

Leszek Piaseczny
Krzysztof Rogowski
Akademia Marynarki Wojennej

WPLYW GRUBOŚCI SKRZYDŁA NA STRUKTURĘ I WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE OKRĘTOWEGO PĘDNIKA ŚRUBOWEGO

STRESZCZENIE

Przedstawiono wyniki badań skrzydła okrętowego pędnika śrubowego odlanego z mosiądzu manganowego MM55 w formie piaskowej. Wykazano, że ze zwiększeniem grubości przekroju skrzydła z 15 do 45 mm zwiększyły się udziały faz α i κ w strukturze, zmniejszyła liczba i zwiększyły wymiary wydzielonych faz α i κ oraz zmniejszyły właściwości mechaniczne skrzydła pędnika: R_m o 5,3% i $R_{0,2}$ o 17,8%.

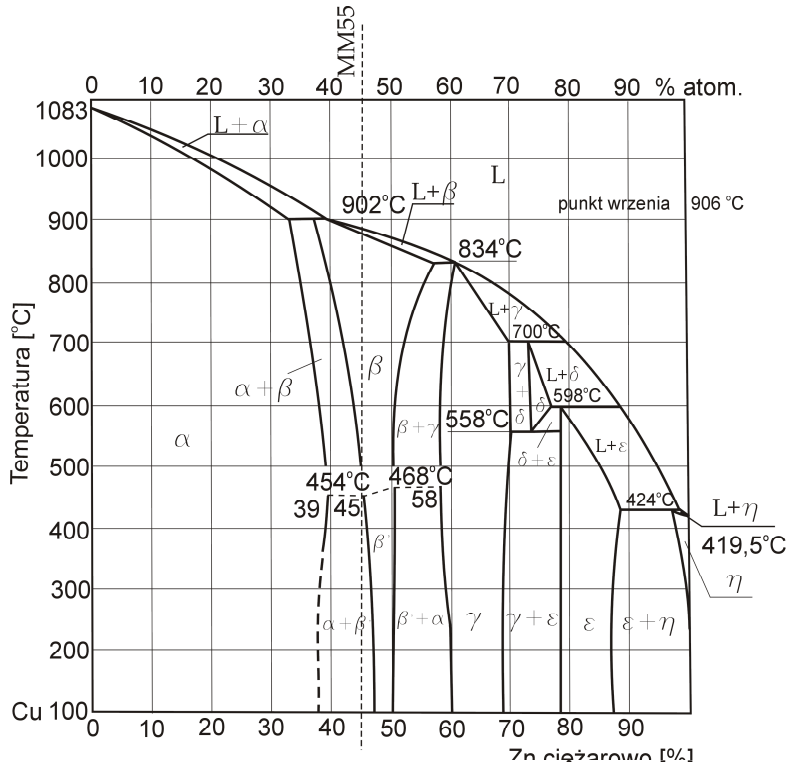
WSTĘP

W mosiądzu manganowym dodatek manganu (max 4%) powoduje obniżenie temperatury topienia mosiądzu, dzięki czemu wchłania on mniej gazów. Przy zawartości do 14% mangan tworzy z miedzią roztwór stały, przeciwdziała rozpadowi się fazy β w mosiądzach, co korzystnie wpływa na właściwości mechaniczne i odporność stopu na korozję w wodzie morskiej. Wspólnie z żelazem tworzy fazy międzymetaliczne rozdrabniające ziarno, co zwiększa wytrzymałość stopu, bez pogorszenia plastyczności stopu.

Aluminium w mosiądzach manganowych (do 3%) wzmacnia ziarna fazy α i fazę β . Zwiększa odporność pędnika śrubowego na korozję i kawitację. Zwiększa wytrzymałość na korozję zmęczeniową i zmniejsza gęstość mosiądzu, pędnik śrubowy jest lżejszy. Zwęża zakres temperatur krzepnięcia, co zwiększa lejność stopu. Aluminium na ciekłym mosiądzu tworzy błonkę tlenków Al_2O_3 utrudniającą odgazowanie stopu, co pogarsza właściwości mechaniczne odlewów. Ostatnio w mosiądzach manganowych na okrętowe pędniki śrubowe zawartość aluminium ogranicza się do max 0,5%.

