

WYTRZYMAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH W ZŁOŻONYM STANIE NAPRĘŻENIA

I. N. SZKANOW I N. S. WOŁKOWA (KAZAŃ)

Przytoczono wyniki eksperymentalnego badania wytrzymałości zmęczeniowej stali i stopów tytanowych przy skojarzeniu statycznego dwuosiowego rozciągania ze zmiennym zginaniem i skręcaniem. Pokazano, że czułość na asymetrię cyklu, wytworzoną przez dwuosiowe statyczne rozciąganie, zależy od zespołu mechanicznych charakterystyk materiału. Zaproponowano kryterium wytrzymałości zmęczeniowej, uwzględniające wpływ dwuosiowego statycznego rozciągania na zmianę wytrzymałości zmęczeniowej przy zginaniu i skręcaniu, które wskazuje na dobrą zgodność z eksperymentalnymi danymi.

Obecnie znanych jest wiele kryteriów równoważności pozwalających na określenie wytrzymałości zmęczeniowej materiałów w złożonych stanach naprężenia [1–6]. Część z nich ma charakter doświadczalny [2]. Inne wyprowadzono na podstawie różnych przesłanek fizykalnych [3–5].

Najbardziej znane kryteria wytrzymałości zmęczeniowej w złożonym stanie naprężenia opracowano na podstawie analogicznych kryteriów wytrzymałości materiałów pod obciążeniami statycznymi. W pierwotnej postaci mogą one być wykorzystane w przypadku symetrycznych cykli zginania i skręcania. W przypadku bardziej ogólnym, uwzględniającym obciążenia zmienne, zalecanie jednego z istniejących kryteriów jako miarodajnego — nie jest wskazane. Związane jest to z jednej strony z brakiem wystarczająco miarodajnych eksperymentów, a z drugiej strony — ze złożonością procesów fizykalnych zachodzących w materiale przy jego wieloskładowym, cyklicznym obciążeniu przy jednoczesnym działaniu wielosiowych obciążeń statycznych.

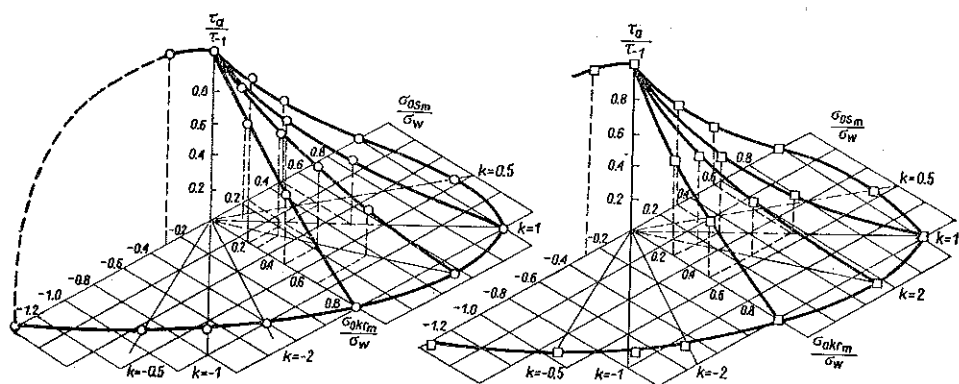
Istniejące kryteria wytrzymałości zmęczeniowej sprawdzano na podstawie wyników uzyskanych w przypadku materiałów «klasycznych» o niskiej i średniej wytrzymałości. Wyniki uzyskiwane przez większość badaczy różnią się pomiędzy sobą, co należy przypisać różnym metodom badań, różnym materiałom oraz różnym warunkom technologicznej i hutniczej obróbki materiałów. Wyniki badań w większości przypadków nie są podbudowane danymi statystycznymi. Przeważnie brak jest informacji dotyczących jakości powierzchni i mikrostruktury próbek. Doświadczenia wykonywane są na próbkach o różnym kształcie, na różnych stanowiskach badawczych, przy zastosowaniu różnych częstotliwości obciążenia i przyrządów pomiarowych. Prowadzi to do poważnych trudności przy porównywaniu wyników otrzymanych przez różnych autorów. Biorąc ponadto pod uwagę, że nie ma obecnie prawie żadnych danych, dotyczących wytrzymałości zmęczeniowej nowoczesnych

