

POLITECHNIKA OPOLSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY

Streszczenie rozprawy doktorskiej

*Uwzględnienie odkształcenia plastycznego przy wyznaczeniu
trwałości w jednoosiowym stanie obciążenia*

Autor

mgr inż. Justyna Koziarska

Promotor:

prof. dr hab. inż. Tadeusz Łagoda

Promotor pomocniczy:

dr inż. Andrzej Kurek

1. Wprowadzenie

Zmęczenie materiałów to zagadnienie, którym zajmowano się już w XIX wieku. Z czasem temat ten stawał się coraz bardziej pogłębiany i lepiej opisywany. Zjawisko zmęczenia jest nieodzownym tematem każdej gałęzi przemysłu zwłaszcza przemysłu wykorzystującego materiały metalowe. Pojawiające się na rynku coraz nowsze materiały wymagają analizy zmęczeniowej, by poznać zachowania tych materiałów pod kątem naprężeń i odkształceń.

To w jakim stopniu wyniki badań poszczególnych materiałów w warunkach zginania różnią się od rozciągania-ściskania jest jednym z kluczowych punktów tej pracy. Przede wszystkim skupiam się w niej na uwzględnieniu w obliczeniach występującego w przypadku zginania gradientu odkształcenia i naprężenia. Co pozwala na porównanie wyników badań przy zginaniu do wyników badań przy rozciąganiu – ściskaniu, przy uwzględnieniu odkształcenia plastycznego.

Praca doktorska składa się łącznie z 10 rozdziałów. Po wprowadzeniu, następne rozdziały to przegląd literaturowy pod kątem aktualnej wiedzy w temacie pracy oraz wszelkich wiadomości niezbędnych do odpowiedniego podejścia do późniejszych badań. Poznajemy w tych rozdziałach najbardziej popularne i najczęściej wykorzystywane charakterystyki zmęczeniowe.

Pracę doktorską napisałam z myślą o wykorzystaniu tańszych rozwiązań w przemyśle poprzez zastosowanie materiałów przeanalizowanych pod kątem uzyskania efektywniejszych i korzystniejszych rezultatów.

2. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest analiza dotycząca uwzględnienia znacznego odkształcenia, w szczególności odkształcenia plastycznego, przy wyznaczaniu trwałości zmęczeniowej w jednoosiowym stanie obciążenia.

Ponadto celem głównym pracy jest weryfikacja możliwości wykorzystania gradientu naprężeń i odkształceń dla wyników badań przy zginaniu wahadłowym z uwzględnieniem modelu sprężysto-plastycznego w celu porównania ich do wyników badań przy rozciąganiu-ściskaniu.

W niniejszej pracy określiłam zależności charakterystyk zmęczeniowych rozciągania-ściskania i zginania wahadłowego zarówno tych bardziej znanych i częściej używanych jak i nowych. Porównałam charakterystyki zmęczeniowe na rozciągnię – ściskanie i zginanie wahadłowe z uwzględnieniem odkształcenia plastycznego, a następnie dokonałam analizy wyników tego porównania. Praca obejmuje analizę badań zmęczeniowych 4 rodzajów stali, mosiądzu oraz 2 stopów aluminium według modelu ciała sprężysto-plastycznego, a następnie te same materiały poddałam analizie badań zmęczeniowych z uwzględnieniem gradientu naprężenia i odkształcenia.

Materiały zostały poddane analizie w celu stwierdzenia czy jest konieczność wykonywania drogich badań zmęczeniowych na rozciąganie-ściskanie, czy uwzględniając gradient wyniki uzyskane przy zginaniu wahadłowym będą miarodajne.

3. Uwzględnienie gradientu odkształcenia i naprężenia

Efekt gradientu naprężeń bardzo rzadko jest uwzględniany wprost w modelach oceny trwałości zmęczeniowej. Omówienie metody gradientowej jako jednej z metod prognozowania granicy zmęczenia przedstawiono w literaturze, gdzie pokazano iż przy pomocy metody gradientowej naprężenie jest modyfikowane ze względnym lub bezwzględnym gradientem naprężenia.

Tym samym należy pamiętać, że gradient ulega zmianie wraz ze zmianą wielkości próbki. Gradient naprężeń jest zwykle związany z dość dużym spadkiem naprężeń poniżej powierzchni materiału. Jednak wzdłuż powierzchni materiału, w miejscu nacięcia karbu, również spada naprężenie jednakże szybkość zaniku jest znacznie mniejsza. Jedną z nowszych prac z tego zakresu dotyczy wpływu różnych rodzajów karbów na trwałość zmęczeniową i zastosowania, w związku z występowaniem znacznych naprężeń i odkształceń, tak zwanych „true stress” i „true strain”.