Ważnym składnikiem mosiądzów manganowych jest żelazo (do 1,5%). Dodatek manganu zwiększa rozpuszczalność żelaza w mosiądzu do 3% [1]. Jak wykazały prezentowane badania, żelazo występuje w fazie α (0,46%), fazie β (0,36%), a głównie w wydzieleniach fazy κ (86,32%). Zależnie od wymiarów i rozproszenia wydzieleni fazy κ wyraźnie zwiększa się wytrzymałość i zmniejsza plastyczność mosiądzu manganowego.

Układ równowagi struktur mosiądzu przedstawiono na rysunku 1.

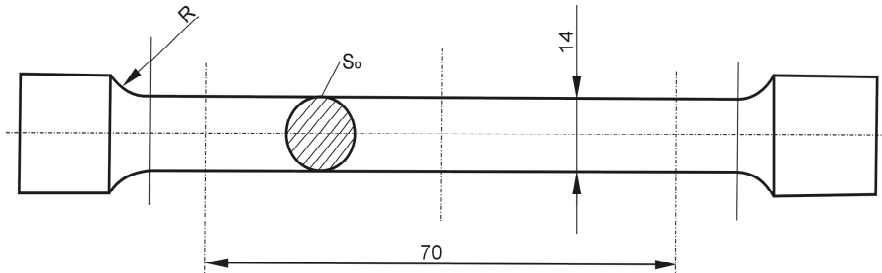


Rys. 1. Układ równowagi struktur mosiądzu Cu-Zn [5]

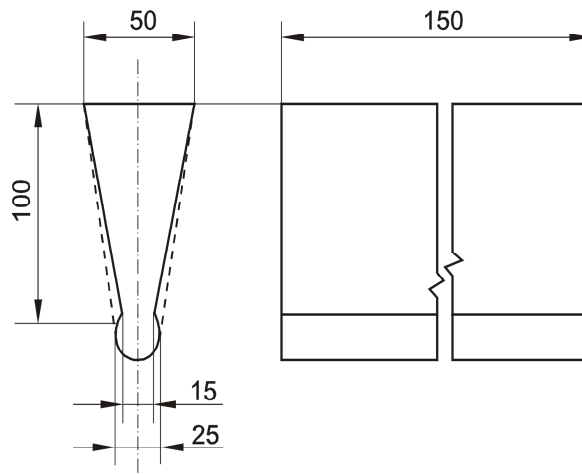
Mosiądze manganowe mają strukturę dwufazową $\alpha+\beta'$ z ewentualnymi wydzieleniami bogatej w żelazo fazy κ [2]. Optymalne skojarzenie właściwości mechanicznych i odporności na korozję występuje przy zawartości w strukturze mosiądzu 30 – 50% fazy α .

Zgodnie z przepisami PRS [6] właściwości mechaniczne mosiądzów manganowych w piaskowych odlewach okrętowych pędników śrubowych powinny wynosić minimum: $R_{0,2}=175 \text{ N/mm}^2$, $R_m=460 \text{ N/mm}^2$ i $A_5=20\%$. Podane w atęcie

właściwości mechaniczne okrętowego pędnika śrubowego producent wyznacza na próbce (rys. 2.) pobranej z wlewka próbnego (rys. 3.). Odpowiadają one w przybliżeniu właściwościom mechanicznym skrzydła pędnika w przekroju o grubości 25 mm. Rzeczywiste wartości właściwości mechanicznych skrzydła w poszczególnych przekrojach o grubościach zwiększających się od wierzchołka skrzydła do wejścia skrzydła w piastę pędnika będą różne, zależnie od występującej w danym przekroju prędkości stygnięcia skrzydła.



