



Badanie mechanizmu inicjowania procesu erozji kawitacyjnej stopu odlewniczego na bazie fazy międzymetalicznej Ni_3Al

DARIUSZ ZASADA, ZBIGNIEW BOJAR, ROBERT JASIONOWSKI*

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,
Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

* Akademia Morska w Szczecinie, Instytut Nauk Podstawowych Technicznych,
70-205 Szczecin, ul. Podgórna 51/53

Streszczenie. W referacie zaprezentowano wyniki badań erozji kawitacyjnej w okresie inkubacji stopu odlewniczego na bazie fazy międzymetalicznej Ni_3Al z dodatkami stopowymi boru, cyrkonu, chromu, molibdenu i żelaza. Badania prowadzono na materiale w stanie po odlewaniu oraz po procesie homogenizacji w temperaturze $1200^{\circ}C$, w czasie do 100 godzin, w atmosferze powietrza. Stwierdzono podobny charakter inicjowania zużycia kawitacyjnego w postaci mikropęknięć i lokalnych ubytków zarówno w stanie po odlewaniu, jak i po homogenizacji.

Słowa kluczowe: stopy odlewnicze, erozja kawitacyjna, fazy międzymetaliczne

Symbole UKD: 669.017

Wprowadzenie

Kawitacja jest zjawiskiem niepożądanym, występuje głównie w kanałach przepływowych maszyn i urządzeń (pompy, turbiny wodne itp.) [1-2]. Podstawową przyczyną procesu niszczenia kawitacyjnego są gwałtowne zmiany ciśnienia przepływającej cieczy — impulsowe zmniejszanie ciśnienia cieczy poniżej ciśnienia krytycznego, bliskiego ciśnieniu parowania cieczy, a następnie tworzenie się pęcherzyków parowo-gazowych i implodowanie tych pęcherzyków w strefie wyższego ciśnienia. W opisywanym zjawisku powstające mikropęcherzyki pełnią rolę zarodków kawitacji mających tę właściwość, że posiadają one zdolność do

cyklicznego odtwarzania się na skutek uwalniania gazów zawartych w objętości cieczy. Powtarzającemu się zjawisku sprężania i implozji pęcherzyków gazowych w cieczy roboczej towarzyszą szybkozmienne impulsy ciśnienia sięgające 10^9 Pa, szczególnie niebezpieczne w przypadku grupowania pęcherzyków w obłok kawitacyjny, w którym pęcherzyki implodują jednocześnie, wywołując znacznie większy impuls ciśnienia końcowego niż implozja pojedynczego pęcherzyka. W warunkach krytycznych może także wytworzyć się kumulacyjna strużka cieczy, poruszająca się z prędkością przekraczającą 100 m/s [1-4].

Na powierzchni materiału podanego oddziaływaniu cieczy zjawisko kawitacji powoduje miejscowe niszczenie warstwy wierzchniej w wyniku wypadkowego oddziaływania uderzeń mikrostrumieni cieczy o wysokich parametrach hydrodynamicznych i fal ciśnienia. Ze względu na charakter obciążeń, niszczenie powierzchni materiału można porównać z procesem zmęczeniowym. Opis ilościowy i jakościowy niszczenia kawitacyjnego zależy przede wszystkim od rodzaju materiału i warunków odbywania się procesu erozji kawitacyjnej. W pierwszym przypadku chodzi o strukturę materiału (wielkość ziaren, rodzaj wtrąceń, zanieczyszczeń i faz, ich morfologia, rozmieszczenie itp.), w drugim natomiast — o rozkład obciążeń kawitacyjnych oraz możliwość dodatkowego występowania w obszarze implozji procesów chemicznych, elektrochemicznych oraz cieplnych.

Celem rozpoznawczych badań omawianego zjawiska, podjętych w odniesieniu do grubokryształicznego stopu odlewniczego na osnowie fazy międzymetalicznej Ni_3Al , z dodatkami stopowymi boru, cyrkonu, chromu, molibdenu i żelaza, był opis zużycia kawitacyjnego w początkowym okresie powstawania zniszczeń, a więc w okresie inkubacji. Problem ten jest bardzo istotny ze względu na perspektywy wykorzystania rozważanej grupy tworzyw intermetalicznych na elementy urządzeń i maszyn podanych oddziaływaniu przepływającej cieczy.

