. Łopatki w procesie produkcji muszą być poddawane kontroli jakości. Elementy nie spełniające kryteriów, między innymi zawierające dużą liczbę granic niskokątowych nie mogą być instalowane w silnikach i generatorach ze względu na bezpieczeństwo oraz koszty obsługi serwisowej. Dlatego też określenie liczby granic niskokątowych w końcowej części pióra jest jednym z podstawowych kroków w procesie oceny jakości monokrystalicznych łopatek turbin gazowych.

Jak dotąd nie w stanie techniki nie ujawniono nieniszczącej metody określenia liczby granic niskokątowych w piórach monokrystalicznych łopatek turbin gazowych na podstawie analizy obrazów dyfrakcyjnych Lauego otrzymanych w dwóch charakterystycznych obszarach pióra monokrystalicznych łopatek turbin otrzymanych z nadstopów niklu. Określenia liczby granic niskokątowych można obecnie dokonać metodami dyfrakcyjnej topografii rentgenowskiej lub metodą dyfraktometryczną Ω -skan mapowania powierzchni łopatek przy zastosowaniu dyfraktometru rentgenowskiego [„Omega-Scan: an X-ray tool for the characterization of crystal properties” Hans Berger, Hans-Arthur Bradaczek, Hans Bradaczek, J Mater Sci: Mater Electron (2008) 19:S351–S355]. Jednakże metody dyfrakcyjnej topografii rentgenowskiej wymagają przygotowania płaskiego zglądu metalograficznego, co wiąże się ze zniszczeniem łopatki, natomiast metoda dyfraktometryczna, pomimo iż umożliwia mapowanie całego pióra, ma małą rozdzielczość liniową (rzędu średnicy wiązki rentgenowskiej, czyli około 1 – 1,5mm) [„Determination of Crystal Orientation by X-Scan Method in Nickel-Based Single-Crystal Turbine Blades” K. Gancarczyk, R. Albrecht, H. Berger, D. Szeliga, A. Gradzik, J. Sieniawski, Metallurgical

and Materials Transactions A, vol. 48A (2017) p.5205], co uniemożliwia wykrywanie za jej pomocą niewielkich granic niskokątowych. Stąd zaistniała potrzeba opracowania efektywnego sposobu określania liczby granic niskokątowych (nawet stosunkowo niewielkich) w piórze monokrystalicznej łopatki turbiny gazowej, bez konieczności jej jednoczesnego niszczenia.

Potrzebę tą udało się zrealizować poprzez opracowanie rozwiązania według niniejszego wynalazku, który stanowi nieniszczący sposób określania liczby granic niskokątowych w piórze monokrystalicznej łopatki turbiny gazowej, wykonanej z nadstopu niklu, zwłaszcza łopatki silnika lotniczego lub generatora energetycznego, poddanej wcześniej obróbce cieplnej stanowiącej ostatni etap produkcji łopatki, polegający na odpowiednim przygotowaniu pióra łopatki do analizy, wykonaniu badań metodą dyfrakcji rentgenowskiej Lauego ze ściśle określonych obszarów geometrii pióra i badań powierzchni podstawy łopatki metodą rentgenowskiej topografii dyfrakcyjnej, oraz analizy obrazów dyfrakcyjnych Lauego i topogramów a następnie obliczeniu liczby granic niskokątowych występujących w tym piórze. Sposób według wynalazku charakteryzuje się tym, że najpierw przeprowadza się fazę przygotowawczą, w ramach której analizując geometrię pióra łopatki określa się obszar stanowiący wycinek pióra o zerowym - lub z jego małą odchyłką $\pm 0,1^\circ$ - nachyleniu jego powierzchni ($\delta = 0 \pm 0,1^\circ$) względem osi (Z) łopatki stanowiącej oś prostopadłą do płaszczyzny podstawy łopatki, następnie na tak określonym wycinku pióra ustala się lokalizację dwóch charakterystycznych punktów, z których jeden punkt (R_S) jest usytuowany w odległości od 1 do 5 mm, korzystnie 3 mm od górnego bandaża pióra, a drugi punkt (R_E) jest usytuowany na wysokości równej $\frac{1}{2}$ długości pióra z odchyłką ± 1 mm, ponadto przy wykorzystaniu wycinka o zerowym - lub z jego małą odchyłką $\pm 0,1^\circ$ - nachyleniu jego powierzchni ($\delta = 0 \pm 0,1^\circ$) względem osi (Z) łopatki oraz cięciwy (BL2*) leżącej na wysokości punktu (R_E) umownie dzieli się pióro na cztery obszary (ET), (EL), (ST) i (SL), po czym znaną metodą dokonuje się pomiaru kątów (δ) nachylenia tych obszarów względem osi (Z), oraz pomiaru kątów (ε) obrotu tych obszarów względem cięciwy (BL1*) leżącej na wysokości punktu (R_S) i cięciwy (BL2*), a główną fazę sposobu według wynalazku realizuje się w kilku następujących po sobie etapach:

- w pierwszym etapie oczyszcza się pióro łopatki z zanieczyszczeń, zwłaszcza z pozostałości formy odlewniczej, poprzez obróbkę strumieniowo-ścierną z użyciem sypkiego ścierniwa o twardości nie mniejszej niż 7 w skali Mohs'a i średniej gradacji ziarna nie wyższej niż 0,2 mm; stosowanie ziaren o większej gradacji mogłyby spowodować

uszkodzenie powierzchni pióra, wprowadzić naprężenia skutkujące niemożliwością otrzymania czytelnych obrazów dyfrakcyjnych Lauego,

- w drugim etapie przeprowadza się proces elektrolitycznego polerowania powierzchni łopatki w roztworze kwasu nadchlorowego w alkoholu lub mieszaninie alkoholi, w temperaturze od -45°C do -55°C , korzystnie -50°C , przy napięciu od 10 do 20 V, korzystnie 18 V, przez czas od 4 do 6 minut, korzystnie 5 minut; w przypadku krótszego czasu nie doszłoby do wytworzenia odpowiedniej jakości zglądu, to jest powierzchni lustrzanej o niewielkiej chropowatości,

- w trzecim etapie na pióro łopatki kieruje się wiązkę promieniowania rentgenowskiego polichromatycznego emitowanego przez źródło RTG o anodach Cu lub Mo lub najkorzystniej Co, o średnicy wiązki nie większej niż 1,5 mm, i rejestruje się dwa obrazy dyfrakcyjne Lauego z dwóch charakterystycznych punktów (R_S) oraz (R_E),

- w czwartym etapie, z wykorzystaniem znanego oprogramowania do analizy Lauegramów, dokonuje się obrotu otrzymanych obrazów dyfrakcyjnych Lauego o kąt $90^{\circ} \pm 1^{\circ}$ względem cięciwy łączącej krawędź natarcia z krawędzią spływu pióra, to jest cięciwy (BL1*) dla punktu (R_S) i (BL2*) dla punktu (R_E), a następnie dokonuje się dwóch kolejnych obrotów każdego z obrazów dyfrakcyjnych względem osi (Z) o kąty typu (ϵ), odpowiadające obszarom (ET) i (EL) oraz (ST) i (SL), otrzymując w efekcie cztery obrócone Lauegramy – po jednym dla każdego z czterech obszarów,

- w piątym etapie z każdego obróconego obrazu dyfrakcyjnego Lauego określa się dwie składowe orientacji wektora [001] rdzeni dendrytów α_M oraz α_N dla każdego z obszarów (ET), (EL), (ST) i (SL), w taki sposób, że składowe te odczytuje się z rzutu wektora [001] na płaszczyznę odniesienia, która jest równoległa do płaszczyzny obrazu dyfrakcyjnego Lauego,

- w szóstym etapie dokonuje się pomiaru kąta (β) – będącego kątem pomiędzy prostą równoległą do cięciwy (BL*) i przechodzącą przez środek obrazu dyfrakcyjnego Lauego oraz prostą przechodzącą przez plamkę refleksu 001 oraz środek obrazu dyfrakcyjnego Lauego - z każdego z finalnie obróconych obrazów, odpowiednio dla każdego z czterech obszarów pióra (ET), (EL), (ST) i (SL), uwzględniając jego znak, związany z umiejscowieniem plamki refleksu 001 względem osi (M) i (N) układu współrzędnych na obrazie,