Dla modelu ciała sprężysto-plastycznego model odkształceń w przekroju można zapisać jako:

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_{a \max} \frac{x}{R} = \frac{\sigma_a(x)}{E} + \left(\frac{\sigma_a(x)}{K'} \right)^{1/n'} \quad (1)$$

Licząc pochodną obustronnie po x ze wzoru otrzymujemy:

$$\frac{\varepsilon_{a \max}}{R} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma_a(x)}{dx} + \left(\frac{1}{K'} \right)^{1/n'} \left(\frac{1}{n'} \right) \sigma_a(x)^{1/n'-1} \left(\frac{d\sigma_a(x)}{d(x)} \right), \quad (2)$$

ostatecznie po przekształceniach otrzymujemy:

$$\sigma_{a,grad} = \sigma_{a,e-p} \left[1 + E \left(\frac{1}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \frac{1}{n'} \sigma_a(x)^{\frac{1}{n'}-1} \right]^{\frac{1}{5n'}} \quad (3)$$

Maksymalne naprężenie otrzymujemy na powierzchni czyli dla $x = R$; $\sigma_a(x) = \sigma_{a,e-p}$ czyli:

$$\sigma_{a,grad} = \sigma_{a,e-p} \left[1 + E \left(\frac{1}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \frac{1}{n'} \sigma_{a,e-p}^{\frac{1}{n'}-1} \right]^{\frac{1}{5n'}} \quad (4)$$

Obliczenie maksymalnego naprężenia daje mi podstawę do obliczenia gradientu odkształceń, na podstawie zależności Ramberga – Osgooda, czyli:

$$\varepsilon_{a,grad} = \left(\frac{\sigma_{a,grad}}{E} \right) + \left(\frac{\sigma_{a,grad}}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (5)$$

4. Analiza wyników

Posiadając część wyników na podstawie badań własnych, a część uzyskanych z literatury przeprowadziłam analizę 7 materiałów o różnym składzie chemicznym i właściwościach pod kątem modelu ciała sprężysto-plastycznego dla jednoosiowego stanu obciążenia jakim jest zginanie wahadłowe w porównaniu z rozciąganiem-ściskaniem. Część danych do badań zostało zaczerpniętych z literatury a część danych uzyskano na podstawie badań własnych. Znaczna część przeanalizowanych materiałów jest na podstawie badań zrealizowanych w Katedrze Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Opolskiej.

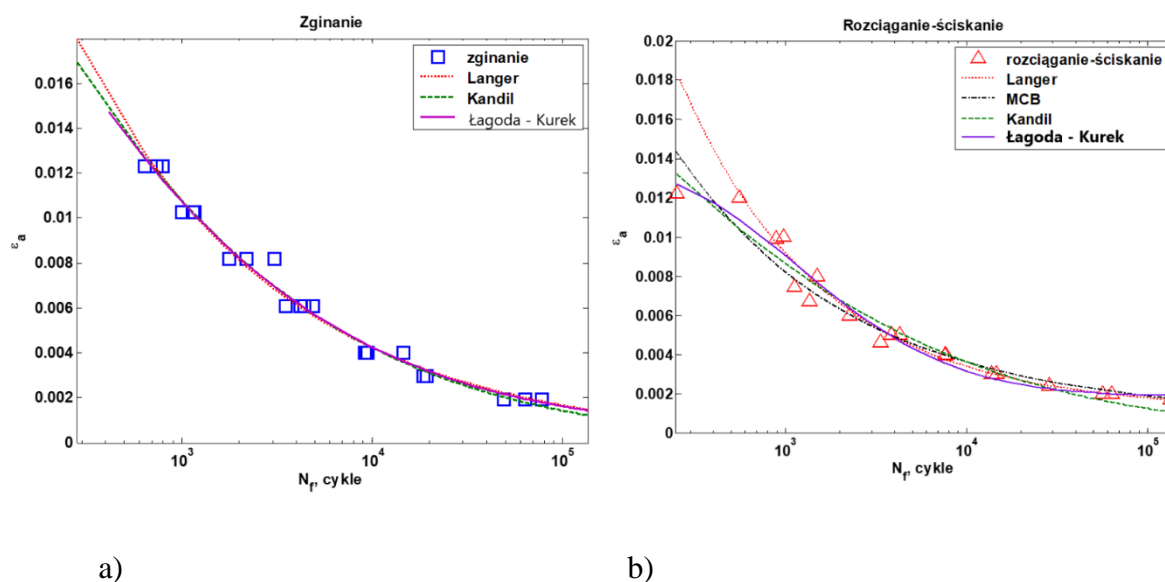
W tabeli 1 przedstawiam skład chemiczny analizowanych materiałów.

Tabela 1. Skład chemiczny badanych materiałów (%).

