



UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNO-PRZYRODNICZY
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY

ROZPRAWY NR 128

Stanisław Mroziński

STABILIZACJA WŁASNOŚCI CYKLICZNYCH METALI I JEJ WPŁYW NA TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWĄ

BYDGOSZCZ – 2008

REDAKTOR NACZELNY
prof. dr hab. inż. Janusz Prusiński

REDAKTOR DZIAŁOWY
prof. dr hab. inż. Maciej Woropay

OPINIODAWCY
prof. dr hab. inż. Czesław Goss
dr hab. inż. Paweł Pyrzanowski

OPRACOWANIE REDAKCYJNE I TECHNICZNE
mgr Michał Górecki, mgr inż. Daniel Morzyński

© Copyright
Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
Bydgoszcz 2008

ISSN 0209-0597

Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
ul. Ks. A. Kordeckiego 20, 85-225 Bydgoszcz, tel. (052) 3749482, 3749426
e-mail: wydawucz@utp.edu.pl <http://www.utp.edu.pl/~wyd>

Wyd. I. Nakład 120 egz. Ark. aut. 9,0. Ark. druk. 9,25. Zamówienie nr 2/2008
Oddano do druku i druk ukończono w maju 2008 r.

Spis treści

Spis ważniejszych oznaczeń	5
1. Wstęp	7
1.1. Wprowadzenie	7
1.2. Przebieg procesu zmęczenia	8
1.3. Teza, cel i zakres pracy	10
2. Wybrane zagadnienia niskocyklowego zmęczenia metali	13
2.1. Podstawowe pojęcia i opisy	13
2.2. Obliczenia trwałości zmęczeniowej z wykorzystaniem danych z zakresu niskocyklowego zmęczenia	18
2.3. Wpływ wybranych czynników na własności cykliczne	26
2.4. Podsumowanie przeglądu literatury	38
2.5. Wytyczne do badań własnych	41
3. Opis badań i uzyskane wyniki	42
3.1. Cel i zakres badań własnych	42
3.2. Opis badań	43
3.2.1. Próbkki do badań	43
3.2.2. Programy obciążenia	44
3.2.3. Aparatura badawcza	47
3.3. Wyniki badań	48
3.3.1. Zmiany parametrów pętli histerezy	48
3.3.2. Wykresy zmęczeniowe	58
4. Analiza wyników badań	62
4.1. Wpływ wielkości odkształcenia na zmiany własności cyklicznych podczas obciążeń stałoamplitudowych	62
4.2. Wpływ czynników związanych z obciążeniem na zmiany własności cyklicznych w warunkach obciążeń losowych i programowanych	66
4.3. Wpływ zmian własności cyklicznych na opisy i modele wykorzystywane podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej	97
4.4. Wpływ zmian własności cyklicznych na wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej	109
5. Obliczenia trwałości zmęczeniowej z wykorzystaniem chwilowych własności cyklicznych (metoda CWC)	117
5.1. Założenia do obliczeń trwałości metodą CWC	117
5.2. Obliczenia trwałości zmęczeniowej metodą CWC	119
5.3. Zakres zastosowania metody CWC	127
6. Podsumowanie i wnioski	129
Literatura	134
Streszczenia	145

Spis ważniejszych oznaczeń

A_5	– względne wydłużenie próbki proporcjonalnej po rozerwaniu
b, c	– wykładniki odkształceniowego wykresu zmęczeniowego
e	– odkształcenie nominalne
E	– moduł sprężystości wzdłużnej
i	– numer powtórzenia bloku programu obciążenia
j	– numer stopnia programu
K'	– współczynnik wytrzymałości cyklicznej
K_t, α_k	– teoretyczny współczynnik spiętrzenia naprężeń, współczynnik kształtu karbu
K_ε	– współczynnik spiętrzenia odkształceń lokalnych, odkształceniowy współczynnik kształtu
K_σ	– współczynnik spiętrzenia naprężeń lokalnych, naprężeniowy współczynnik kształtu
K^*	– współczynnik krzywej szkieletowej
K_p	– współczynnik wykresu zmęczeniowego w ujęciu energetycznym
k	– liczba stopni w bloku programu obciążenia
n'	– wykładnik cyklicznego umocnienia materiału dla stanu ustalonego
n''	– wykładnik cyklicznego umocnienia materiału dla stanu nieustalonego
n^*	– wykładnik krzywej szkieletowej
n_o	– liczba cykli w bloku programu (pojemność bloku)
n_j^i	– liczba cykli j-tego stopnia programu obciążenia, dla i-tego powtórzenia
$2N_f$	– liczba nawrotów obciążenia do pęknięcia zmęczeniowego
N	– liczba cykli do pęknięcia zmęczeniowego w warunkach obciążenia stałoamplitudowego lub programowanego
n	– bieżąca liczba cykli obciążenia stałoamplitudowego lub programowanego
n_j	– liczba cykli obciążenia zrealizowana na stopniu o amplitudzie ε_{acj}
N_{exp}	– liczba cykli do pęknięcia zmęczeniowego uzyskana podczas badań
N_i	– liczba cykli do pęknięcia zmęczeniowego dla i-tego poziomu obciążenia stałoamplitudowego
N_{obl}	– liczba cykli do pęknięcia zmęczeniowego uzyskana podczas obliczeń
n/N	– względna trwałość zmęczeniowa
$2N_t$	– przejściowa liczba nawrotów na wykresie Morrowa
N_p	– liczba cykli w bloku przeciążeń
R_m	– wytrzymałość doraźna na rozciąganie
R_e	– granica plastyczności
R_{eH}	– górna granica plastyczności
S	– naprężenie nominalne
U	– niepewność rozszerzona
α	– wykładnik potęgi w równaniu wykresu zmęczeniowego w ujęciu energetycznym

λ	– liczba powtórzeń bloku programu obciążenia do pęknięcia zmęczeniowego
ΔW_{pl}	– energia odkształcenia plastycznego
ΔW_{plj}	– energia odkształcenia plastycznego dla j-tego stopnia programu obciążenia
$\Delta W_{pl(max)}$	– energia odkształcenia plastycznego dla odkształcenia ε_{acmax}
ΔW_s	– energia odkształcenia sprężystego
ΔW_c	– energia odkształcenia całkowitego
$\Sigma \Delta W_{pl}$	– skumulowana energia odkształcenia plastycznego podczas próby zmęczeniowej
$\Sigma \Delta \varepsilon_{ap}$	– skumulowana wartość odkształcenia plastycznego podczas próby zmęczeniowej
$\Sigma \Delta \varepsilon_{ap(i)}$	– skumulowana wartość odkształcenia plastycznego w i-tym bloku obciążenia losowego lub programowanego
$\Sigma \Delta W_{pl(i)}$	– skumulowana energia odkształcenia plastycznego w i-tym bloku obciążenia losowego lub programowanego
σ	– ogólne oznaczenie naprężenia
σ_{cpl}	– cykliczna granica plastyczności
$\delta \sigma_o$	– wielkość zakresu proporcjonalnego między odkształceniem i naprężeniem
ε	– ogólne oznaczenie odkształcenia
ε_c	– odkształcenie całkowite
ε_{ac}	– amplituda odkształcenia całkowitego
ε_{ap}	– amplituda odkształcenia plastycznego
ε_{ae}	– amplituda odkształcenia sprężystego
ε_{acp}	– amplituda odkształcenia całkowitego dla cykli przeciążających
ε_{acj}	– amplituda odkształcenia całkowitego dla j-tego stopnia programu obciążenia
ε_{acmax}	– największa amplituda odkształcenia całkowitego w programie obciążenia
ζ	– współczynnik wypełnienia widma obciążenia
ε_f'	– współczynnik cyklicznego odkształcenia plastycznego
$\Delta \varepsilon_{ac}$	– zakres odkształcenia całkowitego
$\Delta \varepsilon_{ap}$	– zakres odkształcenia plastycznego
$\Delta \varepsilon_{ae}$	– zakres odkształcenia sprężystego
$\Delta \varepsilon^*, \Delta \sigma^*$	– zakresy odkształcenia i naprężenia w opisie krzywej szkieletowej
σ_a	– amplituda naprężenia
σ_{aj}	– amplituda naprężenia dla j-tego stopnia programu obciążenia
σ_m	– naprężenie średnie
$\Delta \sigma$	– zakres naprężenia

1. WSTĘP

1.1. WPROWADZENIE

Większość elementów maszyn podlega podczas eksploatacji obciążeniom zmiennym. Są one przyczyną złożonego procesu nazywanego zmęczeniem materiału. W początkowej fazie przebiega on w sposób bezobjawowy. Przez długi czas nie występują żadne widoczne symptomy wskazujące, że w materiale następuje proces uszkodzenia. Natomiast w końcowej fazie proces uszkodzenia elementu przebiega w sposób nagły i może prowadzić do groźnych awarii czy katastrof [61]. Przykładem mogą być liczne awarie i katastrofy samolotów, statków, pojazdów drogowych, maszyn roboczych i innych urządzeń. Na podstawie danych statystycznych podawanych w USA (National Institution of Standards and Technology, 1983 r.) 60% katastrof drogowych było spowodowanych pęknięciami zmęczeniowymi [128]. Ogólne straty spowodowane pęknięciami zmęczeniowymi wyniosły tylko w USA około 100 mld dolarów rocznie. W większości przypadków przyczyną katastrof lub awarii był rozwój pęknięcia od niewykrytej wady lub karbu konstrukcyjnego. Niewielka część powstałych uszkodzeń wystąpiła w wyniku, np. nieprzewidywalnego przeciążenia elementu. Według specjalistów, tylko zastosowanie wiedzy z zakresu zmęczenia materiałów mogłoby te straty zredukować do 29 mld dolarów rocznie [23]. Z tego też powodu uwzględnianie w procesie konstruowania maszyn i urządzeń problematyki zmęczenia materiałów jest ważnym problemem współczesnej techniki i stanowi duże wyzwanie, któremu muszą sprostać konstruktorzy.

Przyjęcie za dopuszczalne występowania w projektowanych elementach maszyn i urządzeń odkształceń plastycznych spowodowało konieczność prowadzenia badań własności zmęczeniowych w obszarze niskocyklowego zmęczenia. Szczególny rozwój tych badań nastąpił w latach 80. XX wieku. Było to spowodowane głównie potrzebami projektowania urządzeń ze względu na niewielką liczbę cykli obciążenia (reaktory, kotły, zbiorniki ciśnieniowe itp.). Další intensywny rozwój badań w zakresie niskocyklowego zmęczenia był spowodowany z jednej strony zastosowaniem do opisu procesu zmęczenia nowych wielkości kryterialnych, takich jak np. energii odkształcenia całkowitego czy plastycznego, a z drugiej strony – doskonaleniem metod i technik badawczych w zakresie pomiaru i rejestracji podstawowych wielkości fizycznych. Rozwój metod eksperymentalnych w badaniach zmęczeniowych jest widoczny w szczególności w zakresie mikroprocesorowego sterowania próbami zmęczeniowymi przy wykorzystaniu różnych wielkości fizycznych, takich jak: odkształcenie całkowite, plastyczne, sprężyste oraz energia odkształcenia całkowitego lub plastycznego. Szybkość sterowania w układzie pętli sprzężenia zwrotnego, jak również wysoka jakość przetworników pomiarowych oraz metod pomiaru wielkości fizycznych stwarzają nowe możliwości doskonalenia metod badań, a następnie obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych.

Podstawą racjonalnego i efektywnego projektowania elementów maszyn pracujących w zakresie zmęczenia niskocyklowego jest znajomość własności materiałów w obszarze odkształceń sprężysto-plastycznych. Niewystarczającymi stają się tradycyjnie wyznaczone własności mechaniczne, sztywność określona modułami Younga czy Kirchhoffa, własności zmęczeniowe czy odporność na pękanie. Próby, podczas których określa się wymienione własności, stały się już w zasadzie badaniami technicznymi, a ich procedury zawarte są w normach branżowych lub państwowych. Konstruktorzy odpowiedzialnych elementów i urządzeń oczekują na coraz bardziej precyzyjne wyniki badań, stanowiące dane wyjściowe do obliczeń, np. metodą elementów skończonych. W tym celu niezbędna jest również znajomość własności materiałów konstrukcyjnych w zakresie sprężysto-plastycznym i w złożonych stanach naprężenia.

Pomimo zastosowania podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych nowych opisów procesu zmęczenia oraz nowych lub zmodyfikowanych hipotez sumowania uszkodzeń, uzyskiwane rozbieżności wyników obliczeń i badań są znaczne. Skłaniają one do dalszego poszukiwania ich przyczyn, a tym samym – poprawy skuteczności obliczeń trwałości zmęczeniowej.

1.2. PRZEBIEG PROCESU ZMĘCZENIA

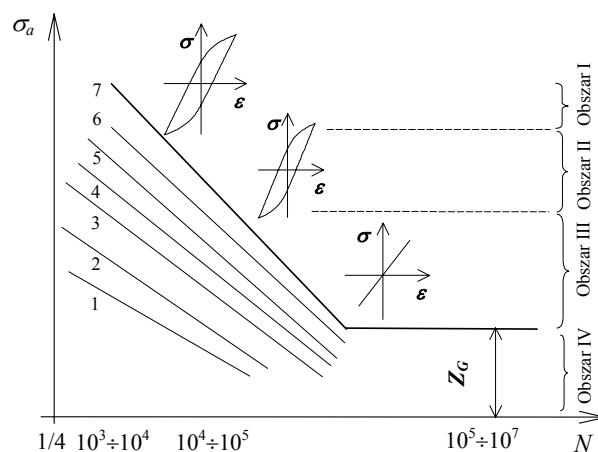
Podstawę do oceny trwałości zmęczeniowej stanowi kompleksowa analiza całego procesu zmęczeniowego, który ze względu na charakter nieodwracalnych zmian w strukturze materiału spowodowanych cyklicznymi odkształceniami można podzielić na trzy następujące po sobie etapy [20, 33, 34, 61, 63, 136, 143]:

1. Etap zmian własności mechanicznych, takich jak umocnienie lub osłabienie. Zmiany te zachodzą w całym obciążanym elemencie, jednak najbardziej intensywny ich przebieg zaznacza się w miejscach silnych spiętrzeń naprężeń w postaci lokalnych karbów geometrycznych. Na dnie karbu geometrycznego oraz w miejscu największego wyężenia materiału może dochodzić do wystąpienia lokalnych odkształceń plastycznych. W wyniku cyklicznie zmieniających się odkształceń zmienia się gęstość i układ istniejących i powstających defektów struktury.
2. Etap inicjacji pęknięć zmęczeniowych w wyniku kumulacji nieodwracalnych odkształceń plastycznych w obszarach największego wyężenia materiału.
3. Etap rozwoju pęknięcia zmęczeniowego. Na skutek obciążeń wzrasta długość pęknięcia. Na tym etapie bardzo ważnym zagadnieniem jest prędkość pęknięcia do chwili osiągnięcia przez pęknięcie określonego wymiaru krytycznego, powyżej którego następuje jego katastrofalny rozwój. Głównym problemem jest przewidywanie czasu działania obciążenia do momentu osiągnięcia przez pęknięcie wymiaru krytycznego.

Dla poszczególnych etapów procesu zmęczenia stosuje się odpowiednie metody obliczeń trwałości zmęczeniowej. Wybór metody do określonego etapu zmęczenia zależy od konstruktora i podyktowany jest wieloma względami,

z których najważniejsze to warunki eksploatacji elementu, bezpieczeństwo użytkowników oraz niezawodność.

Bardzo złożony i skomplikowany charakter procesu zmęczenia nie przeszkodził w usystematyzowaniu zjawisk towarzyszących temu procesowi i ustaleniu określonych prawidłowości pomiędzy nimi. Cechą szczególną tych zjawisk jest fakt, że mogą one występować przy różnych poziomach obciążeń i odkształceń. Na podstawie licznych obserwacji mikroskopowych stwierdzono, że podobne zjawiska zmęczeniowe zachodzą w materiale na różnych poziomach naprężeń i przy różnych liczbach cykli. Powyższe zilustrowano na rysunku 1.1 w postaci szeregu linii pod wykresem zmęczeniowym wykonanymi na podstawie badań żelaza Armco [61, 63].



Rys. 1.1. Wykres zmęczeniowy z zaznaczonymi strefami zjawisk zmęczeniowych [61]:

- 1-2 – strefa inkubacji poślizgów w niektórych ziarnach,
- 2-3 – strefa występowania poślizgów w pojedynczych ziarnach,
- 3-4 – strefa linii i pasm poślizgu,
- 4-5 – strefa rozwijania pasm poślizgu,
- 5-6 – strefa rozwoju mikropęknięć,
- 6-7 – strefa łączenia się mikropęknięć

Na rysunku zaznaczono cztery obszary odpowiadające zakresom quasi-statycznego pęknięcia (obszar I), niskocyklowego zmęczenia (obszar II), wysokocyklowego zmęczenia (obszar III) oraz obszar nieograniczonej trwałości zmęczeniowej (obszar IV).

