

Grażyna OBER

BADANIA ZMĘCZENIOWE PRZY OBROTOWYM ZGINANIU PRÓBEK GŁADKICH
I Z KARBEM ZE STALI FERRYTYCZNEJ ALUMINIOWANYCH ZANURZENIOWO

Streszczenie. W pracy ujęto wyniki badań wpływu aluminiowania zanurzeniowego na wytrzymałość zmęczeniową oraz na współczynnik działania karbu pierścieniowego typu V, uzyskanych na próbkach z żelaza "Armed" przy obciążeniu giętno-obrotowym. Wyniki badań uzależniono od wpływu zmiennych parametrów procesu aluminiowania, a mianowicie temperatury T i czasu zanurzenia τ próbek w kąpeli Al. Stwierdzono nieznaczne obniżenie wytrzymałości zmęczeniowej próbek aluminiowych gładkich i istotną różnicę w wartościach badanych współczynników działania karbu dla próbek aluminiowanych z karbem w porównaniu z podawanymi w literaturze specjalistycznej dla próbek z analogicznym karbem lecz niealuminiowanych.

Wprowadzone częściowe współczynniki działania karbu, określone przez analogię do definicji współczynnika działania karbu β_v , umożliwiają ilościowe ujęcie wpływu poszczególnych parametrów aluminiowania lub innych zabiegów technologicznych na wytrzymałość zmęczeniową. Wartości omawianych współczynników mogą być pomocne projektantowi przy prognozowaniu trwałości wyrobów, w zależności od zastosowanej technologii aluminiowania.

Wprowadzenie

Powłoki aluminiowe uzyskiwane metodą zanurzeniową zabezpieczają elementy konstrukcyjne przed działaniem korozji. Dobre własności antykorozyjne oraz prostota formowania tych powłok spowodowały, że znajdują one coraz szersze zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Mają bowiem szczególne znaczenie dla problemu zwiększenia przeciętnej trwałości i niezawodności elementów eksploatowanych w warunkach różnorodnego działania zewnętrznych czynników fizycznych i chemicznych powierzchniowo aktywnych, np. w warunkach agresywności wód kopalnianych i wilgotności atmosfery. W przeciwnym wypadku elementy te musiałyby być wykonywane z drogich deficytowych stali stopowych.

Aluminiowane elementy w czasie eksploatacji podlegają różnego rodzaju obciążeniom statycznym i dynamicznym o dowolnych zmiennych przebiegach wywołujących zjawisko zmęczenia. Przegląd nielicznej literatury specjalistycznej [1-4] z tego zakresu i badania własne [5] wykazywały istotny wpływ procesu aluminiowania na trwałość zmęczeniową tych elementów, a w szczególności w przypadkach działania karbów konstrukcyjnych w postaci wszelkich nieciągłości poprzecznych przekrojów elementów. W tym ostatnim przypadku obserwuje się tendencje odwrotne [6] od opisywanych w literaturze [7, 8, 9] dla

elementów z karbem bez powłok ochronnych, dla których zachodzi znaczne obniżenie wytrzymałości zmęczeniowej [10]. W związku z tym zaistniała konieczność przeprowadzenia kompleksowych badań zmęczeniowych na próbkach gładkich i z karbem z naniesionymi powłokami aluminiowymi.

Cel i zakres pracy

Cel \acute{e} m pracy jest wyznaczenie wytrzymałości zmęczeniowej przy zginaniu obrotowym próbek o średnicy $d_0 = 8,0$ mm ze stali ferrytycznej (żelazo Armco), gładkich i z karbem pierścieniowym typu V ($\alpha = 45^\circ$, $t = 2$ mm, $\rho = 0,2$ mm, $d_r = 8$ mm) z naniesioną metodą zanurzeniową dyfuzyjną powłoką aluminiową. Wyniki tych badań zezwolą na określenie jednego z ogółu współczynników ujmujących ilościowo wpływ karbów mechanicznych na wytrzymałość zmęczeniową, a mianowicie współczynnika działania karbu β_k dla próbek aluminiowych.