Materiał	Skład chemiczny															
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe	Mg	Zn	Zr+Ti	Pb	Sn	Al
10HNAP	0,115	0,41	0,71	0,082	0,028	0,81	1,9	0,3	-	-	-	-	-	-	-	-
30CrNiMo8	0,3	0,27	0,49	0,019	0,009	3,89	1,9	0,3	-	-	-	-	-	-	-	-
SM45C	0,45	0,35	0,64	0,011	0,012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MO58	-	-	-	-	-	-	max 0,2	-	56-60	max 0,5	-	-	-	1-3,5	max 0,5	max 1
16Mo3	0,12-0,2	0,35	0,4-0,9	0,025	0,01	-	-	-	0,3	-	-	-	-	-	-	-
6082-T6	0,1	0,7-1,3	0,4-1	-	-	0,25	-	-	-	0,5	-	0,2	0,1	-	-	-
2017 (A)	-	0,2-0,8	0,4-1,0	-	-	0,1	-	-	3,5-4,5	0,7	0,4-1,0	0,25	0,25	-	-	-

Dla każdego z analizowanych materiałów wyniki badań w pracy doktorskiej umieściłam w tabelach, a następnie na ich podstawie wykonałam wykresy przedstawiające krzywe poszczególnych charakterystyk. Poniżej znajdziemy wykresy dla 16Mo3 dla zginania

wahadłowego (rys. 1a) i rozciągania - ściskania (rys. 2b) jako przykład jednego z siedmiu analizowanych materiałów. Porównania i analiza dotyczą również różnych modeli takich jak Langer, Kandil oraz Łagoda-Kurek.

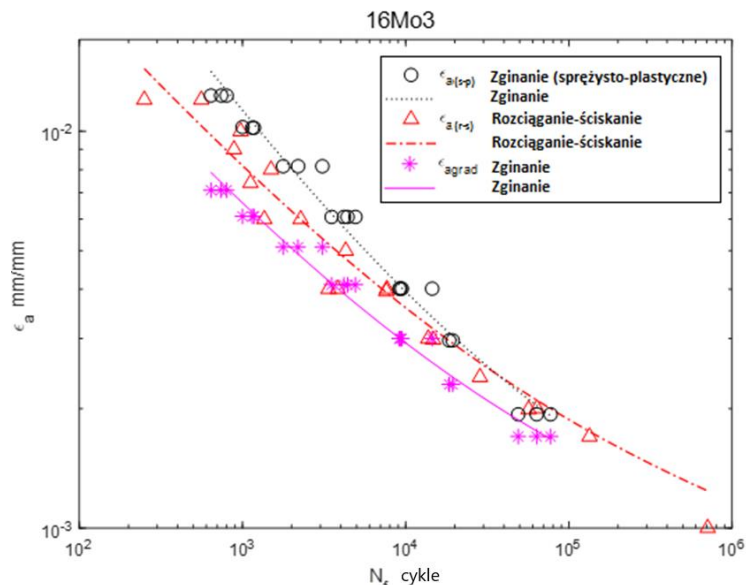


Rys. 1. Wykresy krzywych dla stali 16Mo3 dla poszczególnych charakterystyk przy a) zginaniu wahadłowym b) rozciąganiu-ściskaniu.

Następnie dla każdego z omawianych materiałów zostały w pracy doktorskiej zaprezentowane tabele z wynikami dla poszczególnych charakterystyk, również z uwzględnieniem gradientu naprężenia i odkształcenia oraz z błędem średniokwadratowym.

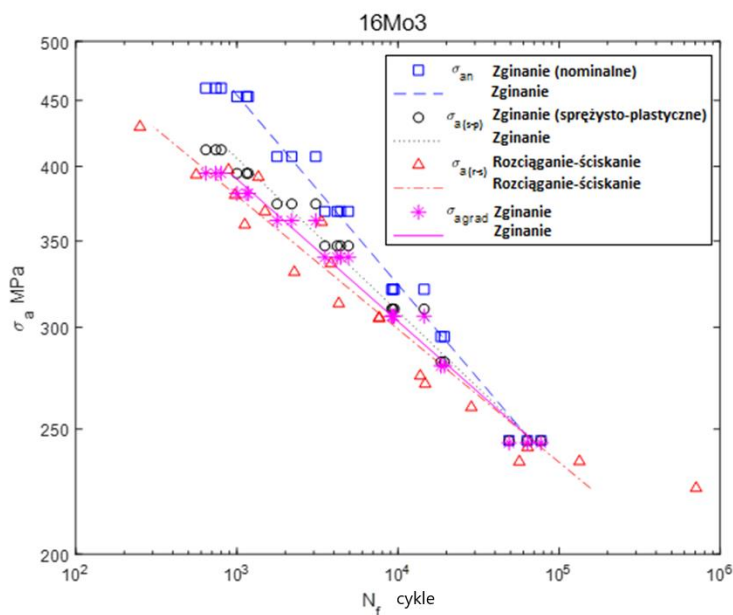
Analizując zamieszczone w tabelach wyniki obliczeń błędu średniokwadratowego dla odkształceń, najbliższej wyniku charakterystyki rozciągania-ściskania, która jest tu charakterystyką wejściową, jest wynik zginania z uwzględnieniem gradientu.

