

CEL PRACY

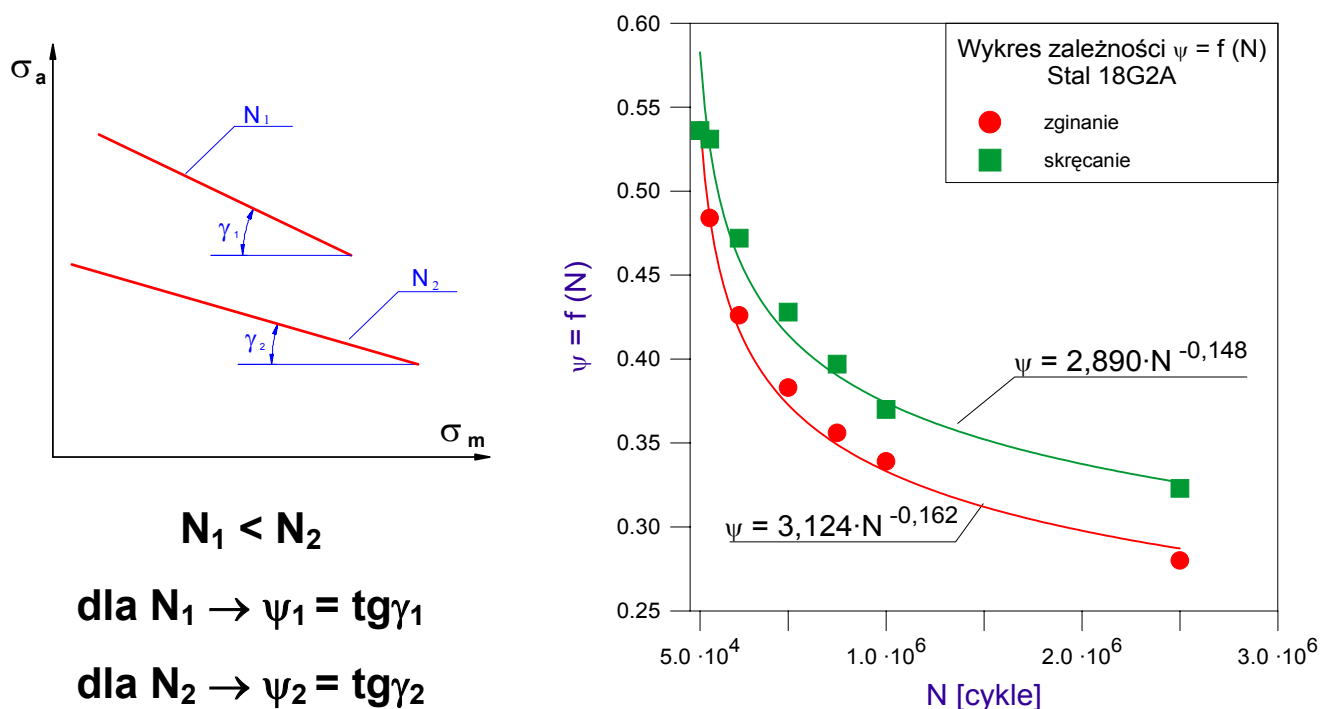
1. Analiza energetycznych kryteriów zmęczenia wieloosiowego pod względem zastosowanych materiałów, rodzajów obciążenia, wpływu koncentratora naprężenia i zakresu stosowalności dla małej i dużej liczby cykli.
2. Modyfikacja kryteriów wyężenia pod kątem uwzględnienia typu obciążenia, rodzaju badanego materiału i wpływu obciążenia średniego na trwałość zmęczeniową materiału konstrukcyjnego.
3. Porównanie trwałości zmęczeniowej uzyskanej według zmodyfikowanych kryteriów i otrzymanej doświadczalnie w przypadku obciążenia próbek gładkich i z karbem przy zginaniu, skręcaniu i równoczesnym zginaniu ze skręcaniem.

ZAKRES PRACY

1. Przeprowadzenie analizy literatury ze szczególnym uwzględnieniem metod i modeli opisu wpływu wartości średniej naprężenia na trwałość zmęczeniową.
2. Analiza związków, opisujących zmęczenie materiału w warunkach obciążeń zginających i skręcających, określenie matematycznego modelu opisującego wpływ wartości średniej naprężenia w analizowanych przypadkach obciążenia.
3. Modyfikację energetycznego kryterium wytrzymałości zmęczeniowej z uwzględnieniem zaproponowanego modelu uwzględniającego wpływ wartości średniej naprężenia.
4. Analiza wyników badań zmęczeniowych i porównanie trwałości eksperymentalnej z trwałością obliczoną przy pomocy proponowanych modeli zmęczenia wieloosiowego.