Występowanie stref stałych uszkodzeń zmęczeniowych zostało wykorzystane przy formułowaniu założeń niektórych hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych bazujących na założeniu istnienia linii stałych uszkodzeń zmęczeniowych. Hipotezy te, opracowane początkowo dla zakresu wysokocyklowego zmęczenia i opisu naprężeniowego [51, 77, 138, 153], zostały następnie transponowane na zakres niskocyklowy oraz opisy odkształceniowe i energetyczne [37, 97, 98, 101, 104, 122].

Podstawowym założeniem wykorzystywanych obecnie hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych jest występowanie okresu stabilizacji własności cyklicznych. W przypadku wielu materiałów konstrukcyjnych okres stabilizacji własności cyklicznych jest pojęciem czysto umownym. Spowodowane jest to faktem, że występuje on bardzo krótko, a częstokroć nie występuje wcale. Muszą zatem budzić wątpliwości wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej, zakładających stabilność własności cyklicznych. Wątpliwości te potwierdza analiza porównawcza wyników trwałości uzyskanych z obliczeń i badań. W wielu przypadkach różnicowanie wyników jest znaczne i dochodzi nawet do 300% [155, 158, 161].

Zmiany własności cyklicznych i brak okresu stabilizacji – występujące podczas obciążenia cyklicznego wielu materiałów – powodują, że jednym z kierunków poszukiwań poprawy zgodności wyników trwałości uzyskanych z obliczeń i badań powinno być powiązanie towarzyszących procesowi zmęczenia zmian własności cyklicznych z procesem sumowania uszkodzeń zmęczeniowych. Potwierdzeniem zasadności takiego kierunku dalszych badań wydają się być doniesienia literaturowe, w których wskazuje się, że podczas obciążenia zmiennego wraz ze wzrostem stopnia uszkodzenia zmianie ulegają parametry wytrzymałościowe określane np. w próbach statycznego rozciągania (R_m , R_e , E) [19, 24, 25, 106, 134]. Spostrzeżenia zawarte w wymienionych pracach, w połączeniu z analizą przebiegu zmęczenia (rys. 1), pozwalają stwierdzić, że w poszczególnych strefach zmęczenia opisanych liniami stałych uszkodzeń (linie 1-7 na rysunku 1.1), własności materiału można również opisywać za pomocą parametrów określanych w stałoamplitudowych próbach zmęczeniowych, a następnie wykorzystywać je podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej.

1.3. TEZA, CEL I ZAKRES PRACY

Potwierdzone wielokrotnie podczas badań doświadczalnych występowanie zmian własności cyklicznych, brak wyraźnego okresu stabilizacji oraz występujące rozbieżności w wynikach trwałości zmęczeniowej uzyskanych z obliczeń i badań pozwalają postawić tezę, że przebieg zmian własności cyklicznych ma wpływ na wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej. Poprawę zgodności wyników trwałości uzyskanych z obliczeń i badań można uzyskać, uwzględniając podczas sumowania uszkodzeń zmęczeniowych występujące zmiany własności cyklicznych materiału. Problemem badawczym jest zarówno sam przebieg zmian własności cyklicznych podczas obciążenia zmiennego, jak również możliwość jego przewidywania. Jego rozwiązanie wymaga realizacji szerokiego programu badań porównawczych w warunkach obciążenia stałoamplitudowego i nieregularnego z wykorzystaniem próbek wykonanych z materiałów o zróżnicowanych własnościach statycznych i cyklicznych.

Celem podstawowym pracy jest analiza doświadczalna przebiegu stabilizacji własności cyklicznych metali oraz jej wpływu na trwałość zmęczeniową. Cele dodatkowe pracy stanowią:

- ocena wpływu przebiegu stabilizacji własności cyklicznych na podstawowe dane materiałowe i charakterystyki określone w warunkach obciążenia stałoamplitudowego,
- analiza porównawcza własności cyklicznych wybranych metali w różnych okresach trwałości zmęczeniowej i zróżnicowanych warunkach obciążenia,
- analiza wpływu parametrów i postaci programu obciążenia na przebieg stabilizacji własności cyklicznych,
- doświadczalna weryfikacja metody obliczeń trwałości zmęczeniowej bazującej na chwilowych własnościach cyklicznych.

Cele pracy realizowano na podstawie niskocyklowych badań zmęczeniowych trzech metali w warunkach obciążeń stałoamplitudowych, losowych i programowanych. Analizę wyników badań prowadzono wykorzystując podstawowe parametry pętli histerezy, dane materiałowe i charakterystyki zmęczeniowe, będące podstawą obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych.

W rozdziale pierwszym pracy, poza wprowadzeniem określającym jej cele i zakres, scharakteryzowano przebieg procesu zmęczenia oraz omówiono główne kierunki badań niskocyklowego zmęczenia metali.

W rozdziale drugim dokonano przeglądu dotychczasowego stanu wiedzy na temat prowadzenia badań w zakresie niskocyklowego zmęczenia, stosowanych określeń i modeli do opisu własności cyklicznych oraz ich wykorzystywania podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej. Ponadto dokonano przeglądu doniesień literaturowych, które zostały poświęcone analizie wpływu różnych czynników związanych z materiałem i jego stanem oraz warunkami obciążenia na przebieg stabilizacji własności cyklicznych. Rozdział kończy podsumowanie przeglądu literatury i wytyczne do badań własnych.

W rozdziale trzecim przedstawiono opis i wyniki badań własnych prowadzonych w warunkach obciążeń stałoamplitudowych, losowych i programowanych. Wykorzystywane podczas badań programy obciążenia cechowały się zróżnicowaniem postaci i kształtu programu. Cechą wspólną programów obciążenia był taki sam współczynnik wypełnienia widma, pojemność bloku programu oraz wartość maksymalna odkształceń w nim występujących. Wyniki badań przedstawiono w formie zarejestrowanych podczas badań zmian podstawowych parametrów pętli histerezy w funkcji liczby cykli obciążenia oraz w postaci wykresów zmęczeniowych w ujęciu energetycznym.

W rozdziale czwartym przedstawiono analizę uzyskanych wyników badań, wykorzystując podstawowe parametry pętli histerezy określone podczas badań w różnych okresach trwałości zmęczeniowej i zróżnicowanych warunkach obciążenia. Analizę wyników badań przeprowadzono w aspekcie wpływu przebiegu stabilizacji własności cyklicznych na dane materiałowe określone w warunkach obciążeń stałoamplitudowych, jak również na wyniki obliczeń trwałości przy wykorzystaniu wyznaczonych danych. Na podstawie badań zmęczeniowych przeprowadzonych w zróżnicowanych warunkach obciążenia dokona-

no również oceny wpływu parametrów programów obciążenia na przebieg stabilizacji własności cyklicznych i uzyskaną trwałość zmęczeniową.

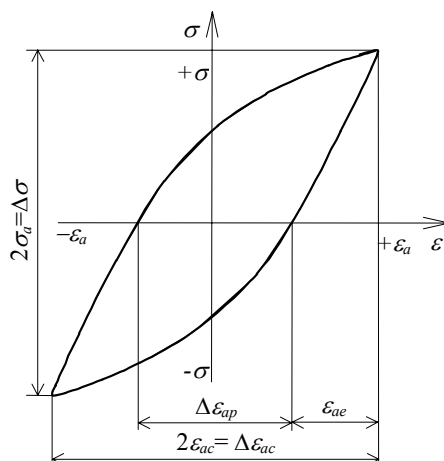
W rozdziale piątym zawarto podstawowe założenia do metody obliczeń trwałości zmęczeniowej z uwzględnieniem zmian własności cyklicznych. Rozdział kończy doświadczalna weryfikacja zaproponowanej metody obliczeń trwałości zmęczeniowej.

W rozdziale szóstym sformułowano wnioski oraz wytyczne do dalszych badań.

2. WYBRANE ZAGADNIENIA NISKOCYKLOWEGO ZMĘCZENIA METALI

2.1. PODSTAWOWE POJĘCIA I OPISY

Zakres niskocyklowego zmęczenia w porównaniu z zakresem zmęczenia wysokocyklowego różni się przede wszystkim wartością odkształceń występujących podczas cyklicznych obciążeń. Obciążenia te wywołują w strukturze materiału złożony splot zjawisk zależnych od stanu materiału, wartości obciążeń i liczby cykli obciążenia. Ogólnie nazywa się je zmianami zmęczeniowymi. Do ich opisu można przyjmować różne wielkości fizyczne, które podczas obciążenia cyklicznego podlegają pomiarom lub obliczeniom w trakcie obciążenia. Do najważniejszych można zaliczyć podstawowe parametry pętli histerezy, takie jak ε_{ac} , ε_{ap} , ε_{ae} , σ_a (rys. 2.1) [20, 35, 38, 61, 63].



Rys. 2.1. Pętla histerezy oraz jej podstawowe parametry [36]

Parametrem wykorzystywanym do opisu zmian własności cyklicznych może być również energia odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} , której miarą jest pole powierzchni pętli histerezy. Możliwości wykorzystywania tego parametru do opisu zmian własności cyklicznych oraz podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej zostaną szczegółowo omówione w dalszych rozdziałach niniejszej rozprawy. Na podstawie analizy doniesień literaturowych można stwierdzić, że przebieg zmian własności materiału podczas obciążenia cyklicznego mogą opisywać również inne wielkości, takie jak np. emisja akustyczna [77, 102, 103, 105], pole magnetyczne i inne [55].

Parametry pętli histerezy są wykorzystywane w stosowanych obecnie opisach procesu zmęczenia (odkształceniowym, naprężeniowym, energetycznym). Są to opisy fenomenologiczne, nie wiążące się bezpośrednio z rzeczywistością

strukturą metali i fizycznym charakterem zmian w nich zachodzących. Występujące w różnych okresach trwałości zmęczeniowej związki między parametrami pętli histerezy a liczbą cykli obciążenia N określa się własnościami cyklicznymi, które mogą się zmieniać lub być stałe. W pierwszym przypadku można mówić o cyklicznym umocnieniu lub osłabieniu materiału, a w drugim o stabilizacji własności cyklicznych. Przez cykliczne umocnienie należy rozumieć cechę materiału (czasem chwilową) polegającą na stopniowym (z cyklu na cykl) wzroście σ_a oraz obniżeniu ε_{ap} przy stałej wartości ε_{ac} lub obniżaniu ε_{ac} przy stałej wartości σ_a . Natomiast podczas cyklicznego osłabienia ma miejsce obniżanie σ_a oraz wzrost ε_{ap} przy stałej wartości ε_{ac} lub wzrost ε_{ac} przy stałej wartości σ_a . Pod pojęciem stabilizacji własności cyklicznych należy natomiast rozumieć taki stan materiału przy ustalonej wartości obciążenia, np. $\varepsilon_{ac} = \text{const}$, w którym pozostałe wielkości, takie jak σ_a , ε_{ap} , ΔW_{pl} nie ulegają zmianie. Naprężenie odpowiadające temu stanowi określa się jako naprężenie nasycenia (stabilizacji) σ_{as} , a odkształcenie jako odkształcenie nasycenia (stabilizacji) ε_{as} [N1, N2].

Badania doświadczalne w zakresie niskocyklowego zmęczenia prowadzić można, wykorzystując różne wielkości kontrolowane (sterujące) [115]. Teoretycznie mogą nimi być wszystkie parametry pętli histerezy pokazane na rysunku 2.1. Do najczęściej stosowanych należą jednak badania przy stałej wartości ε_{ac} lub ε_{ap} oraz stałej wartości σ_a .

A. Opisy odkształceń dla stanów stabilizacji własności cyklicznych

Podstawową charakterystyką opisującą własności cykliczne w zakresie niskocyklowego zmęczenia określaną na podstawie badań doświadczalnych jest zależność pomiędzy σ_a a ε_{ap} . Dla metali oraz ich stopów przyjęto założenie, że odkształcenie plastyczne ε_{ap} jest funkcją potęgową naprężenia σ_a o postaci:

$$\varepsilon_{ap} = \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (2.1)$$

Zależność między amplitudami naprężenia σ_a a odkształcenia ε_{ap} z okresów stabilizacji dla kilku poziomów odkształcenia ε_{ac} lub naprężenia σ_a przedstawia się graficznie w postaci wykresu w bilogarytmicznym układzie współrzędnych σ_a i ε_{ap} . W przypadku braku okresu stabilizacji niezbędne do wykonania wykresu parametry pętli histerezy σ_a i ε_{ap} pobiera się z okresu odpowiadającego połowie trwałości zmęczeniowej [N2]. Wykres przedstawiający zależność pomiędzy σ_a a ε_{ap} można uzyskać, wykonując badania stałoamplitudowe na kilku poziomach odkształcenia z wykorzystaniem kilku próbek (metoda klasyczna zgodna z normami [N1, N2]) lub z wykorzystaniem jednej próbki poddanej obciążeniu stopniowo narastającemu (metoda uproszczona) [71, 89]. Do anali-

tycznego opisu cyklicznych własności materiału wykorzystuje się modele jedno- lub dwuparametrowe [39, 56]. Niektóre z nich poddano weryfikacji w pracy [56]. Najczęściej stosowanym podczas analizy zmęczeniowej konstrukcji jest model Ramberga-Osgooda, np. [53, 133] o postaci:

$$\varepsilon_{ac} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (2.2)$$

Modyfikacja modelu Ramberga-Osgooda [26] polegała na przyjęciu założenia, że istnieje cykliczna granica plastyczności σ_{cpl} , poniżej której materiał można traktować jako liniowo sprężysty, co pozwoliło zapisać zależność (2.2) w postaci:

$$\varepsilon_{ac} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a - \Delta\sigma_{cpl}}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \text{ dla } \sigma_a > \sigma_{cpl} \text{ oraz } \varepsilon = \frac{\sigma_a}{E} \text{ dla } \sigma_a < \sigma_{cpl} \quad (2.3)$$

Przy wykorzystaniu prostych modeli analitycznych istnieje możliwość opisu odpowiednich gałęzi pętli histerezy. Równanie rosnącej gałęzi pętli histerezy otrzymuje się, mnożąc zależność (2.2) przez dwa:

$$\Delta\varepsilon_{ac} = \frac{\Delta\sigma}{E} + 2 \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (2.4)$$

Gałęzie malejące pętli otrzymuje się, stosując wzór (2.4) po transformacji układu współrzędnych do górnego wierzchołka pętli. Powyższą metodę postępowania omówiono szczegółowo w literaturze, np. [37, 62, 68, 153]. Zależność pomiędzy odkształceniem a naprężeniem o postaci opisanej równaniem (2.4) stosuje się do opisu pętli histerezy materiałów podlegających zasadzie Masinga [84]. Dla materiałów nie podlegających zasadzie Masinga zdefiniowano tzw. wykres szkieletowy, który tworzą górne lub dolne gałęzie pętli histerezy. Wykres ten otrzymuje się w wyniku przemieszczenia poszczególnych pętli histerezy wzdłuż ich części liniowej. Początek układu współrzędnych przyjmuje się w dolnym punkcie najmniejszej pętli. Zasadę Masinga oraz szczegóły konstrukcji wykresu szkieletowego wyjaśniono dokładnie między innymi w pracach [62, 68, 155]. Dla materiału nie podlegającego zasadzie Masinga zależność pomiędzy odkształceniem a naprężeniem przyjmuje postać:

$$\Delta\varepsilon_{ac}^* = \frac{\Delta\sigma^*}{E} + 2 \left(\frac{\Delta\sigma^*}{2K^*} \right)^{\frac{1}{n^*}} \quad (2.5)$$

B. Opisy cyklicznych odkształceń dla stanów nieustalonych

Przyjmuje się, że pętla histerezy w materiałach osłabiających lub umacniających się cyklicznie zmienia się do określonej liczby cykli. Największe zmiany pętli histerezy mają miejsce z reguły na początku próby zmęczeniowej. Zmiany te maleją wraz ze wzrostem liczby cykli obciążenia. Najczęściej zakłada się, że kształt pętli histerezy ustala się pomiędzy 1/3 a 1/2 liczby cykli do momentu pęknięcia zmęczeniowego. Zachowanie materiału ze względu na osłabienie czy umocnienie może zależeć od wielu czynników. Obszerną ich analizę przedstawiono w pracach [61, 62]. Ten sam materiał w różnym stanie (obróbka cieplna, cieplno-chemiczna), dla różnych warunków obciążenia (obciążenie osiowe, zginanie, skręcanie, historia obciążenia) wykazywać może różne własności [61, 62, 63, 93, 119, 120].

