

**Dariusz ZASADA, Zbigniew BOJAR**  
Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa  
**Robert JASIONOWSKI**  
Akademia Morska, Szczecin

## **BADANIE MECHANIZMU INICJOWANIA PROCESU EROZJI KAWITACYJNEJ WYBRANYCH STOPÓW NA OSNOWIE FAZY MIĘDZYMETALICZNEJ $Ni_3Al$**

### **Słowa kluczowe**

Kawitacja, erozja kawitacyjna, stopy intermetaliczne, faza międzymetaliczna.

### **Streszczenie**

W pracy przedstawiono wyniki badań zużycia kawitacyjnego, w okresie inkubacji, wybranych stopów 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  $1200^{\circ}C$ . Stwierdzono podobny charakter inicjowania zużycia kawitacyjnego w postaci mikropęknięć i lokalnych ubytków zarówno w stanie po odlewaniu, jak i po homogenizacji.

### **Wprowadzenie**

Erozja kawitacyjna występuje głównie w kanałach przepływowych maszyn i urządzeń (turbiny wodne, turbiny parowe, pompy wirowe, śruby okrętowe, tuleje cylindrowe silników chłodzonych wodą itp.) [1–2]. Podstawową przyczyną procesu niszczenia kawitacyjnego jest powstawanie i wzrost oraz gwałtownie zanikanie pęcherzyków zawierających parę danej cieczy, gaz lub mieszanke parowo-gazową. Powstające pęcherzyki rozwijają się gwałtownie w obszarach

obniżonego ciśnienia przepływającej cieczy i zanikają implodując w strefie podwyższonego ciśnienia, powodując pęknięcia i ubytki materiału.

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].

Zjawisko kawitacji powoduje na powierzchni materiału podanego oddziaływaniu cieczy miejscowe niszczenie warstwy wierzchniej w wyniku wypadkowego oddziaływania uderzeń mikrostrumieni cieczy o wysokich parametrach hydrodynamicznych i fal ciśnienia. Ze względu na charakter obciążeń, niszczenie warstwy wierzchniej materiału można porównać z procesem zmęczenia. Opis ilościowy i jakościowy niszczenia kawitacyjnego zależy przede wszystkim od rodzaju materiału i warunków zachodzenia 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.

Stopy na osnowie fazy międzymetalicznej  $Ni_3Al$  cechują się zespołem właściwości fizykochemicznych, pozwalających zaliczyć je do grupy materiałów specjalnych nowej generacji. Do podstawowych zalet tych stopów przede wszystkim należy zaliczyć: odporność na działanie atmosfer utleniających i nawęglających, względnie wysoką wytrzymałość doraźną, wysoką wytrzymałość zmęczeniową, wysoką odporność na pełzanie, bardzo dobrą odporność na zużycie ścierne i korozję. Ponadto istotną zaletą intermetali z układu Ni-Al jest niski koszt materiałowy z uwagi na wysoką zawartość aluminium. W literaturze brak jest opisu efektów niszczenia warstwy wierzchniej stopów intermetalicznych  $Ni_3Al$  na skutek erozji kawitacyjnej.

Celem rozpoznawczych badań omawianego zjawiska, podjętych w odniesieniu do grubokrystalicznych stopów (wielkość krystalitów  $\sim 3$  mm) na osnowie fazy międzymetalicznej  $Ni_3Al$ , był opis zużycia kawitacyjnego w początkowym stadium powstawania zniszczeń, a więc w okresie inkubacji. Problem ten jest bardzo istotny, ze względu na perspektywę wykorzystania rozważanej grupy tworzyw intermetalicznych na elementy urządzeń i maszyn podanych oddziaływaniu przepływającej cieczy.

## 1. Materiał i metody badawcze

Przedmiotem badań były stopy na osnowie fazy  $\text{Ni}_3\text{Al}$  o składzie chemicznym przedstawionym w tabeli 1. Materiał w stanie po odlewaniu poddano wyżarzaniu ujednorodniającemu w atmosferze powietrza, w temperaturze  $1200^\circ\text{C}$ . Badania mikrostruktury prowadzono z użyciem mikroskopu skaningowego Philips XL30 (LaB<sub>6</sub>).

Badania erozji kawitacyjnej przeprowadzono na urządzeniu strumieniowo-uderzeniowym, stosując próbki w kształcie walców o średnicy 20 mm. Próbki mocowano do ramion wirnika, równoległe do osi strumienia wody tłoczonyj 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  $1,55 \text{ m}^3/\text{godz}$ .