WPŁYW OBCIĄŻENIA ŚREDNIEGO

Jednym z parametrów opisujących zachowanie się materiału pod wpływem naprężeń σ_m średnich jest współczynnik ψ , określający wrażliwość materiału na asymetrię cyklu. Najczęściej wykorzystuje się go przy opisie wytrzymałości zmęczeniowej materiału na poziomie granicy zmęczenia i jego wartość uzależniona jest od rodzaju materiału. W pracy przyjęto założenie, że wartość współczynnika wrażliwości materiału na asymetrię cyklu zależy nie tylko od rodzaju materiału, lecz także od liczby cykli N niszczących materiał.



Na podstawie wyników badań doświadczalnych zawartych w pracy do opisu zmiany wartości współczynnika zaproponowano funkcję w postaci

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

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

Rysunek powyżej przedstawia schematyczne ujęcie przyjętego założenia oraz przykładowy wykres zmian współczynnika ψ wraz z liczbą cykli N dla próbek ze stali 18G2A poddanych zginaniu i skręcaniu. Wyraźnie widoczny jest silniejszy wpływ obciążenia średniego dla trwałości $N = 5 \cdot 10^4 \div 10^6$ cykli, co potwierdza przyjęte założenie.

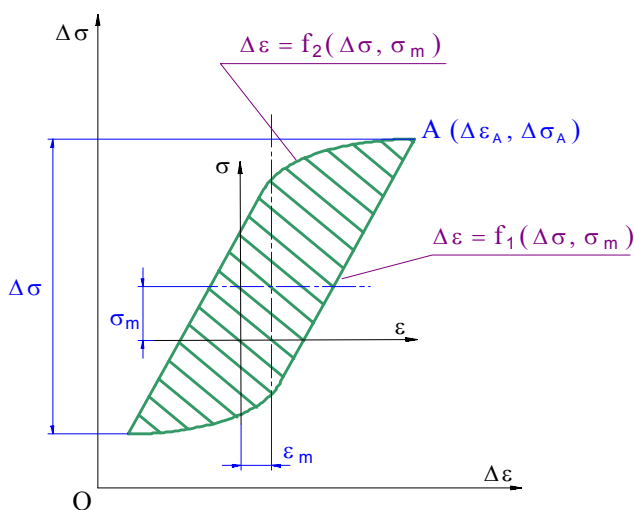
PARAMETR ENERGETYCZNY

W oparciu o wyznaczoną funkcję zmiany współczynnika $\psi = \psi(N)$ zaproponowano zmodyfikowaną postać liniowej zależności transformacyjnej ze względu na udział obciążeń średnich

$$\sigma_{a-1}(N) = \sigma_a + \psi(N)\sigma_m = \sigma_a + \eta N^\lambda \sigma_m$$

gdzie: $\sigma_{a-1}(N)$ - amplituda naprężenia przebiegu wahadłowego ($R = -1$), równoważnego pod względem zmęczenia przebiegowi niesymetrycznemu ($R \neq 0$).

Wykorzystując tę zależność do opisu pętli histerezy krzywej cyklicznego odkształcenia dla przebiegów zmęczeniowych z wartością średnią naprężenia możemy obliczyć jej pole, co pozwala na wyznaczenie energii W^p odkształcenia plastycznego rozpraszanej w materiale podczas jednego cyklu obciążenia.



$$f_1 = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \frac{\psi(N) \cdot \sigma_m}{E} + \left(\frac{1}{K'}\right)^{\frac{1}{n}} \left[\left(\frac{\Delta\sigma_A}{2} + \psi(N) \cdot \sigma_m\right)^{\frac{n}{2}} - \left(\frac{\Delta\sigma_A}{2} - \frac{\Delta\sigma}{2}\right)^{\frac{n}{2}} \right]$$

$$f_2 = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \frac{\psi(N) \cdot \sigma_m}{E} + \left(\frac{\Delta\sigma + 2\psi(N) \cdot \sigma_m}{2K'}\right)^{\frac{1}{n}}$$

$$W^p = \int_0^{\Delta\sigma} f_1 d(\Delta\sigma) - \int_0^{\Delta\sigma} f_2 d(\Delta\sigma)$$

Przyjmując energię odkształcenia W^* jako parametr energetyczny opisujący wytężenie materiału przy obciążeniach zmęczeniowych, uzyskujemy możliwość przedstawienia przebiegów o różnych współczynnikach asymetrii cyklu na jednym wykresie (W^*-N).

