

Wojciech Jurczak
Akademia Marynarki Wojennej

Jerzy Schmidt
Politechnika Krakowska

BADANIE WSPÓŁCZESNYCH MATERIAŁÓW PRZEZNACZONYCH NA PĘDNIKI OKRĘTOWE

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wyniki badań podstawowych właściwości mechanicznych i korozyjnych nowego materiału konstrukcyjnego przeznaczonego na wysokowytrzymałe pędniki okrętowe. Badany materiał wytworzono na bazie niklu z dodatkiem chromu modyfikowanego azotem i pierwiastkami tworzącymi azotki (stop CrNiN). Właściwości nowego stopu CrNiN, który ubiega się o wykorzystanie w budownictwie okrętowym, porównano z właściwościami stopów miedzi obecnie stosowanymi na śruby okrętowe.

Najnowszy stop CrNiN wykazał najlepsze właściwości mechaniczne i bardzo dobrą odporność na korozję wśród brązów stosowanych na śruby, co kwalifikuje ten materiał do dalszych badań celem wdrożenia w budownictwie okrętowym w szerokim zakresie, nie tylko na pędniki, ale także na inne wysoko obciążone elementy.

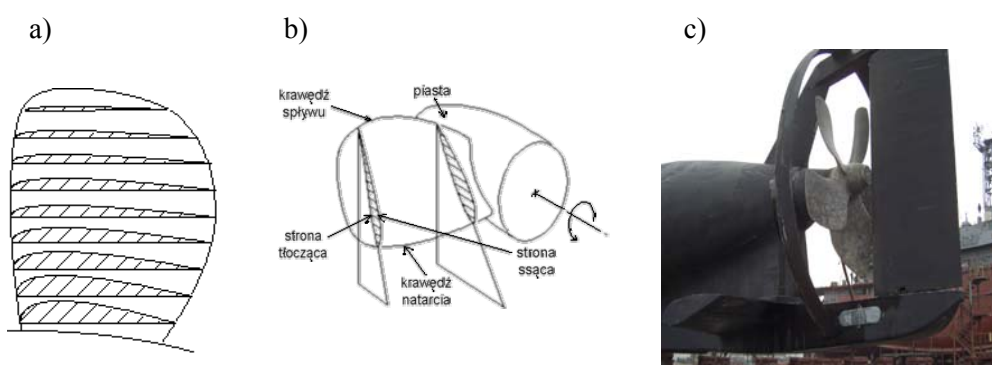
Słowa kluczowe:

pędniki okrętowe, odporność erozyjno-kawitacyjna, wytrzymałość zmęczeniowa.

WSTĘP

W jednostkach pływających układem odpowiedzialnym za ich ruch jest zespół napędowy, w skład którego wchodzi pędnik. Najbardziej rozpowszechnionym typem pędnika jest śruba okrętowa (śruby całolane lub skrzydła śrub nastawnych i sterów strumieniowych) o ciężarze około 750 kg. Jest to urządzenie mające od 3 do 7 skrzydeł (płatów) osadzonych koncentrycznie na piaście i obracanych za

pośrednictwem wału napędzanego przez silnik (rys. 1.) [1]. Gabaryty śrub okrętowych oraz rodzaj materiału warunkują ich zastosowanie w różnego rodzaju jednostkach pływających o różnym przeznaczeniu — inne dla trałowców, inne dla jednostek szybkich. Ze względu na specyficzne warunki eksploatacji szybkoobrotowe śruby napędowe okrętów specjalnych powinny być wykonane z materiałów mających wysokie właściwości mechaniczne (statyczne i dynamiczne), odporność na erozję i korozję, co regulują przepisy [10]. Pędnik-śruba to część układu napędowego najbardziej narażona na korozyjne oddziaływanie wody morskiej. W krajowym budownictwie okrętowym na śruby stosuje się, oprócz stali i nierdzewnego staliwa (H17N2T), następujące stopy miedzi: głównie mosiądz manganowy MM55, brązy układu Cu-Mn-Al (Nowoston, Sonoston, Supreston) i Cu-Al-Ni (Nilakium) o zmiennej zawartości Al (3–7,5%), Fe (3,5%) i Ni (2–4,5%) oraz z dodatkami Zn, Cr, Co, Be i inne [7]. Stopy miedzi przeznaczone na śruby okrętowe powinny spełniać szczególnie wysokie wymagania. Musi je charakteryzować dobra odporność na korozję i erozję, a dla dużych prędkości obrotowych dobra odporność na kawitację. Jest to tylko część wymogów oprócz małej przenikalności magnetycznej i dobrych właściwości tłumiących, jakie winny spełniać materiały na śruby okrętowe.