Tabela. 1. Skład chemiczny badanych stopów

Stop	Zawartość pierwiastka (% wag.)						
	Ni	Al	Zr	B	Cr	Mo	Fe
$\text{Ni}_3\text{Al}$	87,5	11,5	0,46	0,02	–	–	–
$\text{Ni}_3\text{Al}+\text{Cr}$	77,6	12,6	1,57	0,05	8,1	–	–
$\text{Ni}_3\text{Al}+\text{Cr}+\text{Mo}$	79,1	10,4	1,32	0,01	7,8	1,19	–
$\text{Ni}_3\text{Al}+\text{Cr}+\text{Mo}+\text{Fe}$	68,6	10,9	0,22	0,03	6,9	1,22	12,0

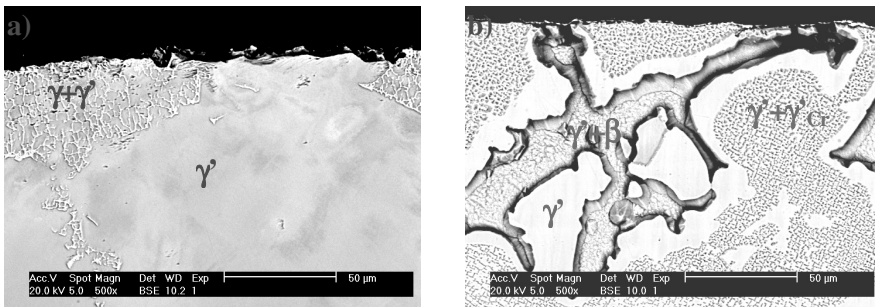
## 2. Wyniki badań

Przeprowadzone badania metalograficzne wykazały, że stan lany stopów na osnowie fazy międzymetalicznej  $\text{Ni}_3\text{Al}$  charakteryzuje się złożoną, pod względem morfologicznym, dendrytyczną budową wielofazową. Osnowę tych stopów stanowi roztwór wtórny typu  $\gamma'$ , w którym można wyróżnić strefy podstawowej objętościowo fazy  $\gamma'$  i występujące obok nich strefy ( $\gamma'+\gamma$ ) (tylko stop  $\text{Ni}_3\text{Al}$  – Rys. 1a) albo też strefy ( $\gamma'+\gamma'_{\text{Cr}}$ ) ( $\gamma'_{\text{Cr}}$  – roztwór wtórny typu  $\gamma'$  znacząco wzbogacony w chrom) (rys. 1b). Jednocześnie w tych samych krystalitach obok obszarów  $\gamma'$ , po granicach krystalitów i w przestrzeniach międzydendrytycznych występują obszary dwufazowe ( $\gamma'+\beta$ ) (rys. 1b). Stwierdzono, że dodatek cyrkonu (~ 0,5% wag.) sprzyja wydzielaniu w objętości analizowanych stopów wydzielen bogatych w cyrkon.

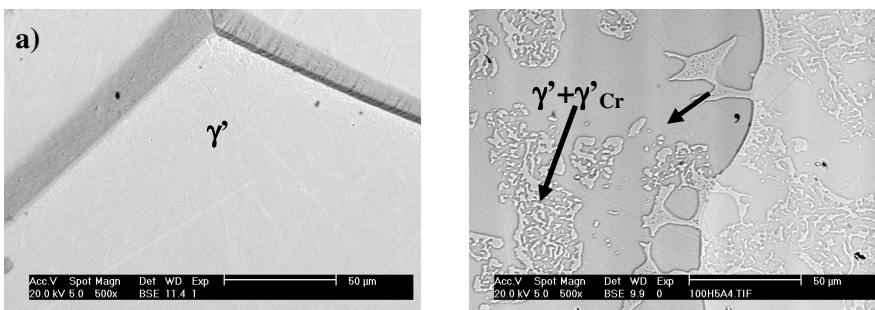
W wyniku procesu homogenizacji w temperaturze  $1200^\circ\text{C}$  w atmosferze powietrza, następuje całkowite ujednorodnienie do jednofazowej struktury  $\gamma'$  (tylko stop  $\text{Ni}_3\text{Al}$  – rys. 2a) lub częściowe ujednorodnienie składu chemicznego, uwidoczniające się zanikiem obszarów dwufazowych ( $\gamma'+\beta$ ) już po 10 godzi-

nach wygrzewania, przy jednoczesnym zachowaniu rozwarstwienia struktury osnowy na strefy podstawowej objętościowo fazy  $\gamma'$  i strefy ( $\gamma' + \gamma'_{Cr}$ ) (rys. 2b).