Parametr W^* jest liczony jako suma energii właściwej odkształcenia sprężystego, energii odkształcenia sprężystego pochodzącego od naprężenia średniego i energia właściwej odkształcenia plastycznego:

$$W^* = W^e + W^m + W^p = \frac{1}{2E} \left(\frac{\Delta\sigma}{2}\right)^2 + \frac{1}{2E} \psi(N) \sigma_m^2 + \int_0^{\Delta\sigma} f_1 d(\Delta\sigma) - \int_0^{\Delta\sigma} f_2 d(\Delta\sigma)$$

POWIERZCHNIA AMPLITUD GRANICZNYCH

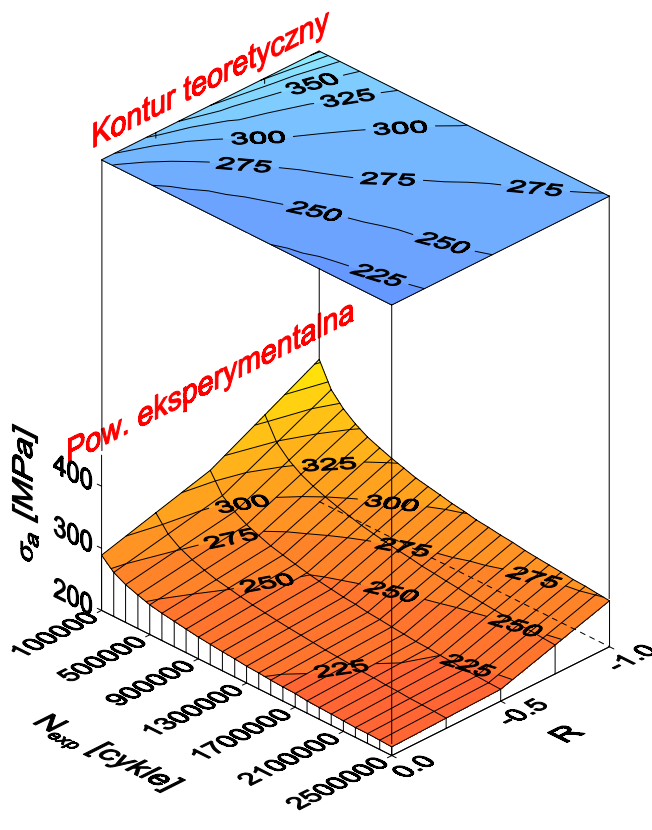
Wytrzymałość zmęczeniowa materiału z uwzględnieniem naprężenia średniego σ_m może być opisana za pomocą funkcji $\sigma_a = f(\sigma_m, N)$, gdzie σ_a jest dopuszczalną (graniczną) amplitudą obciążenia zmiennego dla zadanej wartości średniej i trwałości N materiału. Uwzględniając wcześniej przedstawione zależności w pracy zaproponowano opis powierzchni amplitud granicznych w postaci:

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

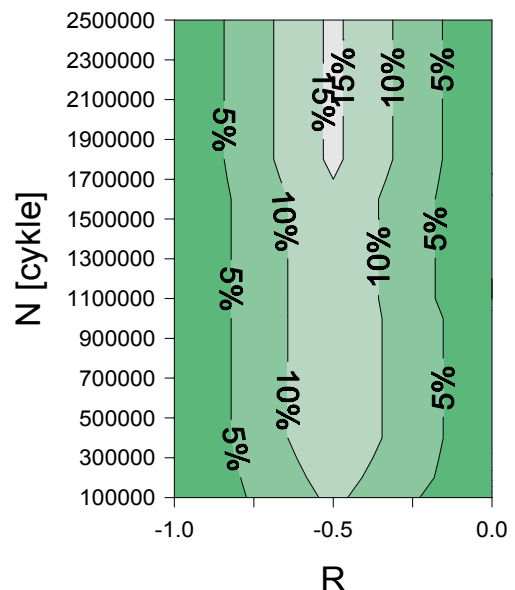
gdzie: m, Z_G, N_0 - stałe materiałowe, η, λ - parametry równania

opisanego wcześniej.