Analizując to zagadnienie i przekładając powyższe dane na wykres zależności amplitud odkształcenia dla stali 16Mo3 jako pierwszego analizowanego materiału (rys. 2), obserwujemy iż krzywa wyników zginania według modelu sprężysto-plastycznego przecina się z krzywą wyników rozciągania-ściskania. Natomiast krzywa wyników zginania z uwzględnieniem gradientu jest usytuowana niżej od obu czyli ma niższe wartości odkształceń dla tego samego zakresu liczby cykli.



Rys. 2. Wykres zależności amplitudy odkształcenia $\epsilon_a = f(N_f)$ dla opracowanych wyników dla stali 16Mo3

Poniższy wykres (Rys.3), to zależność amplitudy naprężenia od liczby cykli dla stali 16Mo3. Tendencja kolorystyczna na wykresach została dobrana taka sama dla każdego analizowanego materiału.

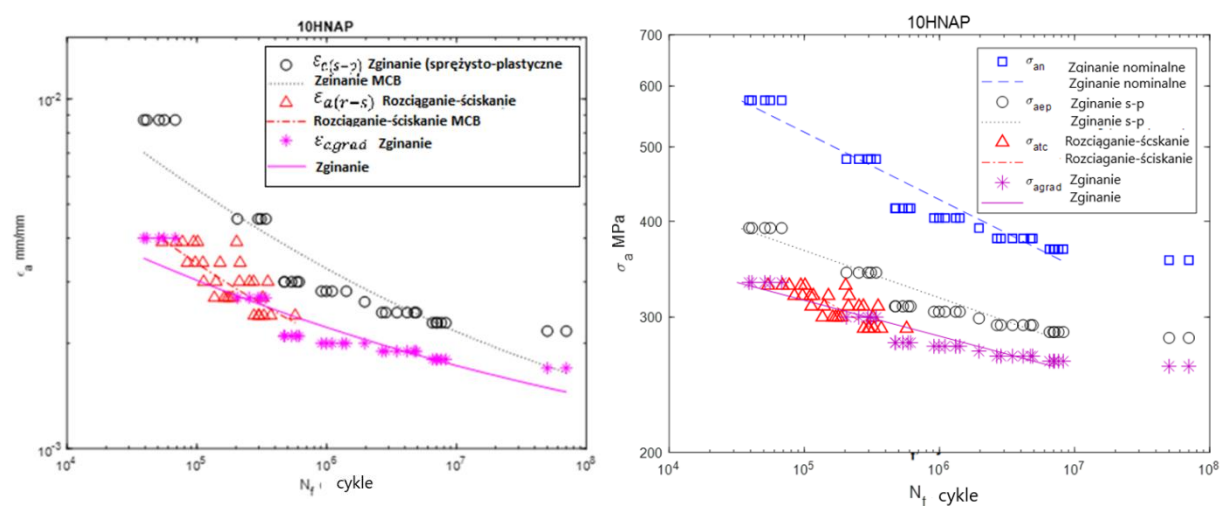


Rys. 3. Wykres zależności amplitudy naprężenia $\sigma_a = f(N_f)$ dla opracowanych wyników dla stali 16Mo3.

W tym przypadku mamy do czynienia z przecięciem się wszystkich czterech krzywych na wysokości niespełna 100 000 cykli. Dla zakresu liczby cykli mniejszej niż punkt styku,

krzywa wyników zginania z uwzględnieniem gradientu jest usytuowana znacznie bliżej krzywej wyników rozciągania-ściskania niż krzywa wyników zginania wahadłowego według modelu sprężysto-plastycznego, a tym bardziej bliżej niż krzywa wyników zginania według modelu nominalnego.