Podobnie jak w pracach [5 i 6] badaniom poddano próbki gładkie i z karbem niealuminowane, jako układ odniesienia dla wyników dalszych badań (grupa pierwsza) oraz próbki poddane udarowi cieplnemu przez zanurzenie w kąpieli Al (dla analogicznych temperatur kąpieli T i czasów zanurzenia $\tilde{\tau}$, jak dla procesu aluminowania), lecz chronionych przed dyfuzyjnym aluminowaniem specjalną powłoką [5] (grupa druga). Trzecią grupę stanowią próbki z dyfuzyjną powłoką aluminiową o różnych grubościach i strukturze wynikających z przyjęcia pięciu czasów zanurzania ($\tilde{\tau} = 2, 4, 6, 8, 10$ min) dla próbek gładkich i trzech czasów zanurzania ($\tilde{\tau} = 2, 6, 10$ min) dla próbek z karbem oraz dwóch temperatur kąpieli Al, a mianowicie $T = 983$ K i $T = 1113$ K.

Skład chemiczny materiału na próbki, sposób przygotowania powierzchni próbek, sposób przeprowadzania procesu aluminowania, jakość i struktura materiału podłoża oraz dyfuzyjnych powłok aluminiowych na próbkach są analogiczne jak w pracach [5, 6].

Taki sposób przeprowadzenia badań umożliwi porównywanie wyników badań dla różnych rodzajów obciążeń, a przyjęcie stałych warunków dla podłoża przez zastosowanie jednego materiału - żelazo Armco - o jednofazowej strukturze zezwala na skoncentrowanie się na podstawowym zagadnieniu pracy, istotnym dla badanego zjawiska przy eliminowaniu wpływu innych zjawisk.

Przebieg badań i ich wyniki

Badania zmęczeniowe dla wyszczególnionych trzech grup próbek gładkich i trzech grup próbek z karbem przeprowadzono przy zginaniu obrotowym na maszynie typu Schenck, z częstotliwością 30 Hz, przy ustalonej wartości $\sigma_m = 0$ (naprężenie średnie), zmniejszając poziom obciążania zmianą wartości σ_a (amplituda cyklu naprężeń).

Badania w zakresie ograniczonej wytrzymałości na zmęczenie realizowano, poddając:

- próbki gładkie grupy I (29 próbek), grupy II (127 próbek) i grupy III (287 próbek) oraz
 - próbki z karbem grupy I (22 próbki), grupy II (95 próbek) i grupy III (90 próbek),
- obciążeniom zmiennym dla pięciu poziomów naprężeń (σ_a), przy liczbie próbek 5, a w niektórych przypadkach 3 dla każdego poziomu naprężeń.

Sposób wyznaczania wytrzymałości na zmęczenie dla wszystkich grup próbek nie różnił się od ogólnie stosowanej metody klasycznej; wytrzymałość określono na podstawie badań 3 - 6 próbek.

Do opracowania wyników badań zmęczeniowych użyto jednej z metod rachunku statycznego, a mianowicie analizy regresji.

Dla przyjętego modelu funkcji regresji w postaci:

$$f(X_1) = A + B \lg N, \quad (1)$$

wykonano obliczenia jej dostosowania do punktów eksperymentalnych w zakresie czasowej wytrzymałości zmęczeniowej metodą najmniejszych kwadratów oraz obliczono współczynnik korelacji:

$$r = \frac{(X_1 - \bar{X})(Y_1 - \bar{Y})}{[(X_1 - \bar{X})^2 (Y_1 - \bar{Y})^2]^{1/2}} \quad (2)$$

gdzie:

- \bar{X}, \bar{Y} - wartości średnie zmian cykli (N) i naprężeń (σ),
- X_1, Y_1 - kolejne wartości eksperymentalne,

natomiast w zakresie trwałej wytrzymałości zmęczeniowej opisano równaniem:

$$Y = C \quad (\sigma = Z_{g\sigma}). \quad (3)$$

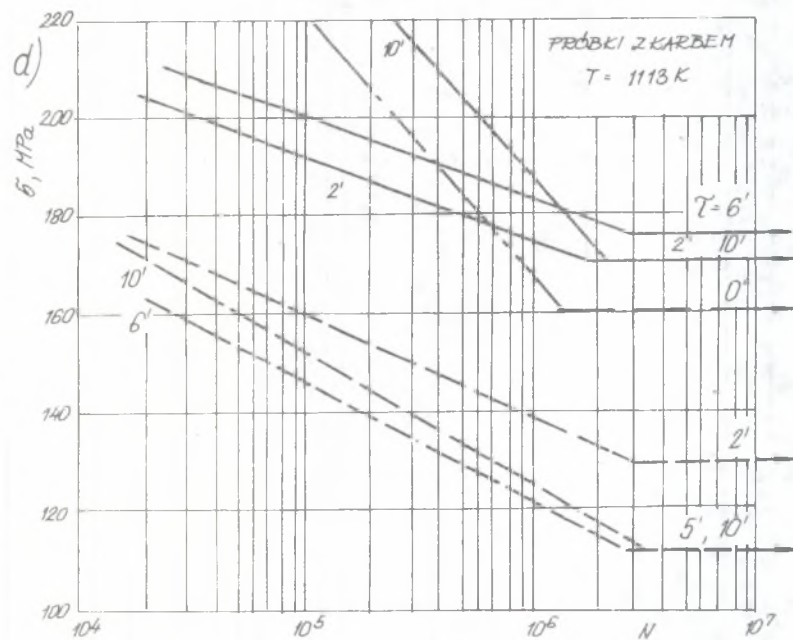
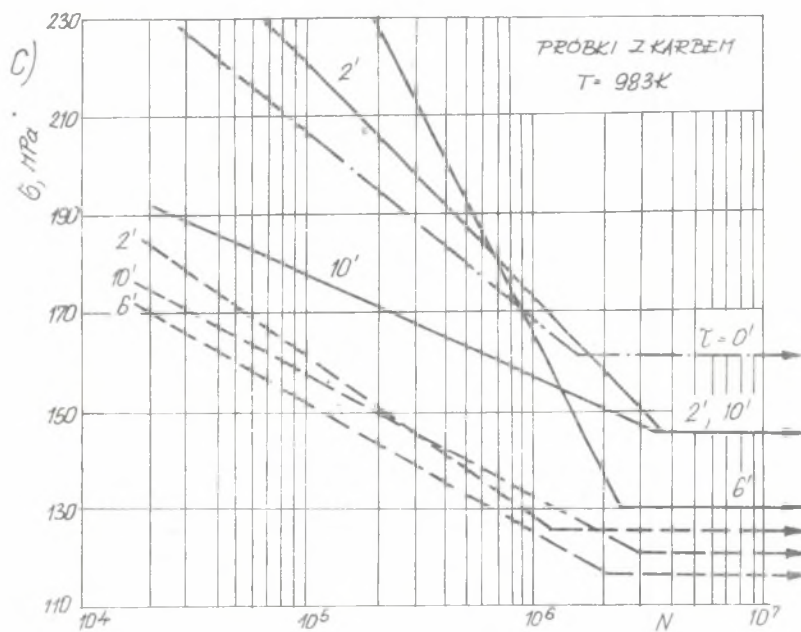
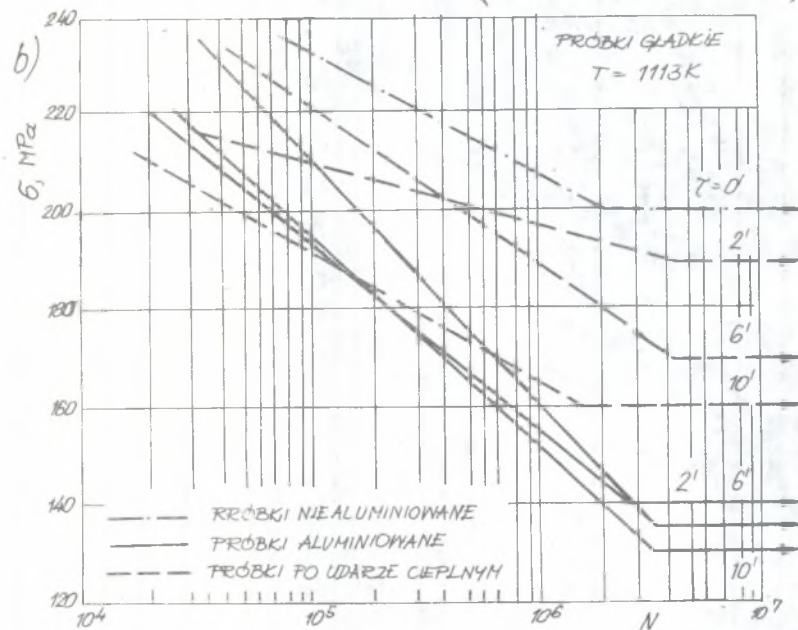
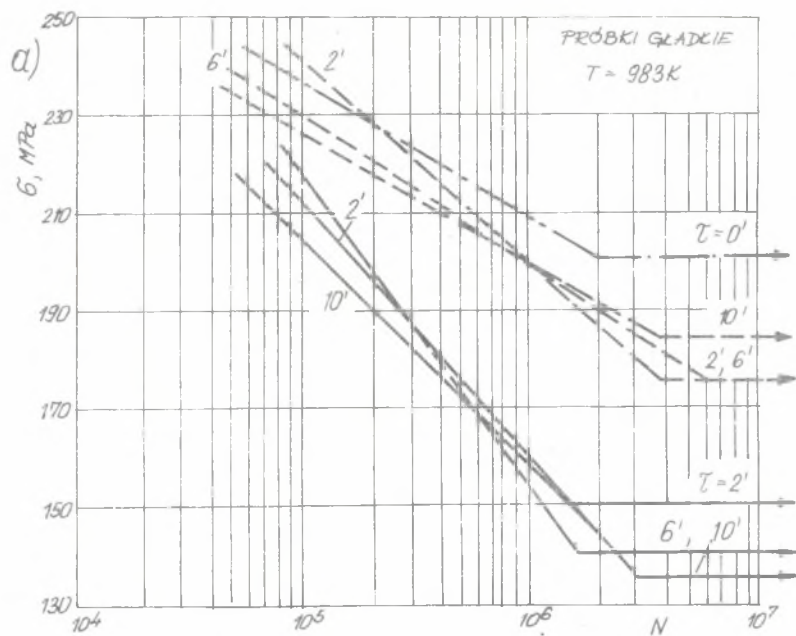
Wyniki szczegółowych obliczeń statystycznych [5] dla równań (1) i (2) przedstawiono graficznie w postaci 28 krzywych zmęczeniowych $N = f(\sigma_{\max})$ dla poszczególnych grup i rodzajów próbek, we współrzędnych półlogarytmicznych (rys. 1).