materiałów konstrukcyjnych (stałe o wysokiej wytrzymałości, niklowe i tytanowe stopy żaroodporne), wydawało się celowe przeprowadzenie kompleksowych badań doświadczalnych wytrzymałości zmęczeniowej tych materiałów konstrukcyjnych przy możliwie znacznej zmienności warunków obciążenia tak, by na tej podstawie można było ocenić przydatność istniejących kryteriów wytrzymałości zmęczeniowej.

Niniejsze opracowanie zawiera wyniki badań typowych reprezentantów nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych: stali 30 HGSA, IH12N2WMFA oraz stopów tytanu WT3 i WT8 przy równoczesnym oddziaływaniu obciążeń statycznych i cyklicznych.

Materiały te mają zbliżone charakterystyki wytrzymałości statycznej i wytrzymałości zmęczeniowej, stanowiąc często materiały wzajemnie konkurujące w różnych konstrukcjach.

Badania prowadzone były za pomocą urządzeń tej samej klasy, zbudowanych lub unowocześnionych w laboratorium wytrzymałości zmęczeniowej Instytutu Lotniczego w Kazaniu. Zachowywano kształt i wymiary roboczej części próbek. Zunifikowano węzły zamocowania, obciążenia oraz metody pomiaru odkształceń i naprężeń [7-9].



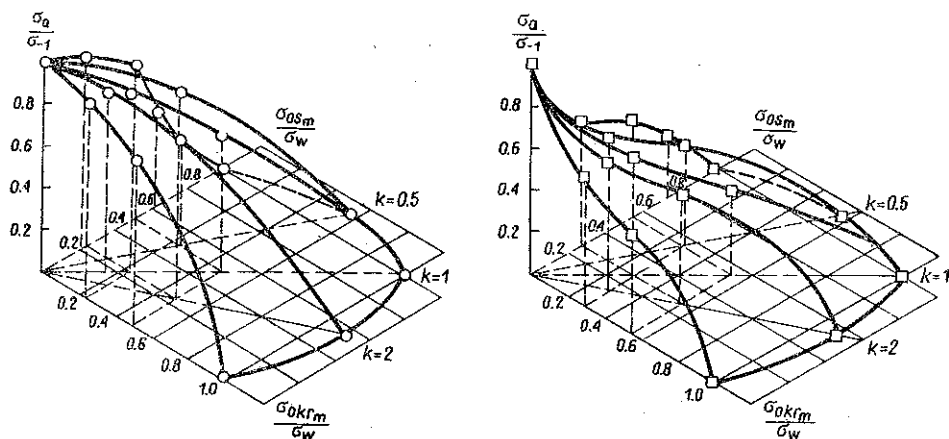
Rys. 1. Graniczne wykresy zniszczenia zmęczeniowego stali IH12N2WMFA (○) i stopu tytanu WT8 (□) przy skręcaniu i dwukierunkowym statycznym rozciąganiu: $K = \sigma_{obwm} / \sigma_{osm}$, σ_{obwm} i σ_{osm} — naprężenia obwodowe i osiowe; τ_a , τ_{-1} — graniczna amplituda i granica wytrzymałości przy 10^7 cykli

Badano cienkościennie próbki w kształcie rury o stosunku średnicy do grubości ścianki równym 20, co zapewniało realizację płaskiego stanu naprężenia.

Na rys. 1 i 2 przedstawiono wyniki badań w postaci przestrzennego wykresu powierzchni granicznych [9], które umożliwiają poglądowe pokazanie wpływu dwukierunkowego rozciągania statycznego o różnych stosunkach naprężeń głównych na zmianę wytrzymałości zmęczeniowej przy skręcaniu (rys. 1) i zginaniu (rys. 2).