Rys. 1. Pędnik-śruba okrętowa: a) pojedynczy płat śruby o zmiennym przekroju; b) płat z piastą śruby; c) rzeczywisty wygląd śruby okrętu podwodnego

Materiał na śruby okrętowe musi spełniać wymagania odporności na działanie aktywne korozyjnego środowiska morskiego i wymagania odporności na działanie sił hydrodynamicznych powodujących istnienie znaczących stanów naprężenia.

Od początku lat osiemdziesiątych, mimo utrzymującego się kryzysu w żeludze, obserwuje się wzrost zużycia stopów miedzi w przemyśle okrętowym, zarówno tych do przeróbki plastycznej, jak i stopów odlewniczych. To głównie śruby

napędowe wykonuje się techniką odlewania. Wymagania dotyczące rodzaju stosowanego materiału i jego właściwości mechanicznych, a przede wszystkim dotyczące podstawowych dla konstruktora obliczeniowych naprężeń granicznych, są zawarte w przepisach każdego z towarzystw klasyfikacyjnych [5].

Stopy miedzi wykazują lepszą odporność na korozję od samej miedzi. Czysta miedź jest odporna na korozję w atmosferze morskiej oraz przy stałym zanurzeniu w nieruchomej lub wolno przepływającej wodzie morskiej. Odporność tę tworzą dodatni potencjał elektrodowy oraz ochronne działanie wytwarzającej się warstwy silnie przylegających, trudno rozpuszczalnych produktów korozji. Prędkość korozji czystej miedzi przy stałym zanurzeniu w wodzie morskiej wynosi 0,02–0,07 mm/rok [6].

Korozja miedzi znacznie intensyfikuje się ze wzrostem przepływu wody morskiej. Występują wtedy uderzenia napowietrzonych strugi wody powodujące ciągle miejscowe zniszczenie i usuwanie ochronnej warstwy produktów korozji. Prowadzi to do pojawienia się anodowych obszarów o niższym potencjale pod pozostałym osadem. Tam też przebiega wzmoczona korozja.

Zależnie od rodzaju konstrukcji okrętowych te same stopy miedzi mogą wykazywać różne trwałości w środowisku morskim. Ze względu na agresywność środowiska morskiego rozróżnia się dwa rodzaje konstrukcji. Miedzionikle (gatunków MNŻ101 i MNM301 wg PN-78/H-87052) stosuje się do konstrukcji niemających szczelin lub omywanych wodą morską przepływającą z prędkością 1–2 m/s. Przykładem takiej konstrukcji są rurki wymiennika ciepła.

W celu podwyższenia właściwości użytkowych stopów miedzi stosowanych w budownictwie okrętowym modyfikowano ich strukturę dodatkami stopowymi. Modyfikatory rozdrabniają i zaokrąglają ziarna, rozbijają strukturę dendrytyczną, a często też odtleniają stop. Jako zarodki krystalizacji działają przede wszystkim trudno tliwe i nierozpuszczalne w miedzi metale, jak molibden, wolfram, niob i tantal, fazy międzymetaliczne tytanu, wanadu i cyrkonu z aluminium, węgliku oraz borki. Modyfikatorami można ulepszyć strukturę i własności mechaniczne miedzi i wszystkich jej stopów, przy czym ulepszenie to może mieć pewną specyfikację, zależnie od rodzaju stopu. Modyfikowanie miedzi poza rozdrabnianiem struktury może neutralizować działanie szkodliwych domieszek występujących w roztworze (tlen, wodór, siarka) lub wydzielających się na granicach ziaren w postaci niskotopliwych eutektyk (ołów, bismut). Szczególnie korzystnie działają mikrododatki wapnia, litu i cyrkonu, znacznie zmniejszając kruchość miedzi na gorąco, przy zachowaniu (lit, wapno) dużej przewodności miedzi w brązach aluminiowych (BA93, BA1032) i innych (MM59, MO59, MA58). Wskutek modyfikacji można korzystnie

zmienić strukturę perytektyczną i wydzielenia fazy β . Modyfikowanie stopów miedzi ołowiem (MO59, MO58) powoduje również rozdrobnienie i bardziej równomierne rozmieszczenie wydzieleni ołowiu w strukturze stopu [8].

W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat nastąpił znaczny postęp w zakresie odlewniczych stopów miedzi przeznaczonych na obciążone elementy okrętowych elementów, jak pędniki okrętowe czy wirniki pomp, powodując redukcję gęstości o 10–20%, zwiększenie wytrzymałości materiału, zwiększenie odporności na korozję i zmęczenie korozyjne, a tym samym zmniejszenie prawdopodobieństwa awaryjnych uszkodzeń.

Zastosowanie lżejszych i bardziej wytrzymałych brązów manganowo-aluminiowych na pędniki pozwoliło na zmniejszenie zużycia paliwa i dwukrotne zwiększenie trwałości odlewów (do 20 lat).