Równania prostych regresji w zakresie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej oraz współczynniki korelacji dla próbek gładkich i z karbem ujęto w tablicy 1.

Tabela 1

Zestawienie obliczeń statystycznych badań zmęczenia przy obciążeniu giętno-obrotowym próbek okrągłych d = 8 mm z żelaza "Armco" przy N = 500 obr/min

Lp.	Rodzaj próbek i obciążenie powierzchniowe	Czas zanurzenia w kąpielach Al ³⁺ [min]	Równanie krzywej zmęczenia w układzie IEN							
			A	B	r	C	A	B	r	C
			Y = A + BX Y = C r - współczynnik korelacji T = 983 K T = 1113							
1	Niealuminowane	0	361,4382	-25,3351	0,8942	200	361,4382	-25,3351	0,8942	200
2	Zanurzone w kąpielach Al (niealuminowane)	2	390,4290	-31,8676	0,9493	175	260,9332	-10,1563	0,8656	190
		6	379,9174	-30,0325	0,7317	175	382,8079	-32,0326	0,9555	170
		10	359,5763	-26,6101	0,9662	185	307,9223	-23,2519	0,9463	160
3	Aluminowane	2	459,1354	-49,6698	0,9757	150	470,3466	-51,3279	0,9480	135
		6	515,3813	-59,9557	0,9822	140	375,7544	-36,3643	0,8688	140
		10	435,0630	-46,0456	0,9629	135	387,9961	-38,7959	0,8579	130
4	Z karbem, niealuminowane	0	488,4053	-53,2766	0,8035	160	488,4053	-53,2766	0,8035	160
5	Z karbem, zanurzone w kąpielach Al (niealuminowane)	2	334,7285	-34,4424	0,9765	125	261,8816	-20,3392	0,9658	130
		6	273,8043	-24,7122	0,9829	115	274,5187	-25,5262	0,9805	110
		10	277,7241	-24,1049	0,9580	120	299,0738	-29,0471	0,9777	110
6	Z karbem, aluminowane	2	437,0936	-44,0396	0,8798	145	278,3227	-17,1460	0,8918	170
		6	694,1421	-89,0226	0,8486	130	291,0364	-17,9792	0,8712	175
		10	270,3825	-18,8195	0,8610	145	531,0474	-57,0184	0,8195	170