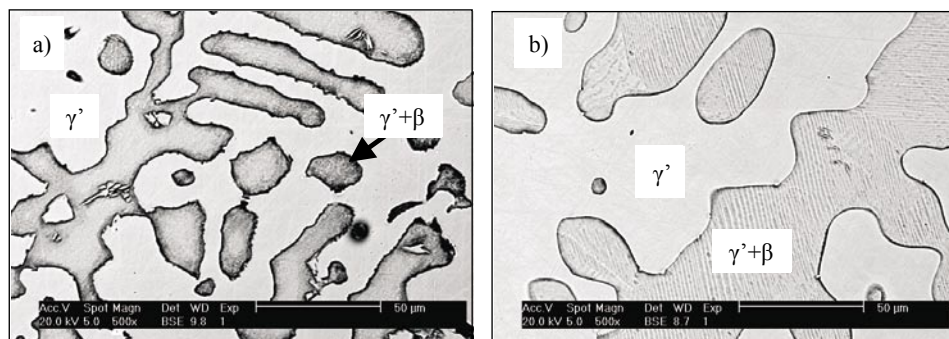
Material i metody badawcze

Przedmiotem badań był stop na osnowie fazy Ni_3Al o składzie chemicznym **Ni-12.0Fe-10.9Al-6.9Cr-1.22Mo-0.22Zr-0.03B**. Materiał w stanie po odlewaniu poddano wyżarzaniu ujednoradniającemu w atmosferze powietrza, w temperaturze $1200^\circ C$. Analizę mikrostruktury prowadzono przy użyciu analizującego mikroskopu skaningowego Philips XL30 (LaB₆).

Badania erozji kawitacyjnej przeprowadzono na urządzeniu strumieniowo-uderzeniowym, stosując próbki w kształcie walców o średnicy 20 mm. Próbki mocowano do ramion wirnika w płaszczyźnie pionowej, równoległe do osi strumienia wody tłoczonej pod ciśnieniem 0,06 MPa, w sposób ciągły przez dyszę o średnicy 10 mm, oddaloną od krawędzi próbki o 1,6 mm. Natężenie przepływu wody było stałe i wynosiło $1,55 \text{ m}^3/\text{godz}$.

Wyniki badań

Badania metalograficzne wykazały, że stop na osnowie fazy międzymetalicznej Ni_3Al posiada zarówno w stanie po odlewaniu, jak i po procesie homogenizacji, dendrytyczną budowę dwufazową. Wyniki mikroanalizy składu chemicznego oraz pomiary mikrotwardości wykazały, że osnowę stopu stanowi roztwór wtórny typu γ' o umownym zapisie $(\text{Ni}, \text{Cr}, \text{Fe})_3(\text{Al}, \text{Cr}, \text{Mo}, \text{Zr})$ (rys. 1). Atomy chromu i żelaza mogą podstawić atomy niklu w strukturze komórki podstawowej typu A_3B , zaś atomy chromu, molibdenu i cyrkonu podstawią preferencyjnie atomy aluminium. Stwierdzono również, że w przestrzeniach międzydendrytycznych występują obszary dwufazowe ($\gamma' + \beta$) (rys. 1a) o podwyższonej twardości w stosunku do osnowy analizowanego stopu (tab. 1).



Rys. 1. Mikrostruktura badanego stopu: a) stan lany; b) po homogenizacji w 1200°C przez 100 godzin

Proces wygrzewania ujednorodniającego przeprowadzony w temperaturze 1200°C w atmosferze powietrza powoduje częściowe ujednorodnienie składu chemicznego oraz zmianę morfologii i zwiększenie udziału objętościowego obszarów dwufazowych $\gamma' + \beta$ (por. rys. 1a z rys. 1b). Zaobserwowane efekty procesu homogenizacji powodują obniżenie mikrotwardości poszczególnych obszarów w stosunku do stanu po odlewaniu (tab. 1), nie wywołują natomiast istotnych zmian w poziomie twardości opisywanych stopów (stan po odlewaniu 262 HV10, po homogenizacji 270 HV10).