Rys. 2. Próbkę do próby rozciągania pobierana z wlewka próbnego [6]



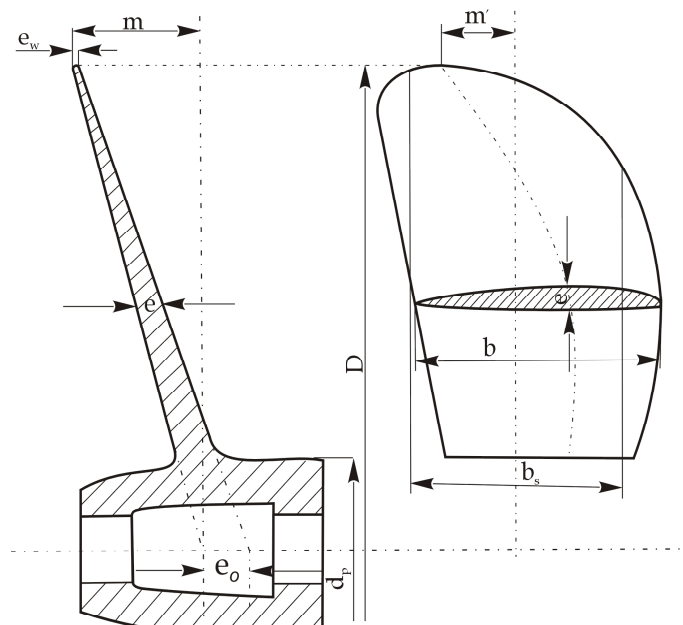
Rys. 3. Wlewek próbny stopu na okrętowe pędniki śrubowe [6]

Znajomość rzeczywistych wartości właściwości mechanicznych, a zwłaszcza właściwości plastycznych skrzydeł pędnika w obszarze prowadzenia naprawy przez prostowanie na gorąco lub spawanie ułatwia wykonanie naprawy, pozwala zmniejszyć odkształcenia i naprężenia spawalnicze i uniknąć ewentualnych pęknięć spawalniczych w spoinie i SWC złącza spawanego [7].

Z tego względu autorzy podjęli badania wpływu grubości skrzydła okrętowego pędnika śrubowego z mosiądzu manganowego MM55 na strukturę i właściwości mechaniczne skrzydeł najczęściej naprawianych elementów pędnika śrubowego [7].

WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Badaniom poddano skrzydło okrętowego pędnika śrubowego z mosiądzu manganowego MM55. Średnica pędnika wynosiła 1200 mm, masa 450 kg, długość skrzydła mierzona od wierzchołka do wejścia w piastę pędnika wynosiła 480 mm. Na promieniu $0,9R$, przy wierzchołku, skrzydło miało grubość 15 mm, a na promieniu $0,25R$, przy wejściu w piastę pędnika, skrzydło miało grubość 45 mm. Kształt i położenie badanego skrzydła w pędniku śrubowym pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Wymiary główne badanego skrzydła pędnika śrubowego:

$D = 1200$ mm – średnica pędnika; $d_p = 240$ mm – średnica piasty pędnika; b – szerokość skrzydła; b_s – średnia szerokość skrzydła; m – odchylenie skrzydła przy wierzchołku; m' – odgięcie skrzydła przy wierzchołku; e – grubość skrzydła; e_w – pozorna grubość skrzydła przy wierzchołku; e_o – pozorna grubość skrzydła w osi pędnika

Próbki do wyznaczania właściwości mechanicznych skrzydła (rys. 2.) pobrano wzdłużnie do szerokości skrzydła ze środków przekrojów skrzydła o grubościach 15, 20, 25, 35 i 45 mm. Badania mikrostruktury przeprowadzono na główkach próbek do prób rozciągania.