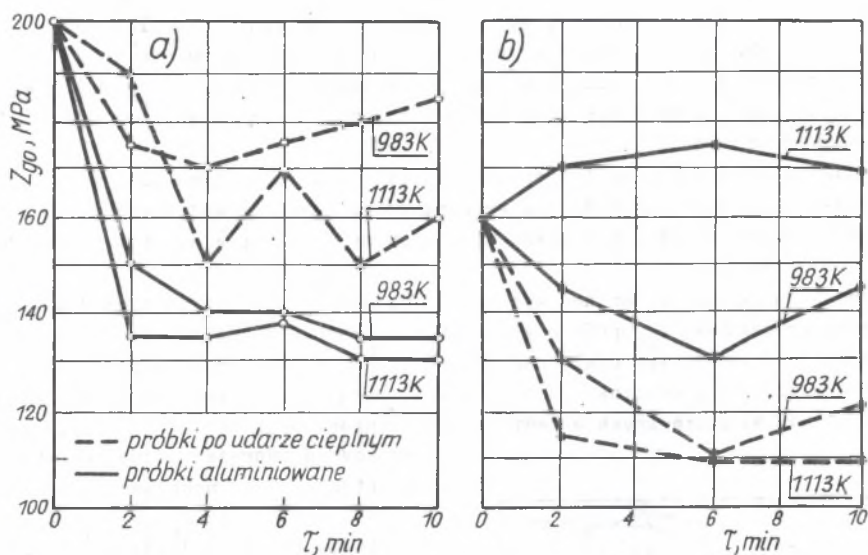


Rys. 1. Krzywe zmęczenia przy obciążeniu giętno-obrotowym dla próbek z żelaza "Armco"

Fig. 1. Fatigue curves at rotary bending for samples of iron Armco

Analiza wyników badań

Z przebiegu krzywych zmęczeniowych na rys. 1a widoczny jest wpływ dyfuzyjnej powłoki aluminiowej na obniżenie wytrzymałości zmęczeniowej Z_{go} . Wartości tego obniżenia, w zależności od parametrów T i ζ procesu aluminiowania dla próbek gładkich, wyeksponowano na zestawionym rysunku 2a.



Rys. 2. Zależność wytrzymałości zmęczeniowej Z_{go} od czasu zanurzenia w kąpeli Al dla próbek z żelaza "Armco":

a) gładkich, b) z karbem

Fig. 2. Dependence of fatigue strength Z_{go} on the time of immersion in the Al Bath for samples of iron Armco

a) plain, b) with ring notch

Dzięki przyjęciu w pracy odpowiedniej metodyki badań (druga grupa próbek) wpływ procesu aluminiowania na obniżenie Z_{go} można rozdzielić na wpływ od udaru cieplnego i wpływ samej powłoki aluminiowej. W literaturze specjalistycznej [2, 3] całkowite obniżenie Z_{go} przypisuje się powłoce aluminiowej, tymczasem w zależności od parametrów aluminiowania udział obu czynników jest różny (rys. 2a), np. dla $T = 983$ K i $\zeta = 8$ min obniżenie całkowite wynosi 33%, w tym 10% od udaru cieplnego, natomiast dla $T = 1113$ K udział udaru cieplnego jest znacznie większy i dla $\zeta = 4$ min wynosi 25%, również przy 33% spadku całkowitego.

Zaburzenia w wykresach $Z_{go} = f(\zeta)$ w zakresie czasu zanurzenia 4 - 10 min dla $T = 1113$ K (rys. 2a) należy przypisać wpływowi zmian strukturalnych. [1,

3, 5, 10, 11] zachodzących w materiale próbek w zależności od czasu zanurzenia na wytrzymałość zmęczeniową.

Odmienne niż dla próbek gładkich przedstawiają się przebiegi krzywych zmęczeniowych dla próbek z karbem (rys. 1b), co ujęto na zestawieniowym rysunku 2b. Obniżenie Z_{go} próbek z karbem poddanych udarowi cieplnemu jest znacznie większe niż analogicznych próbek z karbem lecz aluminiowanych.

Na przykład w temperaturze 983 K największe obniżenie Z_{go} od udaru cieplnego zachodzi dla $t = 6$ min i wynosi 28% przy 19% obniżenia dla próbek aluminiowanych. Dla $T = 1113$ K największe obniżenie od udaru cieplnego występuje również dla $t = 6$ min i wynosi 31% w odniesieniu do $Z_{go,k}$ a 45% w odniesieniu do Z_{go} , przy wzroście do 7% wytrzymałości zmęczeniowej próbek aluminiowanych z karbem.

Z powyższego wynika, że temperatura kąpielii aluminiowej ma duży wpływ na eliminowanie ujemnych skutków dla wytrzymałości zmęczeniowej elementów z karbami konstrukcyjnymi, natomiast udar cieplny dla tych elementów w sposób wyraźny obniża Z_{go} .

