

NISKOCYKLOWA WYTRZYMAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA STOPÓW UKŁADU AL-MG W ZŁOŻONYM STANIE NAPRĘŻENIA

Próbki badanych stopów $AlMg_2Mn_{0,47}Fe_{0,5}$ i $AlMg_6$ poddano wahadłowemu zginaniu zginaniu/skręcaniu oraz wahadłowemu skręcaniu na stanowisku badawczym. Badania dla wieloosiowego stanu obciążenia wymagają odpowiedniego stanowiska. Uzyskane wyniki wykazały, że wytrzymałość zmęczeniowa badanych stopów aluminium jest największa dla wahadłowego zginania i najmniejsza dla wahadłowego skręcania. Wyniki trwałości zmęczeniowej dla wieloosiowego stanu obciążenia są bardzo cenne z uwagi na to, że zdecydowana większość mechanizmów podlega złożonemu stanowi naprężenia.

WSTĘP

W badaniach niskocyklowych wyróżnia się odkształcenia plastyczne, które wpływają na wytrzymałość zmęczeniową materiału. Powodują pojawienie się pętli histerezy podczas jednoczesnego rejestrowania odkształcenia i naprężenia. W pętli histerezy gdzie naprężenia rosły wraz z liczbą cykli naprężeń mówi się o cyklicznym umacnianiu materiału, natomiast gdy naprężenia maleją mówi się cyklicznym osłabianiu materiału [8].

Urządzenia techniczne podlegają najczęściej wieloosiowemu zmęczeniowemu stanowi obciążenia. Ten przypadek obciążenia pomimo różnych prób i metod nie jest tak dokładnie zbadany i opisany jak jednoosiowa trwałość zmęczeniowa. Prowadzone badania nad zmęczeniem wieloosiowym nie stworzyły jednoznacznych zasad opisujących zarówno przypadek nisko jak i wysokocyklowy, chociaż podejmowane są próby sformułowania wieloosiowego kryterium dla przypadku nisko i wysokocyklowego [5, 6, 7].

W poniższej pracy skoncentrowano się na zagadnieniu wyznaczenia trwałości zmęczeniowej stopów układu Al-Mg, a w szczególności $AlMg_2Mn_{0,47}Fe_{0,5}$ (wg PN PA2, wg EN 5251) i $AlMg_6$. Wykonane z tych stopów próbki poddano złożonemu stanowi obciążenia. Zasadniczym celem pracy było przeprowadzenie testów mających na celu określenie wytrzymałości zmęczeniowej materiałów w złożonym stanie naprężenia.

1. WYTRZYMAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA W ZŁOŻONYCH STANACH NAPRĘŻEŃ

W laboratoriach prowadzone są badania na próbkach poddanych odpowiednim obciążeniom na zaprojektowanych w tym celu specjalizowanych maszynach zmęczeniowych w oparciu o przygotowane testy. Maszyny te pozwalają na badanie próbek z materiałów konstrukcyjnych, w których wytworzony jest wieloosiowy stan naprężenia. Uzyskane z badań wiarygodne wyniki pozwalają na dobór odpowiednich kryteriów określających wytrzymałość zmęczeniową wyznaczoną na bazie badań eksperymentalnych. Kryteria określające wytrzymałość zmęczeniową w złożonym stanie naprężenia można znaleźć m.in. w pozycjach [1÷4, 13].

W pracy zaprezentowano badania zmęczeniowe dla wieloosiowego stanu obciążenia, przeprowadzone na prototypowej maszynie zmęczeniowej do wyznaczenia wytrzymałości zmęczeniowej materiałów konstrukcyjnych szczególnie narażonych na korozję.

Maszyna ta jest przykładem wykonania urządzenia, na które uzyskano patent [11]. Znajduje się ona w laboratorium Akademii Marynarki Wojennej. Stanowisko to umożliwia przeprowadzenie badań zmęczeniowych na zginanie, skręcanie oraz jednoczesne zginanie/skręcanie przy różnym udziale tych naprężeń. Szczegółowy opis maszyny jest pod pozycją [10].