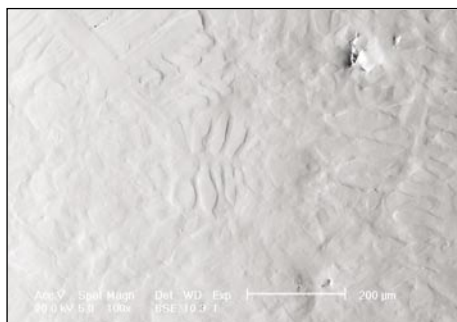
Na podstawie przeprowadzonych badań efektów niszczenia warstwy wierzchniej opisywanego stopu w wyniku procesu erozji kawitacyjnej stwierdzono, że wywołane jest ono przede wszystkim mechanicznym oddziaływaniem strumienia cieczy roboczej. W pierwszych minutach tego oddziaływania ujawniono w omawianym materiale zarówno w stanie po odlewaniu, jak i po dodatkowej homogenizacji, nieciągłości strukturalne (w miejscach lokalizacji rzadzisz i pęcherzy gazowych).

TABELA 1

Wyniki mikroanalizy i pomiarów mikrotwardości faz w obszarach oznaczonych na rysunku 1

Stan po odlewaniu							
Strefa analizy	Zawartość pierwiastka (% at.)						Mikrotwardość HV0.1
	Ni	Al	Cr	Mo	Zr	Fe	
γ'	63,03	15,29	8,72	0,92	0,21	11,85	209±14
$(\gamma' + \beta)$	59,97	28,69	4,11	0,38	–	7,25	376±21
Stan po homogenizacji							
Strefa analizy	Zawartość pierwiastka (% at.)						Mikrotwardość HV0.1
	Ni	Al	Cr	Mo	Zr	Fe	
γ'	63,78	24,73	4,03	0,41	–	7,06	178±23
$(\gamma' + \beta)$	54,95	35,08	2,97	0,24	–	6,76	306±37

W wyniku dalszego oddziaływania strugi cieczy w badanym materiale ujawniają się typowe dla kawitacji efekty niszczenia powierzchni, między innymi bardzo wyraźne ślady odkształcenia plastycznego w poszczególnych krystalitach osnowy i towarzyszące temu ślady „wytrawienia” mikrostruktury warstwy wierzchniej stopu (rys. 2).



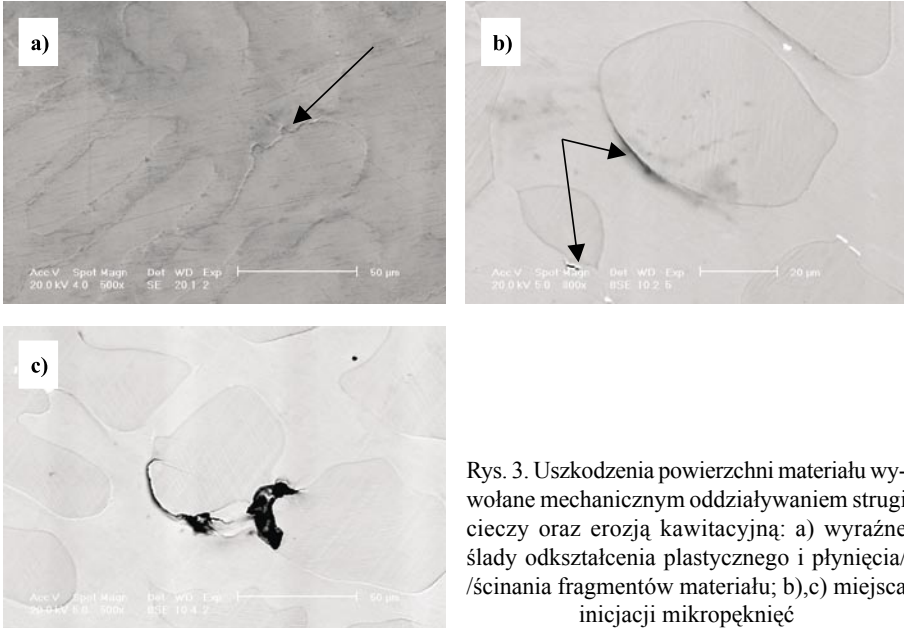
Rys. 2. Falistość warstwy wierzchniej w mikroskali — wyraźne, o różnym stopniu nasilenia ślady odkształcenia plastycznego powierzchni stopu po homogenizacji, podanego 120-minutowej ekspozycji strugi cieczy

