

GRZEGORZ GASIAK, ROLAND PAWLICZEK

Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn

WYTRZYMAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA STALI KONSTRUKCYJNEJ W WARUNKACH OBCIĄŻEŃ NIESYMETRYCZNYCH

Streszczenie: W pracy przedstawiono metodę opisu wytrzymałości zmęczeniowej stali konstrukcyjnej w warunkach obciążeń zmiennych z dodatkowymi obciążeniami statycznymi. Uwzględniono wpływ asymetrii cyklu na trwałość materiału przy pomocy współczynnika wrażliwości materiału na asymetrię cyklu. Na przykładzie badań zmęczeniowych stali 18G2A wykazano zmianę wartości tego współczynnika wraz z liczbą cykli do zniszczenia materiału oraz zaproponowano metodę eksperymentalną wyznaczania funkcji opisującej zależność wartości współczynnika wrażliwości materiału na asymetrię cyklu od liczby cykli niszczących.

1. WPROWADZENIE

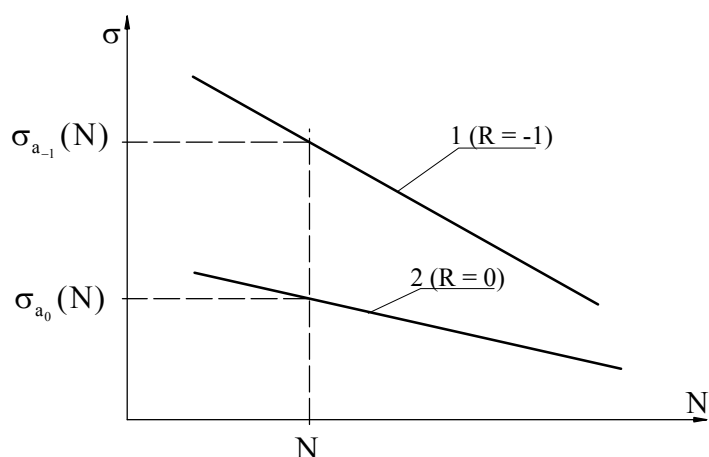
Konstrukcje i elementy maszyn mogą być poddane obciążeniom zmiennym w czasie, które powodują występowanie procesów zmęczeniowych w materiale. Obciążenia te najczęściej mają charakter złożony. Dodatkowo w konstrukcji pojawia się obciążenie średnie, wynikające np. z ciężaru własnego konstrukcji lub obciążeń wstępnych związanych w funkcjami spełnianymi przez konstrukcję. Pojawiająca się asymetria obciążenia zmiennego w sposób istotny wpływa na zmianę dopuszczalnych amplitud obciążenia zmęczeniowego i w związku z tym poznanie wzajemnych relacji pomiędzy obciążeniem średnim, a maksymalnym obciążeniem zmiennym jest istotne przy wyznaczaniu trwałości materiału pracującego w takich warunkach. Liczne prace zawierają modele matematyczne, opisujące wpływ obciążenia średniego na trwałość zmęczeniową materiałów konstrukcyjnych. W literaturze można spotkać równania Goodmana i Gerbera [1, 2, 3], stosowane do opisu wpływu

obciążeń średnich w zakresie trwałości wysoko cyklowej. Szeroko stosowany jest także wzór Morrowa [4]. Przyjmując pewne założenia można zastosować te modele do obliczeń w zakresie trwałości niskocyklowej. W pracach [5, 6, 7] zastosowano je z powodzeniem dla jednoosiowych obciążeń losowych i dla obliczeń w złożonych stanach obciążenia. Badania zmęczeniowe stali 18G2A i 10HNAP opisane w pracy [8] wskazują jednak, że wpływ wartości średniej na trwałość zależy od wrażliwości materiału na obciążenia średnie, natomiast sama wrażliwość na obciążenia średnie zmienia się wraz ze zmianą liczby cykli N do zniszczenia. Poznanie zachowania się materiału przy udziale dodatkowych obciążeń średnich (statycznych) jest więc istotną sprawą na drodze do określenia stanów naprężeń granicznych w szerokim zakresie trwałości zmęczeniowej.

2. WSPÓŁCZYNNIK WRAŻLIWOŚCI MATERIAŁU NA ASYMETRIĘ CYKLU

W przypadku obciążeń zmiennych, przy udziale naprężenia średniego, istotne jest określenie zależności amplitudy naprężenia σ_a od wartości średniej σ_m . Lebedev w pracy [9] opisuje zależność pomiędzy amplitudą naprężenia σ_a i wartością średnią naprężenia σ_m bazującą m.in. na rozważaniach Heywooda [10]. Uzyskano dobrą zgodność obliczeń z wynikami eksperymentalnymi w warunkach obciążeń złożonych dla szerokiego zakresu naprężeń średnich na poziomie granicy zmęczenia, wskazując jednocześnie, że powszechnie stosowane zależności liniowe, paraboliczne i inne wspomniane we wstępie, często znajdują zastosowanie tylko dla wąskiego zakresu naprężenia średniego. Ograniczeniem jest także zakres stosowalności wspomnianych zależności odnośnie do trwałości zmęczeniowej materiału. Zwykle wskazuje się, że modele te znajdują zastosowanie głównie w zakresie trwałości wysokocyklowej. Parametrem opisującym zachowanie się materiału pod wpływem obciążeń średnich jest współczynnik wrażliwości materiału na asymetrię cyklu. Współczynnik jest powszechnie znany i stosowany do opisu wytrzymałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń zmiennych z udziałem naprężenia średniego [1]. Najczęściej wykorzystuje się go przy opisie wytrzymałości zmęczeniowej materiału na poziomie granicy zmęczenia i jego wartość uzależniona jest od rodzaju materiału. W pracy [8, 11] przyjęto założenie, że wartość współczynnika wrażliwości materiału na asymetrię cyklu zależy nie tylko od rodzaju materiału, lecz także od liczby cykli niszczących materiał.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat wyznaczania wartości współczynnika ψ w zależności od liczby cykli N .