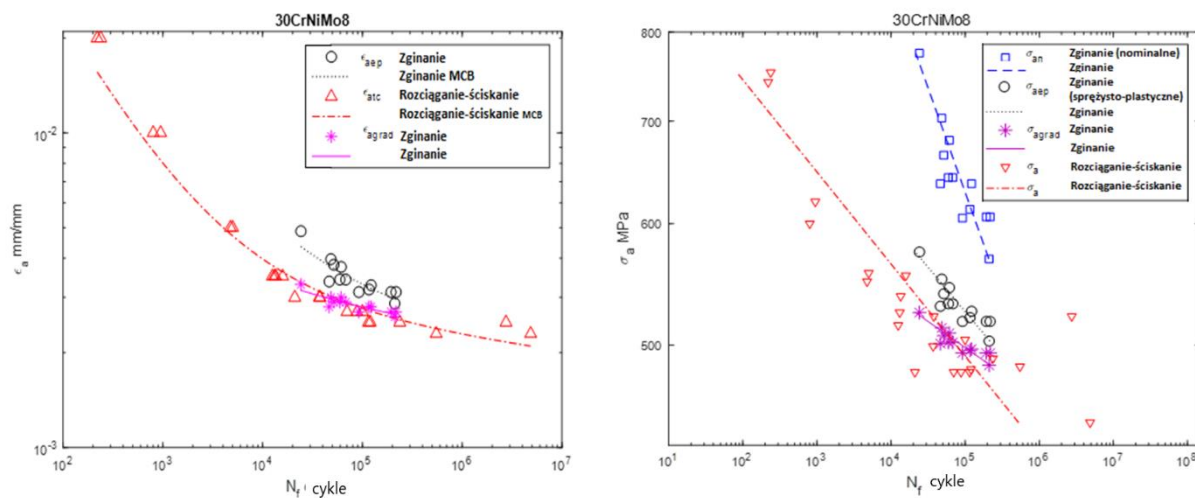
Drugim omawianym materiałem jest stal 10HNAP, dla której również przedstawiłam wykres pod kątem naprężeń jak i odkształceń.



Rys. 4 Wykresy zależności $\epsilon_a = f(N_f)$ i $\sigma_a = f(N_f)$, dla opracowanych wyników dla stali 10HNAP.

Dla stali 10HNAP (Rys. 4) amplituda odkształcenia uwzględniająca gradient dla wyników uzyskanych w warunkach zginania wahadłowego kształtuje się poniżej amplitudy ukazującej wyniki uzyskane w warunkach zginania według modelu sprężysto-plastycznego. Amplituda odkształcenia uwzględniającego gradient niemalże pokrywa się z tą uzyskanych w warunkach rozciągania-ściskania. Również amplituda naprężenia pochodząca od zginania wahadłowego uwzględniającego gradient dla stali 10HNAP jest usytuowana poniżej amplitudy naprężenia ukazującej wyniki dla zginania wahadłowego według modelu nominalnego jak i sprężysto-plastycznego.

Kolejną stalą jest 30CrNiMo8

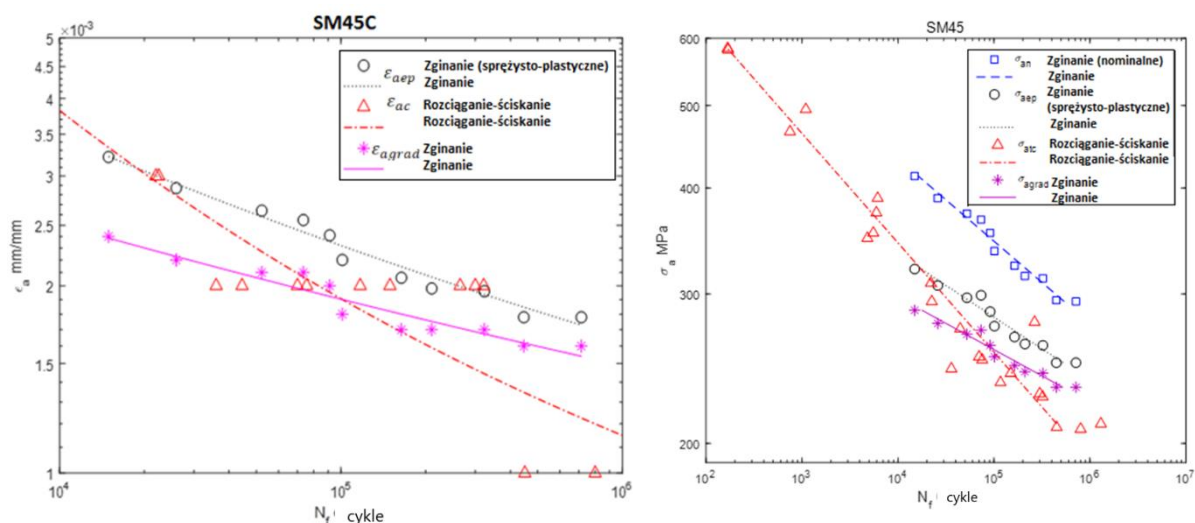


Rys. 5. Wykresy zależności $\epsilon_a = f(N_f)$ i $\sigma_a = f(N_f)$, dla opracowanych wyników dla stali 30CrNiMo8.

Analizując wykres zależności amplitudy odkształcenia od liczby cykli dla stali 30CrNiMo8 (Rys. 5) można zauważyć, iż krzywa wyników wykazanych dla zginania wahadłowego z uwzględnieniem gradientu jest usytuowana znacznie niżej niż krzywa wyników dla zginania według modelu sprężysto-plastycznego. Natomiast porównując krzywą wyników otrzymanych dla zginania z uwzględnieniem gradientu z krzywą wyników uzyskanych dla rozciągania-ściskania widać, iż krzywe te niemalże pokrywają się.

