

WRAŻLIWOŚĆ STALI 18G2A (S 355N) NA ASYMETRIĘ CYKLU OBCIĄŻENIA W WYMIAROWANIU USTROJU NOŚNEGO KOPAREK WIELONACZYNIOWYCH

THE SENSITIVITY OF 18G2A (S 355N) STEEL TO CYCLE ASYMMETRY IN BUCKET WHEEL EXCAVATORS BEARING SYSTEM DIMENSIONING

Stefan Wojciech Szepietowski – Poltegor-Instytut IGO, Wrocław

Naprężenia w ustroju nośnym koparek wielonaczyniowych i zwalowarek taśmowych mają postać cykli o różnym stopniu asymetrii. Asymetrię tę należy uwzględnić w obliczeniach wytrzymałości ustroju. W publikacji określono wartości współczynnika wrażliwości stali 18G2A (S 355N) na asymetrię cykli, przyjęte dla monitoringu trwałości zmęczeniowej ustroju nośnego wielonaczyniowych koparek kołowych.

Stresses in load-carrying structure of bucket wheel excavators and belt stacking machines have got a form of cycles with different degree of asymmetry. The asymmetry should be taken into consideration during calculations of structure resistance. Value of sensitivity coefficient of 18G2A (S 355N) steel to cycles asymmetry, accepted for monitoring of fatigue life of bucket wheel load-carrying structure, have been defined discussed in the paper.

Wprowadzenie

Dla prawie wszystkich elementów ustroju nośnego koparki wielonaczyniowej największą wartość w sumarycznym obciążeniu ma ciężar własny maszyny. Można go traktować jako obciążenie quasi statyczne. Zmienia się ono w niewielkim zakresie wskutek zmieniającego się, podczas procesu urabiania, położenia poszczególnych podzespołów maszyny, głównie wysięgnika koła czerpakowego. W rezultacie występuje duża asymetria cyklu zmian naprężeń w elementach ustroju nośnego, co należy uwzględnić przy ocenie wyężenia zmęczeniowego tego ustroju. Stopień asymetrii cyklu przyjęto charakteryzować za pośrednictwem współczynnika asymetrii R , określonego zależnością:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (1)$$

gdzie: σ_{\min} , σ_{\max} – odpowiednio najmniejsza i największa wartość naprężenia danego cyklu,

Aby można było posłużyć się hipotezą kumulacji uszkodzeń Palmgren-Minera dla oceny wytrzymałości zmęczeniowej ustroju nośnego, należy sprowadzić cykle asymetryczne do cykli wahadłowych. Wtedy wystarcza dla takiej oceny, na ogół znana dla danego materiału, krzywa zmęczeniowa Wöhlera. Redukcji cykli asymetrycznych można dokonać korzystając z następującej zależności [1]:

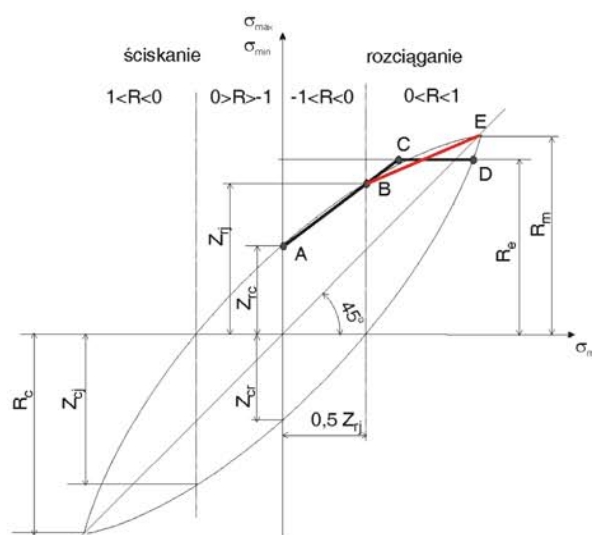
$$a_{zi} = a_i + \psi_a m_i \quad (1)$$

gdzie: a_i – amplituda i tego cyklu naprężeń, a_{zi} – zredukowana wartość amplitudy i –tego cyklu naprężeń, m_i – średnia wartość i –tego cyklu naprężeń, ψ_a – współczynnik wrażliwości materiału na asymetrię cyklu

Współczynnik wrażliwości materiału można wyznaczyć, w oparciu o uproszczony wykres zmęczeniowy Haigha, z zależności [1]:

$$\psi_a = \frac{2Z_{rc} - Z_{rj}}{Z_{rj}} \quad (2)$$

gdzie: Z_{rc} – wytrzymałość zmęczeniowa przy obciążeniu osiowym i wahadłowym cyklu obciążenia (o wartości średniej równej zero), Z_{rj} – granica wytrzymałości zmęczeniowej przy pulsacyjnym cyklu naprężeń.