- w siódmym etapie na podstawie zależności opisanych wzorami (1) i (2):

$$\alpha^* = \sqrt{\alpha_M^2 + (\alpha_N \pm \delta)^2} \quad (\text{wzór 1})$$

$$\beta^* = \beta \pm \varepsilon \quad (\text{wzór 2})$$

określa się kąt (α^*) nachylenia wektora [001] względem krawędzi spływu lub krawędzi natarcia pióra oraz kąt (β^*) obrotu rzutu wektora [001] na płaszczyznę bazową względem odcinków linii wygięcia (CL - camber line) pióra odpowiednich dla każdego z czterech obszarów pióra: (ET), (EL), (ST) oraz (SL),

- w ósmym etapie oblicza się cząstkową liczbę granic niskokątowych dla każdego z czterech obszarów (ET), (EL), (ST) oraz (SL) według wzoru (3):

$$N_{\text{cząstkowa}} = \frac{L}{D} \tan \alpha^* \cdot |\sin \beta^*| \quad (\text{wzór 3}),$$

gdzie L oznacza długość pióra, D – grubość pióra w danym obszarze (ET), (EL), (ST), (SL),

- w dziewiątym etapie, według wzoru (4):

$$N = N_{ST} + N_{ET} + N_{SL} + N_{EL} + N_Z \quad (\text{wzór 4})$$

określa się liczbę granic niskokątowych dla całego pióra łopatki sumując liczbę granic z obszarów (ET), (EL), (ST) oraz (SL) i dodając liczbę granic N_Z dziedziczonych z zamka łopatki. Zamek łopatki krystalizuje wcześniej od pióra, a proces dziedziczenia granic N_Z jest znany i opisany na przykład w publikacji: Subgrain boundaries in single crystal blade airfoil of aircraft engine, W. Bogdanowicz, J. Krawczyk, A. Tondos, and J. Sieniawski, Crystal Research and Technology, Vol. 52 (2017) p.1600372.

Korzystnie, w etapie przygotowawczym analizę geometrii pióra łopatki dokonuje się z wykorzystaniem skanera 3D.

Korzystnie, w pierwszym etapie fazy głównej jako ścierniwo stosuje się elektrokorund szlachetny.

Korzystnie, drugi etap fazy głównej, to jest etap elektrolitycznego polerowania powierzchni pióra łopatki prowadzi się w roztworze, w którego skład wchodzi metanol (CH_3OH), 2-butanol ($\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{CH}_3$) i kwas nadchlorowy (HClO_4) o stężeniu kwasu 60%, najkorzystniej w roztworze, w którym na 35 cm^3 60%-owego kwasu nadchlorowego (HClO_4) przypada 500 cm^3 metanolu (CH_3OH) i 65 cm^3 2-butanolu ($\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{CH}_3$).

Korzystnie, liczbę granic niskokątowych N_Z powstałych w zamku łopatki w początkowym procesie krystalizacji łopatki i dziedziczonych do pióra łopatki określa się w taki sposób, że z wypolerowanej elektrolitycznie powierzchni podstawy zamka łopatki otrzymuje się topogram rentgenowski refleksu 002 lub 113 - przy zastosowaniu rozbieżnej wiązki rentgenowskiej promieniowania Cu lub Co i z oscylacją detektora wraz z próbką

- a liczbę granic niskokątowych N_Z oblicza się na podstawie rozkładu kontrastu tego topogramu. Granice niskokątowe są uwidocznione na topogramach w charakterystyczny sposób – podwyższeniem, obniżeniem albo brakiem kontrastu. Na tej podstawie obserwując topogram zlicza się ilość tych niejednorodności, rozdzielających obszary jednorodne czyli pozbawione defektów.