Rysunki poniżej przedstawiają przykład powierzchni uzyskanej eksperymentalnie, odpowiadający jej kontur teoretyczny wyznaczony według powyższego równania i rozkład błędu względnego dopuszczalnych amplitud obliczony z modelu i wyznaczony eksperymentalnie.



Rozkład błędu względnego



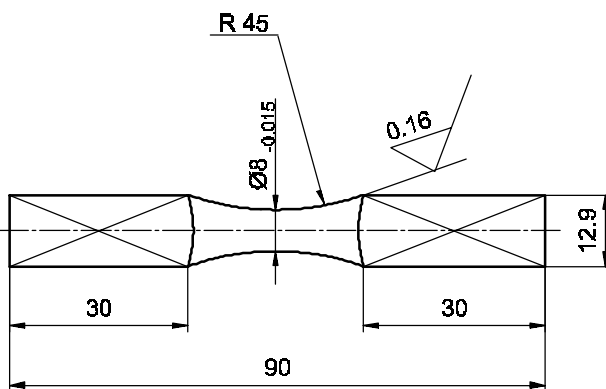
Wyniki badań dla próbek cylindrycznych gładkich poddanych zginaniu

BADANIA EKSPERYMENTALNE

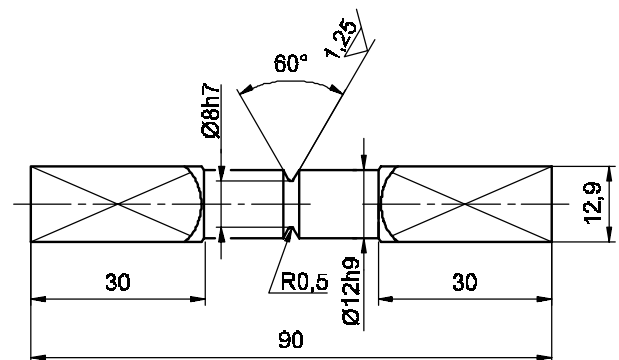
Badany materiał stanowiły stale niskostopowe **18G2A** i **10HNAP**

Stal	Skład chemiczny [%]			Własności wytrzymałościowe
18G2A	0.21C	1.46Mn	0.42Si	$R_e=357$ [MPa], $R_m=535$ [MPa], $E=2.10 \cdot 10^5$ [MPa], $\nu=0.30$, $n' = 0.287$, $K' = 869$ [MPa]
	0.019P	0.046S	0.09Cr	
	0.04Ni	0.17Cu		
10HNAP	0.11C	0.52Mn	0.26Si	$R_e=418$ [MPa], $R_m=566$ [MPa], $E=2.15 \cdot 10^5$ [MPa], $\nu=0.29$, $n' = 0.133$, $K' = 832$ [MPa]
	0.098P	0.016S	0.65Cr	
	0.35Ni	0.26Cu		

Próbki użyte do badań zmęczeniowych przedstawiono na rysunku poniżej.



Próbka gładka



Próbka z karbem

Warunki badań zmęczeniowych:

Testy zmęczeniowe obejmowały obciążenia proporcjonalne, sinusoidalnie zmienne z udziałem wartości średniej naprężenia. Stosunki naprężeń średnich w badanej próbce były takie same, jak stosunki amplitud naprężeń zmiennych. Przeprowadzone badania obejmowały swym zakresem cztery stany obciążenia próbek, ustalone wartością kąta α określającego kombinację zginania ze skręcaniem:

$\alpha = 0$ [rad] (czyste zginanie),

$\alpha = \pi/4$ [rad] (kombinacja zginania ze skręcaniem), $M_{s\alpha} = M_{g\alpha}$; $\sigma_{\alpha}(t) = 2\tau_{\alpha}(t)$