Skład chemiczny i właściwości mechaniczne badanego skrzydła pędnika śrubowego podano w tabeli 1. Dla porównania w tabeli podano też odpowiednie zawartości składników i właściwości mechaniczne wymagane przez PN-91/H-87026 i przepisy PRS [6].

Tabela 1. Skład chemiczny i właściwości mechaniczne badanego skrzydła okrętowego pędnika śrubowego

Dane	Skład chemiczny [%]								R _{0,2} [N/mm ²]	R _m [N/mm ²]	A ₅ [%]
	Cu	Sn	Zn	Pb	Mn	Fe	Al	Ni			
Badane skrzydło	54,5	–	41,3	0,02	3,4	1,0	0,21	–	275	488	25,6
PN-91/H-87026	53–58	max 0,5	reszta	max 0,5	3,6–4,0	0,5–1,5	max 0,5	max 0,5	min 180	min 450	min 15,0
Przepisy PRS	52–62	max 1,5	35–40	max 0,5	0,5–4,0	0,5–2,5	0,5–3,0	max 0,5	175	440	min 20,0

Zgodnie z przepisami [6] równoważnik cynku w stopie kategorii Cu1 nie powinien być większy niż obliczony ze wzoru:

$$C_{Zn} = 100 - \frac{100 \cdot \%Cu}{100 + A}, \quad (1)$$

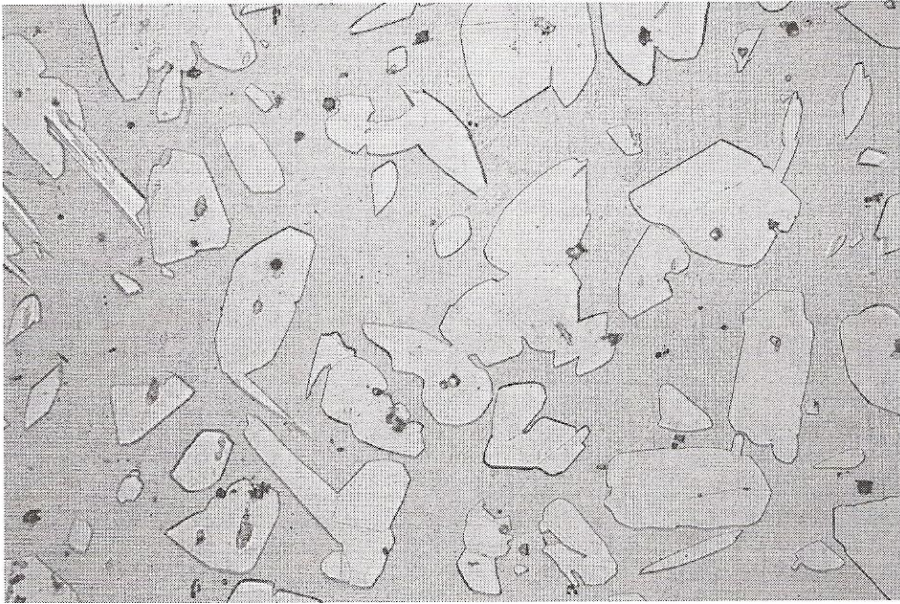
gdzie: $A = 1 \cdot \%Sn + 5 \cdot \%Al - 0,5 \cdot \%Mn - 2,3 \cdot \%Ni - 0,1 \cdot \%Fe$,

nie powinien być większy niż 45%.

W badanym skrzydle pędnika C_{Zn} wynosi 45,1%, co można przyjąć jako skrajne spełnienie wymagań PRS.

Badania struktur skrzydła na szlifach nietrawionych i trawionych przeprowadzono na mikroskopie optycznym Leica Reichert MEF4M. Do badania udziału w strukturze oraz wymiarów wydzieleni faz α , β i κ w mikroskopie zastosowano przystawki do analizy obrazu MultiScan.