Na podstawie przeprowadzonych badań efektów procesu erozji kawitacyjnej stwierdzono, że identyfikowane niszczenie opisywanych stopów wywołane jest mechanicznym oddziaływaniem strumienia cieczy roboczej. W pierwszych minutach tego oddziaływania ujawniono zarówno w stanie po odlewaniu, jak i po homogenizacji, różnego rodzaju nieciągłości strukturalne występujące w omawianych stopach (rzadzizny i pęcherze gazowe).



Rys. 1. Mikrostruktura wybranych stopów w stanie po odlewaniu: a) stop  $Ni_3Al$ , b) stop  $Ni_3Al+Cr+Mo$

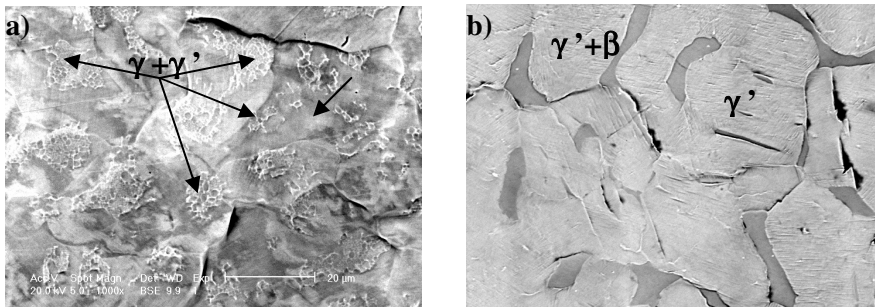


Rys. 2. Mikrostruktura wybranych stopów w stanie po homogenizacji: a) stop  $Ni_3Al$ , b) stop  $Ni_3Al+Cr+Mo$

Pod wpływem dalszego oddziaływania strugi cieczy w badanych materiałach pojawiają się typowe efekty niszczenia powierzchni, między innymi bardzo wyraźne ślady odkształcenia (rys. 3).

Efekty erozji kawitacyjnej obserwowane w warstwie wierzchniej wykazują bardzo wyraźny związek z mikrostrukturą badanych stopów. W przypadku stopu  $Ni_3Al$  stwierdzono, że oddziaływanie cieczy roboczej powoduje „wypiętrzanie” niektórych ziaren przede wszystkim wskutek poślizgu po granicach (rys. 3a).

Natomiast w stopach o wielofazowej budowie (pozostałe stopy) istotnie twardsze obszary dwufazowe ( $\gamma' + \beta$ ) tworzą z reguły „wypiętrzenia”, w związku z efektem „wymiwania” bardziej podatnej (o mniejszej twardości i większej plastyczności) osnowy  $\gamma$ . Powoduje to zmianę chropowatości warstwy wierzchniej i zarazem rzeczywistego kąta padania mikrostrumieni cieczy na powierzchnię próbek, co znacząco wpływa na przebieg jej niszczenia.

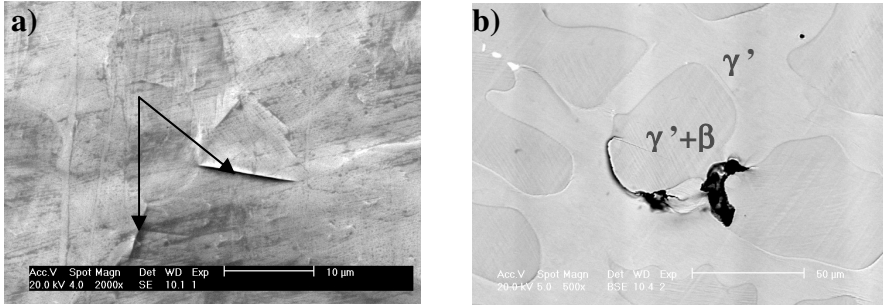


Rys. 3. Falistość warstwy wierzchniej z wyraźną różnicą stopnia odkształcenia plastycznego mikroobszarów warstwy wierzchniej: a) stop  $\text{Ni}_3\text{Al}$ , b) stop  $\text{Ni}_3\text{Al}+\text{Cr}$