Przedstawione korzyści spowodowały, że obecnie większość pędników okrętowych wytwarzana jest z wieloskładnikowych brązów aluminiowych. Ich stosunkowo dobre właściwości użytkowe i technologiczne nie zawsze jednak wystarczają, by sprostać rosnącym wraz z rozwojem techniki okrętowej wymaganiom.

W świetle informacji technicznych wydaje się, że aktualnie rozwój materiałów odlewniczych opiera się na modyfikacji brązów mikrododatkami, np. tytanem, wanadem, cyrkonem, wolframem, bromem berylem i wapniem. Zastosowanie modyfikatorów umożliwia poprawę czystości metalurgicznej (np. odtlenienie brązu), a także wpływa na kształtowanie się pierwotnej mikrostruktury (np. rozdrobnienie struktury). Duże możliwości polepszenia właściwości użytkowych odlewów ze stopów miedzi są jeszcze dalece nieefektywne. Przez odpowiedni dobór parametrów obróbki cieplnej oprócz usunięcia odlewniczych naprężeń prawdopodobnie będzie można uzyskać takie zmiany struktury, które przyczynią się pełniejszego ujawniania potencjalnych możliwości materiałów.

BADANY MATERIAŁ

Inną grupę materiałów odlewniczych o wysokich właściwościach mechanicznych wykorzystywanych w warunkach działania środowiska agresywnego stanowią nadstopy niklowo-chromowe. Jednym z nich jest stop NiCr modyfikowany azotem i pierwiastkami tworzącymi azotki. Pierwiastki te oraz azot w warunkach procesu topienia i odlewania mogą oddziaływać ze sobą, tworząc w strukturze stopu wydzielenie na przykład azotków tytanu.

Mechanizm wpływu azotu i pierwiastków azotkotwórczych na własności tych stopów polega na austenitizacji strukturalnej wyrażającej się zmniejszeniem udziału objętościowego fazy α i na umocnieniu stałych roztworów [3].

Koncepcja stopu została opracowana na Uniwersytecie Technologicznym w St. Petersburgu, gdzie na podstawie obszernych badań fizykochemicznych stworzono metodę prognozowania struktury oraz właściwości stopu zależnie od składników struktury i nasycenia stopu azotem. Odpowiedni dla warunków pracy w środowisku morskim skład chemiczny i strukturę stopu oraz technologię wykonania stopu i odlewów opracowano na podstawie obszernych badań w Instytucie Odlewnictwa w Krakowie z równoczesnym wdrożeniem jego technologii w Przedsiębiorstwie Innowacyjnym Odlewnictwa Specodlew w Krakowie [4]. Opracowana technologia dotyczy śrub napędowych o masie do 250 kg przeznaczonych dla małych i średnich jednostek morskich i została zatwierdzona drogą audytu przez Polski Rejestr Statków do stosowania w PIO Specodlew. Właściwości mechaniczne stopu oraz wykazana wysoka zdolność do odkształceń plastycznych zależne są od struktury stopu, którą można dodatkowo kształtować sposobami obróbki cieplnej.

Przy współpracy z Akademią Marynarki Wojennej wykonano badania właściwości oraz przydatności do pracy w warunkach morskich stopu CrNiN otrzymanego technologią przemysłową. Prace te były realizowane przy wsparciu finansowym w ramach projektu celowego finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (nr 6TO8 2003 C/06289 Projektu).

WYNIKI BADAŃ

Właściwości mechaniczne

Na pędniki okrętowe w krajowym budownictwie okrętowym najczęściej stosuje się mosiądz manganowy MM55 oraz brązy aluminiowe wieloskładnikowe i brązy manganowo-aluminiowe wieloskładnikowe. Do badań celem porównania z właściwościami stopu CrNiN wytypowano po jednym stopie z trzech proponowanych grup stopów miedzi przewidzianych wymogami Polskiego Rejestru Statków (PRS). Szczegółowe wyniki badań właściwości mechanicznych podano w [9], a ich średnie wartości w tabelach 1. i 2. Badania wykonano na MTS zgodnie z PN-EN 10002:2004.