Struktury skrzydła pędnika obserwowano na szlifach pobranych z przekrojów o grubościach 15, 20, 25, 35 i 45 mm. Dla przykładu, na rysunkach 5. i 6. pokazano struktury na przekrojach o skrajnych grubościach 15 mm (rys. 5.) i 45 mm (rys. 6.).

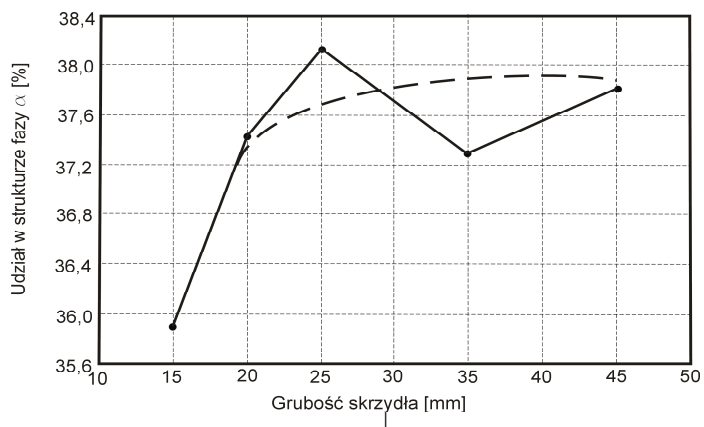


Rys. 5. Mikrostruktura przekroju skrzydła o grubości 15 mm; wydzielienia fazy α (białe) w fazie β' (szare tło) i wydzielienia fazy κ (czarne, drobne, rozproszone); pow. 480x

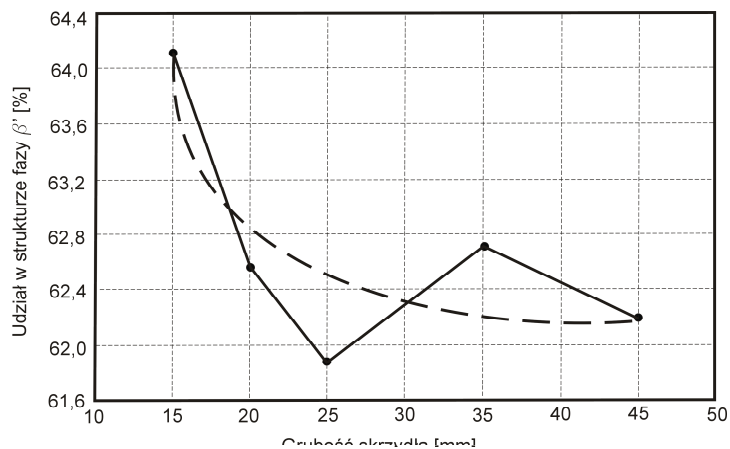


Rys. 6. Mikrostruktura przekroju skrzydła o grubości 45 mm; wydzielienia fazy α (białe) w fazie β' (szare tło) i wydzielienia fazy κ (czarne, grubsze, skupione); pow. 480x

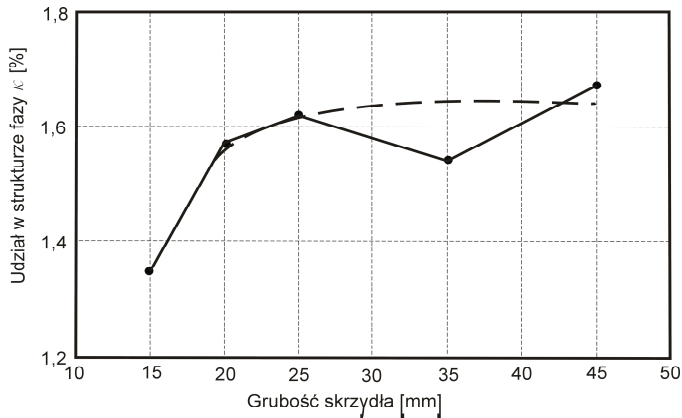
Metodami metalografii ilościowej określono udziały w strukturze skrzydła fazy α (rys. 7.), fazy β' (rys. 8.) i fazy κ (rys. 9.). Zgodnie z przepisami [6] udział fazy α w strukturze pędnika powinien wynosić co najmniej 25%. Jak widać na rysunku 7., w badanym skrzydle pędnika było co najmniej 35,5% fazy α .