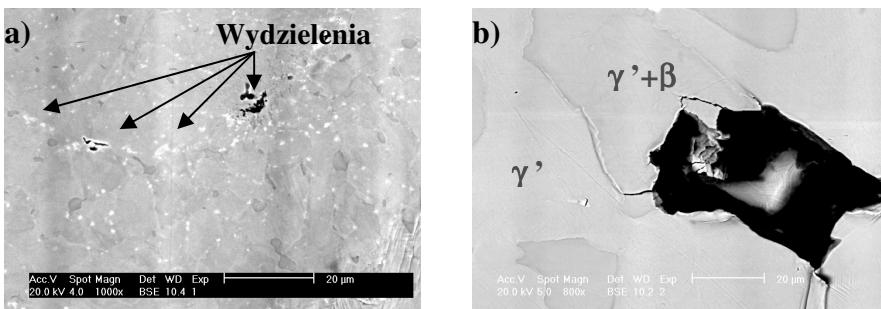
Zaobserwowane zjawisko nie jest równoznaczne z pogorszeniem warunków „współpracy” w układzie warstwa wierzchnia stopu–ciecz robocza, gdyż takie „wyzwalanie” implozji jednorodnie obciążających badaną powierzchnię może nawet zmniejszać efekt zużycia w stosunku do przypadku, kiedy zużycie kawitacyjne jest jednoznacznie zlokalizowane w wybranym obszarze powierzchni próbki. Przeprowadzone obserwacje mikroskopowe wskazują, że pierwsze ubytki i mikropęknięcia powstają przede wszystkim po granicach ziaren (rys. 4a) lub na styku obszarów dwufazowych z osnową stopu (rys. 4b). Przy sprzyjającej orientacji krystalograficznej niektórych ziaren względem kierunku padania strug cieczy dochodzi do pocieniania materiału w strefie ich granic (rys. 4a), odkształcenia plastycznego, a wreszcie lokalnych mikroubytków na granicach międzyfazowych  $\gamma' / (\gamma' + \beta)$  (rys. 4b i 4c).

Dopiero w dalszym okresie oddziaływania cieczy z powierzchnią materiału następuje wykruszanie się krytycznie umocnionych stref ( $\gamma' + \gamma$  – stop  $\text{Ni}_3\text{Al}$ ) lub wydzieleni bogatych w cyrkon oraz – w przypadku stopów wielofazowych – przede wszystkim proces pękania i odrywania fragmentów lub całych obszarów dwufazowych ( $\gamma' + \beta$ ) (rys. 5). Mikropęknięcia zainicjowane w strefach granic ziaren i międzyfazowych rozwijają się przede wszystkim w osnowie  $\gamma$  analizowanych stopów, prowadząc w konsekwencji do wypadania całych ziaren (rys. 6a) lub wypiętrzania obszarów dwufazowych ( $\gamma' + \beta$ ) (RYS. 6b). Na podstawie przeprowadzonych obserwacji fraktograficznych można stwierdzić, że powierzchnia rozdzielania nosi wyraźne oznaki niszczenia zmęczeniowego (rys. 7).

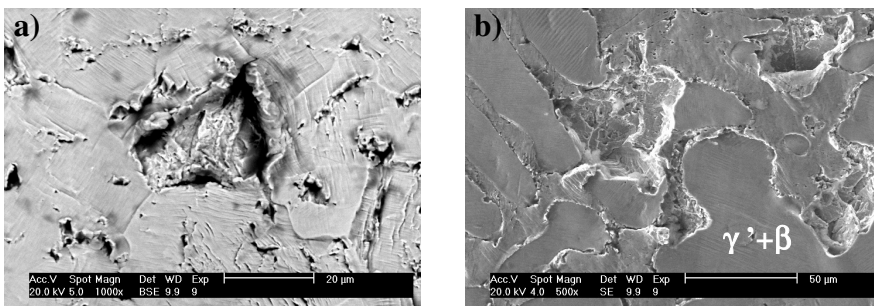
Badania odporności na erozję kawitacyjną badanych stopów po procesie homogenizacji potwierdziły zbieżne mechanizmy inicjowania procesu degradacji powierzchni.



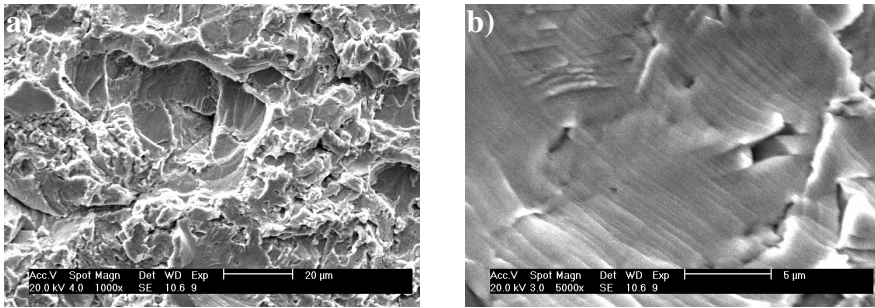
Rys. 4. Uszkodzenia powierzchni materiału wywołane mechanicznym oddziaływaniem strug cieczy i fal ciśnienia: a) wyraźne ślady odkształcenia plastycznego stopu  $\text{Ni}_3\text{Al}$ , b) miejsca inicjacji mikropęknięć w stopie  $\text{Ni}_3\text{Al} + \text{Cr} + \text{Mo} + \text{Fe}$