Tabela 1. Skład chemiczny i właściwości porównawczych stopów miedzi przeznaczonych na pędniki okrętowe

Cecha, nazwa stopu	Zawartość składników %					Statyczne właściwości mechaniczne				Grupa wg PRS
	Cu	Al	Mn	Fe	Ni	R _m MPa	R _{0,2} MPa	A ₅ %	E GPa	
MM55	reszta	0,6	4	1	Zn/ reszta	450	180	20	103	Cu 1
Nikalium	reszta	7,8	3	4,2	3,5	610	245	20	121	Cu 3
Nowoston	reszta	8,3	12	4	2	680	300	24	138	Cu 4

Przedstawione powyżej brązy wykonano metodą Showa, poddając wyżarzaniu pełnemu (900 K/120 min i chłodzenie z piecem do 790 K, następnie chłodzenie w temperaturze pokojowej). Dobór technologii odlewania i składu chemicznego warunkuje właściwości mechaniczne (strukturę) pędnika, ale większy wpływ na granice plastyczności R_e niż na granicę wytrzymałości R_m ma wpływ grubości ścianki odlewu. Brązy wieloskładnikowe pozwalają osiągnąć wysoką wytrzymałość $R_m > 600$ MPa przy wydłużeniu powyżej 20%. Niższe właściwości MM55 kwalifikują ten stop do zastosowania na pędniki dużych wolnoobrotowych jednostek pływających.

W tabeli 2. przedstawiono skład chemiczny oraz podstawowe własności stopu typu CrNiN proponowanego do wykorzystania w budowie śrub napędowych o masie do 250 kg. W przedstawionym zakresie jako materiałowo nowy i będący w testowaniu stop ten uzyskał warunkową akceptację Polskiego Rejestru Statków (PRS) do stosowania w jednostkach morskich.

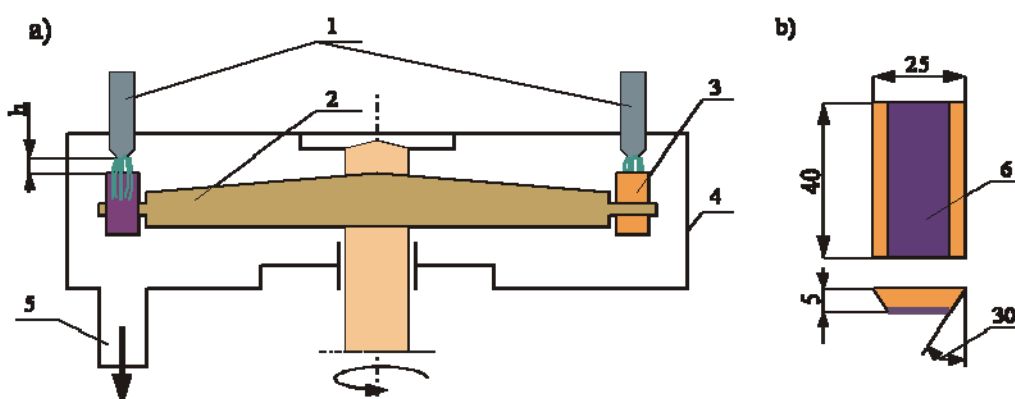
Tabela 2. Skład chemiczny i własności nowego stopu CrNiN

Cecha, nazwa stopu	Zawartość składników %				Statyczne właściwości mechaniczne			Grupa wg PRS
	Ni	Cr	N	reszta	R _m MPa	R _{0,2} MPa	A ₅ %	
CrNiN	52–56	42–46	0.2–0.6	1	800–1100	550–800	15–40	-

Wytrzymałość i dobra plastyczność warunkują wstępne dopuszczenie do zastosowania na jednostkach szybkich pracujących w trudnych warunkach. Duży przedział we właściwościach mechanicznych zależy od parametrów zastrzeżonej obróbki cieplnej i gabarytów odlewu.

ODPORNOŚĆ NA KOROZJĘ

Badania stopu wykonanego technologią przemysłową przeprowadzone zostały w laboratorium Akademii Marynarki Wojennej pod nadzorem PRS-u. Potwierdziły one przewidywane wysokie właściwości stopu w zakresie wymaganym w budowie i eksploatacji pędników okrętowych. Szczególnie istotne są otrzymane wysokie właściwości badanego stopu CrNiN w zakresie odporności erozyjno-kawitacyjnej (OE-K) oraz odporności korozyjnej w warunkach działania naprężenia. Do badań OE-K wykorzystano laboratoryjne urządzenie strugo-uderzeniowe (USU) będące na wyposażeniu AMW (rys. 2.).