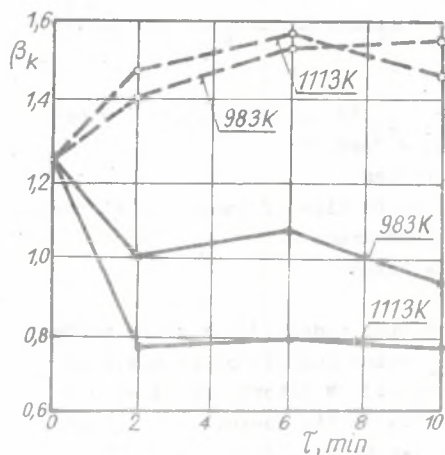
Porównując wyniki badań nad wpływem dyfuzyjnej powłoki aluminiowej na trwałość zmęczeniową Z_{go} próbek gładkich i z karbem z analogicznymi wynikami badań przy wahadłowym cyklu naprężeń (Z_{rc}) przedstawionymi w pracy [6], stwierdza się ich jakościowe podobieństwo z wyjątkiem wyników badań dla próbek z karbem aluminiowanych w kąpielii Al o temperaturze 983 K. Dla wahadłowego cyklu naprężeń cechą charakterystyczną jest pokrywanie się

wartości obniżenia Z_{rc} od udaru cieplnego i wpływu dyfuzyjnej powłoki aluminiowej [6], natomiast dla obciążenia giętno-obrotowego oba czynniki mają różne wpływy na obniżenie Z_{go} , przy czym dyfuzyjna powłoka aluminiowa łagodzi obniżenie Z_{go} wywołane udarem cieplnym (rys. 2b, krzywe dla temperatury 983 K).

Ilościowe ujęcie działania karbu określa się za pomocą współczynnika β_k , wyliczonego jako stosunek wytrzymałości zmęczeniowej próbki gładkiej, w danym przypadku Z_{go} do $Z_{go,k}$ próbki z karbem:

$$\beta_k = \frac{Z_{go}}{Z_{go,k}} \quad (4)$$

Wyliczone zgodnie z definicją (4) wartości współczynnika β_k dla



Rys. 3. Zależność współczynnika działania karbu od czasu zanurzenia w kąpielii Al:

----- próbki poddane udarowi cieplnemu
 ———— próbki z dyfuzyjną warstwą aluminiową

Fig. 3. Relation between the coefficient of activity of rings hotch and the time of immersing in Al bath

omówionych trzech grup próbek z żelaza "Armco", dla obu temperatur kąpieli Al, przedstawiono na rysunku 3 w zależności od czasu zanurzenia. Z przebiegu tych zależności wynika, że w przypadku obciążenia giętną-obrotowego, podobnie jak przy wahadłowym cyklu naprężeń [6], udar cieplny posiada większy wpływ na wzrost współczynnika działania karbu niż aluminiowanie, dla którego współczynnik β_k jest znacznie mniejszy. Wynikają stąd wskazówki dla doboru odpowiednich parametrów procesu aluminiowania elementów konstrukcyjnych.

Wykorzystując zastosowaną w pracy metodykę badań i wprowadzając pojęcie częściowych współczynników działania karbu [6] wyrażających wpływ poszczególnych parametrów procesu aluminiowania, współczynnik działania karbu można przedstawić w postaci:

$$\beta_k = \frac{Z_{go}}{Z(u)} \cdot \frac{Z_{go}}{Z(u)_{go,k}} \cdot \frac{Z(u)}{Z(w)} \cdot \frac{Z(u)}{Z(w)_{go,k}} \cdot \frac{Z(w)}{Z_{go,k}} = (u) \cdot (u)_k \cdot (w/u)_k (w)_k^{-1} \quad (5)$$

gdzie:

$Z(u)_{go}$ - wytrzymałość na zmęczenie dla próbek gładkich poddanych udarowi cieplnemu,

$Z(w)_{go}$ - wytrzymałość na zmęczenie dla próbek gładkich z dyfuzyjną warstwą aluminiową,

$\beta(u) = \frac{Z_{go}}{Z(u)_{go}}$ - współczynnik działania udaru cieplnego w kąpieli Al,

