

Nadstopa MAR-M247 oraz Rene 77 są szeroko wykorzystywane na łopatki wirnika oraz łopatki kierownicze w silnikach lotniczych ze względu na szczególnie wysokie własności wytrzymałościowe w temperaturach eksploatacji, jak również znakomitą odporność na korozję wysokotemperaturową. Agresywne środowisko korozyjne w połączeniu z wysokimi naprężeniami w trakcie eksploatacji elementów w gorącej sekcji prowadzi po pewnym czasie do uszkodzenia części w procesie pełzania, zmęczenia termo-mechanicznego oraz zużycia erozyjnego. Wykorzystanie metod spawalniczych do naprawy elementów z nadstopów niklu jest bardzo pożądane, jednak w przypadku części wykonanych ze stopów umacnianych wydzieleniowo poważnie ograniczone.

Materiał i metodyka badań

Materiałami rodzimymi, na których przeprowadzono eksperyment były dwa odlewnicze nadstopa na osnowie niklu o nazwach handlowych MAR-M247 oraz Rene 77. Skład chemiczny dostarczonych stopów określono przy pomocy spektrometru iskrowego, a wyniki przedstawiono w Tabeli 1.

Modyfikację powierzchni za pomocą lasera impulsowego ALPHA LASER ALS100 z ośrodkiem czynnym Nd-YAG zrealizowano na próbkach o powierzchni około 2 cm² i 1,5 mm grubości. Parametry procesu zamieszczono w Tabeli 2.

Stop/Pierwiastek	W	Co	Cr	Al	Ta	Hf	Ti	Mo	C	Ni
Rene 77	0,05	14,55	14,43	4,16	-	-	3,37	3,98	0,06	reszta

Tabela 1. Skład chemiczny materiałów rodzimych

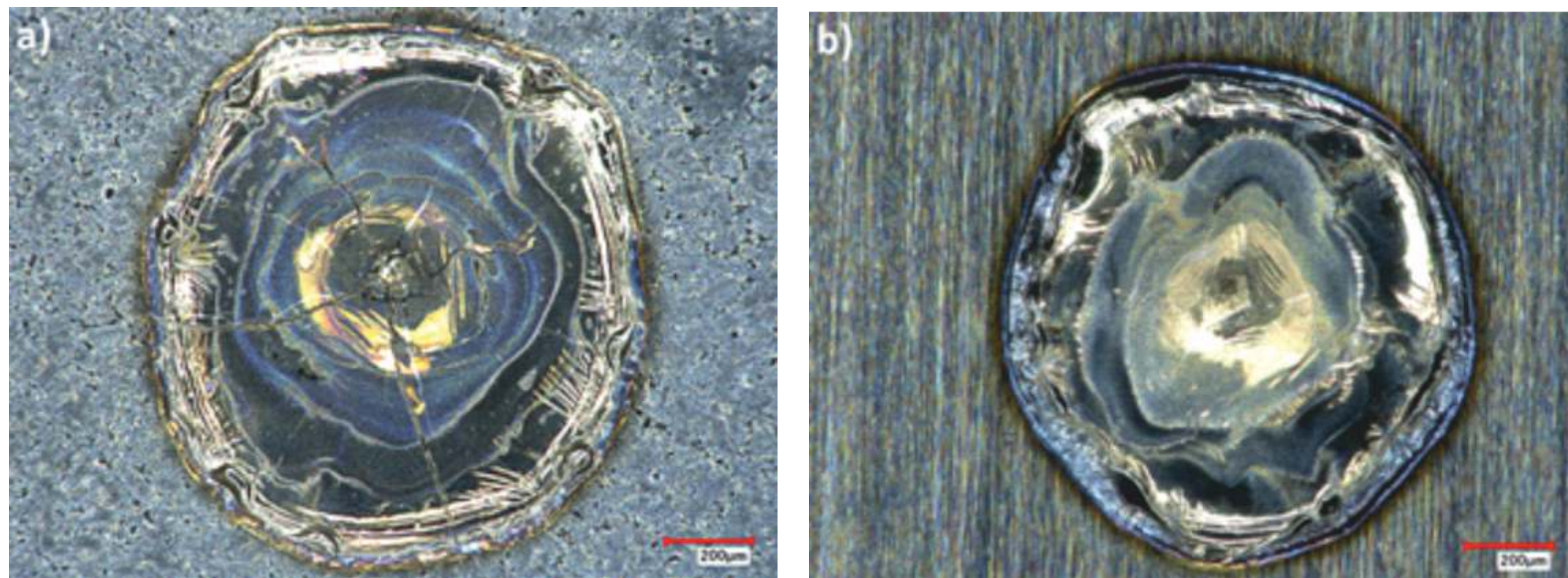
Napięcie [V]	Czas impulsu [ms]	Częstotliwość [Hz]	Średnica wiązki [mm]	Energia [J]	Moc [W]
244	6,5	3	0,8	16,93	50,8