Do zalet sposobu według wynalazku należy przede wszystkim brak konieczności niszczenia powstałych półwyrobów w celu dokonania analizy liczby granic niskokątowych, powstałych podczas krystalizacji w piórze łopatki. Rozwiązanie skutkuje ograniczeniem kosztów przeprowadzania badań, w porównaniu do rozwiązań, w których koniecznością jest odpowiednie wycinanie i przygotowywanie próbek, skutkujące wyeliminowaniem elementu z procesu produkcyjnego. Stosunkowo prosta i powtarzalna procedura umożliwia zautomatyzowanie części procesu, skracając czas realizacji.

Sposób według wynalazku zostanie bliżej objaśniony na poniższym przykładzie oraz na rysunku, na którym fig. 1 przedstawia ilustrację łopatki turbiny z zaznaczonym podziałem łopatki na pióro (1) oraz zamek (2), podziałem pióra na obszary ET, ST, EL, SL oraz ich położenie, obszar stałego kąta nachylenia powierzchni bocznych pióra do osi Z łopatki ($\delta = 0$), a także cięciwy łączące na różnej długości łopatki (L) krawędź natarcia (LE) i krawędź spływu (TE) oraz podstawę łopatki (P); fig. 2 przedstawia ilustrację łopatki turbiny z zaznaczonymi kątami nachylenia powierzchni ssącej (3) i tłoczącej (4) w stosunku do osi Z łopatki w pobliżu krawędzi natarcia (LE) i spływu (TE); fig. 3 - schemat ułożenia modelowych obszarów pióra ET, EL, ST i SL z charakterystycznymi parametrami geometrii pióra, gdzie: BL1*, BL2* – cięciwy łączące krawędź natarcia i spływu na poszczególnych przekrojach pióra, δ_{ET} , δ_{ST} , δ_{EL} , δ_{SL} – kąty nachylenia krawędzi natarcia i spływu względem osi Z, ϵ_{EL} i ϵ_{ET} – kąty krzywizny pióra opisujące obrót powierzchni pióra; fig. 4 - schemat otrzymywania obrazu dyfrakcyjnego Lauego w punkcie R_E i jego obrotu wraz z przykładowym obrazem dyfrakcyjnym Lauego, gdzie: r – refleks 001, CL – linia krzywizny pióra, BL, BL* – cięciwa przekroju pióra, δ_{EL} , δ_{ET} – kąty nachylenia krawędzi natarcia (LE) i spływu (TE) względem osi Z, ϵ_{EL} , ϵ_{ET} – kąty krzywizny pióra opisujące obrót powierzchni pióra względem BL, α_M , α_N – składowe orientacji wektora [001] rdzeni dendrytów, IB, DB – wiązka pierwotna i dyfrakcyjna promieniowania rentgenowskiego, IP – detektor promieniowania rentgenowskiego, natomiast fig. 5 a) – obraz dyfrakcyjny

Lauego otrzymany dla punktu zlokalizowanego na obszarze ET łopatki, a fig. 5 b) - obraz pokazany na fig. 5 a) ale obrócony o 90° względem cięciwy BL*.