Rys. 7. Udział w strukturze fazy α zależnie od grubości przekroju skrzydła pędnika (linia przerywana – przebieg aproksymowany)



Rys. 8. Udział w strukturze fazy β' zależnie od grubości przekroju skrzydła pędnika (linia przerywana – przebieg aproksymowany)



Rys. 9. Udział w strukturze fazy κ zależnie od grubości przekroju skrzydła pędnika (linia przerywana – przebieg aproksymowany)

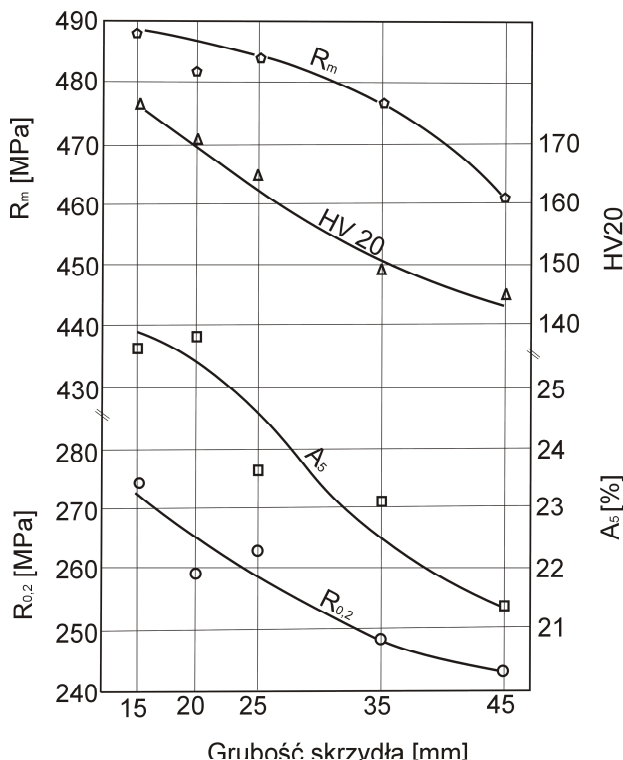
Jak widać na rysunkach, niezależnie od grubości przekroju skrzydła pędnika w strukturze skrzydła pędnika dominuje faza β' , mało plastyczna, lecz o dużej wytrzymałości, będąca wtórnym roztworem stałym cynku w miedzi, o stężeniu 3/2, wzmocnionym głównie żelazem. Uporządkowanie tej fazy następuje z obniżeniem temperatury poniżej 454 °C (rys. 1.). Głównie ona stanowi o właściwościach mechanicznych skrzydła. Jak widać na rysunku 8., ze zwiększeniem grubości przekroju skrzydła zmniejsza się udział fazy β' w strukturze, czyli materiał musi zmniejszyć wytrzymałość i plastyczność. Zasadnicze zmniejszenie udziału fazy β' w strukturze powstaje przy zwiększeniu grubości przekroju skrzydła do 25 mm. Można przyjąć, że dalsze zwiększenie grubości przekroju skrzydła nie zmienia udziału fazy β' w strukturze skrzydła.

Ze zwiększeniem grubości przekroju zwiększa się natomiast udział w strukturze skrzydła fazy α (rys. 7.), która jest roztworem stałym cynku w miedzi o lepszej plastyczności i mniejszej wytrzymałości niż faza β' . Zasadnicze zwiększenie udziału fazy α w strukturze powstaje przy zwiększeniu grubości przekroju skrzydła do 20 mm. Dalsze zwiększenie grubości przekroju skrzydła praktycznie nie zmienia udziału fazy α w strukturze. To stanowi o pewnym zmniejszeniu wytrzymałości skrzydła pędnika ze zwiększeniem grubości jego przekroju.