Rys. 5. Efekty niszczenia powierzchni materiału: a) wykruszania wydzielen bogatych w cyrkon w stopie  $\text{Ni}_3\text{Al} + \text{Cr} + \text{Mo}$ , b) pęknięcie i wykruszanie obszarów dwufazowych ( $\gamma' + \beta$ ) w stopie  $\text{Ni}_3\text{Al} + \text{Cr} + \text{Mo} + \text{Fe}$



Rys. 6. Widok powierzchni z wyraźnymi śladami wyrwanych ziaren (a) stop  $\text{Ni}_3\text{Al}$  i ubytkami osnowy (b) stop  $\text{Ni}_3\text{Al} + \text{Cr} + \text{Mo} + \text{Fe}$



Rys. 7. Efekty erozji kawitacyjnej w postaci ubytku materiału (a,b) połączonego z wystąpieniem prążków zmęczeniowych (b); materiał w stanie po homogenizacji stop  $\text{Ni}_3\text{Al}+\text{Cr}$

## Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań dotyczących początkowej fazy zużycia kawitacyjnego wybranych stopów na osnowie fazy międzymetalicznej  $\text{Ni}_3\text{Al}$  można stwierdzić, że:

- inicjowanie zużycia kawitacyjnego w postaci mikropęknięć i lokalnych ubytków materiału ma podobny charakter dla stopów w stanie po odlewaniu i po homogenizacji;
- pierwsze mikropęknięcia powstają na styku ziaren  $\gamma'$  lub obszarów dwufazowych ( $\gamma' + \beta$ ) z osnową stopu  $\gamma'$ ;
- mikropęknięcia zainicjowane w strefach granic ziaren fazy  $\gamma'$  i granic międzyczłonowych rozwijają się przede wszystkim w osnowie stopów  $\gamma'$ ;
- w dalszym okresie oddziaływania cieczy z powierzchnią materiału następuje proces kruszenia i odrywania fragmentów lub całych ziaren oraz obszarów dwufazowych ( $\gamma' + \beta$ );
- powierzchnia po dłuższym oddziaływaniu cieczy roboczej nosi wyraźne ślady niszczenia zmęczeniowego.

Istotne jest także prowadzenie dalszych prób erozji kawitacyjnej, dla stopów na osnowie faz międzymetalicznych, 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 [5, 6].

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

## Bibliografia

1. Steller K.: Pojęcia podstawowe, ze szczególnym uwzględnieniem pojęć dotyczących maszyn hydraulicznych, Zeszyty Naukowe Instytutu Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk 1982, nr 140/1057/82.
2. Głowacka M., Hucińska J.: Inżynieria Materiałowa (2001) nr 2, s. 79–85.
3. Bugała R., Szkoła M.: Krajowa Konferencja Dobór i Eksploatacja Materiałów Inżynierskich, Jurata 1997, s. 221–227.
4. Steller K.: O mechanizmie nieszczenia materiałów podczas kawitacji, Zeszyty Naukowe Instytutu Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk 1983, nr 175/1107/83.
5. Jasionowski R., Przetakiericz W., Zasada D., Grabian J.: Inżynieria Materiałowa (2005) nr 5, s. 342–345.
6. Jasionowski R., Zasada D.: XXXII Szkoła Inżynierii Materiałowej, Krynica 2004, s. 587–594.

Recenzenci:

**Alfred BRANDOWSKI**

**Jerzy SMOLIK**

## **Analysis of initiation cavitation erosion process mechanism of the chosen alloys based on intermetallic Ni<sub>3</sub>Al phase**

### **Summary**

In the paper the results of research on initial stage – incubation period of a cavitation wear in the intermetallic Ni<sub>3</sub>Al alloys with boron, zirconium, chromium, molybdenum and iron are presented. Investigations were carried out both for as-cast and materials after homogenisation treatment at the temperature 1200°C. Initiation of the cavitation consumption in material as microcracking and local dents had similar character after casting as well as homogenization.