Rys. 1. Wyznaczanie współczynnika wrażliwości materiału na asymetrię cyklu

Jeżeli wyniki badań zmęczeniowych przy obciążeniach wahadłowych ($R = -1$) opisane są za pomocą prostej 1, zaś przy obciążeniach odzerowo tętniących za pomocą prostej 2, to współczynnik wrażliwości materiału na asymetrię cyklu dla trwałości N cykli można wyliczyć jako

$$\psi = \frac{2\sigma_{a_{-1}}(N) - \sigma_{a_0}(N)}{\sigma_{a_0}(N)} \quad (1)$$

gdzie : $\sigma_{a_{-1}}(N)$ - maksymalne naprężenie na poziomie trwałości N cykli dla obciążeń o współczynniku asymetrii cyklu $R = -1$ (cykle wahadłowe),
 $\sigma_{a_0}(N)$ - maksymalne naprężenie na poziomie trwałości N cykli dla obciążeń o współczynniku asymetrii cyklu $R = 0$ (cykle odzerowo tętniące).

W równaniu (1) maksymalne naprężenie jest sumą amplitudy i wartości średniej naprężenia. Dla obciążeń wahadłowych naprężenie średnie jest równe zero, tak więc naprężenie maksymalne jest równe amplitudzie naprężenia. W przypadku obciążeń odzerowo tętniących wartość średnia naprężenia jest równa amplitudzie naprężenia, tak więc naprężenie maksymalne jest równe podwojonej wartości amplitudy naprężenia :

$$\begin{aligned} \sigma_{a_{-1}}(N) &= \sigma_{a(-1)} + \sigma_m \quad \text{i} \quad \sigma_m = 0 \Rightarrow \sigma_{a_{-1}}(N) = \sigma_{a(-1)} \\ \sigma_{a_0}(N) &= \sigma_{a(0)} + \sigma_m \quad \text{i} \quad \sigma_m = \sigma_{a(0)} \Rightarrow \sigma_{a_0}(N) = 2\sigma_{a(0)} \end{aligned} \quad (2)$$

Uwzględniając zależności (2) równanie (1) przyjmie postać

$$\psi = \frac{2\sigma_{a(-1)} - 2\sigma_{a(0)}}{2\sigma_{a(0)}} = \frac{\sigma_{a(-1)}}{\sigma_{a(0)}} - 1 \quad (3)$$

Łatwo stwierdzić, że jeżeli nachylenie prostych 1 i 2 na rysunku 1 jest jednakowe, to współczynnik wrażliwości materiału na asymetrię cyklu jest stały w całym zakresie trwałości zmęczeniowej. Jeżeli zaś proste pokazane na rysunku 1 wyraźnie różnią się nachyleniem, to wartość współczynnika ψ zmienia się wraz z liczbą cykli niszczących. Zmianę wartości współczynnika wraz z liczbą cykli N można zapisać w postaci pewnej funkcji $\psi = f(N)$.

Na podstawie wyników badań doświadczalnych zawartych m.in. w pracach [7, 8, 11] zaproponowano funkcję w postaci

$$\psi(N) = \eta N^\lambda \quad (4)$$

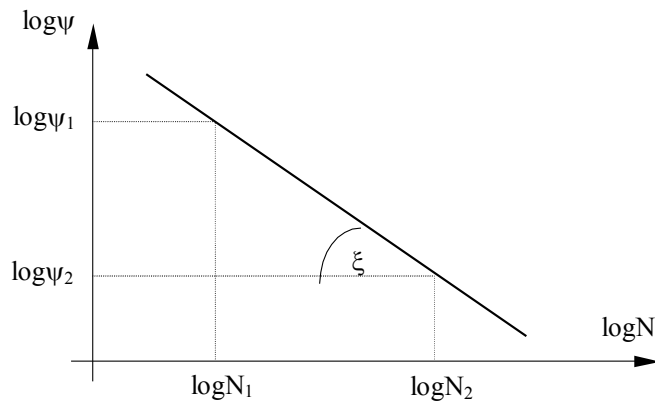
gdzie: η, λ - parametry, których wartości są wyznaczane na podstawie badań zmęczeniowych przy obciążeniach wahadłowych ($R = -1$) i odzerowo tętniących ($R = 0$).

Po obustronnym zlogarytmowaniu równania (4) uzyskano

$$\log \psi = \log \eta + \lambda \cdot \log N \quad (5)$$

Związek (5) opisuje równanie linii prostej w układzie podwójnie logarytmicznym (rys.2). Współczynnik kierunkowy λ w równaniu (4) jest związany z kątem ξ (rys. 2) zależnością

$$\lambda = \operatorname{tg} \xi = \frac{\log \psi_1 - \log \psi_2}{\log N_1 - \log N_2} \quad (5)$$



Rys. 2. Współczynnik wrażliwości materiału na asymetrię cyklu w układzie podwójnie logarytmicznym

Wartości amplitudy naprężenia cyklu dla obciążeń wahadłowych i odzerowo tętniących można wyznaczyć z równania opisującego wyniki badań zmęczeniowych:

- dla obciążeń wahadłowych

$$\log N = B_w + A_w \cdot \log \sigma_{a(-1)} \Rightarrow \sigma_{a(-1)} = \left(\frac{N}{10^{B_w}} \right)^{\frac{1}{A_w}}, \quad (6)$$