Przyjmuje się, że stopy metali wykazują mniejsze umocnienie w porównaniu z czystymi metalami, które wcześniej (po mniejszej liczbie cykli obciążenia) osiągają stan nasycenia. Odpowiadające temu stanowi naprężenia i odkształcenia plastyczne stanowią podstawę formułowania różnych hipotez osłabienia lub umocnienia [62]. Hipotezy te przechodzą ciągłe modyfikacje. Ich cechą wspólną jest jednak to, że wiążą się w sposób pośredni lub bezpośredni ze strukturami dyslokacyjnymi, podlegającymi zmianie podczas cyklicznego odkształcenia metalu. Zmiana własności metali podczas obciążeń cyklicznych zależy przede wszystkim od stabilności struktury dyslokacyjnej. Jeżeli materiał posiada małą gęstość dyslokacji, to podczas odkształcania cyklicznego następuje wzrost gęstości dyslokacji powodujący jego umocnienie. Jeżeli gęstość dyslokacji w materiale wyjściowym jest podwyższona, to mająca miejsce podczas odkształcenia cyklicznego przebudowa struktury dyslokacyjnej powoduje zmniejszenie gęstości dyslokacji i w konsekwencji osłabienie materiału [62, 63].

Zmianom własności cyklicznych towarzyszą zmiany parametrów wytrzymałościowych, wykorzystywanych podczas obliczeń trwałości i traktowanych w nich również jako niezmiennie. Na podstawie wyników przedstawionych w pracach [24, 25, 134, 156] można stwierdzić, że przebieg zmian podstawowych parametrów wytrzymałościowych określanych w próbie statycznego rozciągania (R_e , R_m czy E) zależy od okresu trwałości (stopnia uszkodzenia), w którym zostają one określone. Wyniki eksperymentalne przedstawione w tych pracach wskazują, że parametry wyznaczane w próbie statycznego rozciągania, łączące zarówno wytrzymałość i plastyczność, są czułe na zmiany własności cyklicznych i postępujący proces uszkodzenia zmęczeniowego. Z tego też względu jako orientacyjny wskaźnik zachowania się materiału podczas obciążenia cyklicznego przyjmuje się również często stosunek wytrzymałości na rozciąganie R_m do wyraźnej (R_e) lub umownej ($R_{0,2}$) granicy plastyczności. Umocnienia można oczekiwać dla $R_m/R_{0,2} > 1,4$, a osłabienia dla $R_m/R_{0,2} < 1,2$. Na podstawie badań własnych stwierdzono zasadność tego kryterium dla wielu materiałów metalowych. Innym wskaźnikiem pozwalającym przewidywać własności cy-

kliczne jest stosunek R_e/σ_{plc} . Zgodnie z tym kryterium osłabienie materiału ma zachodzić dla $\sigma_{plc}/R_e < 0,9$, stabilność dla $1,1 \geq \sigma_{plc}/R_e \geq 0,9$, a umocnienie dla $\sigma_{plc}/R_e > 1,1$ [63, 64].

Wskazując na trudności opisywania własności cyklicznych, nie należy również zapominać o znacznych kosztach realizacji badań niskocyklowych. Z tego też względu spotkać można propozycje szacowania parametrów zmęczenia np. podczas klasycznej próby rozciągania [1, 40, 66, 129, 132, 135, 164].

Nie ma większych problemów z opisem stanów ustalonych materiałów. Pojawiają się one jednak dla tak zwanych stanów przejściowych (nieustalonych). Cechą charakterystyczną stanów nieustalonych jest ciągła zmiana kształtu pętli, jak również jej parametrów. Występujące trudności opisu pętli histerezy związane są głównie z wpływem dużej liczby czynników na zachowanie się materiału w stanach przejściowych. W literaturze można znaleźć propozycje opisów odkształceń i odpowiednich gałęzi pętli w tych stanach [39, 125, 126].

Za podstawę tych opisów można przyjąć, podobnie jak dla stanów ustalonych, wykres cyklicznego odkształcenia opisany zależnością (2.2). Poszczególne gałęzie pętli histerezy opisuje się równaniami, które uwzględniają ich zmianę wraz z liczbą cykli obciążenia. W tym celu do zależności (2.4) wprowadza się człony poprawkowe $A_{(k)}$ i B_u :

$$\Delta \varepsilon_{ac} = \frac{\Delta \sigma_a}{E} + 2 \left(\frac{\Delta \sigma}{2(B_u + A_{(k)})} \right)^{n''} \quad (2.6)$$

gdzie $A_{(k)} = ak^2 + bk + c$, a wartości stałych B_u i n'' określa się dla stanu ustalonego materiału, natomiast pozostałe stałe a , b , c oblicza się na podstawie badań próbek o różnych zakresach odkształcenia całkowitego, a tym samym określa się je w zależności od liczby nawrotów obciążenia $2N_f$. W pracy [39] zaproponowano, aby wartości stałych a , b , c wyznaczać w trzech różnych okresach trwałości zmęczeniowej: na początku próby, w połowie trwałości zmęczeniowej i przed pęknięciem zmęczeniowym, a następnie wykonać ich wykres w funkcji $2N_f$. Doświadczalną weryfikację zaproponowanej metody przedstawiono między innymi w publikacjach [39, 62], w których wykazano możliwość wykorzystania zaproponowanej metody opisu stanów nieustalonych zarówno przy cyklicznym umocnieniu, jak i osłabieniu. Wystarczające jest w tych przypadkach aproksymowanie członu poprawkowego $A_{(k)}$ wielomianem drugiego stopnia. Ponadto stwierdzono również przydatność zaproponowanego opisu w przypadku bardziej złożonych przebiegów zmian własności cyklicznych materiału, np. typu osłabienie, umocnienie i ponowne osłabienie. Niezbędny jest wówczas wyższy stopień wielomianu $A_{(k)}$. Przedstawiony sposób postępowania zarówno dla stanów ustalonych, jak również nieustalonych posłużył do opisu cyklicznych odkształceń różnych gatunków stali. Wyniki weryfikacji zostały zamieszczone między innymi w pracach [39, 43-45].

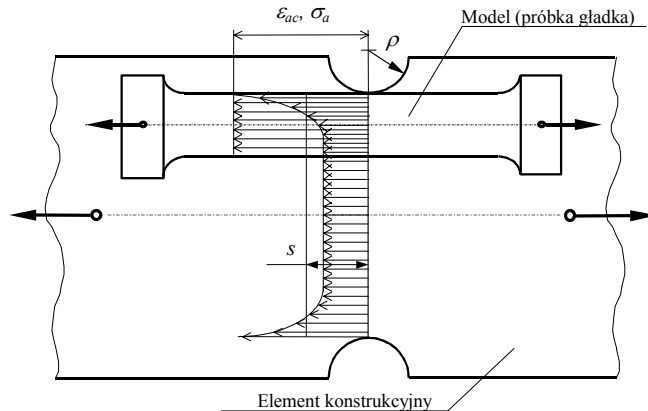
Modelem bardziej uniwersalnym i dokładniejszym od modelu omówionego wcześniej okazał się model kinematycznego wzmocnienia z pamięcią maksymalnych przeciążeń [123]. Jest to model mieszany, obejmujący model kinematyczny i model izotropowy jako przypadki szczególne. Pozwala on uwzględnić cykliczne pełzanie i relaksację naprężeń, które mogą występować podczas niesymetrycznych cykli odkształceń. Obszerne założenia do modelu zawarto w pracach [39, 44]. Omówiono w nich również sposób jego praktycznego zastosowania do opisu cyklicznych odkształceń i pętli histerezy dla stali o podwyższonej wytrzymałości, otrzymując dobrą zgodność z wynikami badań doświadczalnych.

2.2. OBLICZENIA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ Z WYKORZYSTANIEM DANYCH Z ZAKRESU NISKOCYKLOWEGO ZMĘCZENIA

Pojęcie elementu konstrukcyjnego wiąże się nierozłącznie z problemem korbów powstałych ze względów funkcjonalnych lub na skutek różnego rodzaju zabiegów technologicznych. W obszarach korbów w wyniku występujących obciążeń dochodzi do spiętrzenia naprężeń i możliwe jest lokalne uplastycznienie materiału. Ze względu na fakt występowania odkształceń plastycznych zaczęły zawodzić tradycyjne metody obliczeń trwałości bazujące na naprężeniach nominalnych. Niezbędna stała się konieczność analizy lokalnych wartości odkształceń i naprężeń. Metoda obliczeń trwałości zmęczeniowej bazująca na analizie lokalnych odkształceń powstała na przełomie lat 50. i 60. XX w., jako sposób oceny zmęczenia niskocyklowego części reaktorów atomowych i silników odrzutowych [62]. Obecnie znajduje swoje odzwierciedlenie w odkształceniowym lub energetycznym opisie procesu zmęczenia. Podstawą realizacji obliczeń w obydwu ujęciach jest znajomość własności materiałowych w postaci wykresu zmęczeniowego oraz przyjęcie odpowiedniej hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych.

A. Ujęcie odkształceniowe

Ocena trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych w ujęciu odkształceniowym wymaga przyjęcia szeregu danych materiałowych. Określa się je podczas badań niskocyklowych próbek gładkich poddanych zmiennym odkształceniom lub naprężeniom. Stosując metodę obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych, przyjmuje się, że jeżeli próbka gładka zostanie poddana takiemu przebiegowi odkształceń jak element konstrukcyjny w obszarze karbu, to jego trwałość będzie równa trwałości próbki gładkiej. Przyjęty w metodzie obliczeń trwałości sposób modelowania odkształceń w karbie pokazano w sposób schematyczny na rysunku 2.2.



Rys. 2.2. Modelowanie elementu konstrukcyjnego w karbie za pomocą próbki gładkiej obciążonej osiowo

W pracach [82, 86, 93, 99, 119] podano propozycje modelowania odkształceń w karbie, wykorzystując próbkę poddaną zginaniu. Analiza porównawcza wyników obliczeń trwałości uzyskanych z zastosowaniem danych ze zginania i obciążenia osiowego wykazała wpływ metody wyznaczania danych materiałowych na wyniki obliczeń. Mniejsze zróżnicowanie wyników obliczeń i badań stwierdzono w przypadku wykorzystywania w nich danych uzyskanych w warunkach zginania.

Wykres zmęczeniowy wykorzystywany podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych w ujęciu odkształceniowym wykonuje się na podstawie niskocyklowych badań zmęczeniowych zgodnie z [N1, N2]. Najbardziej znanym opisem wykorzystywanym podczas opracowywania uzyskanych wyników jest równanie Mansona-Coffina-Basquina [19, 78]:

$$\frac{\Delta \varepsilon_{ac}}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_{ae}}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_{ap}}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} \left(2N_f \right)^b + \varepsilon'_f \left(2N_f \right)^c \quad (2.7)$$

W zależności od rodzaju materiału wykres $\varepsilon_{ac} = f(2N_f)$ może mieć różny przebieg. Jednak prawie zawsze zbliża się asymptotycznie w zakresie małej liczby cykli obciążenia do prostej aproksymującej odkształcenia plastyczne, natomiast w zakresie wysokocyklowym do prostej określonej przez zmiany amplitudy odkształceń sprężystych. W literaturze spotkać można prace [39, 40], w których odkształcenia całkowite aproksymowano liniami prostymi, uzyskując wysoki współczynnik korelacji. Punkt przecięcia się prostych ε_{ae} i ε_{ap} nazywany jest punktem przejściowym, a odpowiadająca mu liczba cykli N_f lub nawrotów $2N_f$, przejściową liczbą cykli N_t , albo nawrotów $2N_t$.

Uwzględnienie w obliczeniach trwałości w ujęciu odkształceniowym naprężenia średniego wymaga modyfikacji zależności (2.7) zgodnie z propozycją Morrowa [89]:

$$\frac{\Delta \varepsilon_{ac}}{2} = \frac{(\sigma'_f - \sigma_m)}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (2.8)$$

lub Mansona-Halforda [80]:

$$\frac{\Delta \varepsilon_{ac}}{2} = \frac{(\sigma'_f - \sigma_m)}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f \left(\frac{\sigma'_f - \sigma_m}{\sigma'_f} \right)^{\frac{c}{b}} (2N_f)^c \quad (2.9)$$

W metodzie obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych opartych na analizie odkształceń, trwałość jest bardzo ściśle uzależniona od amplitudy lokalnego odkształcenia w miejscu inicjacji pęknięcia. Lokalne odkształcenia i naprężenia ε i σ trzeba oszacować w miejscu prawdopodobnej inicjacji pęknięcia (np. dno najostrego karbu). Obecnie istnieje kilka propozycji ich wyznaczania. Do najbardziej znanych należy koncepcja Stowella (1950 r.), zmodyfikowana następnie przez Hardratha i Ohmana (1953 r.) oraz koncepcja podana przez Neubera (1961 r.). Najczęściej stosowana jest propozycja Neubera, która wiąże naprężenia lokalne σ i nominalne S w karbie za pomocą współczynników spiętrzenia naprężeń K_σ i odkształceń K_ε [127]. Według Neubera kwadrat współczynnika kształtu karbu K_t oblicza się jako iloczyn współczynników K_σ i K_ε :

$$K_t^2 = K_\sigma K_\varepsilon \quad (2.10)$$

przy czym:

$$K_\sigma = \sigma / S \quad (2.11)$$

oraz

$$K_\varepsilon = \varepsilon / e \quad (2.12)$$

Odkształcenie maksymalne ε na dnie karbu odpowiada naprężeniu σ , a odkształcenie nominalne e naprężeniu nominalnemu S . Równanie (2.12) można zapisać w postaci:

$$\sigma \cdot \varepsilon = K_t^2 S e \quad (2.13)$$

Jest to równanie hiperboli zwanej hiperbolą Neubera. Dla zakresu sprężystego równanie (2.13) można zapisać jako:

$$\sigma \cdot \varepsilon = K_t^2 S^2 / E \quad (2.14)$$

Odształcenia lokalne na dnie karbu określa się rozwiązując układ równań (2.14) z (2.2). Z układu tego przy znanej wartości współczynnika K_t oraz naprężenia nominalnego S można wyznaczyć naprężenia σ i odkształcenia ε na dnie karbu.

B. Ujęcie energetyczne

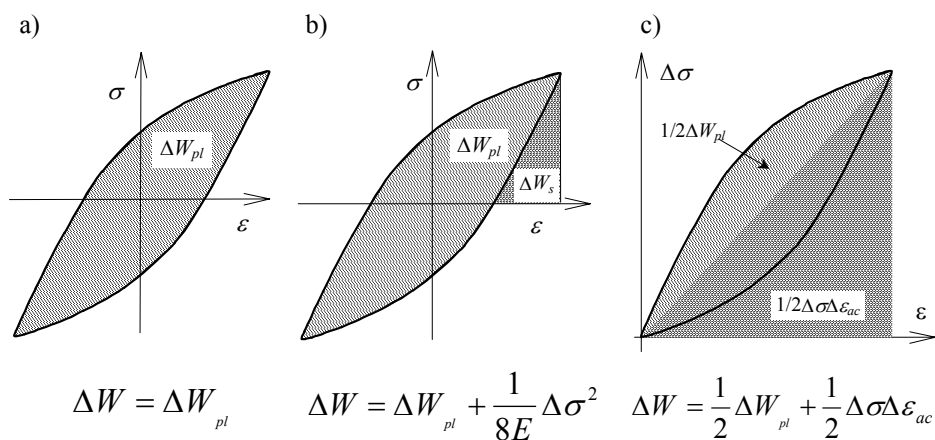
Analiza danych literaturowych dotyczących niskocyklowego zmęczenia pozwala stwierdzić, że istnieje wiele hipotez oraz koncepcji energetycznego podejścia do procesu zmęczenia [27, 28, 31, 35-40, 67, 68]. Ostatnie lata przyniosły szczególny rozwój badań w tym zakresie. Jest to spowodowane między innymi tym, że ujęcie energetyczne procesu zmęczenia jest pełniejsze od opisu odkształceniowego czy naprężeniowego. Uwzględnia ono bowiem wzajemne interakcje zarówno naprężeń, jak i odkształceń. Wykonanie charakterystyki zmęczeniowej w ujęciu energetycznym wymaga zdefiniowania parametru energetycznego i przyjęcia odpowiedniego modelu opisu zmęczenia w ujęciu energetycznym. Na podstawie analizy danych literaturowych można stwierdzić, że obecnie istnieją dwa podstawowe podejścia do opisu procesu zmęczenia w ujęciu energetycznym.

W pierwszym uwzględnia się całkowitą skumulowaną w procesie zmęczenia energię, która jest porównywalna z energią rozproszoną w statycznej próbie rozciągania. Propozycje takiego podejścia można znaleźć między innymi w pracy [31].