Przykład

Łopatkę do badania poddano analizie geometrii jej pióra z wykorzystaniem skanera 3D w wyniku czego określono obszar stanowiący wycinek pióra o zerowym nachyleniu jego powierzchni ($\delta = 0 \pm 0,1^\circ$) względem osi (Z) łopatki stanowiącej oś prostopadłą do płaszczyzny podstawy łopatki, następnie na tak określonym wycinku pióra ustalono lokalizację dwóch punktów, z których jeden punkt (R_S) był usytuowany w odległości 3 mm od górnego bandaża pióra, a drugi punkt (R_E) był usytuowany na wysokości równej $\frac{1}{2}$ długości pióra wynoszącej $L=30$ mm, to jest w odległości 15 mm od górnego bandaża pióra. Następnie przy wykorzystaniu wycinka $\delta = 0$ oraz cięciwy (BL2*) leżącej na wysokości punktu (R_E) wyznaczono cztery obszary (ET), (EL), (ST) i (SL) i dokonano w nich pomiaru kątów (δ) nachylenia tych obszarów względem osi (Z), oraz pomiaru kątów (ϵ) obrotu tych obszarów względem cięciwy (BL1*) leżącej na wysokości punktu (R_S) i cięciwy (BL2*), a także ich długość $L^* = 15$ mm i grubość D (dla obszarów ET i ST – $D=1,2$ mm, dla obszarów EL i SL – $D=2$ mm). Kąty określone dla poszczególnych obszarów wynosiły: $\delta_{ET}=1.5^\circ$, $\epsilon_{ET}=40.0^\circ$; $\delta_{ST}=4.5^\circ$, $\epsilon_{ST}=48.0^\circ$; $\delta_{EL}=11.0^\circ$, $\epsilon_{EL}=20.0^\circ$; $\delta_{SL}=7.5^\circ$, $\epsilon_{SL}=45.0^\circ$. Następnie przygotowano powierzchnię pióra do badań rentgenowskich poprzez jej oczyszczenie z zanieczyszczeń, zwłaszcza z pozostałości formy odlewniczej, stosując obróbkę strumieniowo-ścierną z użyciem elektrokorundu szlachetnego o twardości 9 w skali Mosh'a i średniej gradacji ziarna 0,2 mm, oraz poprzez polerowanie elektrolityczne powierzchni łopatki w temperaturze -50°C , przy napięciu 18 V, przez czas 5 minut, w roztworze w którym na 35 cm^3 60%-owego kwasu nadchlorowego (HClO_4) przypadało 500 cm^3 metanolu (CH_3OH) i 65 cm^3 2-butanolu ($\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{CH}_3$). Następnie pióro łopatki naświetlano w wybranych wcześniej punktach R_S i R_E , wiązką białego promieniowania rentgenowskiego Co o średnicy 1 mm, przez co uzyskano dwa obrazy dyfrakcyjne Lauego, po jednym z każdego punktu. W kolejnym etapie dokonano obrotu każdego z otrzymanych obrazów dyfrakcyjnych Lauego o kąt 90° względem cięciwy łączącej krawędź natarcia z krawędzią splywu pióra, to jest cięciwy (BL1*) dla punktu (R_S) i (BL2*) dla punktu (R_E) (fig. 3) z wykorzystaniem ogólnodostępnego oprogramowania QLaue do edycji Lauegramów, np. dla obszaru (ET) obrócony obraz dyfrakcyjny Lauego przedstawiono na fig. 5b. Przekształcone wcześniej obrazy dyfrakcyjne Lauego obrócono

kolejno względem osi (Z) o kąty ε_{EL} i ε_{ET} oraz ε_{SL} i ε_{ST} , odpowiednio dla poszczególnych obszarów i poziomów cięciw, z których otrzymano dyfrakcję Lauego (fig. 4).

Dla każdego z finalnie obróconych obrazów dyfrakcyjnych Lauego określono dwie składowe orientacji wektora [001] rdzeni dendrytów α_M oraz α_N (fig. 1b) dla każdego z obszarów (ET), (EL), (ST) i (SL) w taki sposób, że składowe te odczytano z rzutu wektora [001] na płaszczyznę odniesienia, która jest równoległa do płaszczyzny obrazu dyfrakcyjnego Lauego, a także kąt β . Dla obszaru ET kąt $\alpha_M = 6.0^\circ$, kąt $\alpha_N = 8.0^\circ$, a kąt $\beta = -31^\circ$ („-” ze względu na umiejscowienie refleksu 001). Dla pozostałych obszarów kąty wynosiły: dla obszaru EL $\alpha_M = 9.5^\circ$, kąt $\alpha_N = 3.5^\circ$, a kąt $\beta = -31^\circ$, dla obszaru ST $\alpha_M = 5.5^\circ$, kąt $\alpha_N = 11.5^\circ$, a kąt $\beta = -31^\circ$, dla obszaru SL $\alpha_M = 2.5^\circ$, kąt $\alpha_N = 7.5^\circ$, a kąt $\beta = -31^\circ$. Znając kąty β obliczono kąt β^* dla każdego z obszarów: ET ($\beta^* = \beta - \varepsilon_{ET} = -31 - 40 = -71^\circ$), EL ($\beta^* = \beta - \varepsilon_{EL} = -31 + 20 = -11^\circ$), ST ($\beta^* = \beta - \varepsilon_{ST} = -31 - 48 = -79^\circ$), SL ($\beta^* = \beta - \varepsilon_{SL} = -31 + 45 = 14^\circ$). W kolejnym etapie dla czterech obszarów pióra ET, EL, ST oraz SL określono kąt α^* nachylenia wektora [001] względem krawędzi spływu lub krawędzi natarcia korzystając ze wzoru (1):