- dla obciążeń odzerowo tętniących

$$\log N = B_j + A_j \cdot \log \sigma_{a(0)} \Rightarrow \sigma_{a(0)} = \left(\frac{N}{10^{B_j}} \right)^{\frac{1}{A_j}}. \quad (7)$$

Uwzględniając zależności (6) i (7) równanie (3) przyjmie postać

$$\psi(N) = N^a \cdot 10^b - 1 \quad (8)$$

gdzie:
$$a = \frac{1}{A_w} - \frac{1}{A_j}; \quad b = \frac{B_j}{A_j} - \frac{B_w}{A_w},$$

natomiast wzór (5) na obliczenie współczynnika λ przyjmie postać

$$\lambda = \frac{\log(N_1^a \cdot 10^b - 1) - \log(N_2^a \cdot 10^b - 1)}{\log N_1 - \log N_2}. \quad (9)$$

Uwzględniając, że dla zakresu trwałości $N = 5 \cdot 10^4 \div 2,5 \cdot 10^6$ jest
 $N_1 = 5 \cdot 10^4 \Rightarrow \log N_1 = 4,7 \Rightarrow N_1 = 10^{4,7}$,
 $N_2 = 2,5 \cdot 10^6 \Rightarrow \log N_2 = 6,4 \Rightarrow N_2 = 10^{6,4}$
 po przekształceniach równanie (9) można zapisać w postaci

$$\lambda = -0,588 \log \left(\frac{10^{4,7a+b} - 1}{10^{6,4a+b} - 1} \right). \quad (10)$$

Zgodnie ze wzorem (4) współczynnik

$$\eta = \frac{\psi}{N^\lambda}. \quad (11)$$

Przyjmując dla $N_1 = 5 \cdot 10^4 \approx 10^{4,7}$, oraz $\psi(N_1) = 10^{4,7a+b} - 1$, wzór (11) przyjmie postać

$$\eta = \frac{10^{4,7a+b} - 1}{10^{4,7\lambda}} = 10^{4,7(a-\lambda)+b} - 10^{-4,7\lambda}. \quad (12)$$

Równania (10) i (12) pozwalają na wyznaczenie wartości parametrów η i λ równania (4) opisującego funkcję zmiany wartości współczynnika wrażliwości materiału na asymetrię cyklu wraz z liczbą cykli niszczących.

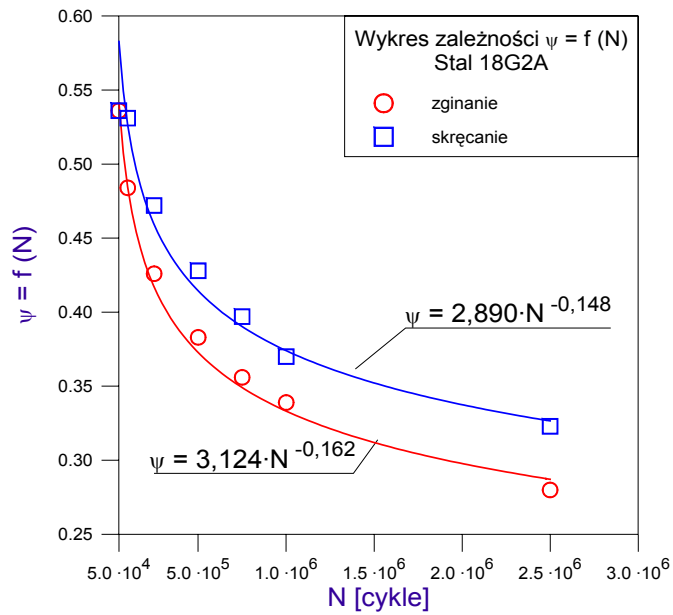
Weryfikacja eksperymentalna zależności przedstawionych powyżej została zawarta w pracy [8, 11]. Badania obejmowały zginanie i skręcanie próbek o przekroju kołowym poddanych cyklicznie zmiennemu zginaniu i skręcaniu z udziałem obciążenia średniego. Zostały one wykonane na maszynie zmęczeniowej MZGS-100 umożliwiającej realizację takich obciążeń. Badany materiał stanowiły stale konstrukcyjne niskostopowe 10HNAP i 18G2A.

Rysunki 3 i 4 przedstawiają wykresy zmiany współczynnika ψ wrażliwości materiału na asymetrię cyklu wraz z liczbą cykli N odpowiednio dla stali 18G2A i 10HNAP.

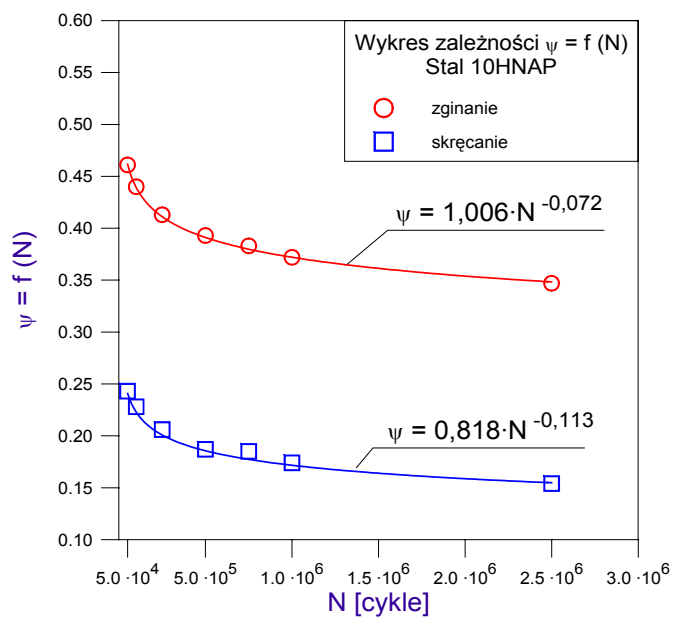
W przypadku stali 18G2A (rys. 3) funkcja $\psi = f(N)$ przyjmuje postać:

a) dla zginania $\psi = 3,124N^{-0,162}$,

b) dla skręcania $\psi = 2,890N^{-0,148}$.