Drugie podejście bazuje na kumulacji energii rozproszonych w poszczególnych cyklach obciążenia zmiennego. W tym przypadku wyróżnić można trzy grupy propozycji, w których uwzględnia się:

- a) tylko energię odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} (rys. 2.3a) – takie propozycje przedstawiono między innymi w pracach [27, 36, 56, 122]; na podstawie analizy doniesień literaturowych można stwierdzić, że model opisu procesu zmęczenia przy wykorzystaniu tego parametru sprawdza się dobrze podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej w obszarze niskocyklowego zmęczenia,
- b) sumę jednostkowej energii odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} i sprężystego ΔW_s – propozycje takiego podejścia znaleźć można w pracach [37, 38, 68]; na rysunkach 2.3b i 2.3c pokazano dwa charakterystyczne opisy wielkości kryterialnej dla tego podejścia. Propozycja opisu sprawdza się dobrze, gdy program obciążenia zawiera cykle z obszaru nisko-, jak również wysoko-cyklowego zmęczenia,
- c) jednostkową energię odkształceń sprężysto-plastycznych ΔW – w propozycji pomija się rozdzielanie energii odkształceń sprężysto-plastycznych na składowe. Opisy takie zaproponowano między innymi w pracach [76, 145].

Schematy ilustrujące w sposób graficzny najczęściej spotykane opisy wielkości kryterialnej w ujęciu energetycznym pokazano na rysunku 2.3.



Rys. 2.3. Kryteria energetyczne stosowane podczas obliczeń trwałości:

- a) według Ellyina i Kujawskiego [27],
- b) według Gołosia i Ellyina [38],
- c) według Kujawskiego i Ellyina [68]

Wykresy zmęczeniowe w ujęciu energetycznym wykonywane są z reguły na podstawie badań prowadzonych w warunkach kontrolowanego odkształcenia lub naprężenia. Wartość wielkości kryterialnej ΔW , będącej podstawą wyznaczenia wykresów zmęczeniowych w ujęciu energetycznym, określa się na podstawie badań znormalizowanych próbek na maszynach wytrzymałościowych, analizując zdyskretyzowane sygnały pomiarowe siły obciążającej próbkę i jej odkształcenia. Sygnały te, po przeliczeniu siły na naprężenie, pozwalają na punktowy opis pętli histerezy w układzie współrzędnych odkształcenie – naprężenie, co umożliwi obliczenie odpowiedniej energii ΔW . Szczegółowy opis postępowania podczas obliczeń, np. pola pętli histerezy znaleźć można między innymi w pracach [155, 158]. Wykresy zmęczeniowe w ujęciu energetycznym aproksymuje się w układzie podwójnie logarytmicznym liniami prostymi w postaci [27]:

$$\Delta W = K_p (N)^\alpha \quad (2.15)$$

Całkowitą energię rozproszoną podczas próby zmęczeniowej oblicza się z pól powierzchni wszystkich pętli histerezy. W celu uproszczenia obliczeń uwzględnia się pole pętli w stanie nasycenia, mnożąc je przez liczbę cykli do pęknięcia zmęczeniowego. Założenie o niezmienności energii rozproszonej w każdym cyklu obciążenia podczas prób zmęczeniowych przy sterowaniu odkształceniem potwierdzono między innymi w pracach [27, 28, 42, 50, 83]. Ponadto stwierdzono, że energia rozproszona jest stała, niezależnie od własności cyklicznych materiału, a na jej wielkość nie wpływa cykliczne osłabienie czy umocnienie. Do wniosków całkowicie odmiennych doszli autorzy prac [12, 13, 57, 93, 96]. Stwierdzili oni zmienność energii rozproszonej w funkcji liczby cykli.

Powoduje to w przypadku np. materiałów cyklicznie niestabilnych trudności jednoznacznego określenia poziomów energii, na których prowadzone były próby zmęczeniowe. Uwaga powyższa ma również istotne znaczenie dla oceny trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych, ponieważ np. nawet niewielki błąd w ocenie energii ΔW_{pl} kumulowany jest wielokrotnie (np. 10^6 - 10^8 i więcej razy) [95, 106, 112, 122]. Problemów wynikających z wykonania charakterystyk materiałowych w ujęciu energetycznym można częściowo uniknąć, prowadząc badania np. w warunkach kontrolowanej wielkości kryterialnej przyjmowanej do budowy wykresu (np. w warunkach $\Delta W_c = \text{const}$ czy $\Delta W_{pl} = \text{const}$). Jest to jednak dopiero przedmiotem prac weryfikacyjnych [11, 60, 114, 115, 144].

Wartości poszczególnych wielkości kryterialnych występujących w opisie energetycznym można również obliczyć, znając własności materiałowe określone podczas badań. Na przykład wartość energii odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} można określić na podstawie znajomości parametrów równania (2.2). Dla materiału podlegającego zasadzie Masinga [84] można to zrobić z zależności zaproponowanej przez Morrowa:

$$\Delta W_{pl} = \frac{1 - n'}{1 + n'} \Delta \sigma \Delta \varepsilon_{ap} \quad (2.16)$$

W przypadku materiałów nie podlegających zasadzie Masinga, w pracach [54, 72] do obliczeń energii odkształcenia plastycznego zaproponowano zależność o postaci:

$$\Delta W_{pl} = \frac{1 - n'}{1 + n'} \Delta \sigma \Delta \varepsilon_{ap} + \frac{2n^*}{1 + n^*} \delta \sigma_0 \Delta \varepsilon_{ap} \quad (2.17)$$

gdzie:

$\delta \sigma_0$ – przesunięcie wykresu, które można określić z zależności:

$$\delta \sigma_0 = \Delta \sigma - \Delta \sigma^* = \Delta \sigma - 2K^* (\Delta \varepsilon_{ap} / 2)^{n^*} \quad (2.18)$$

Zależność (2.16) jest szczególnym przypadkiem wzoru (2.17), ponieważ dla materiału podlegającego zasadzie Masinga wielkość $\delta \sigma_0 = 0$, a $n^* = n'$.

C. Hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych dla obszaru niskocyklowego zmęczenia

Obliczenia trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych w obszarze niskocyklowego zmęczenia w zdecydowanej większości oparte są na fenomenologicznych hipotezach kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych, najczęściej słabo fizycznie uzasadnionych. Do takich należy najprostsza i najczęściej obecnie stosowana hipoteza liniowa sumowania uszkodzeń zmęczeniowych Palmgren-Minera [87, 131]. Pierwotna postać hipotezy Minera została sformułowana dla

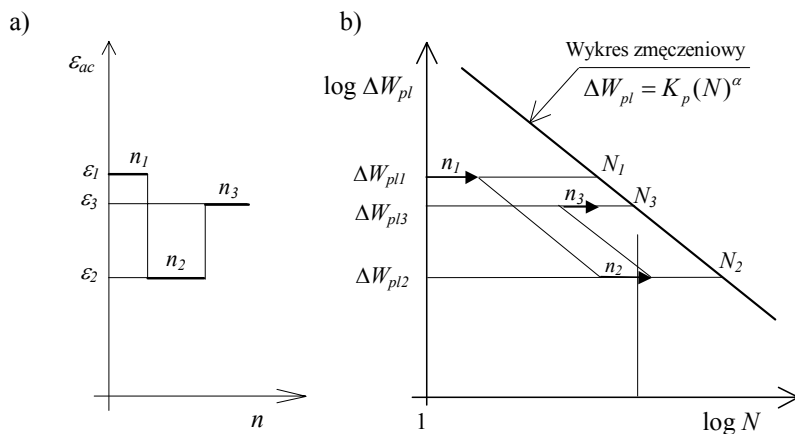
opisu energetycznego. W hipotezach liniowych zakłada się, że w przypadku obciążenia stałoamplitudowego każdy cykl obciążenia niezależnie od fazy procesu zmęczenia, w jednakowym stopniu przyczynia się do uszkodzenia. Oznacza to, że uszkodzenie jest liniową funkcją liczby cykli, co można zapisać:

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (2.19)$$

W hipotezie Palmgrena-Minera zakłada się, że dla wielostopniowego programu obciążenia pęknięcie nastąpi, jeżeli spełniony zostanie warunek:

$$D_i = \lambda \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (2.20)$$

Zasadę sumowania uszkodzeń zgodnie z hipotezą liniową dla opisu energetycznego z wykorzystaniem wielkości kryterialnej, jaką jest energia ΔW_{pl} , pokazano na rysunku 2.4.



Rys. 2.4. Obliczenia trwałości zmęczeniowej zgodnie z hipotezą Palmgrena-Minera w ujęciu energetycznym: a) program obciążenia, b) sumowanie uszkodzeń

Wartość energii ΔW_{pl} odpowiadającą kolejnym cyklom obciążenia blokowego oblicza się podczas sumowania uszkodzeń z wykorzystaniem danych materiałowych wyznaczonych z tzw. okresu stabilizacji własności cyklicznych, np. z zależności (2.16). Taki sposób postępowania powoduje, że podczas obliczeń trwałości wielkość ta jest niezmienna na tych samych poziomach odkształcenia, aż do momentu gdy zostaje spełniony warunek opisany równaniem (2.20). W kontekście występujących podczas obciążeń stałoamplitudowych zmian własności cyklicznych niektórych materiałów (cykliczne osłabienia czy umocnienia), a tym samym energii ΔW_{pl} w funkcji liczby cykli obciążenia stanowi to pewne uproszczenie, które może być jednocześnie jedną z przyczyn obserwo-

wanych rozbieżności uzyskanych wyników obliczeń i badań trwałości zmęczeniowej.

Prostota hipotezy liniowej spowodowała, że jest ona szeroko stosowana podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej. Wykorzystał ją również Tucker w pracy [161], w której sformułował założenia metody obliczeń trwałości zmęczeniowej bazującej na analizie lokalnych odkształceń i naprężeń. Doświadczalna weryfikacja hipotezy wykazała jednak istotne zróżnicowanie uzyskanych wyników obliczeń i badań. Na podstawie dostępnych danych literaturowych można stwierdzić, że skuteczność hipotezy Palmgrena-Minera w obszarze niskocyklowego zmęczenia jest wyższa niż w obszarze wysokocyklowego zmęczenia. Wyniki jej weryfikacji dla różnych opisów procesu zmęczenia przedstawiono między innymi w pracach [153, 154, 158]. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że wartości sumy D_i dla różnych programów obciążenia i różnych materiałów znajdowały się w przedziale od 0,1 do 10 [126].

Krytyka hipotezy liniowej zawarta w wielu pracach spowodowała, że pojawiły się jej modyfikacje [49, 139, 159, 163] przeprowadzone głównie dla zakresu zmęczenia wysokocyklowego. Można je podzielić na dwie grupy. Pierwsza dotyczyła zastąpienia 1,0 w zależności (2.20) współczynnikiem a , którego wartość uzależniono od materiału. Przykładem mogą być modyfikacje podane między innymi przez Cortena i Dolana [21], Serensena i Kogajeva [139] czy Walgrena [163]. Druga grupa modyfikacji dotyczyła wykresu zmęczeniowego. Przykładem może być propozycja Haibacha [49]. Obydwie grupy to efekty prostych zabiegów mających na celu osiągnięcie wyższej zgodności wyników obliczeń trwałości z wynikami badań. Przeprowadzone modyfikacje nie zyskały praktycznego zastosowania do sumowania uszkodzeń zmęczeniowych w obszarze niskocyklowego zmęczenia.

Na podstawie analizy wyników badań oraz zjawisk towarzyszących procesowi zmęczenia w latach 70. sformułowano oraz rozwinięto kilka hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych dla opisu naprężeniowego, opartych na koncepcji istnienia linii resztkowych trwałości oraz linii stałych uszkodzeń zmęczeniowych [79, 81, 149, 154]. Hipotezy te wraz z opracowaniem w latach 80. nowych metod obliczeń trwałości zmęczeniowej, opartych np. na analizie lokalnych odkształceń i naprężeń, zostały adaptowane na obszar niskocyklowego zmęczenia [37, 98, 101, 122]. Ich doświadczalna weryfikacja, przeprowadzona między innymi w pracach [29, 81, 121, 154, 158], wykazała jednak nadal występujące rozbieżności wyników obliczeń i badań, dochodzące np. w przypadku stopu aluminium do kilkuset procent.

Do chwili obecnej zostało opracowanych około 40 różnych hipotez sumowania uszkodzeń. W miarę ich doświadczalnej weryfikacji podlegały one różnym modyfikacjom. Zestawienia, szerokiej analizy oraz zakresu zastosowań hipotez dokonano między innymi w pracach [29, 81, 154]. Skuteczność hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych w zakresie niskocyklowego zmęczenia jest, jak się wydaje, funkcją skali zmian własności cyklicznych. Zostało to wielokrotnie potwierdzone w pracach prowadzonych w różnych ośrodkach badaw-

czych. Największe rozbieżności wyników obliczeń trwałości i badań sygnalizowano w przypadku elementów konstrukcyjnych wykonanych z materiałów cyklicznie niestabilnych, takich jak stopy aluminium i miedzi [112, 116, 154]. Niskiej skuteczności obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych nie poprawiły przeprowadzone modyfikacje hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych, polegające głównie na zastosowaniu podczas sumowania uszkodzeń zmęczeniowych nowych wielkości kryterialnych, takich jak odkształcenie czy jednostkowa energia odkształcenia całkowitego lub jej składowe. Na podstawie analizy wyników badań weryfikacyjnych hipotez sumowania uszkodzeń trudno jednoznacznie wskazać zakres ich zastosowania. Można jednak zauważyć, że ich skuteczność maleje na poziomach obciążenia zbliżonych do granicy zmęczenia. Może to być również spowodowane istotnie większym rozrzutem wyników badań doświadczalnych na tych poziomach w porównaniu z wynikami uzyskanymi w obszarze zmęczenia niskocyklowego.

Cechą wspólną wszystkich hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych dla obszaru niskocyklowego zmęczenia jest fakt, że w celu ich wykorzystania do obliczeń trwałości zmęczeniowej niezbędna jest znajomość wykresów zmęczeniowych, jako podstawowych zbiorów danych o własnościach zmęczeniowych materiału lub obiektu oraz własności cyklicznych opisanych, np. równaniami (2.2) lub (2.3). Z tego względu występujące zróżnicowanie trwałości uzyskanych z obliczeń i badań może być skutkiem niedoskonałości samych hipotez sumowania uszkodzeń, ale również nieprecyzyjnego opisu własności cyklicznych materiału.

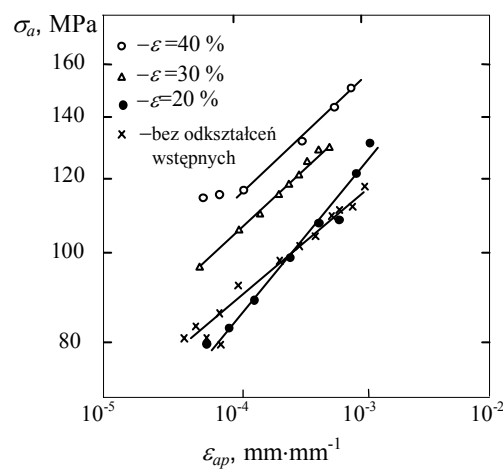
2.3. WPLYW WYBRANYCH CZYNNIKÓW NA WŁASNOŚCI CYKLICZNE

Na podstawie przeprowadzonej analizy danych literaturowych można stwierdzić, że o procesach osłabienia czy umocnienia materiału poddanego obciążeniom cyklicznym decyduje bardzo wiele czynników. Złożoność procesu niskocyklowego zmęczenia oraz różnorodność interpretacji przebiegu zmian własności cyklicznych powoduje, że trudno w sposób precyzyjny wyodrębnić wpływ poszczególnych czynników na przebieg stabilizacji własności cyklicznych, a sam przebieg zmian własności cyklicznych stanowi najczęściej ich interakcję. W poniższej pracy zwrócono uwagę na czynniki najistotniejsze, mające największy wpływ na przebieg stabilizacji własności cyklicznych.