Efekty erozji kawitacyjnej obserwowane w warstwie wierzchniej wykazują bardzo wyraźny związek z mikrostrukturą badanego stopu. Istotnie twardsze obszary dwufazowe ($\gamma' + \beta$) tworzą z reguły „wypiętrzenia”, w związku z efektem „wymywania” bardziej podatnej (o mniejszej twardości i większej plastyczności — tabela 1) osnowy γ' . Efekt ten powoduje zmianę stopnia rozwinięcia warstwy

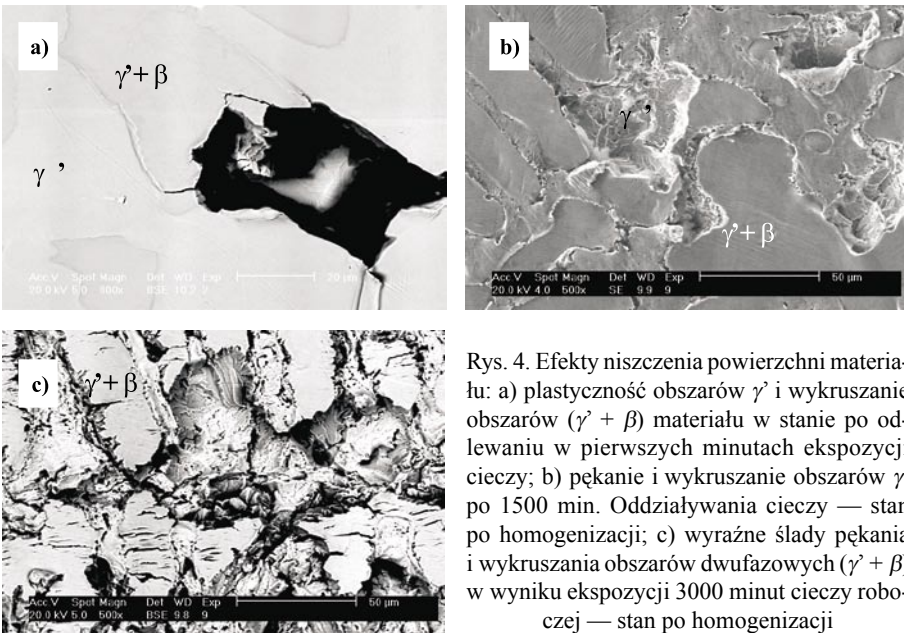
wierzchniej i przez to w istotny sposób zmienia rzeczywisty kąt padania mikrostrumieni cieczy na powierzchnię badanej próbki. W konsekwencji proces ten zmienia chropowatości warstwy wierzchniej i zarazem rzeczywistego kąta padania mikrostrumieni cieczy na powierzchnię próbek, co znacząco wpływa na przebieg jej niszczenia.