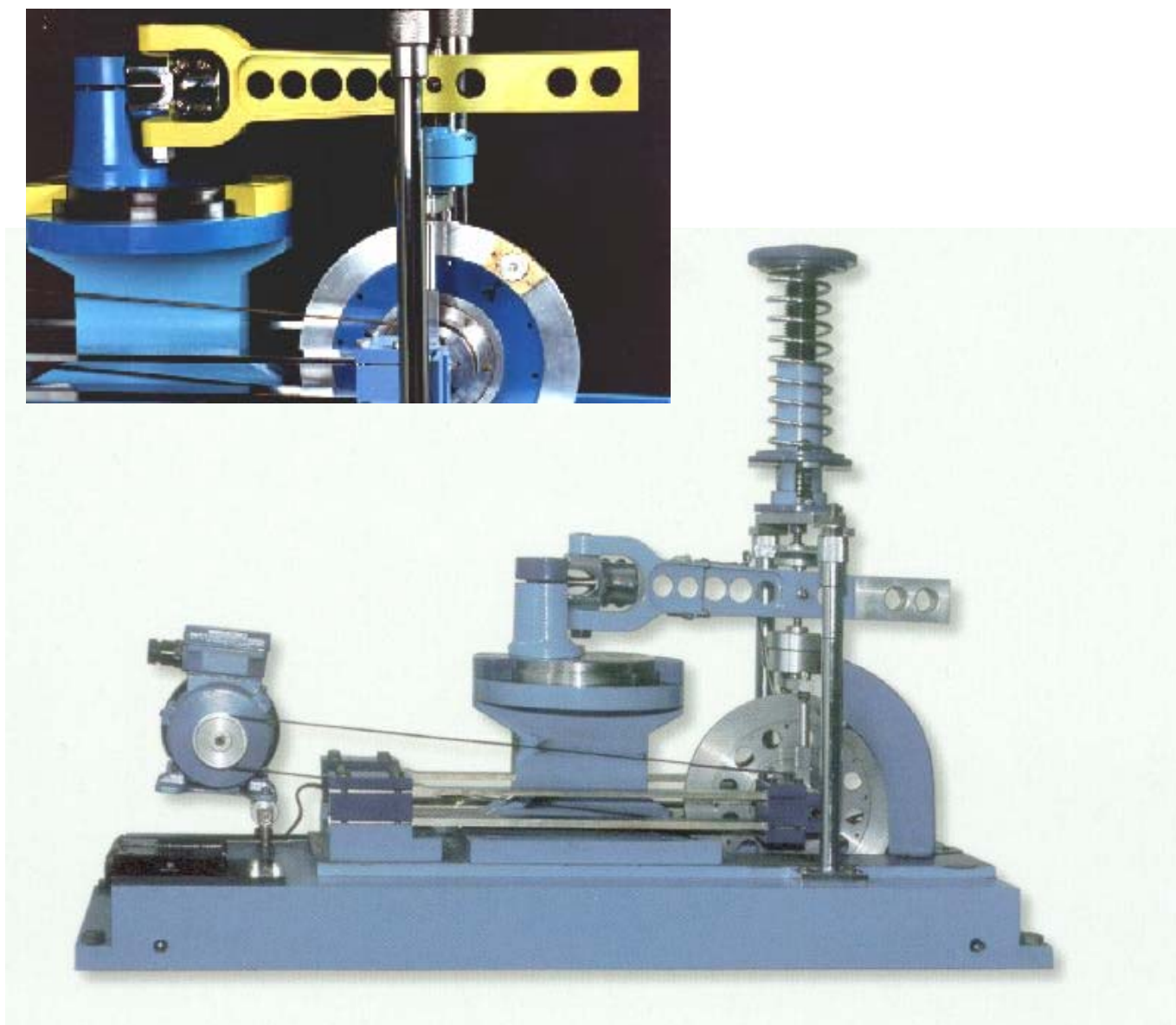
$\alpha = 1,107$ [rad] (kombinacja zginania ze skręcaniem), $M_{s\alpha} = 2M_{g\alpha}$; $\sigma_{\alpha}(t) = \tau_{\alpha}(t)$,

$\alpha = \pi/2$ [rad] (czyste skręcanie).

W przypadku próbek ze stali 10HNAP badania zmęczeniowe przeprowadzono dla ustalonych wartości naprężenia średniego ($\sigma_m, \tau_m = \text{const}$), zaś dla próbek ze stali 18G2A zastosowano procedurę badań, w której parametrem determinującym wartość średnią był współczynnik asymetrii cyklu R - badania zmęczeniowe przeprowadzono dla $R \text{ const} = -1; -0,5; 0$.