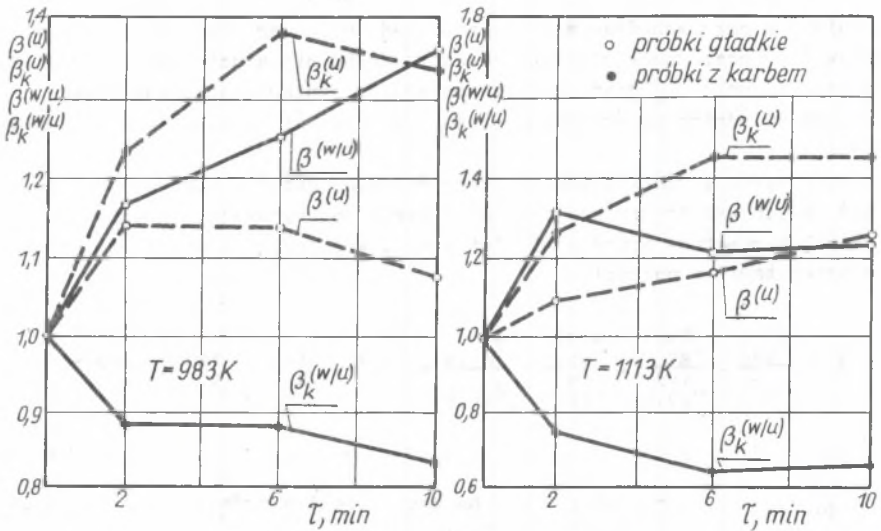
$\beta(w) = \frac{Z_{go}}{Z(w)_{go}}$ - współczynnik działania dyfuzyjnej warstwy aluminiowej,

- dla próbek z karbem wyszczególnione wielkości przyjmują dodatkowo dolny wskaźnik "k",

$\beta_k(w/u) = \frac{Z_{go,k}}{Z(w)_{go,k}}$ - względny współczynnik działania dyfuzyjnej powłoki aluminiowej, dla karbu.

Szczegółowe wartości częściowych współczynników dla obu temperatur kąpieli Al w zależności od czasu zanurzenia przedstawiono na rysunku 4.

Wprowadzenie częściowych współczynników działania karbu daje projektantowi możliwość prognozowania własności elementów z dyfuzyjnymi powłokami aluminiowymi w zależności od zastosowanych parametrów procesu aluminiowania.



Rys. 4. Zależność współczynnika działania uderu cieplnego (----) wywołanego kąpielą w ciekłym Al dla próbek gładkich $\beta(u)$ i z karbem $\beta_k(u)$ oraz względnego współczynnika działania dyfuzyjnej powłoki aluminiowej (—) dla próbek gładkich $\beta(w/u)$ i z karbem $\beta_k(w/u)$ od czasu zanurzenia τ

Fig. 4. Relation between the coefficient of thermal stroke activity caused by Al liquid bath for plain samples $\beta(u)$ and with rings hot $\beta_k(u)$ as well as the relative coefficient of diffusion al coating for the plain samples $\beta(w/u)$ and with rings hot $\beta_k(w/u)$ and the immersing time τ

Wnioski

- Aluminowanie zanurzeniowe próbek z żelaza "Armco" obniża ich wytrzymałość umęczeniową Z_{go} . Wartość tego obniżenia zależy do własności dyfuzyjnej warstwy aluminiowej oraz uderu cieplnego (rys. 2) wynikającego z kontaktu aluminowanego elementu z ciekłym Al. Udział obu czynników jest różny w zależności od parametrów procesu aluminowania τ i T oraz od geometrii powierzchni elementu (próbki gładkie i z karbem).
- Obniżenie wytrzymałości zmęczeniowej na skutek procesu aluminowania zanurzeniowego nie świadczy o obniżeniu trwałości niektórych urządzeń i elementów konstrukcyjnych (eksploatowanych np. w warunkach agresywnych wód kopalnianych), jak łańcuchy górnicze, wózki kopalniane i inne. Prognozowanie bowiem trwałości tych urządzeń i elementów wymaga kompleksowego po-

dejęcia do problemu i uwzględnienia dobrych własności ochronnych powłoki aluminiowej przed intensywnym zużyciem ścierno-erozyjnym i dobrych własności antykorozyjnych.