Liczba uzyskanych cykli jest rejestrowana na komputerze oraz dodatkowo za pomocą elektronicznego licznika przy wykorzystaniu specjalnego oprogramowania i elektronicznego modułu, który jest podłączony do ruchomego ramienia za pomocą tensometrów elektronicznych.

Odpowiednią wartość naprężenia w próbce uzyskuje się w wyniku obrotu koła zamachowego, na którym zamontowane są odważniki. Koło zamachowe doprowadza się do odpowiedniej prędkości obrotowej, dzięki czemu uzyskuje się wymagane obciążenie. Do koła zamachowego zamocowane jest ramię, które pociąga dźwignię powodującą zginanie/skręcanie próbki. Wartość naprężenia jest cały czas kontrolowana na monitorze i zapisywana w komputerze. Zasadniczo rejestrowana jest wartość napięcia, które jest przekalowane na naprężenie.

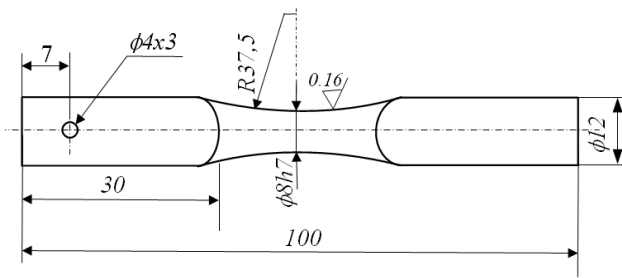
2. BADANIA WŁASNE STOPU $ALMg_2Mn_{0,47}Fe_{0,5}$ I $ALMg_6$

Właściwości mechaniczne badanych stopów $AlMg_2Mn_{0,47}Fe_{0,5}$ i $AlMg_6$ określono w oparciu o przygotowane próbki, których kształt i wymiary są zgodne z obowiązującymi normami: Norma PN-EN 10002-1:2004 oraz Norma PN-EN 10045-1:1994. Na podstawie statycznej próby rozciągania uzyskano wyniki, które zestawiono w tabeli 1. Szczegółowe wyniki badań wytrzymałości zmęczeniowej stopu $AlMg_6$ dla wahadłowego zginania przedstawiono w pracy [9].

Tab. 1. Właściwości mechaniczne próbek ze stopu $AlMg_2Mn_{0,47}Fe_{0,5}$ i $AlMg_6$

Stop	Właściwości plastyczne, %		Właściwości mechaniczne, MPa	
	A ₅	Z	R _m	R _{0,2}
$AlMg_2Mn_{0,47}Fe_{0,5}$	28	70	183	102
$AlMg_6$	23,5	23,6	358	180

Z blach o grubości 12 mm wykonano próbki do badań zmęczeniowych, których kształt i wymiary przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Kształt i wymiary próbek do badań zmęczeniowych

Zakłada się różne warianty wymiarów próbki. Średnica jej środkowej części może przyjmować wymiary od 6 do 8 mm. W badaniach zastosowano próbki o średnicy 6 mm. Wytrzymałość zmęczeniową przeprowadzono dla zginania, skręcania i zginania/skręcaniem. Na rysunkach 2-5 przedstawiono uproszczone wykresy Wöhlera w układzie $\sigma_a, \log N$ będących krzywymi zmęczeniowymi badanych stopów aluminium. Krzywe zostały wyznaczone na podstawie tylko trzech punktów. Każdy punkt został określony w oparciu o wyniki badań z dwóch próbek. Symbole „0”, „45” i „90” oznaczają wartość nastawy głowicy. Dzięki temu możliwe jest realizowanie odpowiednio dla „0” obciążenie próbki wyłącznie momentem gnącym, dla „90” obciążenie próbki wyłącznie momentem skręcającym, „30”, „45”, „60” obciążenie próbki momentem zginającym i skręcającym. Udział tych momentów można określić za pomocą zależności podanych poniżej.