Rys. 3. Zmiana współczynnika ψ wrażliwości materiału na asymetrię cyklu wraz z liczbą cykli dla stali 18G2A



Rys. 4. Zmiana współczynnika ψ wrażliwości materiału na asymetrię cyklu wraz z liczbą cykli dla stali 10HNAP

Wartości współczynników η i λ dla obu przypadków są do siebie bardzo zbliżone. Świadczy to o podobnym wpływie wartości średniej naprężenia na dopuszczalne amplitudy naprężenia zarówno dla zginania jak i dla skręcania. Rysunek 3 wskazuje również, że dla trwałości w zakresie od $5 \cdot 10^4$ do około $7,5 \cdot 10^5$ wartość współczynnika ψ zmniejsza się w znacznym stopniu, zaś dla zakresu trwałości wysoko cyklowej wartość współczynnika wrażliwości materiału na asymetrię cyklu zmienia się nieznacznie.

Dla stali 10HNAP (rys. 4) funkcja $\psi = f(N)$ przyjmuje postać:

a) dla zginania $\psi = 1,006N^{-0,072}$,

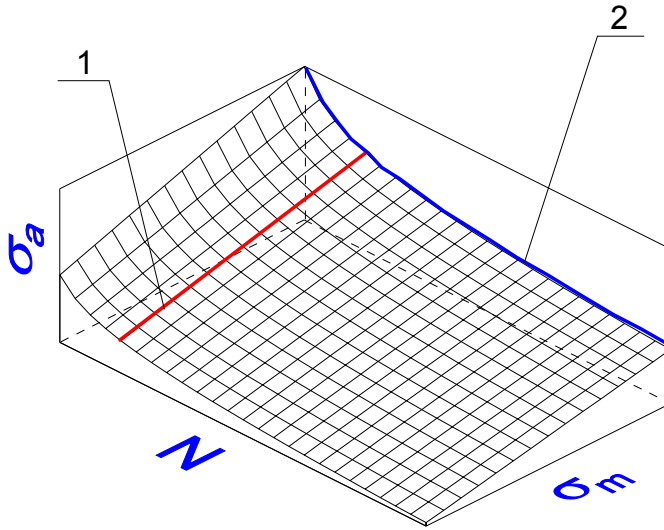
b) dla skręcania $\psi = 0,818N^{-0,113}$.

W tym przypadku wartości współczynników równania (4) różnią się. Przy zginaniu współczynnik wrażliwości materiału na asymetrię cyklu przyjmuje wyższe wartości niż dla skręcania. Oznacza to, że przy zginaniu wartość średnia naprężenia wywiera silniejszy wpływ na dopuszczalne amplitudy naprężenia. Rysunek 3 wskazuje, że dla trwałości w zakresie od $5 \cdot 10^4$ do około $7,5 \cdot 10^5$ wartość współczynnika ψ zmniejsza się w znacznym stopniu, zaś dla zakresu trwałości wysoko cyklowej wartość współczynnika wrażliwości materiału na asymetrię cyklu zmienia się nieznacznie. Występuje więc ta sama właściwość co dla stali 18G2A. Porównując wartości współczynnika wrażliwości materiału na asymetrię cyklu dla badanych stali stwierdzono, że w przypadku zginania współczynniki są zbliżone dla obu rodzajów stali, natomiast przy skręcaniu wartość współczynnika ψ dla stali 10HNAP jest dwukrotnie niższa niż w przypadku stali 18G2A.

3. POWIERZCHNIA GRANICZNYCH AMPLITUD NAPRĘŻENIA ZMIENNEGO

W przypadku obciążeń zmiennych przy udziale naprężenia średniego powierzchnię naprężeń granicznych przedstawia się w układzie współrzędnych $\sigma_a - \sigma_m - N$ (rys. 5). Matematycznym opisem powierzchni jest funkcja $F(\sigma_a, \sigma_m, N)$ wiążąca w sobie amplitudę naprężenia, wartość średnią oraz liczbę cykli niszczących. Poszukiwanie modelu powierzchni na podstawie wyników badań zmęczeniowych jest zagadnieniem złożonym i skomplikowanym [9]. Powierzchnia przedstawiona na rysunku 5 niesie w sobie informację o wzajemnych relacjach amplitudy naprężenia σ_a i wartości średniej naprężenia σ_m (krzywa 1 na rysunku 5) oraz amplitudy naprężenia σ_a i liczby cykli niszczących N (krzywa 2 na rysunku 5). Przyjmując do opisu krzywej 1 pewną funkcję $\sigma_a = f(\sigma_m)$, zaś do opisu krzywej 2 funkcję $\sigma_a = f(N)$ możliwe jest

wyznaczenie matematycznej postaci powierzchni naprężeń granicznych. Dokładność modelu matematycznego powierzchni zależy od dokładności przyjętych modeli matematycznych opisujących krzywe 1 i 2.