Rys. 1. Zmęczeniowy wykres Smitha dla materiału plastycznego
Fig. 1. Smith chart for plastic material

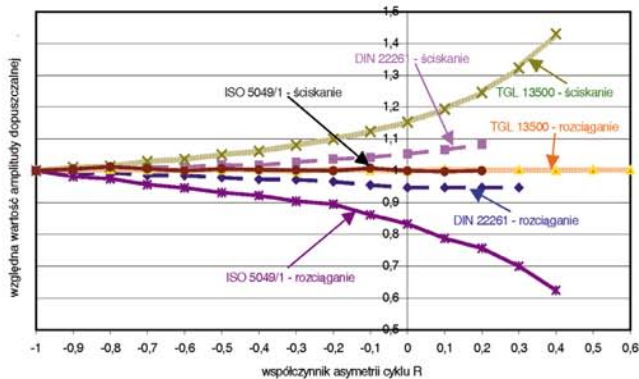
Sam tylko wykres Haigha ogranicza zakres stosowania zależności (2) do cykli naprężeń o współczynniku asymetrii $-1 < R < 0$. Założenie stałej wartości współczynnika wrażliwości materiału, dla takiego zakresu zmienności współczynnika asymetrii, jest równoznaczne z przyjęciem uproszczonego wykresu zmęczeniowego Smitha - prosta przechodząca przez punkty $A(0, Z_{rc})$ i $B(0,5Z_{rj}, Z_{rj})$ na rysunku 1. Dla materiałów plastycznych, takich jak stal, na uproszczonym wykresie Smitha prosta ta jest przedłużana aż do wartości naprężenia całkowitego,

równego granicy plastyczności R_e [2]. Pozwala to odpowiednio poszerzyć zakres stosowania zależności (2).

Współczynnik wrażliwości stali 18G2A (S 355N) dla $\sigma_a \leq Z_{rc}$ według norm obliczeniowych

Dla określenia wartości współczynnika wrażliwości na asymetrię cyklu dla stali 18G2A (S 355n), opisanego zależnością (2), można posłużyć się wartościami ujętymi w normach stosowanych do obliczeń wytrzymałościowych ustroju nośnego maszyn podstawowych. W obowiązujących obecnie, jak i stosowanych do niedawna, normach obliczeniowych ustroju nośnego koparek wielonaczyniowych w zakresie wytrzymałości zmęczeniowej przyjmuje się, że wszystkie cykle obciążenia mają ten sam, maksymalny zakres zmienności [8,9,10]. Wynika stąd, że obliczenia prowadzone są dla trwałości nieograniczonej. Zatem, wyznaczone w oparciu o te normy wartości współczynnika wrażliwości stali 18G2A (S 355N), odnoszą się do granicznych wartości amplitudy naprężeń. Historycznie najstarszą jest norma międzynarodowa ISO 5049/1 [9], w byłej NRD posługiwano się normą TGL 13500/01 [10], w Niemczech stosowana jest obecnie norma DIN 22261 [8], stanowiąca również podstawę normy obliczeniowej przyjętej w Polsce. Wartości Z_{rc} przypuszczalnie przyjęte w powyższych normach są nieco różne (ISO 5049/1 – 180 MPa, TGL 13500/01 i DIN 22261 – 190 MPa) i dotyczą obciążenia osiowego, bo głównie takiemu poddane są elementy ustroju nośnego koparek wielonaczyniowych.