Tabela 2. Parametry procesu modyfikacji powierzchni wiązką laserową

Obserwacje zmian na powierzchni przeprowadzono przy pomocy mikroskopu stereoskopowego. Pomiary twardości materiału rodzimego wykonano przy użyciu twardościomierza Zwick. Zgłady metalograficzne obserwowano za pomocą mikroskopu świetlnego LEICA DM4000 oraz mikroskopów skaningowych FEI NOVA NANOSEM 450 oraz JEOL wyposażonego w detektor EDS. Zgłady trawiono chemicznie w odczynniku Kalling'a i elektrolitycznie w 10% roztworze wodnym CrO₃.

Powierzchnia stopów po modyfikacji wiązką laserową

Na przygotowanych próbkach wykonano serię pojedynczych impulsów. Przykładowo wygląd takiej powierzchni dla badanych stopów zamieszczono na rysunku 1.

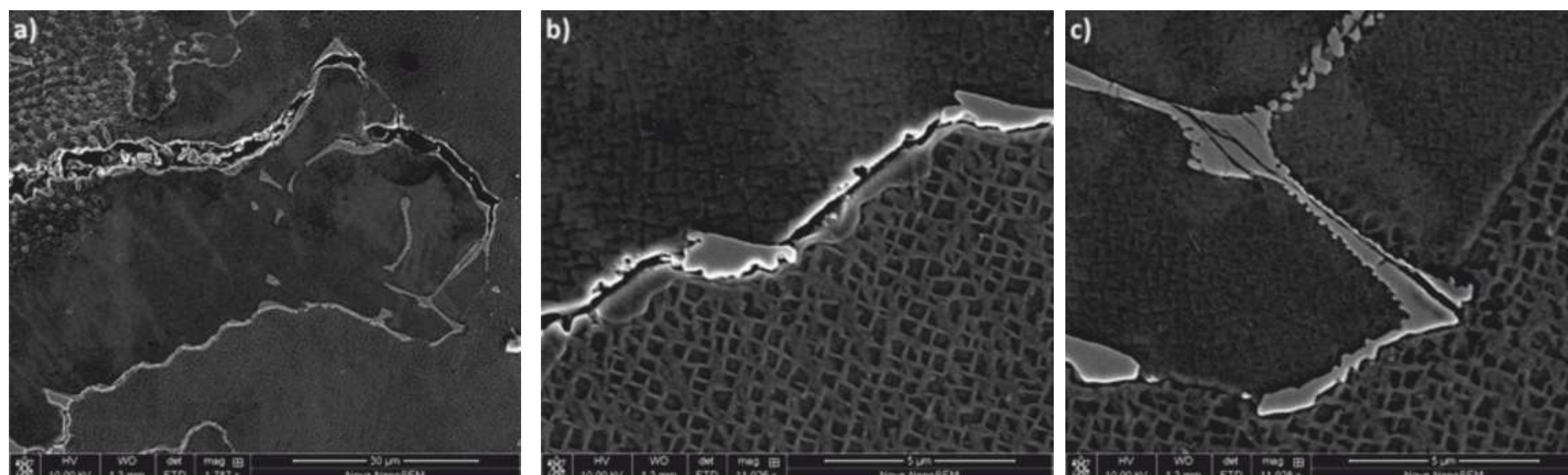


Rys. 1. Powierzchnia stopów po oddziaływaniu wiązki laserowej: a) MAR-M247; b) Rene 77

Krótki czas impulsu i związane z tym bardzo szybkie odprowadzenie ciepła wprowadziło wyraźne zmiany na powierzchni. W centralnych obszarach działania wiązki powstały krater o głębokości około 300 μm otoczone przez obszar o dość rozwiniętej powierzchni. Oddziaływanie wiązki laserowej na powierzchnię nadstopu MAR-M247 (rys. 1a) doprowadziło do powstania kilku pęknięć zainicjowanych blisko osi krateru i rozwijających się na zewnątrz w kierunku linii wtopienia, jak również drobniejszych na obrzeżu. Liczba pęknięć zaobserwowanych w Rene 77 (rys. 1b) była znacznie mniejsza i ograniczyła się do kilku w obszarze dna krateru. Lokalizacja pęknięć wskazuje, iż są to pęknięcia gorące powstałe w trakcie krzepnięcia cieczy. Niedostateczna zdolność stopów do odkształcenia plastycznego w wyniku oddziaływania naprężeń rozciągających doprowadziła do pęknięcia.