Na rys. 1 przedstawiono typowe wykresy powierzchni zniszczenia przy nałożeniu dwukierunkowego rozciągania na zmienne skręcanie. Wykresy te wskazują na znaczny wpływ obciążeń statycznych na zmianę wytrzymałości zmęczeniowej. Charakter tego wpływu zachowuje się dla szerokiej klasy materiałów. Natomiast czułość

materiałów na jednoczesne działanie naprężeń statycznych i zmiennego zginania jest różna w przypadku różnych materiałów. Na rys. 2 przedstawiono wykresy odpowiadające przypadkom skrajnym. Wykresy odpowiadające innym materiałom zajmują położenie pośrednie.



Rys. 2. Graniczne wykresy zniszczenia zmęczeniowego stali IHI2N2WMFA (O) i stopu tytanu WT8 (□) przy zginaniu i dwukierunkowym statycznym rozciąganiu

Z porównania wykresów powierzchni granicznych (rys. 2) widać, że granice wytrzymałości statycznej i wytrzymałości zmęczeniowej, to znaczy wielkości przyjmowane jako charakterystyczne w większości istniejących kryteriów wytrzymałościowych, są niewystarczające do określenia zachowania się materiałów różniących się innymi mechanicznymi i fizycznymi własnościami.

W celu porównania wyników doświadczalnych z wynikami uzyskanymi na podstawie najbardziej znanych kryteriów wykonano wykresy, w których na osi odciętych zamiast składowej jednoosiowej wprowadzono intensywność naprężeń statycznych σ_{im} (rys. 3 i 4).¹ Porównanie wyników doświadczalnych z wynikami obliczeniowymi wykazało znaczne rozbieżności, przekraczające w niektórych przypadkach 50%.

W znanym (por. prace Birgera, Gudmana, Gerbera, Merina, Saweliewa) uogólnionym wzorze dla cyklu asymetrycznego w postaci

$$(1) \quad \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}}\right)^m + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_w}\right)^n = 1$$

m i n są stałymi wielkościami liczbowymi. W większości przypadków $1 \leq m, n \leq 2$.

Przeprowadzona przez autorów analiza danych doświadczalnych, własnych i zaczerpniętych z innych opracowań, przy różnych przypadkach obciążenia wykazała, że wykładniki m i n zależą w ogólnym przypadku od charakterystyk mechanicznych

(¹) Na rysunkach 3-6 przyjęto następujące oznaczenia punktów eksperymentalnych odpowiadających różnym stosunkom naprężeń K : $0 - \nabla \square$, $K=2 - \bullet \nabla \square$, $K=1 - \bullet \nabla \square$

materiałów oraz od chwilowego stanu naprężenia, co umożliwiło przedstawienie kryterium równoważności w postaci

$$(2) \quad \left(\frac{\sigma_{ekw a}}{\sigma_{-1}} \right)^m \pm \left(\frac{\sigma_{ekw m}}{\sigma_w} \right)^n = 1,$$

gdzie

$$\sigma_{ekw a} = \chi_a \sigma_{ia} + (1 - \chi_a) \sigma_{1a},$$

$$\sigma_{ekw m} = \chi_m \sigma_{im(n)} + (1 - \chi_m) \sigma_{im},$$

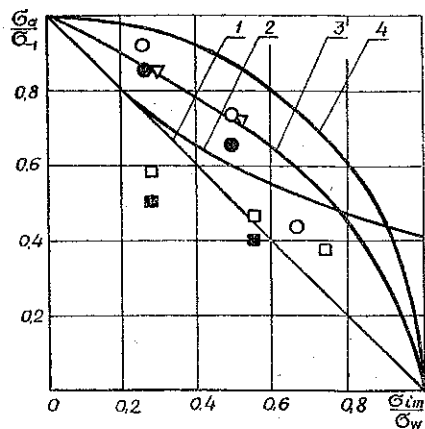
$$\chi_a = \frac{\frac{\sigma_{-1}}{\tau_{-1}} - 1}{\sqrt{3} - 1}, \quad \chi_m = \frac{\frac{\sigma^p}{\tau_k} - 1}{\sqrt{3} - 1},$$

$$\sigma_{im(n)} = \sqrt{\sigma_{1m}^2 + \sigma_{2m}^2 - 2\mu\sigma_{1m}\sigma_{2m}},$$