A. Przebieg obciążenia

Do najważniejszych czynników związanych z przebiegiem obciążenia, mających wpływ na przebieg stabilizacji można zaliczyć: odkształcenia wstępne (statyczne) poprzedzające obciążenia zmienne oraz różnego rodzaju przeciążenia występujące już w trakcie obciążenia zmiennego [3, 18, 41, 55, 69, 70]. Odkształcenia wstępne mają bardzo duży wpływ na trwałość zmęczeniową, jak

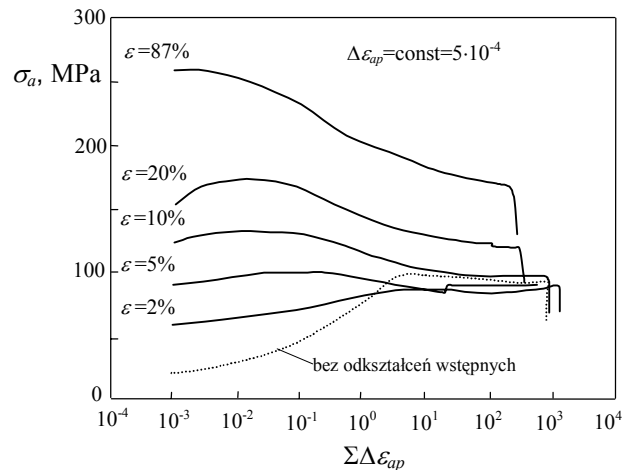
również na sam przebieg procesu stabilizacji. Na podstawie analizy danych literaturowych można stwierdzić, że odkształcenia wstępne występujące przed obciążeniem zmiennym powodują najczęściej obniżenie trwałości zmęczeniowej [70, 118]. Zmieniają one również istotnie własności cykliczne. Wpływ odkształcenia wstępnego na obniżenie trwałości i zmianę własności cyklicznych materiału zależy zarówno od wielkości samego odkształcenia wstępnego, jak również poziomu obciążenia zmiennego występującego po nim [41, 108]. Na rysunku 2.5 pokazano przykłady wykresów opisanych zależnością (2.1), otrzymanych na podstawie badań zmęczeniowych próbek wykonanych ze stopu miedzi z cynkiem 69/31CuZn, poddanych wstępnym odkształceniom o różnej wartości [70].



Rys. 2.5. Wykresy cykliczne dla próbek z czystej miedzi wstępnie obciążonych [68]

Badania zmęczeniowe przeprowadzono w warunkach obciążeń stałoamplitudowych (rozciąganie-ściskanie) przy kontrolowanej amplitudzie odkształcenia plastycznego ($\epsilon_{ap} = \text{const}$) oraz kontrolowanej amplitudzie naprężenia ($\sigma_a = \text{const}$). Dla niewielkich odkształceń wstępnych ($\epsilon = 20\%$) i małych poziomów odkształcenia plastycznego ($\epsilon_{ap} < 0,05\%$) obserwowano cykliczne osłabienie materiału, natomiast dla wysokich ($\epsilon_{ap} > 0,1\%$) jednokierunkowe odkształcenie wstępne prowadziło do jego umocnienia.

Odkształcenia wstępne mogą również zmienić przebieg kumulacji odkształceń plastycznych ϵ_{ap} (rys. 2.6). Zaobserwowano to między innymi w pracy [18] na podstawie badań zmęczeniowych wstępnie odkształconych próbek wykonanych z miedzi w warunkach kontrolowanego odkształcenia plastycznego. Dla niewielkich poziomów odkształcenia wstępnego ϵ materiał charakteryzował się cyklicznym umocnieniem, natomiast dla wysokich materiał wykazywał cechy materiału osłabiającego się cyklicznie bez okresu stabilizacji.



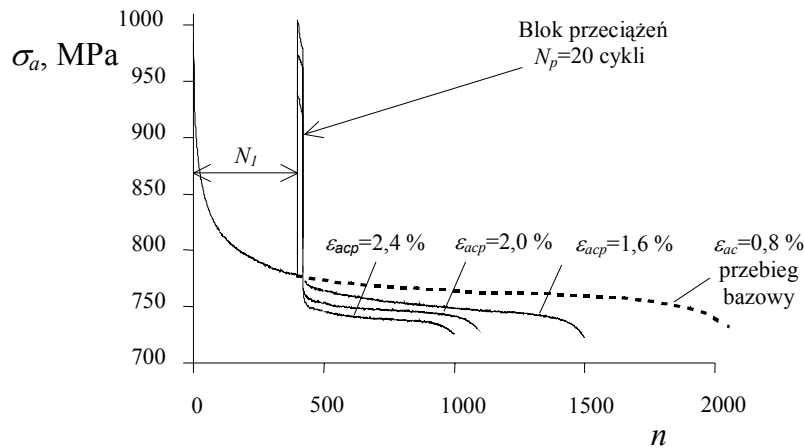
Rys. 2.6. Kumulacja odkształceń plastycznych dla różnych wartości odkształceń wstępnych próbek z miedzi [18]

Istotny wpływ na trwałość zmęczeniową, w tym również na niskocyklową trwałość zmęczeniową oraz przebieg stabilizacji, mają różnego rodzaju przeciążenia występujące w trakcie obciążenia zmiennego. Przez przeciążenie należy rozumieć cykl lub blok cykli o amplitudzie odkształcenia lub naprężenia istotnie wyższej od amplitudy obciążenia bazowego.

W obszarze wysokocyklowego zmęczenia, gdy o trwałości decyduje etap zmęczenia do momentu pojawienia się pęknięcia, wpływ przeciążeń na trwałość zależy od szeregu czynników, z których najważniejsze to: liczba przeciążeń, wielkość przeciążeń, własności cykliczne materiału. Na przykład w przypadku materiałów podlegających cyklicznemu umocnieniu pojedyncze przeciążenie, powodujące wystąpienie odkształceń plastycznych w materiale, może spowodować wzrost trwałości zmęczeniowej, a w przypadku materiałów podlegających cyklicznemu osłabieniu jej obniżenie [62]. Natomiast gdy o trwałości zmęczeniowej decyduje etap rozwoju pęknięcia, przeciążenia mogą powodować wzrost trwałości zmęczeniowej [62, 137, 148]. Wynika to ze zjawiska opóźnienia, występującego w strefie uplastycznienia materiału przed wierzchołkiem pęknięcia.

W obszarze niskocyklowego zmęczenia, niezależnie od położenia przeciążenia, jego formy (cykl pojedynczy, blok cykli) czy wielkości, powodują one najczęściej obniżenie trwałości zmęczeniowej [6, 7, 22, 108, 110, 111, 118, 157, 160, 166]. Własności cykliczne materiału w tym obszarze po przeciążeniu zależne są między innymi od poziomu zrealizowanego przeciążenia. W przypadku gdy amplituda cykli przeciążających ε_{acp} jest odpowiednio wysoka, to własności te różnią się w porównaniu z własnościami cyklicznymi materiału obserwowanymi podczas przebiegu obciążenia bez przeciążeń. Na podstawie badań stali konstrukcyjnej C45 [92, 106, 117] oraz stali stopowej 30HGSA [109] w warunkach występowania przeciążeń stwierdzono, że po każdym przeciążeniu,

niezależnie od jego postaci, badany materiał ulegał umocnieniu (stal 45) lub osłabieniu (stal 30HGSA). Zilustrowano to na rysunku 2.7 w postaci przykładowych wykresów zmian amplitudy naprężenia σ_a w przebiegu stałoamplitudowym i z blokiem 20 cykli przeciążających o zróżnicowanej amplitudzie ε_{acp} dla próbek ze stali 30HGSA.

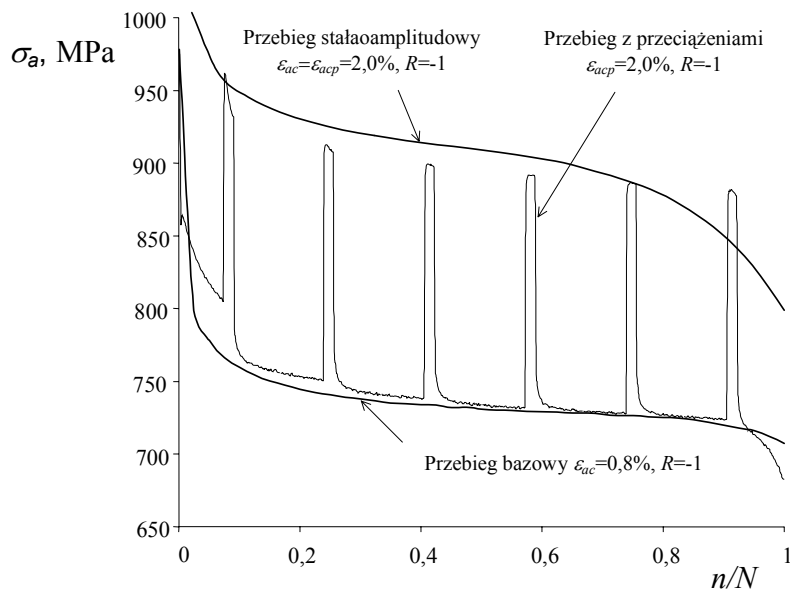


Rys. 2.7. Zmiany σ_a w przebiegach z przeciążeniami o zróżnicowanej amplitudzie cykli przeciążających próbek ze stali 30HGSA [106]

Wielkość osłabienia lub umocnienia po przeciążeniu zależała między innymi od amplitudy ε_{acp} cykli przeciążających, pojemności N_p bloku przeciążeń i jego położenia w przebiegu obciążenia, opisywanego liczbą cykli N_l . Na podstawie analizy porównawczej wybranych parametrów pętli histerezy (σ_a , ε_{ap} , ΔW_{pl}) w tych samych okresach trwałości względnej n/N stwierdzono niewielkie ich zróżnicowanie podczas obciążenia stałoamplitudowego i z przeciążeniami. Na rysunku 2.8 zilustrowano to w postaci przykładowych wykresów zmian σ_a w przebiegach stałoamplitudowych o amplitudach $\varepsilon_{ac} = 0,8\%$ i $2,0\%$ i w przebiegu z przeciążeniami ($\varepsilon_{acp} = 2,0\%$) w funkcji n/N .

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że naprężenia σ_a podczas obciążenia stałoamplitudowego i z przeciążeniami mają w tych samych okresach trwałości względnej n/N zbliżony poziom.

Cykle przeciążające stosowane w badaniach opisanych w pracach [93, 110] miały amplitudę odkształcenia ε_{acp} co najmniej dwukrotnie większą od amplitudy odkształcenia ε_{ac} dla przebiegu bazowego ($\varepsilon_{acp} \geq 2 \cdot \varepsilon_{ac}$). W pracy [18] wykazano, że przeciążenia mają wpływ na przebieg stabilizacji dopiero wówczas, gdy amplituda cykli przeciążających jest odpowiednio wysoka. Wymienione spostrzeżenia sformułowano na podstawie analizy porównawczej kumulacji odkształceń plastycznych ($\Sigma \Delta \varepsilon_{ap}$) w próbkach wykonanych z miedzi poddanym obciążeniom stałoamplitudowym i z przeciążeniami dla $R = -1$.

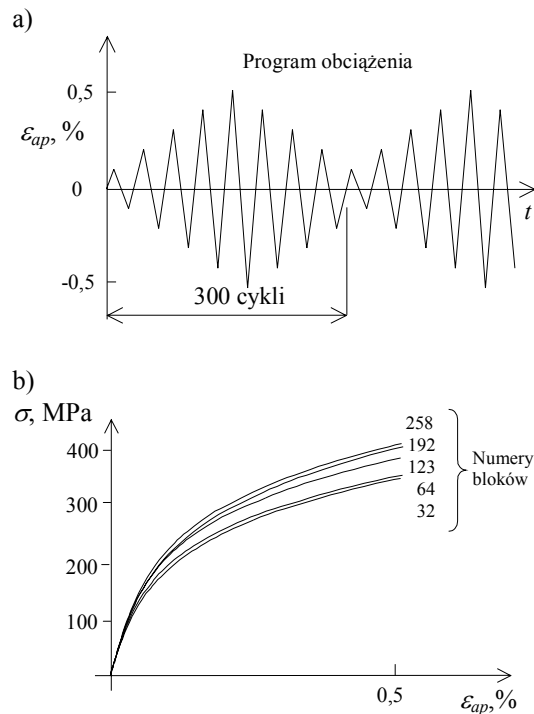


Rys. 2.8. Zmiany σ_a podczas obciążeń stałoaamplitudowych i z przeciążeniami [110]

Zachodzące podczas obciążenia cyklicznego zmiany własności cyklicznych mogą być widoczne zarówno w postaci zmian parametrów pętli histerezy w funkcji liczby cykli obciążenia, jak również w zróżnicowanym położeniu wykresów cyklicznego odkształcenia uzyskanych dla różnych okresów trwałości zmęczeniowej. Dla zobrazowania powyższego na rysunku 2.9 przedstawiono wykresy cyklicznego odkształcenia próbek ze stali nierdzewnej opisane równaniem (2.2), uzyskane w różnych okresach trwałości obciążenia programowanego realizowanego w formie bloków [4].

Zmiany położenia kolejnych wykresów wskazują na brak wyraźnego okresu stabilizacji własności cyklicznych podczas obciążenia programowanego. Brak takiego okresu sygnalizowano również w pracach [41, 70, 109, 111]. Autorzy do takiego stwierdzenia doszli na podstawie analizy porównawczej własności cyklicznych określanych w jednym bloku programu, w czasie stopniowego wzrostu obciążenia oraz jego stopniowego zmniejszania.

Wpływ przebiegu obciążenia na własności cykliczne obserwuje się zarówno podczas badań w warunkach obciążeń jednoosiowych [43, 93, 119], jak również wieloosiowych w warunkach obciążenia proporcjonalnego oraz nieproporcjonalnego [2, 16, 74].



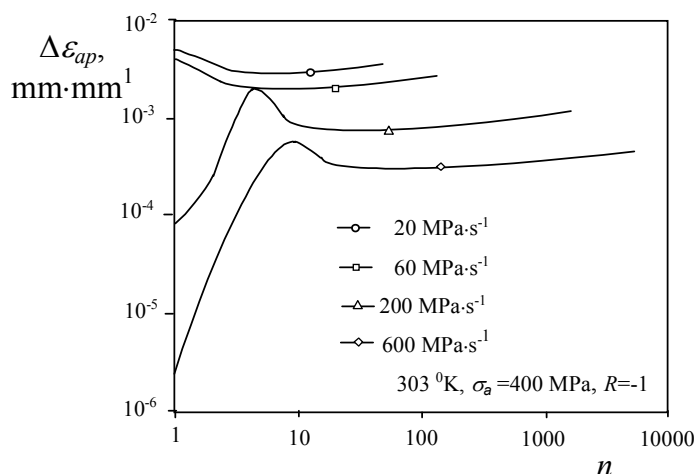
Rys. 2.9. Kształt bloku programu obciążenia (a), wykresy cyklicznego odkształcenia w różnych okresach trwałości (b) [4]

Zmiany własności cyklicznych materiału występują niezależnie od rodzaju obciążenia [1, 75, 81, 82, 83, 103, 117, 134, 162] i stanu materiału [42, 93]. Występują zarówno w skali makro, podczas badań próbek gładkich [40, 41, 85], jak również w skali mikro, podczas badań próbek z korbami [8, 14, 141]. W pracy [10] na podstawie analizy odkształceń w obszarach korbów metodami interferometrycznymi stwierdzono zmiany własności cyklicznych oraz brak okresu stabilizacji w strefach zmęczeniowego pęknięcia. W trakcie badań obserwowano w tych strefach efekty umocnienia i osłabienia. W pracy [10] stwierdzono, że nieuwzględnianie podczas analizy stanu odkształceń materiału w obszarach korbów zjawisk osłabienia lub umocnienia materiału prowadzić będzie do nieskutecznej oceny trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych.

B. Prędkość odkształcania i kształt cyklu

Zarówno prędkość odkształcania, jak i występujące przerwy w obciążeniu mają wpływ na trwałość zmęczeniową i własności cykliczne [16, 55, 90]. Na podstawie dostępnych wyników badań można stwierdzić, że wraz ze wzrostem prędkości obciążenia zmiennego zmniejszeniu ulega na danym poziomie wartość amplitudy odkształcenia plastycznego oraz nieznacznie wzrasta trwałość zmęczeniowa. Zostało to stwierdzone między innymi w pracy [16] na podstawie

badan próbek wykonanych z molibdenu poddanych obciążeniu rozciągająco-ściskającemu ($R = -1$) w warunkach kontrolowanego naprężenia o różnej prędkości obciążania (od 20 do 600 $\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1}$). Wpływ różnych prędkości odkształcenia oceniano na podstawie analizy porównawczej zmian zakresu odkształcenia plastycznego $\Delta\varepsilon_{ap}$ dla różnych prędkości odkształcenia w funkcji liczby cykli obciążenia. Przykładowe zmiany tego parametru na jednym poziomie naprężeń ($\sigma_a = 400 \text{ MPa}$) i czterech prędkości przedstawiono na rysunku 2.10.