Analiza pęknięć w obszarze strefy wpływu ciepła

W stopie MAR-M247 zaobserwowano pęknięcie gorące zainicjowane w obszarze przetopionym i propagujące w kierunku strefy wpływu ciepła (rys. 2a). Tworzenie się pęknięcia likwacyjnego w SWC blisko linii wtopienia było wspomagane przez pęknięcie gorące utworzone wcześniej w trakcie krystalizacji obszaru przetopionego o czym świadczy stosunkowo duża jego szerokość.



Rys. 2. Pęknięcia likwacyjne w strefie wpływu ciepła w MAR-M247: a) lokalizacja pęknięcia; b) likwacja na granicy dendrytów; c) pęknięty węgiel

Pęknięcie likwacyjne powstałe w wyniku oddziaływania wiązki lasera Nd-YAG w wybranych nadstopach na osnowie niklu

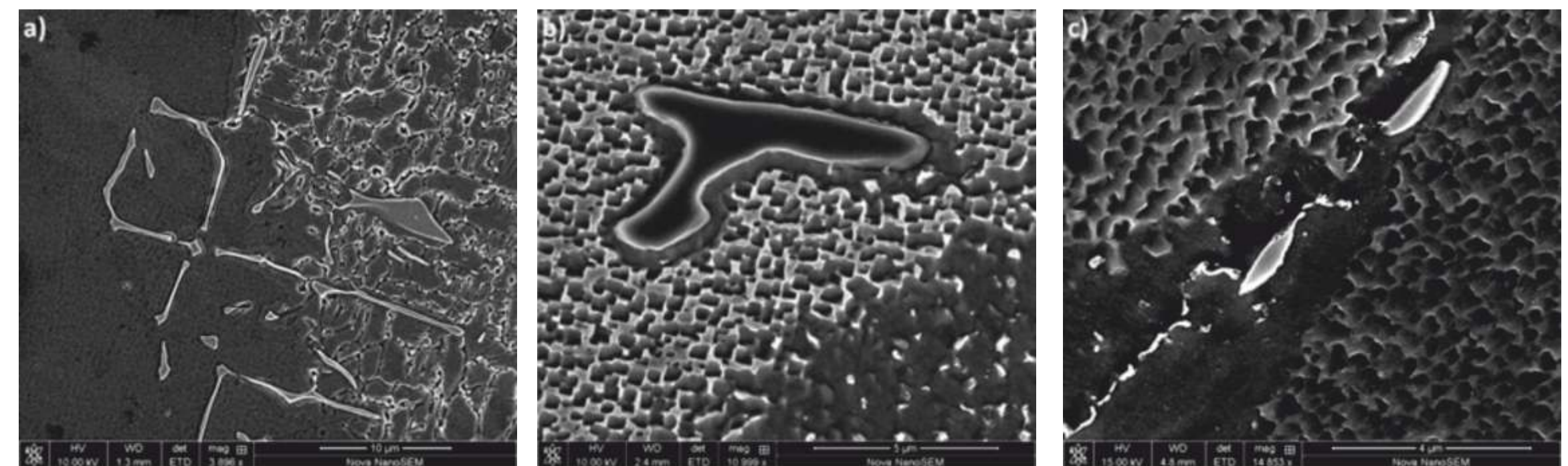
Autorzy:
mgr inż. Łukasz Rakoczy,
dr hab. inż. Anna Zielińska-Lipiec, prof. AGH
dr inż. Lechosław Tuz, dr inż. Tomasz Góral

Pęknięcie o czysto likwacyjnym charakterze powstałe w wyniku powtórnej krystalizacji na drodze przemiany eutektycznej z osnową nadtopionej nierównowagowo fazy γ' zaprezentowano na rysunku 2b. Zmiana charakteru powierzchni międzyfazowej węgiel/osnowa wskazuje, że węgliki bogate w Hf i Ta charakteryzujące się wysoką stabilnością zostały lokalnie rozpuszczone. Nie wyklucza się nadtopienia krawędzi węglików z racji zmiany warunków termodynamicznych w obecności cienkiej warstewki cieczy. W odległości około 60 μm od linii wtopienia duże węgliki ze względu na złożony stan naprężeń w trakcie chłodzenia uległy kruchemu pękaniu (rys. 2c).