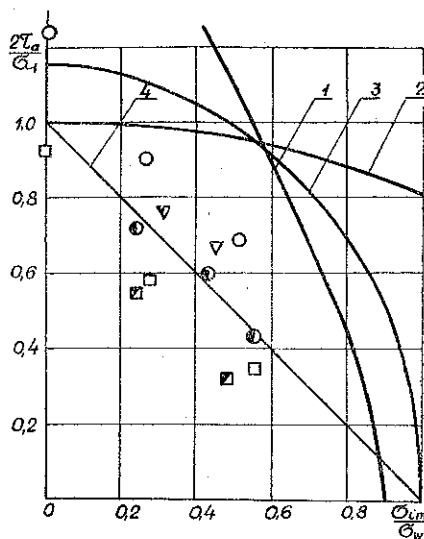
$$m=1,$$

$$n(\text{przy zginaniu}) = \frac{\sigma_w}{\sigma_{0,2}} \psi (1 + \psi) + \frac{A+1}{A-1} (1 - \psi) \left(\frac{\sigma_{ekw m}}{\sigma_w} \right)^2,$$

$$A = \frac{\sigma_w}{\sigma_{-1}},$$



Rys. 3. Zestawienie danych wyznaczonych na podstawie różnych kryteriów i danych doświadczalnych przy łącznym oddziaływaniu dwukierunkowego statycznego rozciągania i zmiennych naprężeń od zginania: \circ — IHI2N2WMFA, ∇ — 3OHGSA, \square — WT8. Kryteria: 1 — Zoderberga, 2 — Odinga, 3 — Birgera, 5 — Merina

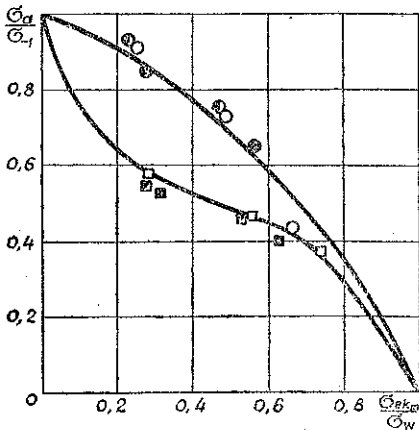


Rys. 4. Zestawienie danych obliczeniowych według różnych kryteriów i danych doświadczalnych przy łącznym oddziaływaniu rozciągania statycznego i zmiennych naprężeń od skręcania. Materiały i ich oznaczenia jak na rys. 3. Kryteria: 1 — naprężeń normalnych, 2 — stycznych, 3 — Birgera, 4 — Merina

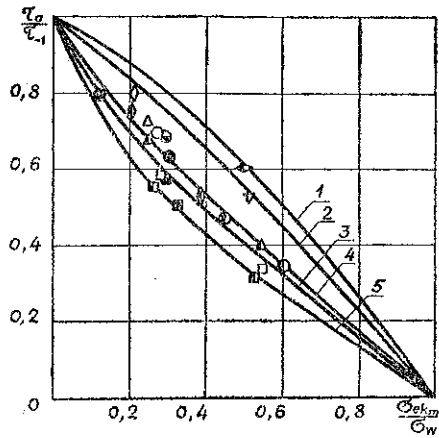
gdzie ψ_k oznacza współczynnik względnego przewężenia pola przekroju poprzecznego

$$n_{(\text{przy skręcaniu})} = \chi^\beta \frac{\sigma_w}{\sigma_{0,2}}, \quad \beta = \frac{\sigma_{-1}}{\tau_{-1}}.$$

Podstawą tego kryterium równoważności jest zależność (1) oraz założenie płaskiego stanu naprężenia A. A. LEBIEDIEWA [10], w którym wprowadzono poprawkę 2μ , gdzie μ oznacza chwilowy współczynnik Poissona (2), przyjmujący wartości w przedziale od 0,3 do 0,5 w zależności od wielkości obciążeń statycznych. Wprowadzenie tej poprawki pozwoliło na dobranie naprężenia równoważnego odpowiadającego danym eksperymentalnym przy różnych stosunkach K .