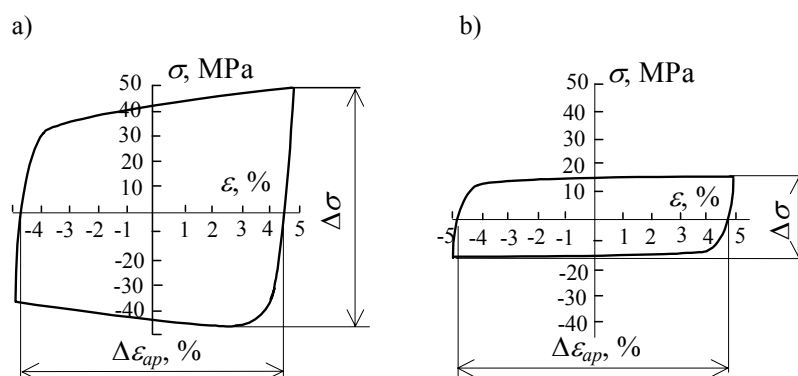


Rys. 2.10. Zmiany $\Delta\varepsilon_{ap}$ w funkcji liczby cykli obciążenia ($\sigma_a = 400 \text{ MPa}$, $R = -1$) [16]

W pracy [16] zauważono ponadto, że wpływ prędkości obciążenia na zakres odkształceń plastycznych $\Delta\varepsilon_{ap}$ oraz uzyskaną trwałość zależy również od poziomu amplitudy naprężenia σ_a .

Parametrem charakteryzującym przebieg obciążenia zmiennego sinusoidalnie jest również jego częstotliwość. W obszarze niskocyklowego zmęczenia przy wysokich częstotliwościach następuje szybki wzrost temperatury próbki, który doprowadza do zniekształcenia pętli histerezy na skutek odkształceń cieplnych, zmian struktury oraz pełzania [62]. Uwidacznia się to w sposób bardzo wyraźny w przypadku materiałów słabo przewodzących ciepło, np. kompozytów. Ze względu na znaczny wpływ częstotliwości obciążenia na przebieg niskocyklowego zmęczenia, jak również na uzyskane wyniki trwałości, jej poziom został określony w normie [N2] na około 0,2 Hz. Przyjmuje się, że powinna być tak dobrana, aby nie powodować nagrzania próbki podczas całej próby o więcej niż 20°C . Wpływ częstotliwości na trwałość niskocyklową zależy w dużej mierze od własności materiału. Wzrost częstotliwości obciążenia zwiększa trwałość niskocyklową stali [61], a obniża, np. stopów cyny i ołowiu [140]. Ze względu na znaczne odkształcenia towarzyszące niskocyklowemu zmęczeniu, badania wpływu częstotliwości na niskocyklową trwałość dotyczyły najczęściej częstotliwości mniejszych od 1 Hz. W pracy [140] na podstawie wyników badań zmę-

zeniowych eutektycznego lutu 63Sn/37Pb stwierdzono, że trwałość zmęczeniowa maleje wraz ze zmniejszeniem częstotliwości obciążenia. Odbywa się to w sposób liniowy w zakresie częstotliwości od 10^{-3} do 1 Hz. Szczególny wpływ częstotliwości na trwałość występuje w zakresie od 10^{-4} do 10^{-3} Hz. Wraz ze wzrostem częstotliwości istotnym zmianom ulega kształt pętli histerezy. Na rysunku 2.11 pokazano przykładowe pętle histerezy na poziomie odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 5\%$ dla dwóch częstotliwości: 10^{-4} i 1 Hz.

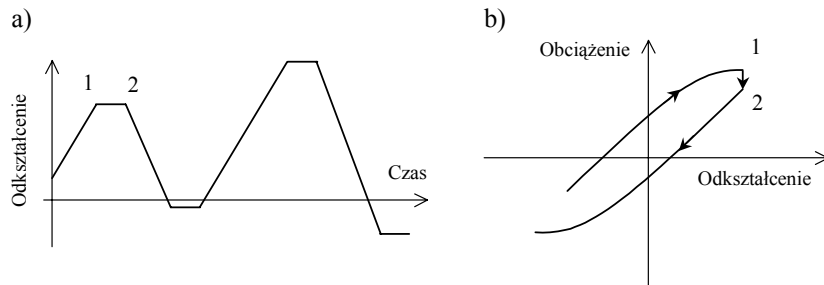


Rys. 2.11. Kształt pętli histerezy dla dwóch częstotliwości obciążenia lutu 63Sn/37Pb: a) 1 Hz, b) 10^{-4} Hz [140]

Na podstawie analizy uzyskanych pętli histerezy można stwierdzić, że wraz z obniżaniem częstotliwości zmniejszeniu ulega wartość obciążenia niezbędnego do realizacji tego samego poziomu odkształcenia.

Na przebieg stabilizacji istotny wpływ ma również kształt cyklu obciążenia. Wiąże się to głównie z czasami przetrzymywania w półcyklu rozciągania lub ściskania. Wpływ kształtu cyklu na trwałość jest praktycznie niewidoczny w stalach węglowych i stalach o podwyższonej wytrzymałości [62]. Wpływ ten uwiadcza się nieznacznie w stalach austenitycznych odpornych na korozję. W pracach [3, 5, 55] stwierdzono, że zatrzymanie obciążenia w półcyklu rozciągania powoduje szybszą stabilizację pętli histerezy niż podczas obciążenia zmiennego ciągłego. Wyniki obserwacji uzyskane we wspomnianych pracach wykorzystano w pracy [55], gdzie zaproponowano wspomniany przebieg obciążenia do wyznaczania własności cyklicznych (rys. 2.12).

Proponowany przebieg obciążenia poddano doświadczalnej weryfikacji dla różnych postaci programów obciążenia stosowanych zarówno w klasycznej, jak i uproszczonej metodzie wyznaczania własności cyklicznych. Analiza uzyskanych wyników wykazała znacznie mniejszy rozrzut punktów opisujących wierzchołki pętli histerezy dla nowej metody badań. Praktycznie nie obserwowano różnic w wynikach w obszarze sprężystym, co miało miejsce podczas badań z obciążeniem bez stosowania przerw.



Rys. 2.12. Proponowany przebieg programu obciążenia (a) i efekt relaksacji na skutek zatrzymania programu obciążenia po każdym nawrocie (b) [55]

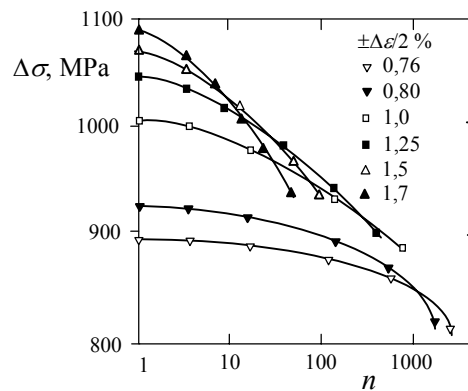
C. Wielkość odkształcenia

Wielkość odkształcenia ma bezpośredni wpływ na trwałość zmęczeniową. Istniejący związek teoretyczny pomiędzy wartością amplitudy odkształcenia a trwałością zmęczeniową został uwzględniony w zależności (2.7). Zupełnie innym problemem jest wpływ tego parametru na przebieg zmian własności cyklicznych w warunkach obciążeń zmiennych. Na podstawie analizy doniesień literaturowych można stwierdzić, że w zależności od poziomu odkształcenia zmiennego metale i ich stopy można podzielić na trzy grupy:

- 1) cyklicznie stabilne, niezależnie od poziomu odkształceń cyklicznych,
- 2) podlegające w całym zakresie odkształceń cyklicznych tylko umocnieniu lub tylko osłabieniu,
- 3) metale, których własności cykliczne zależą od poziomu odkształcenia cyklicznego.

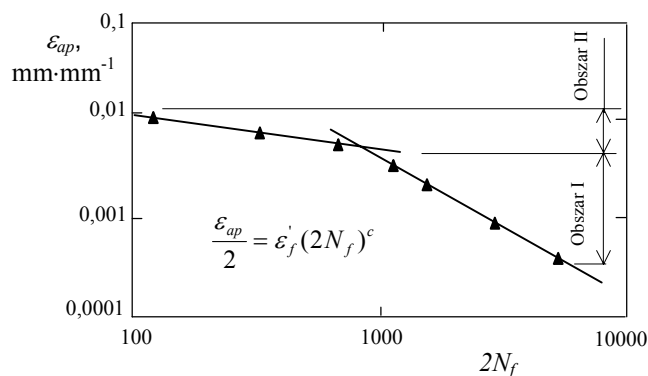
W przypadku pierwszej grupy metali, niezależnie od poziomu odkształcenia, nie występują wyraźne zmiany własności cyklicznych opisywanych parametrami pętli histerezy w funkcji liczby cykli obciążenia. Do grupy tej zaliczyć można bardzo niewiele metali oraz ich stopów. Należy stwierdzić, że uznanie materiału za cyklicznie stabilny czy niestabilny może wynikać również z przyjętego do oceny tej cechy materiału, parametru pętli histerezy oraz dokładności jego pomiaru lub obliczeń.

Druga grupa materiałów charakteryzuje się tym, że niezależnie od poziomu odkształcenia ulegają one osłabieniu [42, 73, 142] albo umocnieniu [106, 114]. Poziom odkształcenia może natomiast wpływać na stopień osłabienia lub umocnienia lub prędkość tych procesów [118, 142]. Na podstawie niskocyklowych badań zmęczeniowych stopu tytanu IMI 834 na sześciu poziomach odkształcenia obserwowano cykliczne osłabienie (rys. 2.13) [142]. Podczas badań większy stopień osłabienia oraz jego wyższa prędkość dotyczyła poziomów o amplitudzie $\varepsilon_{ac} > 1\%$. Osłabienie i jego prędkość były o wiele mniejsze dla poziomów o amplitudzie $\varepsilon_{ac} < 0,8\%$.



Rys. 2.13. Zmiany $\Delta\sigma$ na sześciu poziomach odkształcenia [142]

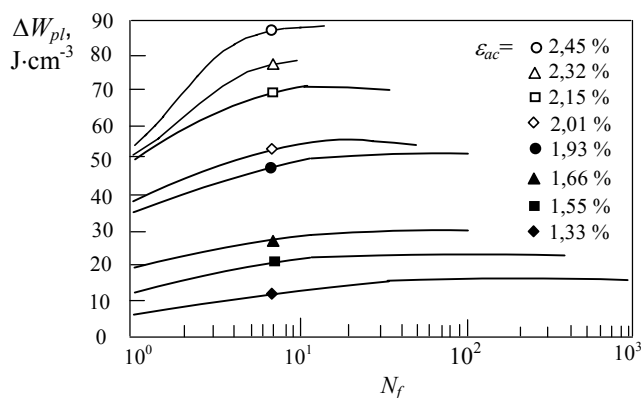
Brak okresu stabilizacji, jak również wpływ poziomego odkształcenia na wielkość zmian własności cyklicznych powoduje, że w obszarze niskocyklowego zmęczenia niekiedy problemy sprawia aproksymowanie wykresów zmęzeniowych liniami prostymi. Trudności te dotyczą określenia wartości odkształcenia ε_{ap} na odpowiednich poziomach odkształcenia całkowitego ε_{ac} oraz aproksymowania wykresów zmęzeniowych w całym zakresie odkształceń jedną funkcją. Z tego względu wyniki badań proponuje się przedstawiać przy wykorzystaniu dwóch wykresów zmęzeniowych. W pracach [65, 142] propozycje dotyczą wykresów zmęzeniowych w układzie współrzędnych $2N_f - \varepsilon_{ap}$ (rys. 2.14), a w publikacji [32] wykresów zmęzeniowych w układzie współrzędnych $2N_f - \Delta W_{pl}$.



Rys. 2.14. Wykresy trwałości zmęzeniowej dla dwóch obszarów odkształcenia [142]

Wpływ poziomego odkształcenia na własności cykliczne oraz brak okresu stabilizacji powoduje trudności w jednoznacznym określeniu parametrów pętli histerezy reprezentatywnych dla poszczególnych poziomów obciążenia. Przyjmowanie ich w takim przypadku z połowy okresu trwałości zmęzeniowej może być przyczyną zróżnicowania – uzyskanych przy ich wykorzystaniu – wyni-

ków trwałości z obliczeń i badań. Wpływ okresu trwałości przyjętego do określania danych materiałowych na wyniki obliczeń trwałości sygnalizowano między innymi w publikacjach [58, 108, 112]. W pracy [73] na podstawie analizy wyników badań stali sprężynowej wysokiej wytrzymałości stwierdzono, że pomocą w określeniu okresu, z którego należy pobrać niezbędne dane do obliczeń, może być znajomość przebiegu zmian energii odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} (rys. 2.15).



Rys. 2.15. Zmiany ΔW_{pl} w funkcji liczby cykli obciążenia [73]

W przeciwieństwie do naprężenia σ_a i odkształcenia ϵ_{ap} parametr ten charakteryzował się znacznie mniejszymi zmianami w funkcji liczby cykli obciążenia oraz występowaniem bardziej wyraźnego w stosunku do innych wielkości kryterialnych okresu stabilizacji. Uzyskane przy wykorzystaniu tak określonych danych materiałowych wykresy cyklicznego odkształcenia w układzie naprężenie – odkształcenie oraz wykresy trwałości w układzie odkształcenie – liczba nawrotów pozostawały w dużej zgodności z wynikami badań.

Jak już wspomniano na początku niniejszego rozdziału, oprócz klasycznych parametrów pętli histerezy do oceny zmian własności cyklicznych mogą być wykorzystane również inne parametry bezpośrednio związane z rejestrowanymi pętlami histerezy. W pracach [9, 106, 130] analizowano wpływ wielkości odkształcenia na własności cykliczne, wykorzystując moduły określone podczas niskocyklowych badań zmęczeniowych z rejestrowanych pętli histerezy (moduł sieczny - E_s , moduł styczny - E_t) oraz moduł E wyznaczany w klasycznej próbie rozciągania po zrealizowaniu określonej liczby cykli obciążenia zmiennego. W pracach stwierdzono przydatność wymienionych parametrów do oceny własności cyklicznych oraz ich zależność od poziomu odkształcenia. W publikacji [106] na podstawie przeprowadzonej analizy porównawczej wyników uzyskanych na różnych poziomach odkształcenia stwierdzono, że wyższe wartości modułu stycznego E_t występują na niższych poziomach obciążenia.

Wpływ poziomu odkształcenia na przebieg zmian własności cyklicznych obserwuje się zarówno w temperaturach otoczenia, jak również w temperaturach podwyższonych [17, 47, 52, 85, 124, 127, 147, 150]. W pracy [52] do oceny porównawczej wielkości umocnienia próbek wykonanych ze stali chromowo niklowej w temperaturach od 24 do 928°C na sześciu poziomach odkształcenia zaproponowano tzw. stopień umocnienia opisany zależnością:

$$\delta_{\sigma} = \frac{\sigma_a^p - \sigma_a^1}{\sigma_a^1} 100\% \quad (2.21)$$

gdzie:

- σ_a^p – maksymalna wartość amplitudy naprężenia na danym poziomie odkształcenia,
- σ_a^1 – wartość amplitudy naprężenia w pierwszym cyklu obciążenia.

Przeprowadzona analiza zmian amplitudy naprężenia na poszczególnych poziomach odkształcenia i zróżnicowanych temperaturach wykazała, że maksymalna wartość tego parametru dla poszczególnych poziomów odkształcenia występuje w temperaturze badań wynoszącej około 761°C. Wraz z dalszym wzrostem temperatury zmiany własności cyklicznych są coraz mniejsze, a w temperaturze 982°C efekty umocnienia materiału zanikają. W pracy zauważono również, że istnieje możliwość wykorzystywania równania (2.12) do opisu wyników badań zarówno w temperaturach pokojowych, jak również w podwyższonych. Interesujące propozycje symulacji ustabilizowanych pętli histerezy dla różnych zakresów odkształcenia i temperatury podano w pracy [165], natomiast w publikacjach [125, 126] zaproponowano sposób postępowania podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych w ujęciu odkształceniowym i naprężeniowym.

Cechą charakterystyczną trzeciej grupy metali jest zależność własności cyklicznych od poziomu odkształcenia. Stwierdzono to między innymi w publikacji [93] na podstawie badań niskocyklowych próbek wykonanych ze stali konstrukcyjnej wyższej jakości 45 oraz w publikacji [167] na podstawie badań próbek ze stopu tytanu Ti-2Al-2,5Zr. Stal 45 dla poziomów odkształcenia $\varepsilon_{ac} < 0,8\%$ ulegała cyklicznemu osłabieniu, natomiast dla poziomów $\varepsilon_{ac} > 0,8\%$ stal cechowała niewielkie umocnienie. Próbki ze stopu tytanu wykazywały cykliczne osłabienie dla $\varepsilon_{ac} < 2\%$, podczas gdy dla poziomów $\varepsilon_{ac} > 2\%$ cykliczne umocnienie.