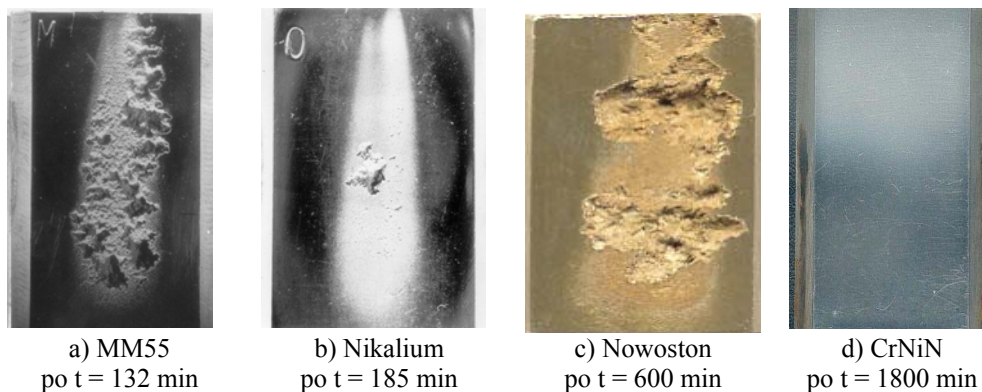
Rys. 2. Stanowisko USU do badania OE-K

- a) schemat urządzenia: 1 — dysze (2 szt.), 2 — wirnik z próbkami (1800 obr/min = 41,4 m/s), 3 — próbka, 4 — obudowa wirnika, 5 — spływ wodnego czynnika do zbiornika cyrkulacyjnego;
- b) kształt i wymiary próbki do badań OE-K: 6 — powierzchnia badanej próbki; odległość dyszy od powierzchni badanej próbki wynosiła 0,8 mm; próbki zdarzały się z kwitującymi strumieniami (\varnothing wylotu z dyszy 6 mm) testującej wody z prędkością ok. 52 m/s, co odpowiada $V = \text{ok. } 100$ węzłów; liczba zderzeń była bliska 3624 na minutę; temperatura wody w zbiorniku zmieniała się od 18 do 25 °C

Podczas porównawczych analiz doświadczalnych nad odpornością (wytrzymałością) erozyjną okrętowych materiałów inżynierskich odtwarzano i zachowywano podczas kolejnych prób te same parametry chropowatości powierzchni oraz działania erozyjno-kawitacyjnego urządzenia strugo-uderzeniowego (USU) i cieczy roboczej. Przykładowo, w badaniu OE-K przeprowadzonym zgodnie z wymaganiami ASTM G32-85 ubytek masy stopu CrNiN po 30 godzinach ekspozycji erozyjno-kawitacyjnej wyniósł zaledwie 0,001 g. Poziom odporności tego stopu w tym zakresie jest wielokrotnie wyższy w stosunku do najlepszych brązów.

Dla porównania, Nowoston po 5 godzinach ekspozycji erozyjno-kawitacyjnej zanotował 100-krotnie większy ubytek masy od Cronin, a Nikalium ten ubytek masy zarejestrował już po 3,2 godzinach. Najniższą odpornością erozyjno-kawitacyjną wykazał się MM55.

Różny czas ekspozycji erozyjno-kawitacyjnej i widoczne ubytki masy na badanych próbkach (rys. 3.) pokazują podatność badanych materiałów na tego rodzaju korozję.



a) MM55
po $t = 132$ min

b) Nikalium
po $t = 185$ min

c) Nowoston
po $t = 600$ min

d) CrNiN
po $t = 1800$ min

Rys. 3. Stan powierzchni próbek badanych materiałów poddanych ekspozycji erozyjno-kawitacyjnej po zderzeniu wirujących próbek z wypływającą z dysz wodą z prędkością ok. $V = 50$ m/s

Na rysunku 4. przedstawiono przykładowe wykresy opisujące OE-K materiałów. Uzyskane z badań dane ilościowe o erozyjnych ubytkach masy próbek G [mg/ μ g] (i/lub głębokości zniszczeń h [mm]) wywołanych w czasie pomiarów t [min lub s] nanoszono na odpowiednie wykresy (rys. 4a). Ich przebiegi zwykle wykazywały znaczne podobieństwo, co pozwoliło je opisać w sposób podany na rysunku 4b, określając objętości ubytku i wprowadzając etap zarodkowania jako etap powstawania mikropęknięć czy kraterów kawitacyjnych, defragmentacji i miejscowych ubytków objętości. Na rysunku 4a przedstawiono rozkład wartości średnich ubytków masy próbek w strefie niszczenia lawinowego (strefa 2), która jest zbliżona do prostej, ale zwykle ma znacznie większe nachylenie, niż to wykazuje prosta aproksymująca wyniki badań na obszarze zarodkowania strefy (strefa 1) [2].

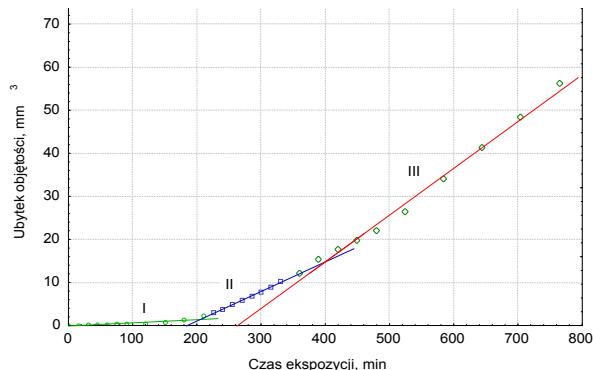
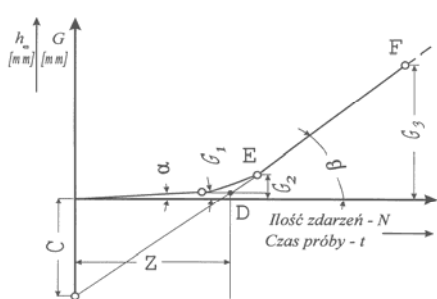
Odcinek strefy inkubacyjnej można opisać równaniem:

$$G1 = \operatorname{tg}\alpha N1 \text{ lub } G1 = a N1 \quad (1)$$

Poza odcinkiem Z (w strefie 2) równanie prostej ma postać:

$$G2 = \operatorname{tg}\beta N2 + C \text{ lub } G2 = b N2 + C, \quad (2)$$

gdzie: $a = \operatorname{tg}\alpha$ — tangens nachylenia krzywej w okresie inkubacyjnym;
 $b = \operatorname{tg}\beta$ — tangens nachylenia krzywej E–F w strefie intensywnej erozji;
 C — przesunięcie funkcji liniowej, zależne od wielkości (Z);
 N — liczba zderzeń wirującej próbki ze strumieniem wody.



a) schemat do opisu parametrów przebiegu krzywych rozwoju uszkodzeń erozyjnych w tzw. strefach niszczenia: inkubacyjnej (Z) i lawinowych zniszczeń erozyjnych (C)

b) średni ubytek objętości próbek wykonanych z Nowostonu w funkcji czasu; I — etap inkubacji (pojawiania się i narastania śladów lokalnych mikroodkształceń plastycznych, defragmentacji ziaren i śladowych ubytków ich objętości, II — etap zarodkowania zniszczenia, III — etap lawinowego rozwoju uszkodzenia

Rys. 4. Wykres odporności erozyjno-kawitacyjnej (OE-K):
 a) opisany w literaturze; b) wybranego badanego materiału

Wielkość okresu inkubacyjnego (wartość Z , czyli „wytrzymałość erozyjną”) można określić wg wielkości odcinka określającego punkt przecięcia się obu prostych — oznaczony symbolem „D” (rys. 4a). Po wstawieniu wartości Z w miejsce N oraz po porównaniu równań (1) i (2), otrzymamy:

$$Z = C / (a - b). \tag{3}$$

Mając ubytek masy $G1$ wywołany liczbą zderzeń $N1$, z równania (1) można określić:

$$a = G1 / N1. \tag{4}$$

Typowe przebiegi tak określonych zależności ubytku masy Δm badanych materiałów od czasu t można dodatkowo numerycznie lub graficznie zróżniczkować, co pozwala uzyskać przebiegi krzywych prędkości erozji w funkcji czasu $\delta(\Delta m) / dt = (t)$ i określić czas, po którym erozja materiału osiągnęła maksymalną prędkość (2. przegięcie).

Ponadto, jeżeli G_2 i G_3 określają średnie ubytki masy próbek po liczbie zderzeń odpowiednio N_2 i N_3 , odniesione do okresu lawinowego (intensywnego) niszczenia opisanego równaniem (2), to można także określić wartości:

$$b = G_2 - G_3 / N_2 - N_3; \quad (5)$$

$$C = \{(G_2 \times N_3) - (G_3 \times N_2)\} / (N_3 - N_2). \quad (6)$$

Po dodatkowym obliczeniu, według (3), wartości Z i wskaźnika intensywności zużycia otrzymujemy

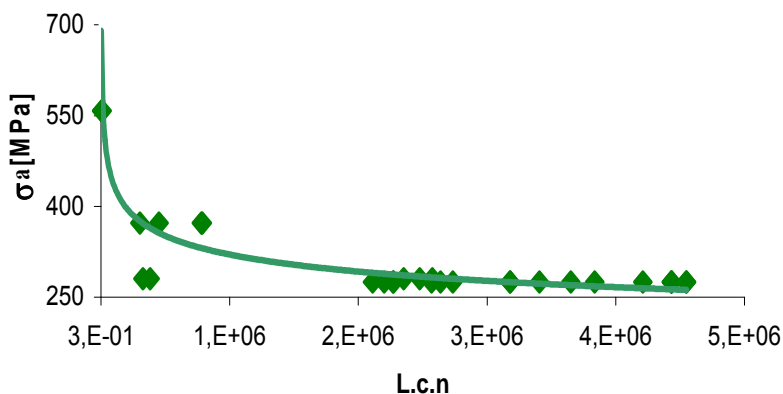
$$I_e = \Delta m / \Delta t \quad (7)$$

i uzyskujemy komplet danych liczbowych potrzebnych między innymi do przybliżonego opisu oraz odpowiednich porównań określonych wyników z badań kinetyki zniszczeń erozyjno-kawitacyjnych różnych materiałów. Podane wyżej zależności postanowiono zatem w dalszej części tej pracy wykorzystać do odpowiednich porównań i scharakteryzowania kinetyki badanych zjawisk w okrętowych materiałach o różnych stanach utwardzenia.