Dla próbki obciążonej wyłącznie momentem gnącym:

$$\alpha = 0^\circ, M(t) = M_g(t), \sigma = \frac{M_g(t)}{W_x} \quad (1)$$

Dla próbki obciążonej wyłącznie momentem skręcającym:

$$\alpha = 90^\circ, M(t) = M_s(t), \tau = \frac{M_s(t)}{2W_x} \quad (2)$$

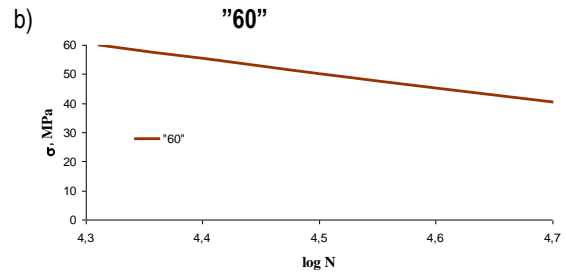
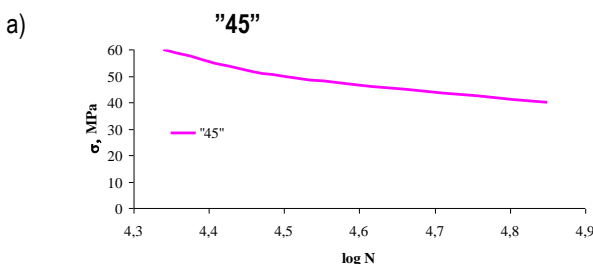
W przypadku zginania ze skręcaniem zgodnie z hipotezą Hubera:

$$M_z(t) = \sqrt{M_g^2(t) + 0,75M_s^2(t)}, \quad \sigma = \frac{M_z(t)}{W_x}, \quad M_z(t) - \text{moment zastępczy (z hipotezy Hubera)} \quad (3)$$

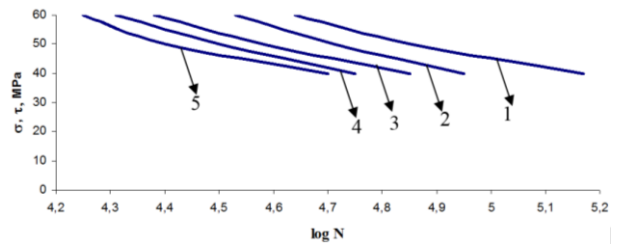
$$\alpha = 30^\circ, M_z(t) = \frac{\sqrt{15}}{4} M(t) \quad (4)$$

$$\alpha = 45^\circ, M_z(t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{7}}{2} M(t) \quad (5)$$

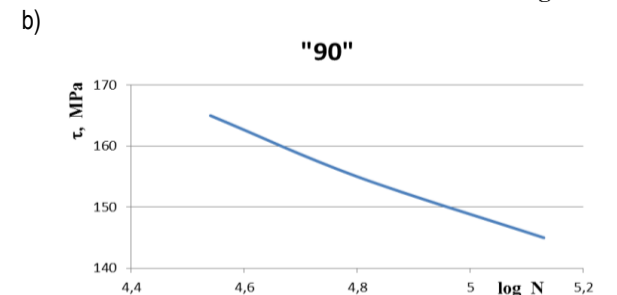
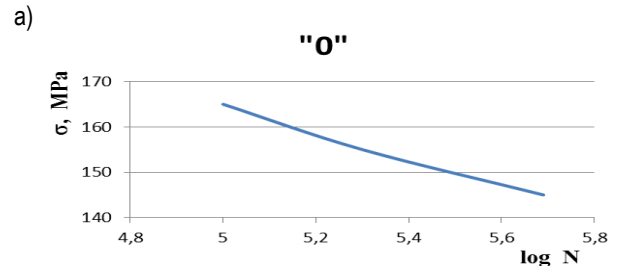
$$\alpha = 60^\circ, M_z(t) = \frac{\sqrt{13}}{4} M(t) \quad (6)$$