Natomiast na wykresie zależności amplitud naprężenia dla stali 30CrNiMo8 można zauważyć, iż krzywa wyników dla zginania wahadłowego z uwzględnieniem gradientu ma znacznie niższe wartości odkształcenia niż krzywa wyników ukazanych dla zginania według modelu sprężysto-plastycznego ale i według modelu nominalnego.

Kolejna stal to SM45C



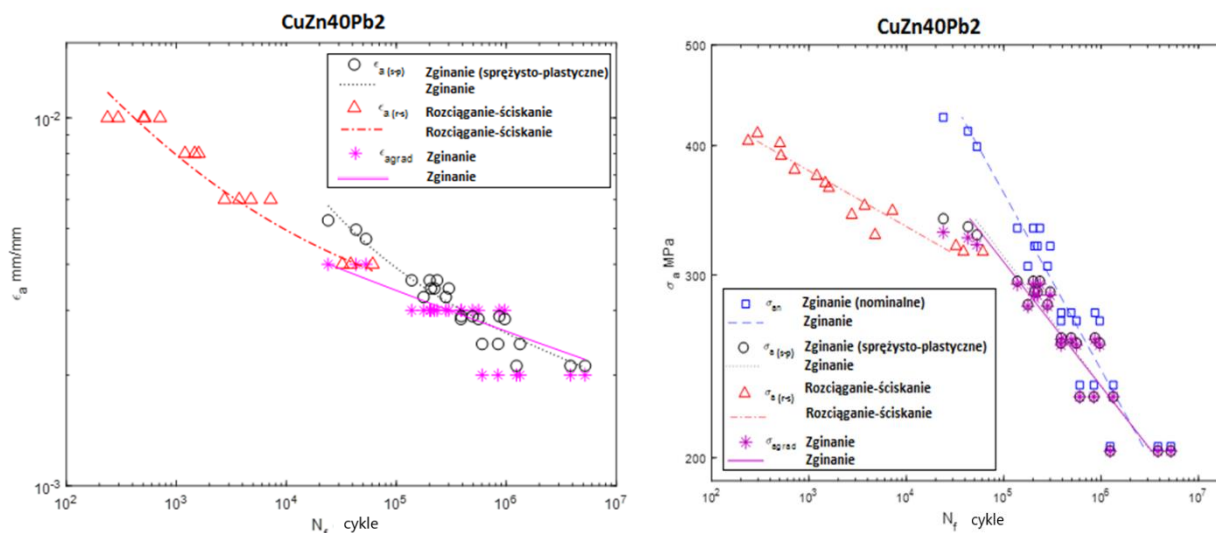
Rys. 6. Wykresy zależności $\epsilon_a = f(N_f)$ i $\sigma_a = f(N_f)$, dla opracowanych wyników dla stali SM45C.

Pierwszy wykres z rys 6, to wykres zależności amplitudy odkształcenia od liczby cykli, gdzie krzywa dla wyników zginania z uwzględnieniem gradientu jest równoległa do krzywej wyników uzyskanych dla zginania według modelu sprężysto-plastycznego, ale jest usytuowana niżej co oznacza, iż dla tej samej ilości liczby cykli ma niższe wartości odkształceń.

Natomiast drugi wykres z rys.6 dla stali SM45C to wykres zależności amplitudy naprężenia od liczby cykli. Zarówno krzywa wyników uzyskanych dla zginania według modelu sprężysto-plastycznego jak i zginania z uwzględnieniem gradientu znajdują się na wykresie poniżej krzywej wyników dla rozciągania-ściskania

Następnie dokonałam analizy materiału CuZn40Pb2.

Pierwszy wykres dla mosiądzu CuZn40Pb2, podobnie jak dla wcześniejszych stali to wykres zależności amplitud odkształcenia od liczby cykli a drugi wykres zależności amplitud naprężenia od liczby cykli (Rys.7).



