

Sposób określania usytuowania naprężeń odlewniczych w monokrystalicznym odlewie nadstopu lotniczego

Przedmiotem wynalazku jest sposób określania usytuowania naprężeń odlewniczych, istniejących w monokrystalicznym odlewie otrzymanym z nadstopu lotniczego poprzez kierunkową krystalizację techniką Bridgmana.

Nadstopy, w tym nadstopy na osnowie niklu, charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami mechanicznymi, szczególnie w wysokiej temperaturze, a także wysoką odpornością na działanie agresywnego środowiska. Dzięki temu znalazły zastosowanie między innymi w produkcji łopatek silników lotniczych. W trakcie produkcji łopatek, na etapie kierunkowej krystalizacji techniką Bridgmana, otrzymuje się monokrystaliczne odlewy łopatek posiadające złożoną strukturę i budowę dendrytyczną. Proces otrzymywania, ze względu na swoją wieloetapowość jak i złożoność kształtu łopatek, jest niezwykle trudny, dlatego już na etapie krystalizacji powstają różnego rodzaju defekty – wakanse, granice niskokątowe, a także naprężenia sieci krystalicznej. Defekty te obniżają właściwości wytrzymałościowe oraz odporność chemiczną i cieplną otrzymywanych odlewów. Prowadzona w dalszym etapie produkcji obróbka cieplna mająca na celu odprężenie materiału i zmniejszenie ilości występujących defektów nie jest wystarczająco skuteczna, aby wyeliminować je całkowicie. Pozostające w odlewie naprężenia i granice niskokątowe oraz granice ziaren mogą powodować rozkruszanie żarowytrzymałych i żaroodpornych powłok ochronnych, nakładanych na odlewy w ostatnich fazach produkcji, a tym samym przyczyniać się do skrócenia czasu eksploatacji łopatek. Z tego powodu bardzo pożądane stało się opracowanie sposobu określania miejsc usytuowania naprężeń odlewniczych, istniejących w tego typu odlewach.

W dotychczas wykonywanych badaniach monokrystalicznych nadstopów lotniczych z użyciem metod topografii rentgenowskiej nie przywiązywano uwagi do ułożenia badanych powierzchni względem płaszczyzn dyfrakcyjnych [A. Onyszko i in., *Crystal Research and Technology* 45, 1326 (2010)]. Zazwyczaj płaszczyzna badanej powierzchni była prostopadła lub równoległa do kierunku krystalizacji odlewu. W tym przypadku, ze względu na asymetryczność refleksu dyfrakcyjnego, kąty padania wiązki pierwotnej względem dwóch badanych powierzchni płytkowej próbki są różne (Fig. 1a).

Jednak gdy płaszczyzny dyfrakcyjne w próbce są równoległe do badanej powierzchni, to warunki dyfrakcji podczas otrzymywania topogramów z obydwu badanych powierzchni

plytkowej próbki mogą być identyczne (Fig. 1b). Aby było to spełnione niezbędny jest jeszcze jeden warunek – ściana próbki MN musi być zwrócona w stronę wiązki pierwotnej. Warunek ten jest spełniony gdy przy stałym ukierunkowaniu wiązki pierwotnej (WP - Fig. 1b) próbka zostanie obrócona o kąt 180° względem osi X. W tym przypadku warunki dyfrakcji będą identyczne dla topogramów uzyskanych z obydwu powierzchni.

Na topogramach rentgenowskich uzyskiwanych metodą Auleytnera z rozbieżną wiązką, można rozróżnić dwa rodzaje kontrastu makroskopowego: orientacyjny – związany ze skokowym obrotem sieci krystalicznej lokalnych makroskopowych obszarów odlewu na ich granice, a także naprężeniowy – związany z fluktuacyjnymi lokalnymi zmianami parametrów sieci krystalicznej lub/i jej orientacji krystalicznej, występujących wewnątrz obszarów makroskopowych. Pierwszy z nich wizualizuje obszary makroskopowych granic niskokątowych, natomiast drugi – makroskopowe obszary naprężeń własnych. Ich powstawanie związane jest z procesem krystalizacji monokrystalicznych odlewów o złożonym kształcie, stąd nazywane są naprężeniami odlewniczymi. Jako przykład wskazać można dyfrakcję promieniowania rentgenowskiego od płytkowej próbki z powierzchniami równoległymi do płaszczyzny dyfrakcyjnej (Fig. 1b). Dyfrakcja promieni rentgenowskich od powierzchni S_1 w obszarze granicy niskokątowej G (Fig. 1b) następuje od strony „wklęsłego” ułożenia płaszczyzn krystalicznych (Fig. 1a, płaszczyzna M), natomiast od powierzchni S_2 od strony „wypukłego” ułożenia płaszczyzn krystalicznych (Fig. 1a, płaszczyzna N). W wyniku tego defekt G będzie wizualizowany na topogramie z powierzchni S_1 poprzez lokalne podwyższenie kontrastu, a na topogramie z powierzchni S_2 poprzez lokalne obniżenie kontrastu. Porównanie topogramów z powierzchni S_1 i S_2 musi ujawnić inwersję kontrastu.