Ze zwiększeniem grubości przekroju skrzydła udział fazy κ w strukturze też się zwiększa, ale w ogóle udział tej fazy w strukturze jest bardzo mały (1,4 – 1,6%). Na rysunku 9. widać, że zasadnicze zwiększenie objętości wydzielań fazy κ następuje przy zwiększeniu grubości przekroju skrzydła do 25 mm, a przy dalszym

zwiększeniu grubości przekroju skrzydła udział fazy κ w strukturze skrzydła praktycznie nie zmienia się. Istotniejsze jest to, że ze zwiększeniem grubości przekroju skrzydła wydzielona faza κ zwiększa swoją objętość i wykazuje tendencję do skupiania się. To powinno zmniejszyć umocnienie dyspersyjne materiału skrzydła i poprawić plastyczność skrzydła.

Wyznaczone zmiany właściwości mechanicznych zależnie od grubości przekroju skrzydła pędnika pokazano na rysunku 10.



Rys. 10. Właściwości mechaniczne zależnie od grubości przekroju skrzydła okrętowego pędnika śrubowego

Na rysunku 10. widać, że dokładnie można wyznaczyć przebieg zmian właściwości przy wyznaczaniu R_m i HV20. Wyznaczanie $R_{0,2}$ i A_5 dało większy rozrzut wartości pomiarowych, co być może wynikało z samej techniki pomiarów.

Jak wykazały badania, zmiana udziału faz w strukturze skrzydła występuje przede wszystkim przy zwiększeniu grubości przekroju skrzydła z 15 do 25 mm i tylko w tym zakresie może tłumaczyć pogorszenie właściwości mechanicznych

skrzydła. Jak widać na rysunku 10., pogorszenie właściwości mechanicznych następuje także przy dalszym zwiększeniu grubości przekroju skrzydła z 25 do 45 mm i tego nie można już wytłumaczyć dalszymi zmianami udziału faz w strukturze, bo nie dają się zmierzyć. Stąd wynika, że o pogorszeniu właściwości mechanicznych skrzydła muszą decydować też inne czynniki. Dla ich ujawnienia przeprowadzono dodatkowe badania metalograficzne wymiarów wydzieleni faz [3, 4, 8]. Wyniki tych badań zestawiono w tabelach 2 i 3.

Tabela 2. Rozkład wymiarów wydzieleni fazy α w skrzydle pędnika śrubowego

Grubość [mm]	Wydzieleni o wymiarach [%]					
	0 – 500 [μm]	501 – 1000 [μm]	1001 – 5000 [μm]	5001 – 10000 [μm]	10001 – 50000 [μm]	50001 – 100000 [μm]
15	66,23	10,22	19,54	4,01	–	–
20	51,49	9,88	33,02	3,52	2,09	–
25	55,10	9,90	25,09	6,68	3,23	–
35	36,54	9,82	35,21	12,85	5,58	–
45	21,11	12,01	42,50	11,33	8,70	4,35

Tabela 3. Rozkład wymiarów wydzieleni fazy κ w skrzydle pędnika śrubowego

Grubość [mm]	Wydzieleni o wymiarach [%]				
	0 – 10 [μm]	11 – 30 [μm]	31 – 50 [μm]	51 – 100 [μm]	101 – 200 [μm]
15	79,44	9,45	7,15	3,96	–
20	78,16	8,66	9,64	3,54	–
25	76,42	9,96	9,16	3,64	0,82
35	74,91	12,72	8,49	3,26	0,62
45	70,42	12,93	11,39	4,20	1,06

Jak widać w tabelach 2. i 3., ze zwiększeniem grubości przekroju skrzydła maleje liczba drobnych wydzieleni, natomiast zwiększa się liczba grubszych wydzieleni faz α i κ i to, obok zmian udziału faz w strukturze skrzydła, powoduje pogorszenie właściwości mechanicznych ze zwiększeniem grubości przekroju skrzydła.