STANOWISKO DO BADAŃ ZMĘCZENIOWYCH

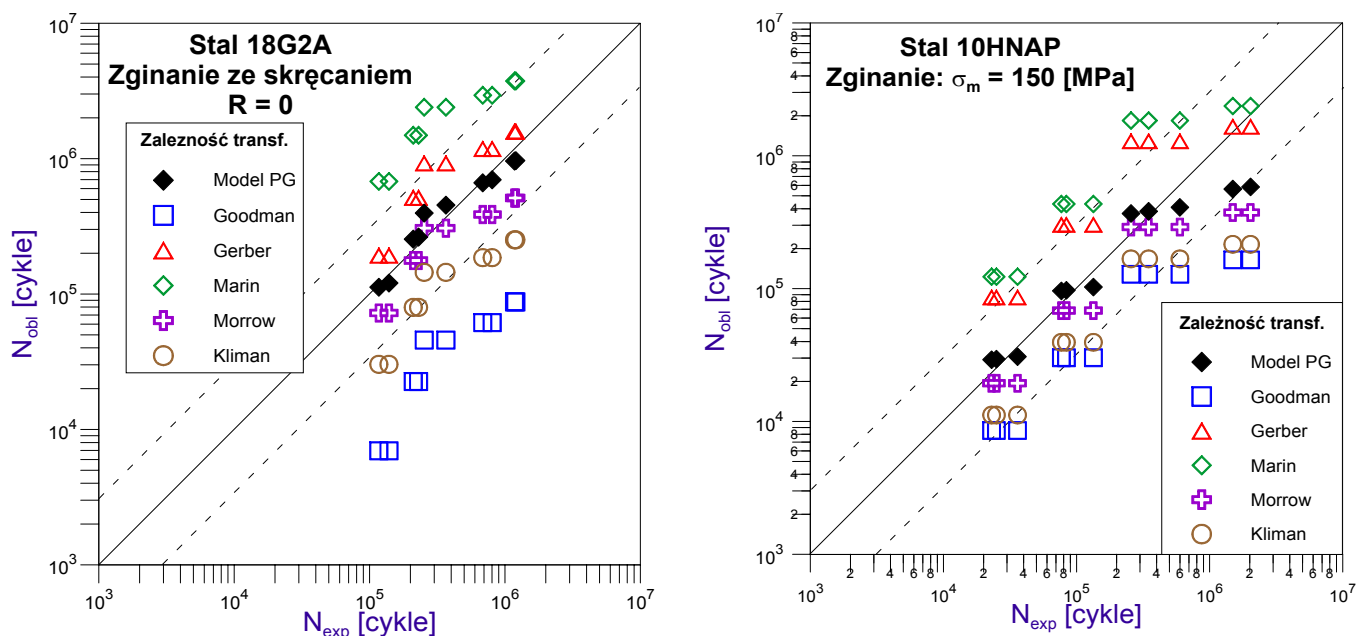
Badania zmęczeniowe wykonano na stanowisku **MZGS-100***. Stanowisko umożliwia realizację badań zmęczeniowych według przyjętego programu badań. Widok stanowiska przedstawiono na rysunku poniżej.