Makroskopowy obszar R z występującymi naprężeniami odlewniczymi charakteryzuje się mikroskopową fluktuacją parametrów sieciowych lub/i orientacji krystalicznej jak i podwyższonym poziomem defektów mikroskopowych i daje taki sam typ kontrastu na topogramach uzyskanych z powierzchni S_1 i S_2 .

Celem twórców niniejszego wynalazku było opracowanie sposobu określania miejsc usytuowania naprężeń odlewniczych, istniejących w odlewie otrzymanym techniką kierunkowej krystalizacji - techniką Bridgmana, w monokrystalicznym nadstopie lotniczym, za pomocą metod dyfrakcyjnej topografii rentgenowskiej.

Sposób określania usytuowania naprężeń odlewniczych w monokrystalicznym odlewie nadstopu lotniczego otrzymanym techniką kierunkowej krystalizacji - techniką

Bridgmana, według wynalazku charakteryzuje się tym, że w pierwszym etapie z odlewu wycina się płaską płytkę w formie prostopadłościanu o grubości korzystnie $10 \div 20$ mm, korzystnie prostopadle do kierunku wyciągania odlewu z obszaru grzania. Następnie w drugim etapie orientuje się płytkę za pomocą metody Lauego, po czym z tej płytki wycina się płaską, prostopadłościenną próbkę korzystnie o grubości $0,5 \div 1,5$ mm i powierzchniach S_1 i S_2 - prostopadłych do kierunku $[001]_{y/y'}$ przy odchyleniu od tej orientacji nieprzekraczającym $\pm 0,5^\circ$. Po czym w trzecim etapie przeprowadza się proces zeszlifowania obydwu powierzchni próbki do ostatecznej jej grubości korzystnie $0,1 \div 0,5$ mm, najkorzystniej 0,3 mm zgodnie z procedurami przygotowania zglądów do badania metodą topografii rentgenowskiej lub przygotowania próbek do badania metodą EBSD. Zaś w czwartym etapie rejestruje się topogramy rentgenowskie z badanych powierzchni S_1 i S_2 , przy czym w etapie tym na głowicy goniometru kamery Auleytnera ustawia się mniejszą próbkę w taki sposób aby oś pasa $[010]_{y/y'}$ – oś Y próbki była równoległa do pionowej osi oscylacji głowicy goniometru kamery, a oś $[100]$ – oś X próbki była pozioma, przy tolerancji ustawienia/odchylenia próbki wynoszącej $\pm 1^\circ$, następnie rejestruje się topogram rentgenowski metodą Auleytnera z szeroką wiązką z powierzchni S_1 próbki, po czym obraca się próbkę względem osi X o $180^\circ \pm 1^\circ$ i rejestruje się topogram rentgenowski z powierzchni S_2 . Następnie, w piątym etapie, na podstawie otrzymanych topogramów dokonuje się określenia i porównania obszarów, na których nie występuje inwersja kontrastu, w taki sposób, że podświetla się kliszę od spodu jednolitym strumieniem światła i mierzy się natężenie tego światła po przejściu przez wybrany obszar kliszy, co realizuje się za pomocą narzędzi służących do pomiaru „zaczernienia” kliszy, najkorzystniej za pomocą fotometru, i identyfikuje się obszary gdzie nie zachodzi inwersja kontrastu, to jest obszary gdzie na topogramach z powierzchni S_1 i S_2 zaczernienie kliszy w danym miejscu jest takie samo, lokalizując tym samym naprężenia odlewnicze.

Korzystnie, zeszlifowaną do korzystnej grubości $0,1 \div 0,5$ mm próbkę na etapie wykonywania topogramów zwraca się ścianą MN do wiązki pierwotnej WP, przy czym warunek ten jest spełniony gdy przy stałym umiejscowieniu wiązki pierwotnej - WP próbkę obraca się o $180^\circ \pm 1^\circ$ względem osi X. Ściana MN jest to ściana boczna, styczna do badanych powierzchni, z których wykonuje się zglądy metalograficzne. Jednakże w całym procesie jest ona niezmienna i możliwy jest obrót wokół osi X przechodzącej prostopadle do powierzchni MN.