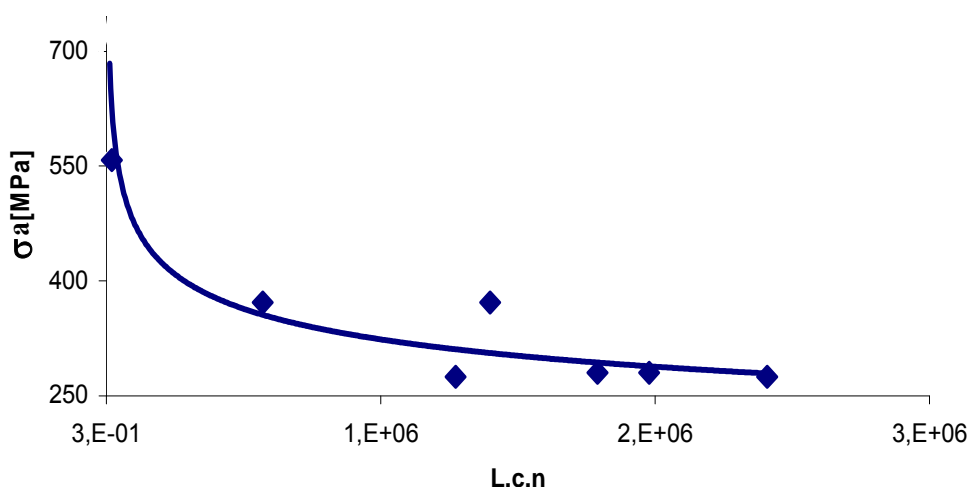
OE-K oceniono przez porównanie okresów zarodkowania makrowzrów erozyjnych T_z i prędkości zużycia erozyjno-kawitacyjnego w okresie równomiernej intensywności erozyjnej V_c poszczególnych stopów. Dla badanych materiałów porównawczych parametry te wyniosły odpowiednio: MM55 $V_c = 52 \mu\text{g/s}$ przy $T_z = 600$ s, Nikalium $30 \mu\text{g/s}$ przy 1300 s, a dla Nowostonu $8 \mu\text{g/s}$ przy 600 s. Dla przykładu podanego na rysunku 4b objętość ubytku erozyjnego na etapie I wyniosła $0,005 \text{ mm}^3/\text{min}$, dla II — $0,06 \text{ mm}^3/\text{min}$, a dla III — $0,1 \text{ mm}^3/\text{min}$. W tym porównaniu nowy stop CrNiN jest szczególnym osiągnięciem technicznym, ponieważ pierwsze oznaki wżerów erozyjnych pojawiły się po 3-krotnie dłuższym czasie oddziaływania czynnika erozyjnego niż dla Nikalium i Nowostonu, a mikroskopijny ubytek masy określono zmianą stanu powierzchni (rys. 3d).

Dla badanych brązów obróbka cieplna polegająca na hartowaniu w wodzie o temperaturze 1200 K zwiększa twardość i polepsza podatność na erozję kawitacyjną [6].

Na rysunkach 5. i 6. przedstawiono wyniki badania wytrzymałości zmęczeniowej stopu CrNiN otrzymane w próbie obrotowo-giętnej prowadzonej dla warunków środowiska powietrznego oraz środowiska wody morskiej zgodnie z *Przepisami projektowania i budowy okrętów* (cz. IX, PRS 1995).



Rys. 5. Przebieg badania wytrzymałości zmęczeniowej stopu CrNiN



Rys. 6. Przebieg badania wytrzymałości zmęczeniowej stopu Cronin w środowisku wody morskiej

Dla oddziaływania obu różnych środowisk na stop w warunkach doświadczenia poziomy naprężeń odpowiadające zniszczeniu próbki są podobne, a wyznaczona wytrzymałość zmęczeniowa jest o takiej samej wartości $Z_{gok} = 275$ MPa. Dla porównania, wytrzymałość na zmęczenie w środowisku wody morskiej (3,5% NaCl) i 5×10^7 cykli dla stopu MM55 wynosi $Z_{gok} = 85$ MPa. Badane brzozy wieloskładnikowe mają dostateczną wytrzymałość zmęczeniową w środowisku wody morskiej i wynosi ona $Z_{gok} = 120$ MPa dla $N_g = 10^8$ cykli naprężeń.