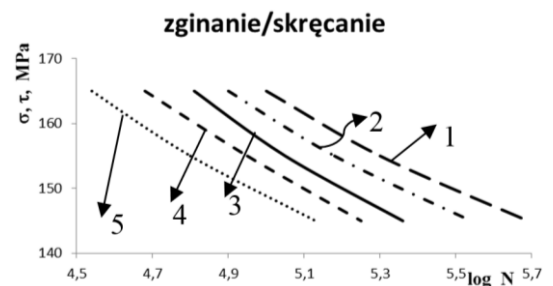
Rys. 2. Uproszczone wykresy zmęczeniowy Wöhlera dla: a) zginanych/skręcanych „45”, b) zginanych/ skręcanych „60” próbek ze stopu AlMg2Mn0,47Fe0,5



Rys. 3. Uproszczone zbiorczy wykres zmęczeniowy Wöhlera dla wahadłowo zginanych, skręcanych, zginanych/skręcanych próbek ze stopu AlMg2Mn0,47Fe0,5 1 – zginanie; 2 – „30” zginanie/skręcanie; 3 – „45” zginanie/skręcanie; 4 – „60” zginanie/skręcanie; 5 – „90” skręcanie



Rys. 4. Uproszczone wykresy zmęczeniowy Wöhlera dla: a) wahadłowo zginanych „0”, b) wahadłowo skręcanych „90” próbek ze stopu AlMg6



Rys. 5. Uproszczone zbiorczy wykres zmęczeniowy Wöhlera dla wahadłowo zginanych, skręcanych, zginanych/skręcanych próbek ze stopu AlMg6, 1 – „0” zginanie; 2 – „30” zginanie/skręcanie; 3 – „45” zginanie/skręcanie; 4 – „60” zginanie/skręcanie; 5 – „90” skręcanie

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ I WNIOSKI KOŃCOWE

Podjęta w pracy tematyka określania wytrzymałości zmęczeniowej materiałów konstrukcyjnych na przykładzie stopów aluminium układu Al-Mg dla wieloosiowego stanu naprężenia wykazała, że przeprowadzenie takich badań jest dość złożonym zagadnieniem. Badania zmęczeniowe przeprowadzono w niewielkim zakresie obciążenia i ograniczonej liczbie cykli naprężeń z uwagi na określone możliwości prototypowego stanowiska. Niemniej badania potwierdziły możliwości określenia wytrzymałości zmęczeniowej materiałów dla samego tylko wahadłowego zginania, wahadłowego skręcania lub kombinacji (przy różnym udziale momentu gnącego bądź skręcającego) zginania/skręcania. Uzyskane poprawne wyniki, wskazują na dalsze prace tak w zakresie samych badań wieloosiowego stanu obciążenia (próbek z materiałów) jak i ciągle doskonalenie sprzętu. Wyniki badań wykazały, że najwyższą trwałość wykazały próbki z obydwu materiałów poddane obciążeniu momentem gnącym czyli dla cyklu wahadłowego zginania (rysunki 3 i 5). Najniższą trwałość wykazały próbki obciążone momentem skręcającym. Na rysunku 3 i 5 przedstawiono krzywe trwałości zmęczeniowej Wöhlera obrazujące charakter ich przebiegu. Zasadniczym celem pracy było przeprowadzenie testów mających na celu określenie wytrzymałości zmęczeniowej materiałów w złożonym stanie naprężenia oraz sprawdzenie przydatności prototypowego stanowiska do przeprowadzenia badań zmęczeniowych dla wieloosiowego stanu obciążenia. W literaturze brak jest danych odnośnie trwałości zmęczeniowej stopu AlMg6 dla wieloosiowego stanu obciążenia. W związku z tym uzyskane wyniki zmęczeniowe mogą być bardzo przydatne dla analizowanego złożonego stanu naprężenia.