Opracowanie takiego sposobu określania miejsc usytuowania naprężeń odlewniczych, istniejących w odlewach z monokrystalicznego nadstopu lotniczego, przyczynia się do wydłużenia czasu eksploatacji łopatek, a tym samym redukcji kosztów naprawy czy też remontów elementów silnika lotniczego. Niezlokalizowanie naprężeń odlewniczych może powodować odpryskiwanie ochronnych żaroodpornych i żarowytrzymałych warstw wierzchnich lub barier TBC, którymi docelowo pokrywane są łopatki, i tym samym przyczynia się do skrócenia czasu eksploatacji łopatki. Wieloetapowość procesu otrzymywania jak i złożoność kształtu łopatek już na etapie krystalizacji odlewów może powodować powstawanie różnego rodzaju defektów – wakanse, granice niskokątowe, a także opisane w zgłoszeniu naprężenia sieci krystalicznej. Dodatkowo prowadzona w dalszym etapie produkcji obróbka cieplna mająca na celu odprężenie materiału i zniwelowanie ilości defektów nie jest w stu procentach skuteczna. Dlatego istotne stało się opracowanie metody do usytuowania naprężeń odlewniczych w monokrystalicznym nadstopie lotniczym. Zaletą tego sposobu jest możliwość badania dużych elementów, poza tym sposób ten jest badaniem nieniszczącym.

Sposób według wynalazku jest bliżej przedstawiony na poniższym przykładzie oraz na rysunku, na którym fig. 1a przedstawia płytkową próbkę z asymetrycznym refleksem dyfrakcyjnym, gdzie kąty padania wiązki pierwotnej względem dwóch badanych powierzchni próbki są różne; fig. 1b – próbkę gdzie płaszczyzny dyfrakcyjne są równoległe do badanych powierzchni; fig. 2 – schemat dyfrakcji wiązki rentgenowskiej w próbce równoległościenniej zorientowanej w układzie ortogonalnym XYZ; fig. 3a i fig. 3b - przykładowe topogramy rentgenowskie próbki przed jak i po standardowej dla nadstopów obróbce cieplnej [D. Szeliga, *Metallurgical and Materials Transactions B* 49, 2550 (2018)], gdzie występuje kontrast orientacyjny i naprężeniowy.

Przykład

Sposób określania usytuowania naprężeń odlewniczych w monokrystalicznym odlewie nadstopu lotniczego otrzymanym techniką kierunkowej krystalizacji - techniką Bridgmana, przeprowadzono tak, że w pierwszym etapie wycięto płaską płytkę w formie prostopadłościanu o grubości 15 mm, prostopadłe do kierunku wyciągania odlewu z obszaru grzania. W drugim etapie zorientowano płytkę metodą Lauego i prostopadłe do osi Z wycięto z niej płaską, prostopadłościenną próbkę o grubości 1 mm i powierzchniach S_1 i S_2 - prostopadłych do kierunku $[001]_{\gamma/\gamma'}$ (fig. 2). Odchylenie od tej orientacji nie przekracza $\pm 0,5^\circ$. W trzecim etapie zeszlifowano obydwie powierzchnie próbki do ostatecznej jej

grubości 0,3 mm zgodnie z procedurami przygotowania zglądów do topografii rentgenowskiej i do badań metodą EBSD. W czwartym etapie zarejestrowano topogramy rentgenowskie z badanych powierzchni S_1 i S_2 . W procesie tym najpierw ustawiono na głowicy goniometrycznej kamery Auleytnera próbkę w taki sposób aby oś pasa $[010]_{y/y'}$ (oś Y próbki) była równoległa do pionowej osi oscylacji głowicy goniometru kamery, a oś $[100]$ (oś X próbki) była pozioma i była ułożona w połowie wysokości pierwotnej wiązki rentgenowskiej (WP), następnie metodą Auleytnera z rozbieżną wiązką z płaszczyzny S_1 próbki zarejestrowano topogram rentgenowski, po czym obrócono próbkę względem osi X (fig. 1) o 180° i zarejestrowano topogram rentgenowski z powierzchni S_2 . Na koniec w piątym etapie na podstawie otrzymanych topogramów dokonano porównania i określenia obszarów, na których nie występuje inwersja kontrastu. Porównania topogramów dokonano poprzez podświetlenie kliszy od spodu jednolitym strumieniem światła i pomiar natężenia tego światła po przejściu przez wybrany obszar kliszy, co możliwe było dzięki zastosowaniu narzędzi służących do pomiaru „zaczernienia” kliszy, najkorzystniej fotometru. W obszarach gdzie nie zachodzi inwersja kontrastu, to jest jeśli na topogramach z powierzchni S_1 i S_2 zaczernienie kliszy w danym miejscu jest takie samo, zlokalizowane są naprężenia odlewnicze.