Rys. 5. Model powierzchni granicznych amplitud naprężenia zmiennego $\sigma_a = f(N, \sigma_m)$

Powszechnie znanym modelem zależności amplitudy naprężenia od wartości średniej przebiegu (krzywa 1 na rysunku 5) jest zależność liniowa w postaci [1]

$$\sigma_a = \sigma_{a(-1)} - \psi \sigma_m, \quad (13)$$

gdzie: σ_a, σ_m – amplituda i wartość średnia przebiegu niesymetrycznego ($R \neq 0$),
 $\sigma_{a(-1)}$ – amplituda naprężenia przebiegu wahadłowego ($R = -1$),
 równoważnego pod względem zmęczenia przebiegowi niesymetrycznemu,
 ψ - współczynnik wrażliwości materiału na asymetrię cyklu.

Przyjmując, że wpływ wartości średniej materiału jest różny dla różnej liczby cykli N niszczących materiał oraz stosując równanie (4) do opisu zmiany wartości współczynnika wrażliwości materiału na asymetrię cyklu wraz z liczbą cykli do zniszczenia, wzór (13) można zapisać w postaci

$$\sigma_a = \sigma_{a_{-1}}(N) - \psi(N) \sigma_m = \sigma_{a_{-1}}(N) - \eta N^\lambda \sigma_m. \quad (14)$$

Bazowa charakterystyka zmęczeniowa dla obciążeń wahadłowych ($R = -1$, krzywa 2 na rysunku 5) jest opisywana równaniem

$$\left(\sigma_{a-1}(N)\right)^m N = Z_G^m N_0, \quad (15)$$

gdzie: m - współczynnik nachylenia krzywej Wöhlera,
 Z_G - granica zmęczenia,
 N_0 - graniczna liczba cykli.

Wyznaczając z równania (15) amplitudę naprężenia $\sigma_{a-1}(N)$ oraz wstawiając do zależności (14) otrzymuje się równanie powierzchni naprężeń granicznych w postaci

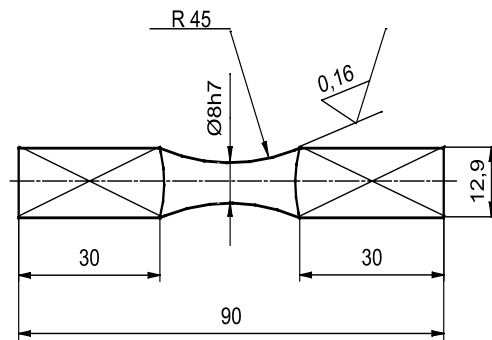
$$\sigma_a(\sigma_m, N) = \left(\frac{Z_G^m N_0}{N}\right)^{\frac{1}{m}} - \eta N^\lambda \sigma_m, \quad (16)$$

gdzie m , Z_G , N_0 należy potraktować jako stałe materiałowe, zaś η i λ są współczynnikami równania (16).

Równanie (16) przedstawia matematyczny model powierzchni naprężeń granicznych wyznaczony w oparciu o wyniki badań zmęczeniowych dla przebiegów wahadłowych i odzerowo tętniących, przy założeniu, że wpływ wartości średniej na amplitudę naprężenia ma postać funkcji liniowej.

4. BADANIA ZMĘCZENIOWE

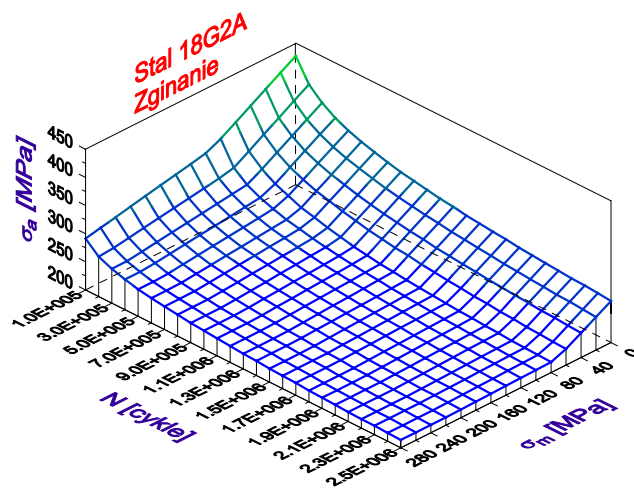
Badania zmęczeniowe [8, 11] wykonano na maszynie zmęczeniowej MZGS-100, umożliwiającej realizację cyklicznie zmiennych przebiegów naprężenia z udziałem naprężenia średniego. Testy zmęczeniowe obejmowały sinusoidalnie zmiennie zginanie i skręcanie z udziałem wartości średniej obciążenia. Eksperymenty prowadzono przy ustalonej wartości współczynnika asymetrii cyklu $R = -1; -0,5; 0$; zmieniając odpowiednio wartość amplitudy momentu M_{ag} oraz wartości średniej momentu M_{mg} dla zginania i odpowiednio M_{as} i M_{ms} dla skręcania. Określono współczynniki standardowej krzywej zmęczeniowej dla ograniczonej trwałości zmęczeniowej materiału. W czasie badań kontrolowano amplitudę i wartość średnią momentu obciążającego próbkę. Próbki do badań zmęczeniowych wykonano ze stali konstrukcyjnych niskostopowych 18G2A i 10HNAP. Kształt i wymiary próbek przedstawione są na rysunku 6.