Wpływ wielkości odkształcenia na własności cykliczne odzwierciedla się we wzajemnym położeniu wykresów cyklicznego odkształcenia oraz wykresu statycznego rozciągania. Wykres cyklicznego odkształcenia leżący nad wykresem statycznego rozciągania wskazuje na umocnienie materiału. Położenie odwrotne świadczy o jego osłabieniu. Wymienione wykresy mogą się wzajemnie przecinać, wskazując na wpływ wartości odkształcenia na przebieg procesu umocnienia.

Takie położenie wspomnianych wykresów zaobserwowano między innymi podczas badań próbek z normalizowanej stali C45 i stopu tytanu Ti-2Al-2,5Zr w warunkach obciążenia osiowego i płaskiego zginania [62, 63, 91, 92, 94, 119, 167].

Na przebieg zmian własności cyklicznych, jak również na trwałość zmęczeniową, mogą mieć także wpływ inne parametry obciążenia niewymienione w niniejszej rozprawie. Do takich należy zaliczyć wartość średnią naprężenia [48, 64, 69, 70] oraz wartość średnią odkształcenia [64]. Wpływ obydwu parametrów na przebieg zmian własności cyklicznych może być różny i w dużej mierze zależy od samego materiału i warunków badań.

2.4. PODSUMOWANIE PRZEGLĄDU LITERATURY

W metodzie obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych bazującej na analizie lokalnych naprężeń i odkształceń wykorzystywane są dane materiałowe, określane podczas niskocyklowych badań zmęczeniowych z tzw. okresu stabilizacji. Na podstawie analizy danych literaturowych można stwierdzić, że w przypadku wielu materiałów metalowych w warunkach obciążeń stałoamplitudowych nie występuje wyraźny okres stabilizacji, a zachodzące osłabienie czy umocnienie materiału zależy od szeregu czynników związanych z materiałem i przebiegiem obciążenia. Powoduje to, że wartości danych materiałowych wykorzystywanych podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej zależą w sposób istotny zarówno od okresu trwałości, w którym zostają określone, jak i poziomu odkształcenia przyjętego podczas badań.

Przebieg zmian własności cyklicznych mogą w istotny sposób zmienić np. odkształcenia wstępne, przerwy w przebiegu obciążenia czy występujące przeciążenia. Podobnie jak w warunkach obciążeń stałoamplitudowych, w warunkach występowania krótkotrwałych przeciążeń występujących w trakcie obciążenia stałoamplitudowego, nie obserwowano wyraźnego okresu stabilizacji. Muszą zatem budzić wątpliwości wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych, uzyskane przy założeniu istnienia okresu stabilizacji.

Na podstawie dokonanego przeglądu literatury można stwierdzić, że występujące w metalach podczas badań stałoamplitudowych procesy cyklicznego osłabienia czy umocnienia mogą w pewnych warunkach (np. zmian temperatury, częstotliwości itp.) spotęgować się lub ulec zanikowi. Znaczna liczba czynników mających wpływ na proces stabilizacji własności cyklicznych powoduje, że stopień weryfikacji poszczególnych jednostkowych propozycji jest wysoce niezadowolający. Z tego powodu trudno wskazać jedną metodę postępowania dla dużej grupy materiałów i warunków obciążenia. Można wyróżnić pewne obszary badań, w których poddaje się weryfikacji wpływ na własności cykliczne jednego lub kilku czynników, np. tylko temperatury, temperatury i częstotliwości, odkształcenia i temperatury, itp. Dla tak zdefiniowanych warunków proponuje się modyfikacje istniejących modeli opisujących własności cykliczne metali.

Do oceny przebiegu procesu stabilizacji wykorzystuje się obecnie różne opisy i wielkości kryterialne. Najstarszym jest opis naprężeniowy. Wielkością kryterialną w nim wykorzystywaną jest łatwy do obliczeń, w przypadku znajomości przebiegów czasowych obciążenia, przebieg zmienny naprężenia nominalnego. Podstawową wadą są trudności interpretacji tego parametru w obszarze odkształceń sprężysto-plastycznych.

Wraz z rozwojem aparatury badawczej, szczególnie techniki komputerowej i instrumentarium do pomiaru podczas badań bardzo małych odkształceń, pojawiła się możliwość opisu przebiegu stabilizacji w ujęciu odkształceniowym. Podstawową zaletą tego opisu jest fakt, że odkształcenie jako wielkość kryterialna wykorzystywana do budowy wykresu zmęczenia (wartość odkształcenia całkowitego, plastycznego lub sprężystego) zostaje określona podczas bezpośrednich pomiarów realizowanych w trakcie badań, przy wykorzystaniu różnych technik (tensometrii, interferometrii czy techniki laserowej). Przeprowadzone analizy przebiegu stabilizacji własności cyklicznych w karbach geometrycznych wskazują, że w nich również nie występuje okres stabilizacji, a przebieg zmian własności cyklicznych, podobnie jak podczas badań z wykorzystaniem próbek gładkich, zależy między innymi od przebiegu obciążenia i samego materiału.

Duże nadzieje na poprawę skuteczności obliczeń trwałości zmęczeniowej wiązane są z opisem energetycznym zmęczenia, który uwzględnia wzajemne interakcje odkształceń i naprężeń. Przyjęcie energii jako wielkości kryterialnej pozwoliło na uzyskanie nowych możliwości opisu procesu zmęczenia. Wielkościami kryterialnymi dla opisu energetycznego mogą być energia odkształcenia całkowitego ΔW_c lub jej składowe (energia odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} , czy sprężystego ΔW_s). Pomimo swoich zalet opis energetyczny ma również wady. Wymaga bowiem wcześniejszego wyznaczenia podstawowych danych materiałowych podczas obciążenia stałoamplitudowego oraz obliczeń iteracyjnych wielkości kryterialnej w trakcie sumowania uszkodzeń zmęczeniowych. Powoduje to niejednokrotnie, że skuteczność obliczeń trwałości zależy od dokładności odwzorowania parametru energetycznego, np. pola pętli. Ponadto na podstawie doniesień literaturowych można stwierdzić, że energetyczne wielkości kryterialne cechuje również brak stabilizacji własności cyklicznych w warunkach obciążenia stałoamplitudowego.

Pomimo przyjęcia do obliczeń nowych wielkości kryterialnych, nie poprawiły one zgodności wyników trwałości uzyskanych z obliczeń i badań. Główną przyczyną jest, jak się wydaje, fakt, że obecnie wśród parametrów wykorzystywanych do opisu zmęczenia oraz obliczeń trwałości, brak wielkości charakteryzujących się nieczułością na zjawiska cyklicznego osłabienia czy umocnienia.

Podstawową charakterystyką opisującą własności cykliczne metali w obszarze niskocyklowego zmęczenia jest zależność potęgowa pomiędzy σ_a a ε_{ap} . Ze względu na wpływ poziomu odkształcenia na wielkość umocnienia czy osłabienia i związane z tym trudności opisu tą zależnością całego zakresu niskocy-

klowego zmęczenia, pojawiły się propozycje dzielenia obszaru niskocyklowego zmęczenia na odrębne przedziały i niezależnego opisywania w nich własności cyklicznych tymi samymi modelami.

Na podstawie dokonanego przeglądu danych literaturowych można stwierdzić, że najczęściej stosowanym modelem analitycznym do opisu własności cyklicznych dla stanów ustalonych jest model Ramberga-Osgooda. Wykorzystywane są w nim dane materiałowe wyznaczone podczas badań zmęczeniowych z okresu stabilizacji oraz moduł Younga określany w trakcie prób statycznych. Doświadczalna weryfikacja modelu pozwala zauważyć jego zadowalającą zgodność z wynikami badań zarówno w przypadku stanów ustalonych, jak również nieustalonych oraz wpływu na proces zmęczenia dodatkowych czynników, np. temperatury czy częstotliwości.

Poprawa zgodności wyników trwałości zmęczeniowej uzyskanych z badań i obliczeń to z jednej strony doskonalenie modeli opisujących zachowanie materiału w warunkach odkształceń sprężysto-plastycznych, a z drugiej problem poszukiwań odpowiedniej hipotezy sumowania uszkodzeń. Wraz z rozwojem nauki o zmęczeniu materiałów i przyjmowaniem nowych wielkości kryterialnych zaobserwować można okresowe powroty do wcześniejszych hipotez, które poddaje się kolejnym modyfikacjom i uzupełnieniom, co w niewielkim jednak stopniu przyczyniło się do poprawy skuteczności obliczeń trwałości zmęczeniowej. Zupełnie naturalnym stało się przenoszenie na obszar niskocyklowego zmęczenia hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych, w znacznym zakresie rozpoznanych i zweryfikowanych w obszarze wysokocyklowego zmęczenia. Najszerszy zakres weryfikacji doświadczalnej w obszarze niskocyklowego zmęczenia ma obecnie hipoteza Palmgrena-Minera.

Pomimo opracowania nowych hipotez sumowania uszkodzeń, niezmiennie pozostają nadal modele analityczne opisujące zachowanie materiału w karbach konstrukcyjnych. W większości nie uwzględniają one nadal zmian własności cyklicznych materiału w tych obszarach, skutkiem czego wyniki obliczeń wielkości kryterialnych mają jedynie charakter przybliżony. Iteracyjny charakter obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych powoduje, że nawet niewielkie błędy w ocenie wielkości kryterialnej są kumulowane wielokrotnie i mogą prowadzić do znacznego zróżnicowania wyników obliczeń i badań. Potwierdzają to wyniki doświadczalnej weryfikacji hipotezy Palmgrena-Minera wskazujące, że największym zróżnicowaniem w stosunku do wyników badań doświadczalnych charakteryzują się wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej w obszarze zbliżonym do granicy zmęczenia.

Na podstawie przeprowadzonej analizy danych literaturowych można stwierdzić, że jednym z kierunków poprawy zgodności wyników trwałości, uzyskanych z badań i obliczeń prowadzonych przy wykorzystaniu hipotez sumowania uszkodzeń, jest między innymi przystosowanie ich do uwzględniania zmian własności cyklicznych podczas obciążeń zmiennych.

2.5. WYTYCZNE DO BADAŃ WŁASNYCH

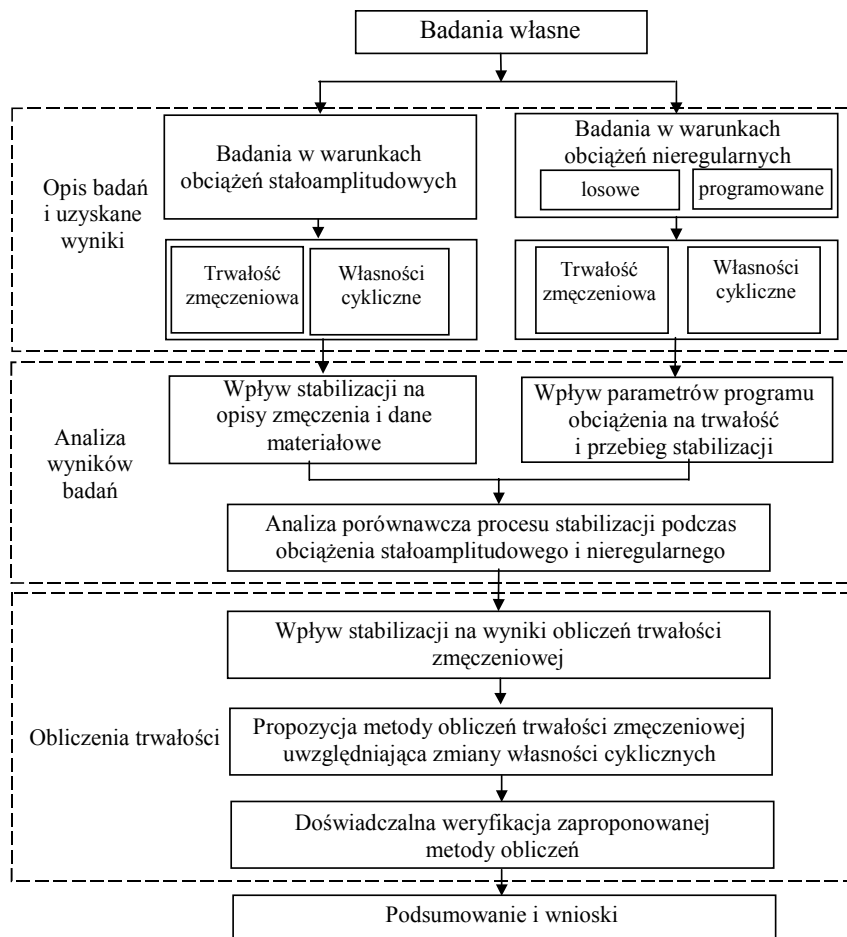
Niewielka poprawa skuteczności obliczeń trwałości (głównie dla materiałów niestabilnych cyklicznie) na skutek dotychczas przeprowadzonych modyfikacji hipotez sumowania wskazuje, że oprócz samych hipotez sumowania uszkodzeń na wyniki obliczeń trwałości ma również wpływ przebieg stabilizacji własności cyklicznych. Zróżnicowane materiały, różnorodne stany i własności cykliczne (zależne od historii obciążenia czy warunków otoczenia) wskazują, że podstawą dalszych prac zmierzających do poprawy wiarygodności wyników obliczeń trwałości zmęczeniowej powinno być uwzględnienie podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej zmian własności cyklicznych. Obliczenia takie wymagają jednak znajomości przebiegu zmian własności cyklicznych materiału w warunkach obciążenia eksploatacyjnego. Na podstawie analizy doniesień literaturowych [107-112] można stwierdzić, że przebieg stabilizacji metali w warunkach prostych dwustopniowych programów obciążenia można przewidywać na podstawie wyników badań stałoamplitudowych. Złożony charakter obciążenia eksploatacyjnego oraz wpływ na przebieg stabilizacji dużej grupy czynników powoduje, że niezbędna jest weryfikacja powyższych spostrzeżeń w warunkach obciążenia programowanego o zróżnicowanych parametrach i postaci.

Do realizacji celu pracy niezbędne są badania zmęczeniowe prowadzone w warunkach obciążenia stałoamplitudowego i nieregularnego z wykorzystaniem próbek wykonanych z materiałów o zróżnicowanych własnościach cyklicznych. Praktyczne zastosowanie uzyskanych wyników wymaga między innymi określenia wpływu na przebieg stabilizacji takich parametrów programów obciążenia, jak wartość maksymalna obciążenia występującego w programie oraz współczynnika wypełnienia widma. W celu sformułowania wniosków o charakterze ogólnym analiza porównawcza własności cyklicznych powinna być prowadzona z wykorzystaniem różnych parametrów pętli histerezy. Wyznaczone w różnych okresach trwałości dane materiałowe powinny umożliwić określenie wpływu przebiegu stabilizacji własności cyklicznych na trwałość zmęczeniową.

3. OPIS BADAŃ I UZYSKANE WYNIKI

3.1. CEL I ZAKRES BADAŃ WŁASNYCH

Zasadniczym celem eksperymentalnych badań własnych było uzyskanie przebiegów zmian podstawowych parametrów pętli histerezy w zróżnicowanych warunkach obciążenia. Celem dodatkowym badań było wykonanie wykresów zmęzeniowych dla badanych materiałów, niezbędnych podczas weryfikacji zaproponowanej w pracy metody obliczeń trwałości zmęczeniowej, bazującej na chwilowych własnościach cyklicznych. Badania własne obejmowały realizację prób zmęzeniowych w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych i nieregularnych z wykorzystaniem próbek wykonanych z trzech metali. Zakres przeprowadzonych badań przedstawiono w postaci schematu blokowego na rysunku 3.1.