Rys. 3. Pęknięcia likwacyjne w strefie wpływu ciepła w Rene 77: a) lokalizacja pęknięcia; b) likwacja na granicy dendrytów; c) propagacja pęknięcia wzdłuż eutektyki γ-γ'

W nadstopie Rene 77 ujawniono nieliczne pęknięcia o charakterze likwacyjnym przebiegające po granicach dendrytów (rys. 3a). Niewystarczająca ilość cieczy w końcowym etapie krzepnięcia cienkiej międzydendrytycznej warstewki doprowadziła do pęknięcia (rys. 3b). Produkty przemiany eutektycznej zaobserwowano na dwóch przeciwnych krawędziach z wyjątkiem obszaru węgla. Wzdłuż wyspy eutektycznej γ-γ' wydzielonej na granicy międzydendrytycznej zaobserwowano drobne pęknięcia likwacyjne (rys. 3c) aczkolwiek bez wyraźnego nadtopienia całego obszaru tzw. incipient melting. Na podstawie morfologii pęknięć stwierdzono, że większa skłonność stopu MAR-M247 do pęknięć wiąże się z utworzeniem większej ilości cieczy po granicach dendrytów w trakcie nagrzewania. Lokalne nadtopienie fazy γ' w pobliżu węglików zaobserwowano również poza obszarami granic międzydendrytycznych (rys. 4).



Rys. 4. Lokalne nadtopienie fazy γ' w SWC: a) MAR-M247; b) Rene 77; c) nadtopiona granica dendrytów w SWC Rene 77

Podstawowym czynnikiem prowadzącym do pęknięć likwacyjnych jest obecność cieczy wzdłuż granic dendrytów. Nadstopa niklu charakteryzują się znaczną segregacją w wyniku czego składniki mikrostrukturalne o obniżonej temperaturze topnienia są obecne także z dala od granic. Lokalne nadtopienie (lub rozpuszczenie) fazy międzymetalicznej zaobserwowane w sąsiedztwie węglików w MAR-M247 i Rene 77 (rys. 4a, b) wskazuje, że likwacja poza granicami dendrytów nie stanowi poważniejszego zagrożenia. Ponadto w obszarze przetopionych zaobserwowano nierozpuszczone węgliki "chinese script" świadczące o ich wysokiej stabilności. Pojawienie się pęknięcia pomiędzy dendrytami wymaga zarówno obecności cieczy na granicy ciała stałe - ciała stałe jak i oddziaływania naprężeń rozciągających w trakcie chłodzenia. W nadstopie Rene 77 zaobserwowano granicę, wzdłuż której w podwyższonej temperaturze była obecna stosunkowo gruba warstewka cieczy (rys. 4c). Stworzone zostały warunki w których międzydendrytyczna ciecz wypełniała zainicjowane w wysokiej temperaturze mikropęknięcia. Gruba warstewka cieczy wzdłuż granic i relaksacja naprężeń przez otaczający materiał nie pozwoliły w tym przypadku na utworzenie pęknięcia likwacyjnego. Podobnych obszarów wskazujących na zalecanie mikropęknięć nie zaobserwowano w nadstopie MAR-M247.

Podsumowanie

Na podstawie zrealizowanych badań sformułowano następujące wnioski:

- Wybrane nadstopa różnią się w znacznym stopniu zarówno składem chemicznym jak i pierwotną mikrostrukturą, co istotnie wpływa istotnie na ich skłonność do tworzenia pęknięć;
- Tworzenie się cieczy wzdłuż granic dendrytów jest głównie związane z nierównowagowym nadtopianiem fazy γ'. Zmiana geometrii węglików wzdłuż nadtopionych granic sugeruje, że mogły one zostać częściowo rozpuszczone;
- Większa ilość cieczy tworzącej się wzdłuż granic dendrytów oraz silniejsze umocnienie decyduje o wyższej skłonności do pęknięć likwacyjnych stopu MAR-M247;
- Utworzenie odpowiednio grubej warstewki cieczy wzdłuż nadtopionych obszarów międzydendrytycznych pozwala zapobiec tworzeniu się pęknięć likwacyjnych w wyniku samozaleczania drobnych mikropęknięć.

Kontakt:

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie

Al. A. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
(12) 617-26-21

www.agh.edu.pl, ltuz@agh.edu.pl

Podziękowania

Badania wykonano w ramach pracy 15.11.110.425