Nie jest to jednoznaczne z pogorszeniem warunków „współpracy tribologicznej” w układzie warstwa wierzchnia stopu-struga wody, gdyż takie strukturalne „wyzwalanie” implozji jednorodnie obciążających badaną powierzchnię może nawet zmniejszać efekt zużycia w stosunku do przypadku kiedy zużycie kawitacyjne jest jednoznacznie zlokalizowane w jakimś wybranym obszarze powierzchni próbki. W każdym razie, przede wszystkim obszary dwufazowe, w związku z taką zmianą mikrogeometrii warstwy wierzchniej są narażone na dynamiczne oddziaływanie cieczy. Przeprowadzane obserwacje mikroskopowe wskazują, że pierwsze mikropęknięcia powstają właśnie na styku obszarów dwufazowych ($\gamma' + \beta$) z osnową stopu (rys. 3). Przy sprzyjającej orientacji krystalograficznej niektórych ziaren względem kąta padania strugi cieczy, dochodzi do pocieniania materiału w strefie ich granic (rys. 3a), silnego odkształcenia plastycznego i płynięcia fragmentów gałęzi dendrytycznych, a wreszcie lokalnych mikroubytków materiału prowadzących do charakterystycznych „zabków” na granicach międzyfazowych $\gamma' / (\gamma' + \beta)$. Lokalnemu odkształceniu plastycznemu ulega przede wszystkim faza γ' w strefach przyległych do obszarów dwufazowych (rys. 3b,c). Tutaj też lokalizują się, zwłaszcza w pobliżu wad odlewniczych i wydzielen obcych faz, pierwsze mikropęknięcia (rys. 3b,c). Pasma zaznaczające się w obrazie BSE na powierzchni obszarów dwufazowych ($\gamma' + \beta$) to raczej efekt ujawniania granic pomiędzy fazami γ' i β w obrębie dwufazowej kolonii, a nie efekt odkształcenia plastycznego tych znacznie bardziej kruchych (w porównaniu do osnowy γ') obszarów. Dopiero w dalszym okresie oddziaływania cieczy z powierzchnią materiału następuje proces kruszenia krytycznie umocnionych stref γ' i odrywania fragmentów lub całych obszarów dwufazowych ($\gamma' + \beta$) (rys. 4). Po całkowitym wyrwaniu fragmentów warstwy wierzchniej można stwierdzić, że powierzchnia rozdzielenia nosi wyraźne oznaki pęknięcia łupliwego (rys. 5), z tym że w strefach granic międzyfazowych można zaobserwować nawet prążki zmęczeniowe, co dowodzi znacznego wpływu zmęczenia w procesie erozji kawitacyjnej wielofazowego stopu intermetalicznego $\gamma' / (\gamma' + \beta)$. Powodem tego zjawiska są natomiast naprężenia zmęczeniowe występujące na powierzchni materiału. Potwierdzeniem tego stwierdzenia mogą być występujące prążki zmęczeniowe przedstawione na rysunku 5.

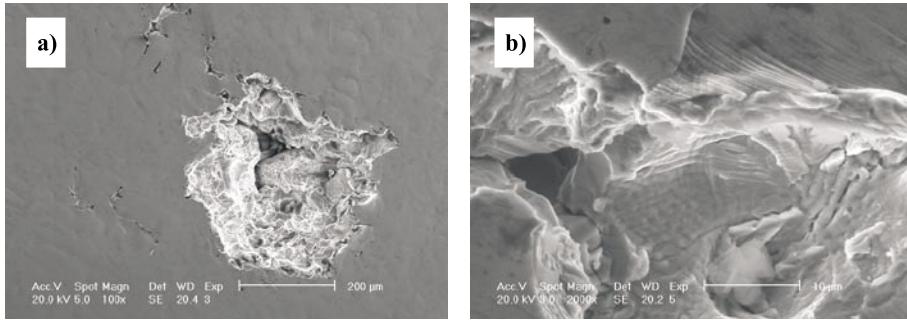
Nietypowe zachowanie badanego stopu podczas homogenizacji, polegające na tym, że prowadzona obróbka nie prowadzi do zaniku roztworu wtórnego na bazie fazy międzymetalicznej Ni_3Al , tylko do zmiany jego morfologii (w zasadzie morfologii obszarów dwufazowych — poprzez koagulację i powiększanie pozostających w strukturze obszarów dwufazowych ($\gamma' + \beta$)). Nie poprawia to



Rys. 3. Uszkodzenia powierzchni materiału wywołane mechanicznym oddziaływaniem strugi cieczy oraz erozją kawitacyjną: a) wyraźne ślady odkształcenia plastycznego i pęknięcia/ścianania fragmentów materiału; b),c) miejsca inicjacji mikropeknięć



Rys. 4. Efekty niszczenia powierzchni materiału: a) plastyczność obszarów γ' i wykruszanie obszarów ($\gamma + \beta$) materiału w stanie po odlewaniu w pierwszych minutach ekspozycji cieczy; b) pęknięcie i wykruszanie obszarów γ' po 1500 min. Oddziaływania cieczy — stan po homogenizacji; c) wyraźne ślady pęknięcia i wykruszania obszarów dwufazowych ($\gamma + \beta$) w wyniku ekspozycji 3000 minut cieczy roboczej — stan po homogenizacji



Rys. 5. Efekty erozji kawitacyjnej w postaci ubytku materiału (a, b) połączonego z wystąpieniem prążków zmęczeniowych (b); materiał w stanie po odlewaniu

mikrostruktury, a wręcz pogłębia strukturalną niejednorodność badanego stopu, który w stanie po homogenizacji wykazuje większy stopień zaawansowania destrukcyjnego procesu wykruszania fragmentów warstwy wierzchniej badanego stopu w warunkach występowania kawitacji.