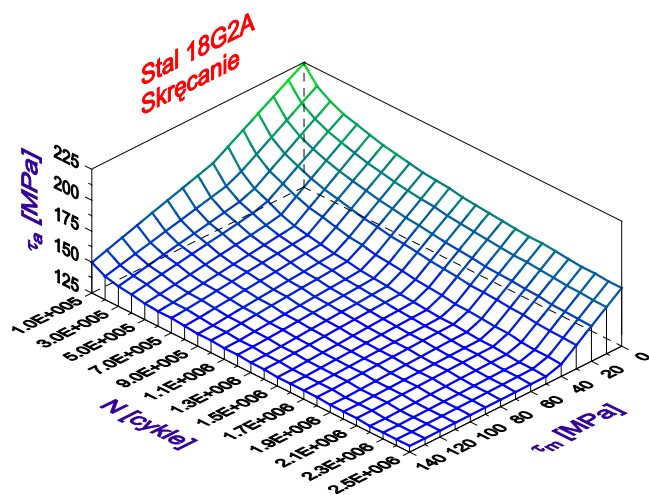
Rys. 6. Kształt i wymiary próbek do badań zmęczeniowych

Na podstawie wyników badań określono eksperymentalne powierzchnie granicznych amplitud naprężenia oraz wyznaczono matematyczną postać powierzchni opisujących poszczególne przypadki obciążenia.

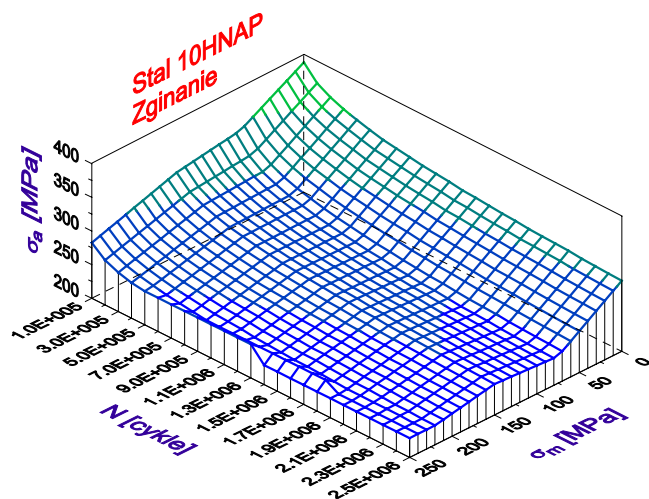
Rysunki 7 ÷ 10 przedstawiają eksperymentalne powierzchnie granicznych amplitud naprężenia odpowiednio dla stali 18G2A i 10HNAP.



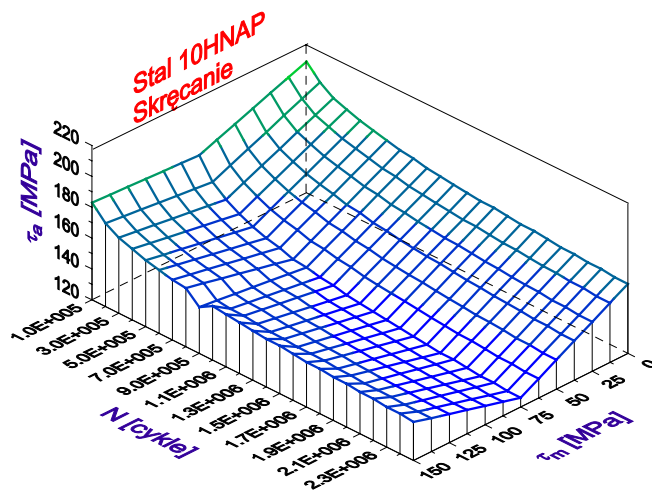
Rys. 7. Płaszczyzna naprężeń granicznych przy zginaniu próbek ze stali 18G2A wyznaczona na podstawie badań doświadczalnych



Rys. 8. Płaszczyzna naprężeń granicznych przy skręcaniu próbek ze stali 18G2A wyznaczona na podstawie badań doświadczalnych



Rys. 9. Płaszczyzna naprężeń granicznych przy zginaniu próbek ze stali 10HNAP wyznaczona na podstawie badań doświadczalnych



Rys. 10. Płaszczyzna naprężeń granicznych przy skręcaniu próbek ze stali 10HNAP wyznaczona na podstawie badań doświadczalnych

Do wyznaczenia parametrów równania (16) zastosowano metodę najmniejszych kwadratów. Współczynnik korelacji dla przyjętego liniowego modelu matematycznego wynosił $-0,90 \div -0,97$ przy poziomie ufności $\alpha = 0,05$ dla wszystkich analizowanych przypadków obciążenia. Teoretyczne płaszczyzny naprężeń granicznych opisano wzorami:

a) dla zginania próbek ze stali 18G2A:

$$\sigma_a = \frac{2129}{N^{0,139}} - 3,124N^{-0,162}\sigma_m,$$

b) dla skręcania próbek ze stali 18G2A:

$$\tau_a = \frac{597}{N^{0,085}} - 2,890N^{-0,148}\tau_m,$$

c) dla zginania próbek ze stali 10HNAP:

$$\sigma_a = \frac{971}{N^{0,079}} - 1,006N^{-0,072}\sigma_m,$$

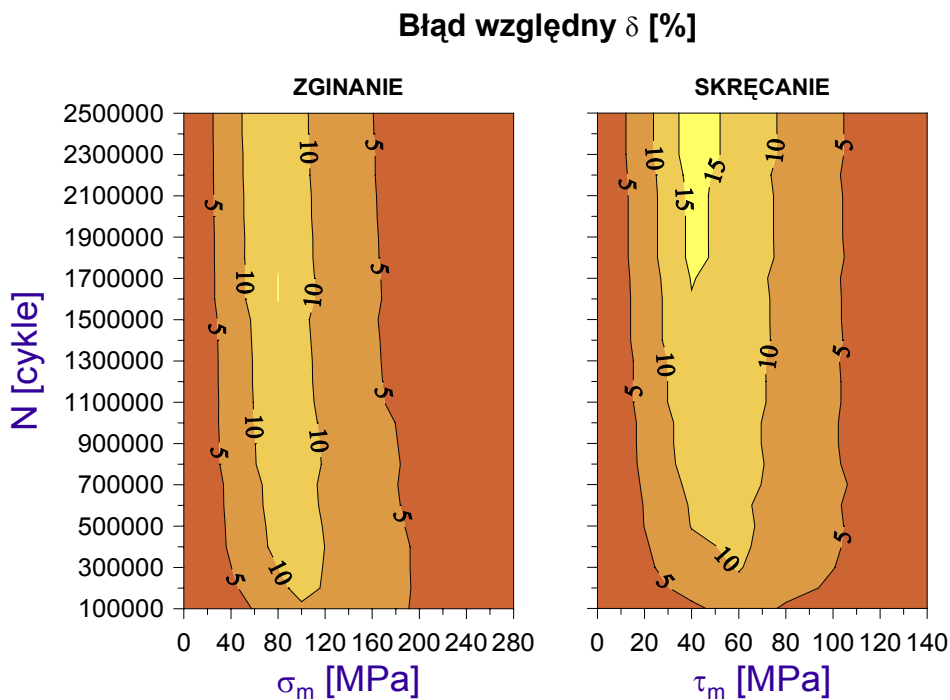
d) dla skręcania próbek ze stali 10HNAP:

$$\tau_a = \frac{445}{N^{0,067}} - 0,818N^{-0,113}\tau_m.$$

Dla określenia poprawności wyników prognozowania dopuszczalnych amplitud naprężenia σ_a z zastosowaniem proponowanego modelu wyznaczono błąd względny amplitud naprężenia obliczonych na podstawie modelu teoretycznego w stosunku do wyników badań doświadczalnych

$$\delta = \frac{\sigma_{a(\text{obl})} - \sigma_{a(\text{exp})}}{\sigma_{a(\text{exp})}} 100\% . \quad (17)$$

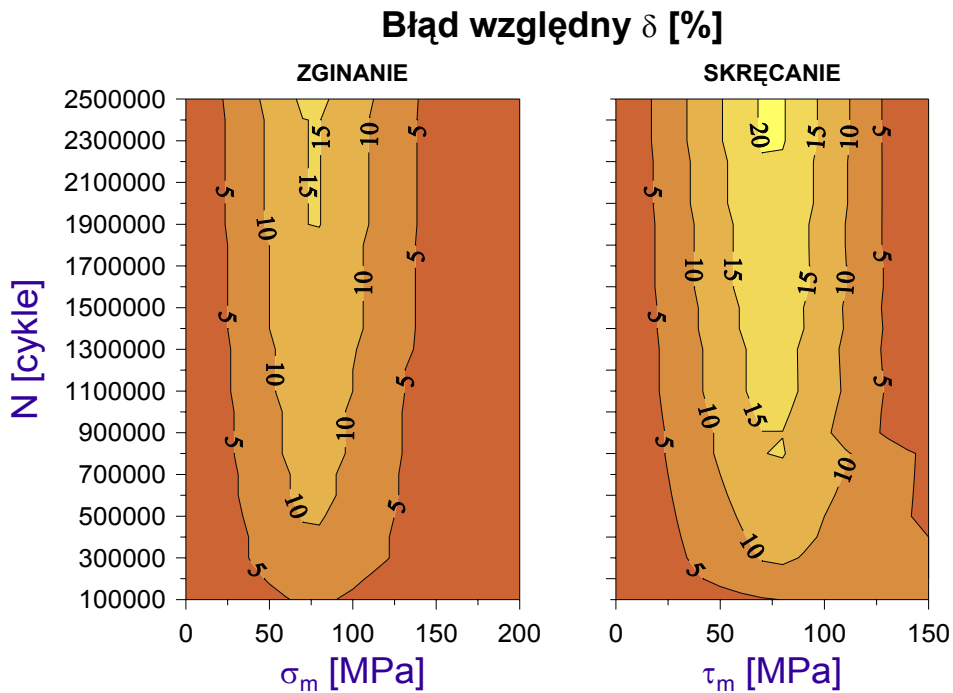
Na rysunku 11 przedstawiono rozkład błędu względnego w zależności od wartości naprężenia średniego i liczby cykli niszczących N dla próbek wykonanych ze stali 18G2A.



Rys. 11. Błąd względny obliczeniowych amplitud naprężenia w stosunku do wyników uzyskanych eksperymentalnie przy zginaniu i skręcaniu próbek ze stali 18G2A (liczbami na liniach warstwic oznaczono wartość błędu w [%])

Maksymalny błąd dla zginania wynosi 10 % przy $\sigma_m = 80$ MPa i trwałości $N > 1,3 \cdot 10^6$ cykli. Dla skręcania błąd ten wynosi 15 % dla $\tau_m = (40 \div 60)$ MPa i trwałości $N > 1,8 \cdot 10^6$ cykli.

Rysunek 12 określa obszary błędów względnych wyników obliczeń w stosunku do wyników doświadczalnych w przypadku zginania i skręcania próbek ze stali 10HNAP.