Układ punktów pomiarowych na rysunku 10. wskazuje, że zmniejszenie właściwości mechanicznych odlewu skrzydła pędnika jest związane ze zmniejszeniem prędkości stygnięcia odlewu w formie piaskowej. Przez zmniejszenie prędkości stygnięcia odlewu jest więcej czasu do narastania dużych ziaren w skrzydle, do

zwiększenia wydzielenia fazy α i wynikłego z tego zmniejszenia udziału fazy β' w strukturze skrzydła, do koagulacji wydzielen fazy κ i skupiania się tych wydzielen w obszarach bogatszych w żelazo.

Jak widać na rysunku 10., zwiększenie grubości przekroju skrzydła dało zmniejszenie: $R_{0,2}$ o ok. 18,3%, R_m o ok. 5,3%, A_5 o ok. 17,4% oraz HV20 o ok. 17,6%. Pozwala to uznać, że ze zwiększeniem grubości przekroju skrzydła pędnika pogarszają się przede wszystkim właściwości plastyczne, a mniej wytrzymałość skrzydła. Można oczekiwać, że spawanie naprawcze skrzydła w najgrubszym przekroju będzie trudne lub wręcz niemożliwe bez powstawania niezgodności spawalniczych, głównie pęknięć w spoinie i SWC złączy [7].

WNIOSKI

Wyniki badań skrzydła okrętowego pędnika śrubowego stanowiącego odlew piaskowy z mosiądzu manganowego MM55 pozwalają stwierdzić, że ze zwiększeniem grubości przekroju skrzydła:

1. Zwiększa się udział w strukturze fazy α i κ , a zmniejsza udział fazy β' . Wydzielenia faz stają się grubsze i mniej rozproszone.
2. Zmniejszają się właściwości mechaniczne skrzydła, przy czym zmniejszenie właściwości plastycznych jest większe niż zmniejszenie wytrzymałości. $R_{0,2}$, HV20 i A_5 zmniejszyły się średnio o 17,8%, natomiast R_m zmniejszyła się tylko o 5,3%.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Adamski C., Bonderek E., Piwowarczyk T., *Mikrostruktury odlewniczych stopów miedzi i cynku*, Wyd. Śląsk, Katowice 1972.
- [2] Hansen M., Anderko K., *Constitution of binary alloys*, McGraw – Hill, New York – Toronto – London 1958.
- [3] PN-84/H-04501, Metale. Metalograficzne badania wielkości ziarna. Mikroskopowe metody określenia wielkości ziarna.
- [4] PN-EN ISO 2624:1997, Miedź i stopy miedzi. Określenie średniej wielkości ziarna.

- [5] Prowans S., *Metaloznawstwo*, PWN, Warszawa 1988.
- [6] PRS, Przepisy klasyfikacji i budowy statków morskich, cz. XIII, *Materiały*, cz. XIV, *Spawanie*, Gdańsk 2002.
- [7] PRS, Publikacja Nr 7/P, Naprawy śrub napędowych ze stopów miedzi, Gdańsk 2002.
- [8] Wojnar L., Majorek M., *Komputerowa analiza obrazu*, CSS Ltd., <http://www.photonics.com/dictionary/lookup/XQ/ASP>.

ABSTRACT

The paper presents the results of investigations into a blade of marine screw propeller cast from manganic brass MM55 in the sand form. The results show that as the thickness of the section of the blade increased from 15 to 45 mm the phase portions α and κ in the structure increased, the number decreased and dimensions of separated phases α and κ increased, and the mechanical properties of the screw propeller decreased: R_m by 5,3% and $R_{0,2}$ by 17,8%.

Recenzent prof. dr hab. inż. Zbigniew Zaczek