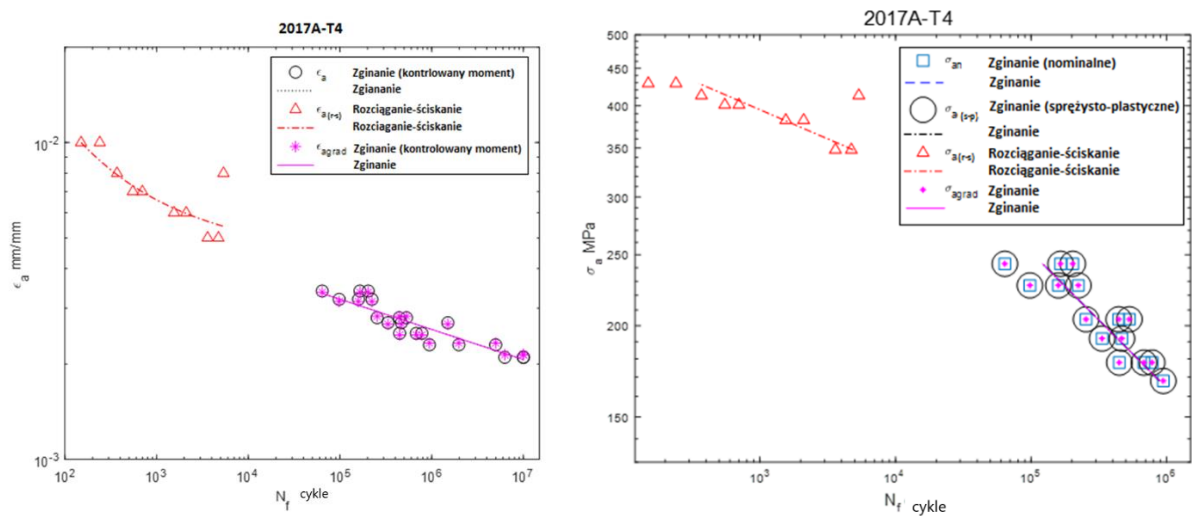
Rys. 7. Wykresy zależności $\epsilon_a = f(N_f)$ i $\sigma_a = f(N_f)$, dla opracowanych wyników dla mosiądzu CuZn40Pb2

Krzywa wyników uzyskanych na podstawie badań w warunkach zginania wahadłowego dla odkształceń dla mosiądzu CuZn40PB2 z uwzględnieniem gradientu jest usytuowana poniżej krzywej wyników zginania według modelu ciała sprężysto-plastycznego. Trudno jest jednak porównać tutaj krzywą uzyskaną na podstawie zginania z uwzględnieniem gradientu do krzywej wyników rozciągania-ściskania, ponieważ ta znajduje się w innym zakresie liczby cykli. Podobna sytuacja ma miejsce dla amplitud naprężenia.

Ostatnie analizowane materiały to stopy aluminium. Pierwszym stopem aluminium jest 2017A-T4

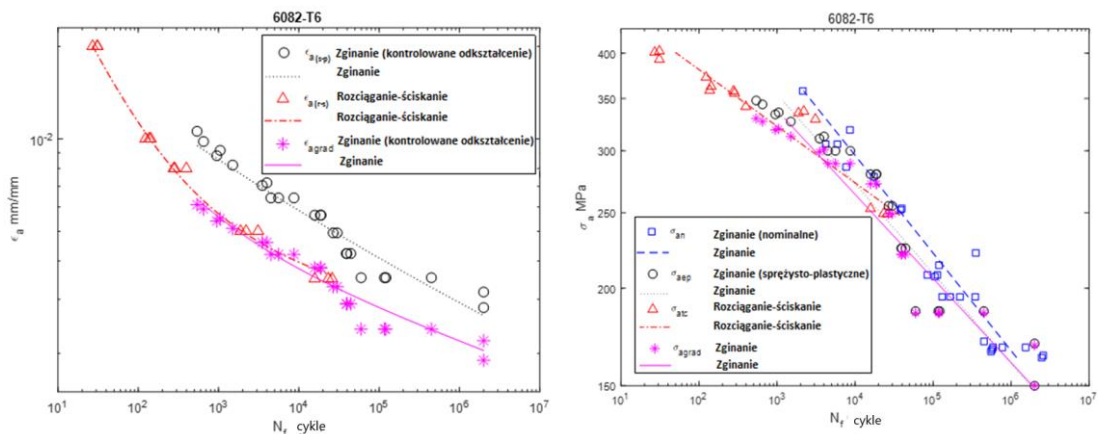
Dla stopu aluminium 2017-T4 do krzywej wyników rozciągania-ściskania zostały porównane krzywe wyników zginania przy kontrolowanym momencie oraz krzywa dla wyników uzyskanych dla zginania z uwzględnieniem gradientu. Zgodnie z wykresem (Rys.8) dla amplitud odkształcenia wyniki dla zginania z kontrolowanym momentem i wyniki dla zginania z uwzględnieniem gradientu pokrywają się ze sobą. Trudno jest porównać wyniki i ich krzywe tych dwóch analizowanych warunków zginania z wynikami i krzywą wyników uzyskanych dla

rozcigania-ściskania, ponieważ ta jest dla innego zakresu liczby cykli. Sytuacja pod kątem naprężeniowym wygląda identycznie jak pod kątem odkształceniowym.



Rys. 8. Wykresy zależności $\epsilon_a = f(N_f)$ i $\sigma_a = f(N_f)$, dla opracowanych wyników dla stopu aluminium 2017A-T4

Drugim analizowanym stopem aluminium a jednocześnie ostatnim analizowanym materiałem jest 6082-T6.