Rys. 12. Błąd względny obliczeniowych amplitud naprężenia w stosunku do wyników uzyskanych eksperymentalnie przy zginaniu i skręcaniu próbek ze stali 10HNAP (liczbami na liniach warstwic oznaczono wartość błędów w [%])

Maksymalny błąd dla zginania wynosi 15 % przy $\sigma_m = 75$ MPa i trwałości $N > 1,9 \cdot 10^6$ cykli. Dla skręcania błąd maksymalny wynosi 17 % dla $\tau_m = 50 \div 100$ MPa i trwałości $N > 1,0 \cdot 10^6$ cykli. Dla trwałości $N > 2,3 \cdot 10^6$ i $\tau_m = 75$ MPa błąd osiąga 20%, lecz obejmuje on nieznaczny obszar płaszczyzny naprężeń granicznych.

5. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono model matematyczny opisu powierzchni dopuszczalnych amplitud naprężenia w zależności od wartości obciążenia średniego i liczby cykli do zniszczenia materiału. Przyjęto założenie, że wpływ wartości średniej obciążenia na dopuszczalne amplitudy naprężenia zależy od wrażliwości materiału na asymetrię cyklu. Zaproponowano funkcję opisującą zmianę wartości współczynnika wrażliwości materiału na asymetrię cyklu, a jej parametry określone zostały na podstawie badań zmęczeniowych próbek w warunkach obciążeń wahadłowych ($R = -1$) i odzerowo tętniących ($R = 0$).

Wpływ wartości średniej obciążenia na dopuszczalne amplitudy naprężenia został uwzględniony za pomocą liniowej zależności, w której uwzględniono zmianę wartości współczynnika wrażliwości materiału na asymetrię cyklu wraz z liczbą cykli do zniszczenia. Zastosowany liniowy model zależności amplitudy naprężenia od wartości średniej naprężenia jest słuszny dla większości stali konstrukcyjnych [1]. W przypadku innego rodzaju materiału konstrukcyjnego koniecznym staje się zweryfikowanie tego modelu.

Na podstawie przeprowadzonych analiz określono model matematyczny powierzchni granicznych amplitud naprężenia, który został zweryfikowany wynikami badań zmęczeniowych próbek ze stali 18G2A i 10HNAP poddanych cyklicznym obciążeniom zginającym i skręcającym z udziałem różnych wartości obciążenia średniego. Maksymalny błąd obliczeń w stosunku do wyników eksperymentu zasadniczo nie przekraczał 15%. Pozwala to stwierdzić, że zaproponowany w pracy algorytm wyznaczania wartości dopuszczalnych amplitud naprężenia daje rezultaty zbieżne z wynikami badań doświadczalnych.

LITERATURA

- [1] KOCAŃDA S, SZALA J.: Podstawy obliczeń zmęczeniowych, PWN, Warszawa 1985
- [2] GOODMAN J.: Mechanics Applied to Engineering, Longmans, Green, and Co., 1899
- [3] GERBER W.: Bestimmung der zulossigne Spannungen in eisen Constructionen, Z Bayer Aech Ing Ver 1874;6
- [4] MORROW J.: in.: Fatigue design handbook, advances in engineering, Vol. 4, Warrendale(PA): Society of Automotive Engineers, 1968, p. 29
- [5] LACHOWICZ C.T., ŁAGODA T., MACHA E., PAWLICZEK R.: Zmęczenie losowe stali 10HNAP i 18G2A z udziałem naprężeń średnich, V Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania 1995, Zesz. Nauk. Politechniki Świętokrzyskiej, Mechanika 56, Ameliówka, Kielce 1995, ss.337-344

- [6] GASIĄK G., PAWLICZEK R., ROZUMEK D.: Przewidywanie trwałości zmęczeniowej próbek z karbem przy cyklicznym zginaniu i skręcaniu z udziałem różnych wartości obciążenia średniego, Zeszyty Naukowe PO nr 257, Seria: Mechanika Z.62, Opole 2000, ss. 19-39
- [7] PAWLICZEK R.: Przewidywanie trwałości zmęczeniowej przy cyklicznym zginaniu i skręcaniu z udziałem wartości średniej naprężenia, Zeszyty Naukowe PO nr 257, Seria: Mechanika Z.62, Opole 2000, ss. 83-105
- [8] PAWLICZEK R.: Badanie wpływu parametrów obciążenia i geometrii karbu na trwałość przy zmiennym zginaniu i skręcaniu, Raport Nr 1/2001, Praca doktorska, Politechnika Opolska, Opole, 2001, s. 170
- [9] LEBEDEV A.A.: Equivalent stress calculation for biaxial/multi-axial fatigue and fracture (experiment and theory), 5th Int.Conf.on Biaxial/Multi-axial Fatigue and Fracture, Cracow 1997, Poland, Vol.1, pp. 35-44
- [10] HEYWOOD R.B.: Design with the Account Taken of Fatigue, Mashinostroyenie, Moscow, 1969
- [11] GASIĄK G., PAWLICZEK R.: Obliczanie trwałości próbek ze stali 18G2A w warunkach zmiennych obciążeń zginających i skręcających o różnych współczynnikach asymetrii cyklu, Zeszyty Naukowe PO nr 268, Seria: Mechanika Z.66, Opole 2001, ss. 23-44

Pracę złożono u redaktora serii w dniu 5 kwietnia 2002 r.
Opiniodawca: Dr hab. inż. Jerzy KALETA

FATIGUE STRENGTH OF A STRUCTURAL STEEL UNDER ASYMMETRIC LOADING

Summary

The paper presents a method of description of fatigue strength of a structural steel under variable loading with additional static loading. Influence of cycle asymmetry on the material life was taken into account with use of the cycle asymmetry sensitivity factor. The 18G2A steel was tested and the test result showed a change of that factor value together with a number of cycles to the material damage. The authors proposed an experimental method for determination of a function describing dependence between the cycle asymmetry sensitivity factor and a number of destructive cycles.