- Dyfuzyjna warstwa aluminiowa znacznie łagodzi działanie karbu, może zatem stanowić metodę niwelowania działania karbu w elementach maszyn i urządzeń eksploatowanych przy zmiennych obciążeniach. Dotyczy to szczególnie urządzeń pracujących w środowiskach o silnym działaniu korozyjnym, np. wód kopalnianych. Natomiast uderzenie cieplne powoduje zwiększenie działania karby, co ujęto w pracy ilościowo przez wprowadzenie częściowych współczynników działania karbu β_k dla poszczególnych parametrów procesu aluminiowania (rys. 3). Daje to konstruktorowi możliwość prognozowania trwałości elementów konstrukcyjnych w zależności od zastosowanej technologii aluminiowania.
- Badania wytrzymałości zmęczeniowej przy zginaniu obrotowym prowadzono w analogicznych warunkach jak dla wahadłowego cyklu obciążeń [6], co zezwoliło na określenie wpływu obu rodzajów obciążenia na wytrzymałość zmęczeniową w przypadku elementu z warstwą aluminiową.

LITERATURA

- [1] Łuczkiwicz H.: Wpływ temperatury i czasu na własności strukturalne i wytrzymałościowe powłok aluminiowych nakładanych zanurzeniowo na żeliwo. Ochrona Przed Korozją Nr 11, 1970, s. 12-16.
- [2] Rjabow W.R.: Alitirowanie stali. Izd. "Mietalżurgia", Moskwa 1973.
- [3] Karpieńko G.W. i inni: Wlijanije dyfuzionnych pokrytij na procnost stalnych izdieleńij. Izd. "Naukowa Dumka", Kijów 1971.
- [4] Coburn K.G.: Aluminized steel - Its Properties and Uses. Metallurgia Manchester, Vol. 60, No 357, 1959.
- [5] Ober G.: Badania wpływu aluminiowania zanurzeniowego na wytrzymałość zmęczeniową stali niskowęglowych. Rozprawa doktorska 1980, Biblioteka Główna Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- [6] Lamber T., Ober G., Marcinkowski L.: Wpływ aluminiowania zanurzeniowego na współczynnik działania karbu dla stali ferrytycznej przy wahadłowym cyklu naprężeń. Inżynieria Materiałowa nr 1/82. Wydawnictwo "SIGMA", Warszawa 1982.
- [7] Dyląg Z., Orłowski Z.: Wytrzymałość zmęczeniowa materiałów WNT, Warszawa 1962.
- [8] Kocańda S.: Zmęczeniowe niszczenie metali. WNT, Warszawa 1978.
- [9] Peterson R.E.: Wrażliwość na działanie karbu. Zmęczenie metali. Praca zbiorowa, WNT, Warszawa 1962.
- [10] Ober G., Gierek A., Bajka L.: Wpływ aluminiowania zanurzeniowego na wytrzymałość zmęczeniową stali ferrytycznej przy obrotowym zginaniu. Inżynieria Materiałowa nr 6/81, Wydawnictwo "SIGMA", Warszawa 1981
- [11] Gierek A., Bajka L.: Aluminiowanie żeliwa ciągliwego z jednoczesną obróbką cieplną. Przegląd Mechaniczny 1975 nr 7.

Wpłynęło do Redakcji 19.05.83

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Marek TROMBSKI

УСТАЛОСТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЛАДКИХ ОБРАЗЦОВ И С НАРЕЗОМ
ИЗ ФЕРРИТОВОЙ АЛЮМИНИРОВАННОЙ СТАЛИ ПРИ КРУГОВОМ ИЗГИБАНИИ

Р е з ю м е

В работе представлены результаты влияния нагружаемой алюминизации на тигусталостную прочность а также на коэффициент действия кольцевого надреза па. V полученных с образцов из железа Армсо при нагрузке с вращающим изгибом. Констатировано незначительное снижение усталостной прочности гладких алюминированных образцов и значительную разницу в значеших исследованных эффективных коэффициентов концентрации напряжений для образцов алюминированных с надрезом, по сравнению с представляемыми в специализированной литературе для образцов с аналогическом надрезом но не алюминированных.

FATIGUE INVESTIGATION OF PLAIN ALUMINIZED IRON SAMPLES WITH RINGS HOTCH FOR ROTARY BENDING

S u m m a r y

In this wort the results of the influence of submersion aluminizing on the fatigue, strength and for coefficient of activity of rings hotch size V based on samples from iron "Armco" at the rotary bending. It has been found a little depression of the fatigue strength of the plain and important difference in examinated values of endurance signal for the plain and not ched specimens comparing with literature data for the samples with analogous hotch but not aluminized.