Względne wartości dopuszczalnych amplitud, określone w



Rys. 2. Zależność względnej dopuszczalnej amplitudy naprężeń σ_a/Z_{rc} od współczynnika asymetrii cyklu według poszczególnych norm

Fig. 2. Dependence of relative admissible amplitude of stresses σ_a/Z_{rc} from cycle asymmetry coefficient according to particular norms

oparciu o powyższe normy, przedstawia rysunek 2. Wynika z niego, że przy obciążeniu rozciągającym w normie TGL 13500/01 przyjęto stałą wartość dopuszczalnej amplitudy naprężenia, niezależną od wartości średniej (dla naprężeń maksymalnych nie przekraczających wartości granicy plastyczności R_e). Pozostałe normy zakładają, że dopuszczalna amplituda naprężeń maleje ze wzrostem wartości średniej. Natomiast dla cykli ściskających z kolei w normie ISO 5049/1 przyjęto stałą wartość dopuszczalnej amplitudy, a w pozostałych normach założono, że dopuszczalna wartość amplitudy rośnie ze zwiększaniem się wartości średniej. Określone na podstawie tych danych współczynniki wrażliwości stali 18G2A (S 355N) ujmują tabela 1. Odbiegają one znacznie od wartości ujętych w publikacji [1]. Jedynie zbliża się do nich wartość współczynnika wynikająca z normy ISO i to tylko dla obciążeń rozciągających. Większość publikacji podaje,

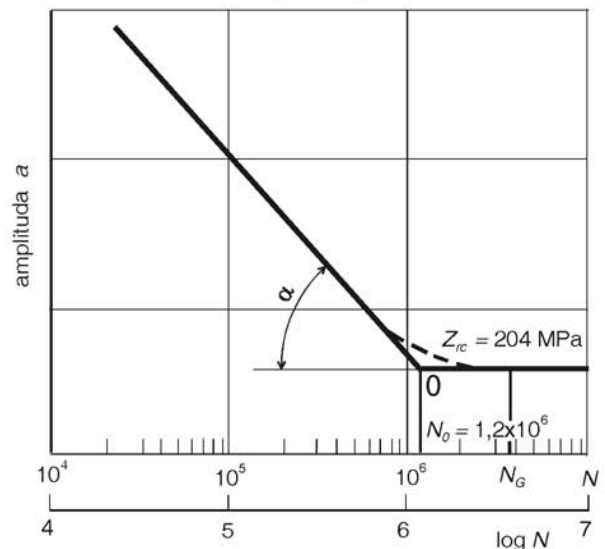
że wartość współczynnika wrażliwości, jeśli nie dla stali 18G2A (S 355N), to dla stali o zbliżonych właściwościach mechanicznych, mieści się w przedziale [0,1, 0,2]. Tylko niektóre z wartości ujętych w tabeli 1 są z tego przedziału, większość z nich leży poniżej przedziału.

Tab. 1. Wartości współczynnika wrażliwości stali 18G2A (S 355N) na asymetrię cyklu dla granicznych wartości naprężeń

Tab. 1. The coefficient of steel 18G2A (S 355N) sensibility on cycle asymmetry for boundary values of stress

Według normy	Wartość współczynnika ψ_a	
	Cykl rozciągający	Cykl ściskający
ISO 5049/1	0,2	0
TGL 13500/01	0	-0,132
DIN 22261	0,055	-0,05

Wartości współczynnika, wynikające z danych ujętych w normie DIN 22261, leżą między skrajnymi wartościami wynikającymi z dwóch pozostałych norm (tab. 1), a ponadto jest to norma najnowsza i przypuszczalnie oparta jest na najnowszych wynikach badań. Zatem wydaje się najrozsądniej tę normę przyjąć jako podstawę do określenia wartości współczynnika wrażliwości stali 18G2A (S 355N).



Rys. 3. Wykres Wöhlera dla stali 18G2A (S 355N) przy osiowym obciążeniu i przemiennym cyklu [4]

Fig. 3. Wöhler graph for 18G2A (S 355N) steel during axial load and alternating cycle