Rys. 5. Zestawienie danych doświadczalnych przy łącznym oddziaływaniu dwukierunkowego rozciągania statycznego i zmiennego zginania z danymi otrzymanymi według zależności (2): \circ — IHI2N2WMFA, \square — WT8.



Rys. 6. Zestawienie danych doświadczalnych przy łącznym oddziaływaniu dwukierunkowego statycznego rozciągania i zmiennego skręcania z danymi otrzymanymi według zależności (2): 1 — 3OHGSA ($\sigma_w = 87 \text{ kG/mm}^2$), 2 — 3OHGSA ($\sigma_w = 124 \text{ kG/mm}^2$), 3 — IHI2N2WMFA, 4 — WT6, 5 — WT8.

Porównanie z doświadczeniami (rys. 5 i 6) wykazuje dość dobrą zgodność proponowanej zależności. Zależność tę sprawdzano dodatkowo doświadczalnie na materiałach o różnej wytrzymałości (stale i stopy tytanowe o średniej i niskiej wytrzymałości) w temperaturach normalnych i podwyższonych. Również w tych przypadkach uzyskano dobrą zgodność z eksperymentem.

Proponowana zależność uwzględniająca wpływ dwukierunkowego statycznego rozciągania na wytrzymałość przy zmiennym zginaniu i skręcaniu jest dogodna w obliczeniach wytrzymałościowych i wyborze materiału, jak również przy wyborze optymalnego zestawu i technologii obróbki termicznej, ponieważ umożliwia przewidywanie zachowania się materiałów przy złożonym stanie naprężenia na podstawie jednoosiowych stanów naprężenia.

LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. В. Вейбулл, *Усталостные испытания и анализ их результатов*, Машиностроение, Москва 1964.
2. J. MARIN, *Interpretation of fatigue strengths for combined stresses*, Proc. Internat. Conf. Fatigue Metals, London-New York 1956.
3. Р. Б. Хейвуд, *Проектирование с учетом усталости*, Машиностроение, Москва 1969.
4. С. В. Серенсен, *Об условиях прочности при переменных нагрузках для плоского и объемного напряженного состояния*, АН СССР, Инженерный сборник, 1, 1, 1941.
5. И. А. Биргер, *Сравнение условий усталостной прочности*, Вестник машиностроения, 9, 1954.
6. В. П. Когаев, *Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени*, Машиностроение, Москва 1977.
7. И. Н. Методика исследования усталостной прочности в условиях сложноплаженного состояния, Труды Казанского авиационного института, 81, Казань 1963.
8. И. Н. Шканов, Ю. Л. Кожевников, *К вопросу о влиянии двухосного статического растяжения на усталостную прочность сталей при кручении*, Труды Казанского авиационного института, 157, Казань 1973.
9. И. Н. Шканов, Ю. Л. Кожевников *О расчете усталостной прочности сталей при наличии двухосного статического растяжения с разным соотношением главных напряжений. Усталостная прочность и долговечность авиационных конструкций*, Межвузовский сб., Куйбышев 1974.
10. Г. С. Пясаренко, А. А. Лебедев, *Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии*, Наукова думка 1976.
11. J. SNEWSCUK, S. J. ZAMRIK, J. MARIN, *Low-cycle fatigue of 7075-7651 aluminium alloy in biaxial bending*, Experimental Mech., 8, 11, 504-512, 1968.

INSTYTUT LOTNICZY W KAZANIU, ZSRR.

Praca została złożona w Redakcji dnia 6 października 1978 r.