Celowe jest przeprowadzenie badań zmęczeniowych dla cykli asymetrycznych. Sposób obciążenia próbek momentami wykazał, że uzyskanie dużych wartości momentów (w celu uzyskania dużych wartości naprężeń w próbce) dla tego rodzaju napędu ogranicza zastosowanie tego stanowiska dla materiałów o doraźnej wytrzymałości na rozciąganie nie przekraczającej 400 MPa.

BIBLIOGRAFIA

1. Ballard P., Dang Van K., Deperrois A., Papadopoulos Y. V., *High cycle fatigue and a finite element analysis*, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol.18, pp397-411, 1995.
2. Banvillet A., Palin-Luc T., Lasserre S., *A volumetric energy based high cycle multiaxial fatigue criterion*, Int. Journal of Fatigue, Vol 25, pp755-769, 2003.
3. Carpinteri A., Spagnoli A., *Multiaxial high-cycle fatigue criterion for hard metals*, Int. Journal of Fatigue, Vol 23, pp135-145, 2001.
4. Carpinteri A., Spagnoli A., Vantandori S., *A multiaxial fatigue criterion for random loading*, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol 26, pp515-522, 2003.
5. Constantinescu A., Dang Van K., Maitournam M. H., *A unified approach for high and low cycle fatigue based on shakedown*

- concept*, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 26, pp561-568, 2003.
6. Constantinescu A., Dang Van K., *A Global Computational Approach in Engineering Problems Identification and Fatigue*, Lecture Notes 10, IPPT PAN and CoE AMAS, Warsaw, 2004.
 7. Dang Van K., *Unified fatigue modelling for structural applications based on a multiscale approach and shakedown hypothesis*, Workshop: Optimal Design, Laboratoire de Mécanique des Solides, Ecole Polytechnique Palaiseau, France, 2003.
 8. Kocańda S.: *Zmęczeniowe pękanie metali*, WNT, Warszawa 1985.
 9. Kyzioł L.: *Wpływ obróbki cieplnej na odporność na korozję naprężeniową i wytrzymałość zmęczeniowo-korozyjną stopów AlMg6 i AlZn5Mg2CrZr przeznaczonych na kadłuby okrętów*, AMW, Gdynia 1990.
 10. Kyzioł L., Garbacz G.: *Stanowisko do badania wytrzymałości zmęczeniowej materiałów konstrukcyjnych w warunkach działania cieczy korodującej dla złożonego stanu naprężeń*, ZN AMW, No. 2 (189), 2012, str. 45 – 54
 11. Kyzioł L., Garbacz G.: *Urządzenie do wyznaczania trwałości materiałów konstrukcyjnych szczególnie narażonych na korozję*, Decyzja Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej, P 381722 na rzecz Akademii Marynarki Wojennej za wynalazek, decyzją Urzędu Patentowego z dnia 25 maja 2011 r.
 12. Kyzioł L., *Określenie wytrzymałości zmęczeniowej w złożonym stanie naprężenia na przykładzie stopu AlMg6*, Logistyka 3/2015, pp. 2750-2757.
 13. Sines G., *Behaviour of metals under complex static and alternating stresses*, Metal Fatigue, pp145-169, McGraw Hill, New York, 1959.

Low-cycle Fatigue strength alloys of Al-Mg in the complex state of stress

The samples of the examined alloys AlMg2Mn0,47Fe0,5 and AlMg6 were subjected to: the oscillating bending on the four spindle machine, the oscillating bending, the bending/torsion as well as the torsion on the fatigue machine. . Research for the state of multiaxial loads require an appropriate position. The obtained results revealed that the fatigue strength of the alloys AlMg2Mn0,47Fe0,5 and AlMg6 are the biggest for the oscillating bending and the smallest for the oscillating torsion. The obtained results of the fatigue strength for multiaxial loading are very valuable due to the fact that the vast majority of mechanisms is subjected into complex state of stress.

Autor:

dr hab. inż. **Lesław Kyzioł** – Akademia Morska w Gdyni, Wydział Mechaniczny