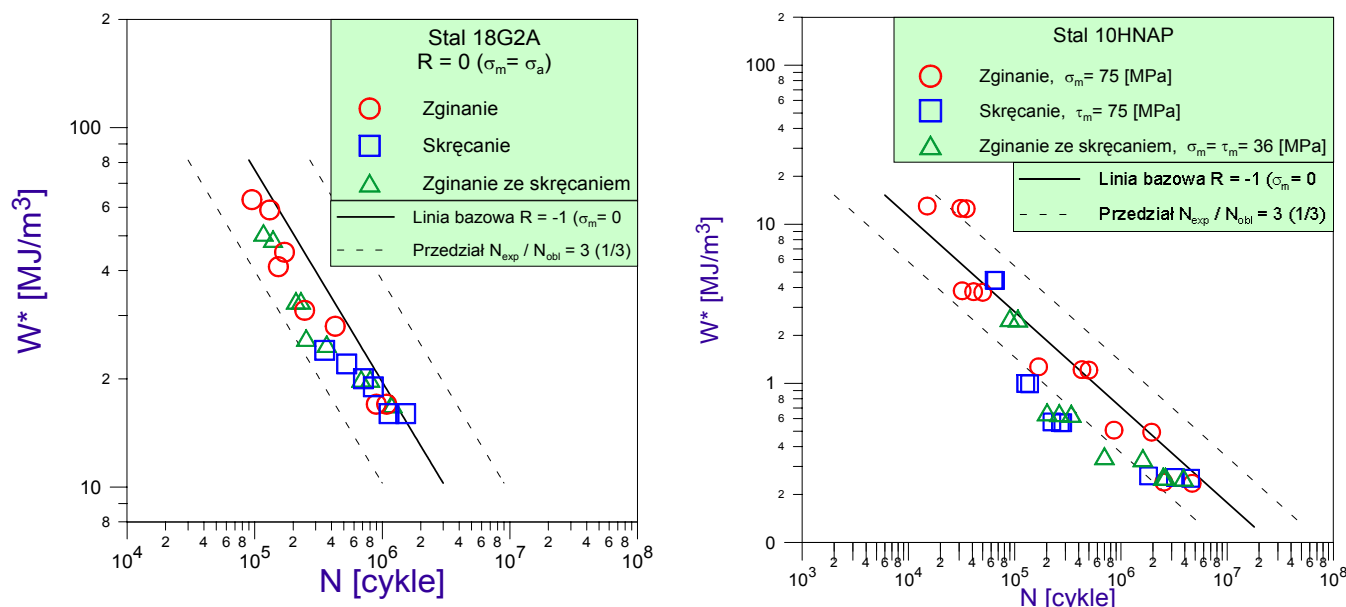
* (Achtelik H., Jamroz L.: Patent PRL nr 112497, CSR nr 200236 i HDR nr 136544)

WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Rysunek poniżej przedstawia przykładowe wykresy porównania trwałości zmęczeniowej uzyskanej eksperymentalnie z trwałością obliczoną według różnych modeli znanych w literaturze. Zaproponowany w pracy własny model obliczeniowy został oznaczony jako Model PG.



Stosując zaproponowany w pracy parametr energetyczny W^* opisano różne przypadki obciążeń na jednym wykresie zmęczeniowym w układzie współrzędnych W^* - N . Rysunki poniżej przedstawiają przykładowe wykresy opisu trwałości zmęczeniowej z zastosowaniem parametru energetycznego W^* .



PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawione w pracy wyniki badań zmęczeniowych próbek wykonanych ze stali 18G2A oraz 10HNAP, poddanych synchronicznemu, cyklicznie zmiennemu obciążeniu zginającym i skręcającym przy różnych wartościach obciążenia średniego pozwalają sformułować następujące wnioski:

1. Wartość średnia naprężenia w istotny sposób wpływa na wartości dopuszczalnych amplitud naprężenia determinując tym samym trwałość zmęczeniową materiału. Zwiększenie wartości średniej naprężenia powoduje spadek wartości amplitudy naprężenia.
2. Wpływ wartości średniej naprężenia na dopuszczalne amplitudy naprężenia zależy od rodzaju materiału. Dla danego materiału wrażliwość materiału na asymetrię cyklu zmienia się wraz z liczbą cykli do zniszczenia. Efekt ten został opisany przy pomocy funkcji zmiany współczynnika wrażliwości materiału na asymetrię cyklu.
3. Zaproponowano algorytm obliczania trwałości zmęczeniowej z uwzględnieniem wpływu obciążenia średniego przy pomocy zmodyfikowanej, liniowej zależności pomiędzy amplitudą naprężenia i wartością średnią naprężenia. Modyfikacja polega na uwzględnieniu zależności określającej zmianę wpływu wartości średniej naprężenia na dopuszczalne amplitudy naprężenia wraz z liczbą cykli do zniszczenia.
4. Spośród analizowanych modeli, uwzględniających wpływ wartości średniej naprężenia na trwałość zmęczeniową, najlepsze wyniki oceny trwałości zmęczeniowej uzyskano za pomocą modelu PG, uwzględniającego założenia i wyniki analiz zawartych w pracy.
5. Model PG posłużył do modyfikacji kryterium energii odkształcenia całkowitego w celu uwzględnienia wartości średniej obciążenia, co pozwoliło w sposób efektywny odnieść przypadki obciążeń niesymetrycznych do obciążeń o zerowej wartości naprężenia średniego.