Rys. 9. Wykresy zależności $\epsilon_a = f(N_f)$ i $\sigma_a = f(N_f)$, dla opracowanych wyników dla aluminium 6082-T6

Omawiając wykres odkształceniowy, zakres liczby cykli dla krzywej dla wyników uzyskanych w warunkach rozciągania-ściskania pokrywa się częściowo z zakresem liczby cykli krzywej dla wyników dla zginania z uwzględnieniem gradientu. W tym obszarze krzywe niemalże pokrywają się ze sobą.

Natomiast pod kątem analizy naprężeń, krzywa dla wyników dla rozciągania-ściskania jest usytuowana w innym zakresie liczby cykli co oznacza, że ciężko jest z tą charakterystyką porównać pozostałe.

5. Wnioski i podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz można wyciągnąć następujące główne wnioski dotyczące uwzględnienia odkształcenia plastycznego przy wyznaczaniu trwałości zmęczeniowej:

1. Wykazano, że charakterystyki zmęczeniowe w przypadku zginania leżą nie niżej niż w przypadku rozciągania-ściskania. Oznacza to, że w przypadku gradientu naprężenia i przyjęciu modelu ciała sprężysto-plastycznego dla danej trwałości zmęczeniowej dopuszczalna jest nie mniejsza amplituda naprężenia, czy też odkształcenia w stosunku do rozciągania-ściskania. W przypadku analizowanych badań zmęczeniowych stopów aluminium te charakterystyki praktycznie się pokrywają i nie ma efektu gradientu naprężenia, czy też odkształcenia. Oznacza to, że uwzględniając efekt modelu ciała sprężysto-plastycznego wyniki obliczeń mieszczą się po stronie bezpiecznej.
2. W pracy zaproponowano zależność uwzględniającą efekt gradientu naprężenia i odkształcenia. W efekcie według zaproponowanego modelu uwzględniającego gradienty oraz przy uwzględnieniu modelu ciała sprężysto-plastycznego dla 7 analizowanych materiałów (4 stali, mosiądzu i 2 stopów aluminium) uzyskałam potwierdzenie, iż ich wyniki badań przy zginaniu wahadłowym są zbliżone do wyników przy rozciąganiu-ściskaniu.
3. Szczegółowa analiza poszczególnych materiałów z uwzględnieniem odkształceń plastycznych wykazała, że:
 - Stal 10HNAP jest typowym przykładem stali dla której dla modelu naprężeniowego jak i odkształceniowego wyniki badań przy zginaniu mają wyższe wartości dla tej samej liczby cykli co wyniki badań przy rozciąganiu-ściskaniu również przy uwzględnieniu gradientu.

- Dla stali 30CrNiMo8 wyniki uzyskane przy zginaniu według modelu nominalnego z uwzględnieniem gradientu również mają wyższe wartości naprężenia i odkształcenia niż przy rozciąganiu – ściskaniu dla tej samej liczby cykli.
 - Analizując stal SM45 pod kątem naprężeniowym i odkształceniowym stwierdzam, iż wyniki uzyskane przy zginaniu według modelu nominalnego mają wyższe wartości naprężenia i odkształcenia przy uwzględnieniu gradientu niż przy rozciąganiu – ściskaniu dla tej samej liczby cykli.
 - Stal 16Mo3 jest stałą, której wyniki na rozciąganie – ściskanie pod kątem naprężeniowym jak i odkształceniowym są niższe niż na zginanie jednak uwzględniając gradient dla wyników badań przy zginaniu wyniki te są jeszcze niższe niż wyniki badań przy rozciąganiu-ściskaniu co daje nam bezpieczny bufor w sytuacji ich użycia.
 - Dla mosiądzu CuZn40Pb2 pod kątem porównania posiadanego zakresu wyników badań przy zginaniu i rozciąganiu – ściskaniu zarówno dla modelu odkształceniowego jak naprężeniowego jest utrudniony ze względu na różne zakresy liczby cykli jednakże mimo to wykorzystując gradient dla wyników badań przy zginaniu otrzymałam wiarygodne wyniki.
 - Dla aluminium 2017-T4 wyniki badań przy zginaniu z uwzględnieniem gradientu jest ciężko porównać do wyników badań na rozciąganie - ściskanie ze względu na inny zakres liczby cykli natomiast drugi badany materiał aluminium 6082-T6 wyniki badań przy zginaniu z uwzględnieniem gradientu jak i rozciąganiu – ściskaniu pokrywają się co oznacza że można wykorzystać wyniki badań przy zginaniu i nie ma potrzeby wykonywaniu drogich badań przy rozciąganiu-ściskaniu.
4. W przyszłości należy dokonać analiz dla innych materiałów oraz zaproponować model uwzględniający gradient naprężenia, czy też odkształcenia w przypadku skręcania.