$$\text{dla obszaru ET} \quad (\alpha^*) = \sqrt{\alpha_M^2 + \gamma_{ET}^2} = \sqrt{\alpha_M^2 + (\alpha_N - \delta_{ET})^2} = 11^\circ$$

$$\text{dla obszaru EL} \quad (\alpha^*) = \sqrt{\alpha_M^2 + \gamma_{EL}^2} = \sqrt{\alpha_M^2 + (\alpha_N + \delta_{EL})^2} = 17^\circ$$

$$\text{dla obszaru ST} \quad (\alpha^*) = \sqrt{\alpha_M^2 + \gamma_{ST}^2} = \sqrt{\alpha_M^2 + (\alpha_N - \delta_{ST})^2} = 6^\circ$$

$$\text{dla obszaru SL} \quad (\alpha^*) = \sqrt{\alpha_M^2 + \gamma_{SL}^2} = \sqrt{\alpha_M^2 + (\alpha_N \pm \delta_{SL})^2} = 2,5^\circ$$

Następnie uwzględniając powyższe dane i korzystając ze wzoru (3) obliczono liczbę cząstkową granic niskokątowych w poszczególnych obszarach pióra:

$$\text{dla obszaru ET} \quad N_{ET} = \frac{L^*}{D} \tan \alpha^* \cdot |\sin \beta^*| = 2,29 \approx 2$$

$$\text{dla obszaru EL} \quad N_{EL} = \frac{L^*}{D} \tan \alpha^* \cdot |\sin \beta^*| = 0,43 \approx 0$$

$$\text{dla obszaru ST} \quad N_{ST} = \frac{L^*}{D} \tan \alpha^* \cdot |\sin \beta^*| = 1,29 \approx 1$$

$$\text{dla obszaru SL} \quad N_{SL} = \frac{L^*}{D} \tan \alpha^* \cdot |\sin \beta^*| = 0,09 \approx 0$$

Finalnie, uwzględniając powyższe dane obliczono liczbę granic niskokątowych w piórze łopatki poprzez sumowanie liczby granic dla poszczególnych obszarów i dodając dwie granice dziedziczone z zamka łopatki $N_Z = 2$, zidentyfikowane z topogramu

rentgenowskiego otrzymanego z podstawy łopatki. Na topogramie tym widoczne były dwa liniowe obszary braku kontrastu – odzwierciedlające granice niskokątowe, rozdzielające trzy obszary o jednolitym kontraście – odzwierciedlające bloki krystaliczne.

$$N = N_{ST} + N_{ET} + N_{SL} + N_{EL} + N_Z = 1 + 2 + 0 + 0 + 2 = 5$$

Skomplikowany kształt, skład chemiczny oraz technologia produkcji elementów konstrukcyjnych w postaci łopatek wirujących powoduje, że podczas procesu krystalizacji w obszarach o skokowej zmianie geometrii mogą być generowane zaburzenia struktury dendrytycznej determinujące powstawanie defektów takich jak granice niskokątowe. Niezbędna jest zatem kontrola jakości otrzymanych elementów pod kątem liczby wspomnianych defektów oraz dalszy rozwój technologii otrzymywania, bazujący na analizie elementów prototypowych. W obu przypadkach przedstawiony sposób na określenie liczby występujących w piórze granic niskokątowych przyspiesza i ułatwia prowadzenie badań związanych z kontrolą jakości. Może także obniżyć koszty tych badań. Sposób przedstawiony w zgłoszeniu może znaleźć zastosowanie w przemyśle lotniczym, energetycznym lub motoryzacyjnym, w laboratoriach kontroli jakości i pracowniach konstruktorskich, wszędzie tam, gdzie stosuje się monokrystaliczne elementy konstrukcyjne w postaci łopatek.