Brak jest w literaturze wiarygodnej wartości Z_{rc} dla tej stali. Można ją jedynie określić z zależności (2) przyjmując wartości ψ_a wynikającą z normy DIN 22261 (tab.1). Na rysunku 3 podany jest wykres Wöhlera dla stali 18G2A (S 355N) przy obciążeniu osiowym, zaczerpnięty z pracy AGH [4]. Dla podanej na nim wartości granicy $Z_{rc} = 204$ MPa otrzymuje się wartość $Z_{rj} = 384$ MPa, natomiast dla danych przyjętych w normie DIN 22261 $Z_{rj} = 360$ MPa. Wg PN-72/H 84018 gwarantowana wartość granicy plastyczności dla stali 18G2A (S 355N) przy rozciąganiu $R_e = 355$ MPa. Jest to wartość nie większa od określonych wyżej wartości granicy wytrzymałości zmęczeniowej dla cyklu pulsacyjnego. Taki sam układ wartości granicznych podaje również dla wielu gatunków stali publikacja [1]. Wydaje się, że dla oceny trwałości zmęczeniowej, w takim przypadku

rozsądnym jest zbudować uproszczony wykres Smitha nie przez obcięcie go prostą poziomą o wartości $\sigma_{max} = R_c$ a prostą przechodzącą przez punkty $(0,5Z_{rj}; Z_{rj})$ i $(R_m; R_m)$ – linia BE (rys. 1). Wtedy dla wartości średniej cyklu $m_i \geq 0,5Z_{rj}$ (dodatkowej wartości współczynnika asymetrii cyklu R) równoważna amplituda, po sprowadzeniu do zerowej wartości średniej, wyrazi się zależnością:

$$a_{iz} = a_i + \frac{Z_{rc}}{R_m - 0,5Z_{rj}}(m_i - 0,5Z_{rj}) \quad \text{dla } 0,5Z_{rj} \leq m_i < R_m \quad (3)$$

Zależność (3) można zapisać w postaci:

$$a_{iz} = a_i + \psi'_a(m_i - 0,5Z_{rj}) \quad \text{dla } 0,5Z_{rj} \leq m_i < R_m \quad (4)$$

Wtedy dla wartości R_m podanej w normie PN-72/H 84018 w wysokości 490 MPa:

$$\psi'_a = \frac{Z_{rc}}{R_m - 0,5Z_{rj}} = 0,715 \quad (5)$$

Naprężenia rozciągające, przekraczające wartość R_c , mogą pojawiać się w elementach ustroju nośnego koparki jedynie sporadycznie i to w specjalnych przypadkach. Zatem ich wpływ na trwałość zmęczeniową ustroju koparki jest niezbyt duży i dokładność określenia obliczeniowej wartości współczynnika wrażliwości materiału w tym przypadku nie ma decydującego znaczenia.

Doświadczenia wskazują, że przy cyklach ściskających dla wielu gatunków stali następuje wyraźny wzrost bezwzględnych wartości granicznych naprężeń [5]. Tak jest to przyjęte w większości omawianych wyżej norm obliczeniowych jak i w normie PN-90/B-03200 [6]. Jednak brak jest w literaturze dostatecznie dokładnych danych doświadczalnych z zakresu obciążeń ściskających. Dlatego najczęściej zakłada się, że całkowity wykres Smitha jest biegunowo symetryczny względem początku 0 układu współrzędnych. Zatem współczynniki wrażliwości materiału na asymetrię cyklu ściskającego co do wartości bezwzględnej będą takie same jak dla cyklu rozciągającego.

Współczynnik wrażliwości stali 18G2A (S 355N) dla $\sigma_a > Z_{rc}$

Współczynnik wrażliwości materiału na asymetrię cyklu, przy amplitudach większych od wartości granicznej, zależy od liczby cykli powodujących zniszczenie zmęczeniowe materiału przy tej amplitudzie zmian naprężeń [11]. Normowe zasady obliczeń wytrzymałości zmęczeniowej ustroju nośnego koparek kołowych nie uwzględniają możliwości występowania cykli naprężeń o amplitudach $\sigma_a > Z_{rc}$. Jednak w rzeczywistości cykle takie mogą wystąpić. Dlatego przy monitorowaniu rzeczywistego stopnia wyężenia ustroju powinno się je uwzględniać. Wartość współczynnika wrażliwości stali 18G2A (S 355N) od liczby cykli powodujących zniszczenie, według badań prowadzonych na Politechnice Opolskiej, przy zginaniu próbki można opisać wzorem [6]:

Literatura

- [1] Kocańda St., Szala J., *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe Warszawa 1991
- [2] *Problemy wytrzymałości zmęczeniowej*. <http://student.uci.agh.edu.pl/~wytrzm/2-5/2-5.htm>
- [3] Wolny St. i inni, *Opracowanie modelu matematycznego prognozowania trwałości zmęczeniowej do badań symulacyjnych i współudział w badaniach*. Opracowanie AGH nr arch 5974/IGO, praca nie publikowana, Kraków 2010

$$\psi_{a > Z_{rc}} = 3,1621 N_a^{-0,164} \quad (6)$$

gdzie: N_a – liczba cykli powodujących zniszczenie materiału przy amplitudzie cykli równej a

Przyjmując tą zależność jako podstawę do określenia wpływu liczby cykli, powodujących uszkodzenia zmęczeniowe, na zmianę wartości współczynnika wrażliwości stali można napisać:

$$\psi_{a > Z_{rc}} = \psi_a \frac{N_a^{-0,164}}{N_0^{-0,164}} \quad (7)$$

gdzie: N_0 – teoretyczna liczba cykli granicy zmęczeniowej, zgodnie z rysunkiem 1, równa $1,2 \times 10^6$ [4]

Z rysunku 3 [1]:

$$\cot \alpha = \frac{\log N_0 - \log N_a}{\log a - \log Z_{rc}} \quad (8)$$

Dla stali 18G2A (S 355N) wg [6, 12] $\cot \alpha = m = 3$, stąd:

$$N_a = \left(\frac{Z_{rc}}{a} \right)^3 N_0 \quad (9)$$

Z zależności (7) i (9) otrzymuje się:

$$\psi_{a > Z_{rc}} = \psi_a \left(\frac{Z_{rc}}{a} \right)^{-0,2} \quad (10)$$

Zależność (10) pozwala na określenie wartości współczynnika wrażliwości stali 18G2A (S 355N) na asymetrię cyklu, przy amplitudach przekraczających granicę wytrzymałości zmęczeniowej, przy monitorowaniu stanu wyężenia zmęczeniowego ustroju nośnego koparki wielonaczyniowej.

Wnioski

1. Wartość współczynnika wrażliwości stali 18G2A (S 355N) na asymetrię cyklu dla granicznych wartości amplitud naprężeń określona została w oparciu o normę obliczeniową DIN 22261. Jest ona nieco mniejsza do zazwyczaj podawanych w literaturze dla stali o właściwościach zbliżonych do stali 18G2A (S 355N).
2. Wartość współczynnika wrażliwości materiału na asymetrię cyklu zależy od liczby cykli wywołujących przy danym naprężeniu zniszczenie materiału. Zmienność tego współczynnika dla stali 18G2A (S 355N) przyjęto na podstawie badań wykonanych na Politechnice Opolskiej.

- [4] Dylań Z., Orłoś Z., *Wytrzymałość zmęczeniowa materiałów*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 1962
- [5] PN-90/B-03200 *Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowe. Załącznik 3 Zasady sprawdzania nośności konstrukcji ze względu na zmęczenie materiału (wysokocykliczne)*
- [6] Gasiak G., Pawliczek R., *Obliczanie trwałości próbek ze stali 18G2A w warunkach zmiennych obciążeń zginających i skręcających o różnych współczynnikach asymetrii cyklu*. Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej nr 268, Seria: Mechanika z 66 ss. 24-44
- [7] DIN 22 261 *Bagger, Absetzer und Zusatzgeräte in Braunkohlentagebauen* marzec 1993
- [8] ISO 5049/1 *Przejezdne urządzenia do ciągłego przeladunku materiałów. Część 1 Zasady projektowania konstrukcji stalowych* Tłumaczenie na język polski OBR DETRANS 1980
- [9] TGL 13500/01 *Stahlbau, STAHLTRAGWERKE, Bauliche Durchbildung* 1982
- [10] Gosiak G., Pawliczek R., *Wytrzymałość zmęczeniowa stali konstrukcyjnej w warunkach obciążeń nie symetrycznych*. http://r.pawliczek.po.opole.pl/publ_1.pgf

Artykuł recenzowali dr hab. inż. Mieczysław Szata, prof. PWr
dr hab. inż. Stanisław Piesiak

Rękopis otrzymano 11.08.2011 r. *2224



Cykl: prolog do konstrukcji...