Opracowany stop charakteryzuje się małą wrażliwością na działanie karbu oraz udarnością zwykle przewyższającą znacznie 60 J/cm^2 . Dla wysokowytrzymałych stopów miedzi, jak Nikalium i Nowoston, udarność wynosi $KCV = 30\text{--}55 \text{ J/cm}^2$. Mając w stosunku do stosowanych brązów wysoką twardość, na poziomie 350 HV, nowy stop przeznaczony jest do wykorzystania na małej i średniej wielkości pędniki pracujące w warunkach dużych zanieczyszczeń i przy możliwości kontaktu płyta śruby z ciałami stałymi oraz z pokrywą lodową. Przeprowadzone obliczenia numeryczne efektu wzrostu wytrzymałości konstrukcji pędnika przy zastosowaniu nowego stopu wskazują również możliwość aplikacji tego materiału na wysokiej sprawności pędniki nowej generacji.

WNIOSKI

1. Otrzymane wyniki badań pozwalają stwierdzić, że badany materiał odlewniczy CrNiN spełnia podstawowe wymagania stawiane materiałom na śruby okrętowe i powinny one zostać poddane badaniom eksploatacyjnym.
2. Właściwości mechaniczne nowego stopu CrNiN są najlepsze spośród wszystkich materiałów konstrukcyjnych stosowanych dotychczas na pędniki.
3. Poziom odporności erozyjno-kawitacyjnej stopu CrNiN jest wielokrotnie wyższy w stosunku do najlepszych brązów i MM55 stosowanych na pędniki okrętowe.
4. Stosowane dotychczas stopy na bazie miedzi nie spełniają wszystkich stawianych im wymagań na pędniki okrętów specjalnych. Problem ten może być rozwiązany przez zastosowanie stopu CrNiN.

Przy doborze stopu CrNiN na pędniki okrętowe należy uwzględnić jego stosunkowo wysoki koszt wytworzenia.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Cicholska M., Czechowski M., *Materialoznawstwo okrętowe*, Akademia Morska, Gdynia 2002.
- [2] Fila J., praca statutowa pk. „Zmęczenie”, *Badania nad hydrodynamicznym i mechanicznym zmęczeniem metali uwarunkowanym konstytucją ich warstwy wierzchniej*, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 2001.

- [3] Kazakov A., Schmidt J., Prichodovsky A., *Developing and experimental verification of the technology for producing dispersion reinforced cast nickel-chromium alloys*, Cast Composites 95, CIAFT Conference, Oktober 19–20, Zakopane 1995.
- [4] Projekt celowy 6 TO8 2003C/06289, *Opracowanie technologii wytwarzania i uruchomienie produkcji śrub okrętowych o zmniejszonej awaryjności do małych i średnich jednostek morskich z nowego stopu Cronin*, Przedsiębiorstwo Innowacyjne Odlewnictwa Specodlew.
- [5] Przepisy PRS, *Wymagania na śruby jednostek szybkich*, Gdańsk 2004.
- [6] Scarabello J. M. i in., *Contrybution a l'etude du systeme trenaire Cu-Al-Mn. Determination de la coupe Cu-Mn-Al limitee ou domaine riche en cuivre*, „Revue de Metalurgie”, 1982, No 12, Vol. 79.
- [7] Schmidt J., Kozakow A., *Investigation of CrNi-N Alloys Properties as a Material for Propeller Castings Used by the Shipbuilding Industry*, Advanced Materials Processing, Institute of Materials Engineering, Australasia 2000.
- [8] Sękowski J. i in., *Atlas struktur znormalizowanych stopów odlewniczych*, WNT, Warszawa 1972.
- [9] Sprawozdanie z pracy zleconej pk. „Tur”, *Kompleksowe badania wdrożeniowe nowego stopu Cr-Ni-N przeznaczonego na śruby okrętowe*, praca zlecona, Instytut Odlewnictwa, Gdynia 2006.
- [10] *Wymagania techniczne Marynarki Wojennej dla materiałów na pędniki okrętów specjalnych*, Gdynia 1982.

INVESTIGATING MODERN MATERIALS FOR MARINE PROPELLERS

ABSTRACT

The paper presents the results of fundamental research into mechanical and corrosive properties of new construction material designed for high-resistance maritime propellers. The material investigated was developed on the basis of nickel with addition of chromium modified with nitrogen and elements making nitrides (alloy CrNiN). The properties of the new alloy CrNiN, which is intended to use in shipbuilding, was compared with properties of copper alloys currently used to make ship propellers.

The latest alloy CrNiN offered the best mechanical properties and a very good resistance to corrosion among bronzes used to make propellers, which qualifies the material for further investigations in order to implement in a wide extent, not only to make propellers but also other highly-loaded parts.

Keywords:

ship propellers, corrosion-cavitations resistance, fatigue strength.

Recenzent prof. dr hab. inż. Witold Precht