Jest to zjawisko zbieżne z tendencją odnotowaną podczas badań porównawczych udarności stopu Ni-Al-Cr-Zr-B. Wskazuje na istotny problem, jakim jest występowanie wysokostabilnej fazy β w wielofazowych stopach Ni₃Al. Istotne jest także prowadzenie dalszych prób erozji kawitacyjnej, które umożliwią rozpoznanie wpływu tak ważnych czynników, jak stopień rozdrobnienia i umocnienia struktury oraz stopień uporządkowania faz międzymetalicznych tworzących osnowę stopów o potencjalnie bardzo dobrej odporności na kawitację.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań dotyczących początkowej fazy zużycia kawitacyjnego wybranych stopów Ni₃Al można stwierdzić, że:

- inicjowanie zużycia kawitacyjnego w postaci mikropełnięć i lokalnych ubytków materiału ma podobny charakter zarówno w stanie po odlewaniu, jak i po homogenizacji;
- pierwotną przyczyną powstania mikropełnięć są nierównomiernie rozmieszczone obszary dwufazowe w objętości próbek;
- pierwsze mikropełnięcia powstają na styku obszarów dwufazowych ($\gamma + \beta$) z osnową stopu;
- mikropełnięcia zainicjowane w strefach granic ziaren fazy γ i granic międzyfazowych rozwijają się przede wszystkim w osnowie stopów γ ;

- w dalszym okresie oddziaływania cieczy z powierzchnią materiału następuje proces kruszenia i odrywania fragmentów lub całych obszarów dwufazowych ($\gamma' + \beta$);
- powierzchnia po dłuższym oddziaływaniu cieczy roboczej nosi wyraźne ślady niszczenia zmęczeniowego.

Niniejsza praca była częściowo finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w ramach projektu nr PBG-KBN-0T00C 024 26.

Artykuł wpłynął do redakcji 23.11.2005 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w lutym 2006 r.

LITERATURA

- [1] K. STELLER, *Pojęcia podstawowe, ze szczególnym uwzględnieniem pojęć dotyczących maszyn hydraulicznych*, Zeszyty Naukowe Instytutu Maszyn Przepływowych PAN, nr 140/1057/82, Gdańsk, 1982.
- [2] M. GŁOWACKA, J. HUCIŃSKA, *Inżynieria Materiałowa*, nr 2, 2001, 79-85.
- [3] R. BUGAŁA, M. SZKODO, *Krajowa Konferencja Dobór i Eksploatacja Materiałów Inżynierskich*, Jurata, 1997, 221-227.
- [4] K. STELLER, *O mechanizmie niszczenia materiałów podczas kawitacji*, Zeszyty Naukowe Instytutu Maszyn Przepływowych PAN, nr 175/1107/83, Gdańsk, 1983.

D. ZASADA, Z. BOJAR, R. JASIONOWSKI

Cavitation wear of intermetallic Ni₃Al alloy

Abstract. The results of research on initial stage-incubation period of a cavitation wear in the intermetallic Ni₃Al alloy with boron, zirconium, chromium molybdenum, and iron are presented in this paper. Investigations were carried out both for as-cast and material after homogenization treatment.

Experiments show that first micro-cracks are formed in the matrix-diphase regions ($\gamma' + \beta$) contact. A crushing and detachment of fragments or even whole diphase ($\gamma' + \beta$) regions occur during further interaction of a liquid with alloy surface. After complete pulling out of surface layer fragments, a separation surface shows clear tracks of both brittle cleavable and fatigue crackings.

Keywords: Ni₃Al intermetallics, microstructure transformation, homogenization treatment, cavitation tests

Universal Decimal Classification: 669.017