Rys. 3.1. Zakres badań własnych

3.2. OPIS BADAŃ

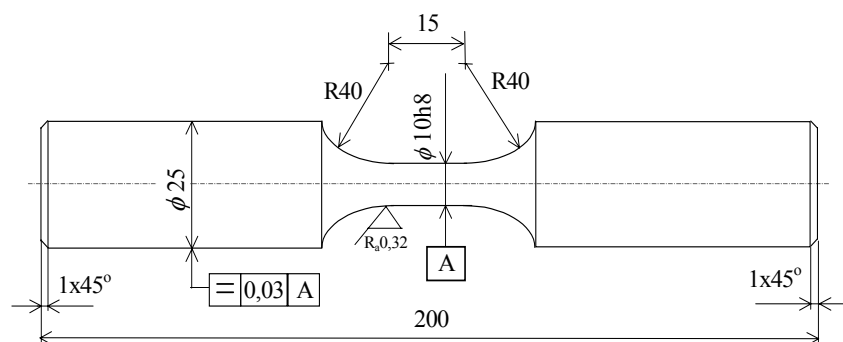
3.2.1. Próbki do badań

Do badań przyjęto trzy metale stosowane w budowie maszyn, tj. normalizowaną stal C45, stal stopową 30HGSA ulepszaną cieplnie oraz stop aluminium AW-2024. Materiały te charakteryzowały się istotnym zróżnicowaniem własności statycznych i cyklicznych. Miało to duże znaczenie praktyczne ze względu na możliwość poszerzenia analizy uzyskanych wyników badań, a tym samym uogólnienia wniosków sformułowanych na podstawie badań. Podstawowe własności wytrzymałościowe materiałów wykorzystywanych podczas badań zestawiono w tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Parametry wytrzymałościowe metali przyjętych do badań [158]

Parametr	Jednostka	Materiał		
		stal C45	stal 30HGSA	stop AW-2024
R_{eH}	MPa	446,3	936,7	321,7
U_{ReH}		1,04	2,15	0,76
R_m		713,3	1030	514,7
U_{Rm}		1,65	2,37	1,2
E		215000	207000	75000
U_E		10	10	5
σ_{cpl}		355	562	415
U		1,04	2,15	0,76
A_5		%	22	9,5
U_A	0,26		0,26	0,26
R_m/R_{eH}	-	1,6	1,1	1,6
σ_{cpl}/R_{eH}		0,75	0,6	1,27

Przyjęte do badań materiały miały postać prętów ciągnionych o średnicy $\phi 25$ mm. Próbki do badań zmęczeniowych wykonano zgodnie z [N2]. Kształt oraz wymiary próbek przedstawiono na rysunku 3.2.



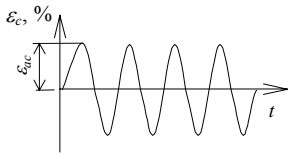
Rys. 3.2. Próbki wykorzystywane podczas badań zmęczeniowych

3.2.2. Programy obciążenia

Zgodnie z przyjętym zakresem pracy (rys. 3.1) w ramach badań własnych wykonano próby zmęczeniowe w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych oraz próby zmęczeniowe w warunkach obciążeń losowych i programowanych.

Obciążenia stałoaamplitudowe zrealizowano na pięciu poziomach odkształcenia w warunkach kontrolowanego odkształcenia całkowitego $\varepsilon_{ac} = \text{const}$. Na każdym poziomie odkształcenia realizowano trzy próby zmęczeniowe. Podczas badań rejestracji podlegały pierwsze trzy cykle obciążenia, a następnie te, które charakteryzowały się procesem cyklicznego osłabienia materiału, jego umocnienia lub inicjacji pęknięcia zmęczeniowego. Jako kryterium zniszczenia próbek podczas badań zmęczeniowych przyjęto 5% obniżenie szczytowego naprężenia w półcyklu rozciągania po okresie stabilizacji własności zmęczeniowych. Czas próbkowania sygnału siły obciążającej próbkę i odkształcenia wynosił 0,025 s, co przy częstotliwości obciążenia $f = 0,2$ Hz pozwalało opisać pętlę histerezy 200 punktami. Parametry badań w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych zestawiono w tabeli 3.2.

Tabela 3.2. Parametry obciążeń stałoaamplitudowych

Schemat programu	Nazwa programu	Parametry	
		stal C45, stal 30HGSA	stop AW-2024
	Obciążenie stałoaamplitudowe (C)	$\varepsilon_{ac} = 0,35\%$ $\varepsilon_{ac} = 0,5\%$ $\varepsilon_{ac} = 0,8\%$ $\varepsilon_{ac} = 1,0\%$ $\varepsilon_{ac} = 2,0\%$ $f = 0,2$ Hz	$\varepsilon_{ac} = 0,5\%$ $\varepsilon_{ac} = 0,65\%$ $\varepsilon_{ac} = 0,8\%$ $\varepsilon_{ac} = 1,0\%$ $\varepsilon_{ac} = 1,5\%$ $f = 0,2$ Hz

Podczas badań mających na celu ocenę wpływu postaci programu obciążenia na trwałość zmęczeniową i przebieg stabilizacji stosowano obciążenia o losowym następcie cykli w programie, nazywane w rozprawie obciążeniami losowymi, oraz obciążenia programowane. Obciążenia losowe opracowano wykorzystując do tego celu funkcję gęstości prawdopodobieństwa zgodną z rozkładem beta. W praktyce inżynierskiej bardzo często przebiegi obciążenia eksploatacyjnego opisuje się z wykorzystaniem rozkładu gęstości prawdopodobieństwa. Dla wielu maszyn i urządzeń znane są np. rozkłady amplitud naprężenia występujące w przebiegach obciążenia eksploatacyjnego [30, 146, 152]. Rozkład beta posiada szereg zalet, m.in. jest rozkładem dwuparametrycznym oraz dwustronnie ograniczonym. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa przyjmuje wartości z przedziału 0÷1, a rozkład wartości amplitud w programie obciążenia można opisać funkcją:

$$f(\varepsilon_{ac}) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} \varepsilon_{ac}^{\alpha-1} (1 - \varepsilon_{ac})^{\beta-1} \quad (3.1)$$

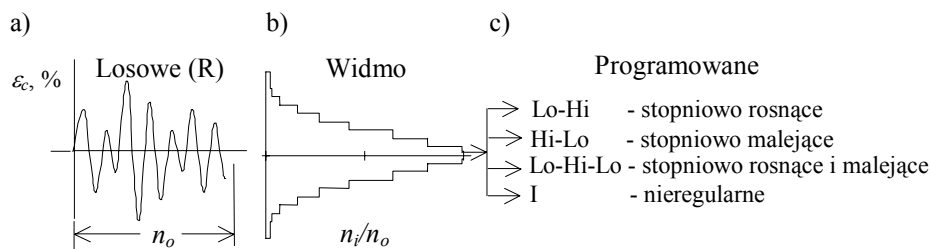
gdzie:

B – funkcja beta opisana funkcją gamma; $B(\alpha, \beta) = \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) / \Gamma(\alpha + \beta)$,
 α i β – parametry rozkładu beta.

Wykorzystując funkcję rozkładu beta, wygenerowano bloki obciążenia o pojemności $n_o = 100$ cykli i losowym (zgodnym z rozkładem beta) następnym amplitud odkształcenia ε_{ac} w programie obciążenia. Przebiegi losowe charakteryzowano wartością maksymalnej amplitudy odkształcenia całkowitego ε_{acmax} w bloku obciążenia oraz współczynnikiem wypełnienia widma ζ odniesionym do amplitudy odkształcenia całkowitego w postaci:

$$\zeta = \sum_{j=1}^k \frac{\varepsilon_{acj}}{\varepsilon_{acmax}} \cdot \frac{n_j}{n_c} \quad (3.2)$$

Wygenerowane przebiegi losowe poddano schematyzacji, uzyskując blokowe widmo obciążenia, a tym samym możliwość opracowania obciążenia programowanego o nieregularnym następnym stopni w bloku. Sposób postępowania podczas opracowywania obciążeń programowanych przedstawiono na rysunku 3.3.



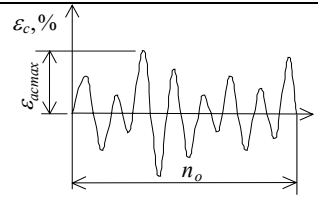
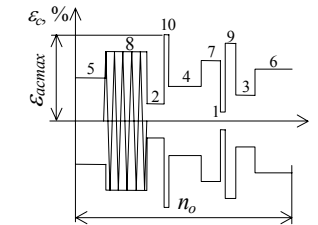
Rys. 3.3. Przygotowanie blokowych programów obciążenia:

- przebieg obciążenia o losowym następnym cykli,
- widmo obciążenia,
- obciążenia programowane

Badania dotyczące wpływu postaci i parametrów obciążenia na przebieg stabilizacji prowadzono dla obciążenia losowego (R) oraz programowanego (I). Parametry zrealizowanych programów zestawiono w tabeli 3.3.

W celu określenia wpływu kolejności stopni w bloku na trwałość i przebieg stabilizacji, oprócz obciążeń programowanych o nieregularnym następnym stopni (I), zrealizowano dodatkowo badania w warunkach obciążeń programowanych o różnej sekwencji stopni w bloku. Były to obciążenia: narastające Lo-Hi, malejące Hi-Lo i stopniowo rosnące, a następnie malejące Lo-Hi-Lo.

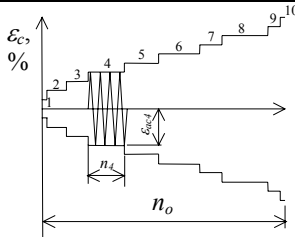
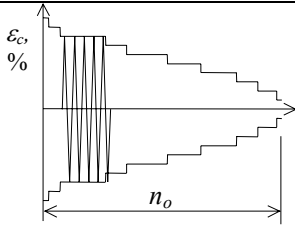
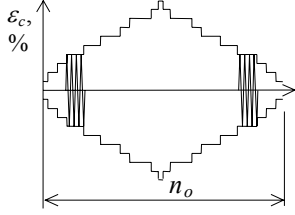
Tabela 3.3. Parametry obciążeń losowych i programowanych

Przebieg obciążenia	Nazwa programu	Parametry			
		$\varepsilon_{acmax}, \%$			pozostałe
		C45	30HGSA	AW-2024	
	losowe (R)	1,5 1,0 0,8 0,5 0,35	1,5 0,8 0,35	0,8 0,5 0,35	$\zeta = 0,34$ $\zeta = 0,56$ $\zeta = 0,77$ $n_o = 100$ $k = 10$
	programowane (I)				

Badania w warunkach obciążeń programowanych o różnej sekwencji stopni w bloku zrealizowano dla jednego poziomu odkształcenia maksymalnego w programie $\varepsilon_{acmax} = 1,5\%$ – dla stali C45 i stali 30HGSA oraz $\varepsilon_{acmax} = 0,8\%$ – dla stopu AW-2024. Badania w warunkach programów o różnej sekwencji stopni prowadzono dla jednej wartości współczynnika wypełnienia widma $\zeta = 0,56$. Parametry programów obciążenia o różnej sekwencji stopni w bloku zestawiono w tabeli 3.4.

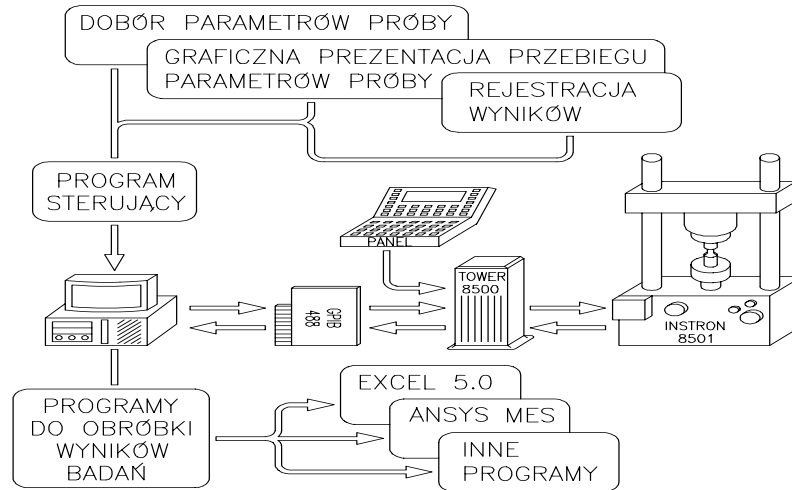
Podczas badań w warunkach obciążeń losowych i programowanych, podobnie jak w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych, parametrem sterującym próbą zmęczeniową było odkształcenie całkowite ε_c części pomiarowej próbki mierzone przy wykorzystaniu ekstensometru. Prędkość przyrostu odkształcenia całkowitego części pomiarowej próbki wynosiła $1\% \cdot s^{-1}$. Podobnie jak podczas badań w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych dla każdej sekwencji obciążenia programowanego realizowano po trzy próby zmęczeniowe. Podczas badań w warunkach obciążeń losowych i programowanych rejestrowano chwilowe wartości siły obciążającej próbkę oraz jej odkształcenia dla całych wybranych bloków obciążenia o pojemności $n_o = 100$ cykli.

Tabela 3.4. Zestawienie parametrów obciążeń programowanych o różnej sekwencji stopni

Przebieg obciążenia	Nazwa programu	Parametry			pozostałe
		n_i	$\varepsilon_{acj}, \%$		
			C45, 30HGSA	AW-2024	
	stopniowo rosnące (Lo-Hi)	$n_1 = 2$	$\varepsilon_{ac1} = 0,15$	$\varepsilon_{ac1} = 0,08$	$\zeta = 0,56$ $n_o = 100$ $k = 10$
		$n_2 = 8$	$\varepsilon_{ac2} = 0,30$	$\varepsilon_{ac2} = 0,16$	
		$n_3 = 9$	$\varepsilon_{ac3} = 0,45$	$\varepsilon_{ac3} = 0,24$	
		$n_4 = 15$	$\varepsilon_{ac4} = 0,6$	$\varepsilon_{ac4} = 0,32$	
		$n_5 = 14$	$\varepsilon_{ac5} = 0,75$	$\varepsilon_{ac5} = 0,40$	
		$n_6 = 17$	$\varepsilon_{ac6} = 0,9$	$\varepsilon_{ac6} = 0,48$	
		$n_7 = 9$	$\varepsilon_{ac7} = 1,05$	$\varepsilon_{ac7} = 0,56$	
		$n_8 = 19$	$\varepsilon_{ac8} = 1,2$	$\varepsilon_{ac8} = 0,64$	
		$n_9 = 5$	$\varepsilon_{ac9} = 1,35$	$\varepsilon_{ac9} = 0,72$	
		$n_{10} = 2$	$\varepsilon_{ac10} = 1,5$	$\varepsilon_{ac10} = 0,8$	
			$\varepsilon_{acmax} = 1,5$	$\varepsilon_{acmax} = 0,8$	
	stopniowo malejące (Hi-Lo)				
	stopniowo rosnące i malejące (Lo-Hi-Lo)				

3.2.3. Aparatura badawcza

Wszystkie badania eksperymentalne przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8501. W celu ich realizacji w warunkach obciążeń losowych i programowanych opracowano program komputerowy umożliwiający sterowanie i rejestrację wyników z maszyny wytrzymałościowej z poziomu zewnętrznego komputera, komunikującego się z maszyną przez standardowy interfejs GPIB. Danymi wejściowymi do programu sterującego były podane w pliku tekstowym wartości kolejnych amplitud odkształcenia, występujące w programie obciążenia. Oprogramowanie umożliwiło również automatyczną rejestrację danych, jak również graficzną prezentację wyników. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 3.4.



Rys. 3.4. Schemat stanowiska badawczego

3.3. WYNIKI BADAŃ

3.3.1. Zmiany parametrów pętli histerezy

A. Obciążenia stałoaamplitudowe (C)

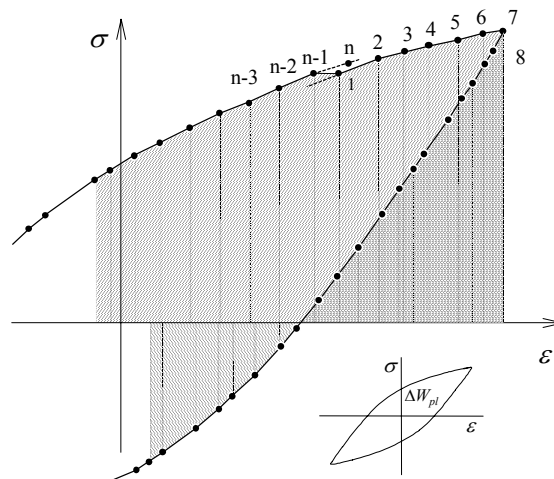
W celu oceny przebiegu stabilizacji, jak również wyznaczenia wykresów zmęzeniowych, opisanych np. zależnością (2.7), (2.8) czy (2.15), niezbędna jest analiza parametrów pętli histerezy w funkcji liczby cykli obciążenia. Jako parametry opisujące przebieg stabilizacji własności cyklicznych przyjęto: amplitudę naprężenia σ_a , amplitudę odkształcenia plastycznego ε_{ap} i energię odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} . Parametry te określono, wykorzystując zarejestrowane podczas badań dla poszczególnych cykli obciążenia chwilowe wartości siły obciążającej i odkształcenia próbki. Wartości chwilowe naprężenia σ obliczano, dzieląc wartość chwilową siły obciążającej próbkę przez pole przekroju początkowego części pomiarowej. Do obliczeń energii odkształcenia plastycznego podczas badań wykorzystywano zależność zaproponowaną w pracy [155] o postaci:

$$\Delta W_{pl} = \left[\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} (\sigma_i + \sigma_{i+1}) (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) \right] + (\sigma_n + \sigma_1) (\varepsilon_1 - \varepsilon_n) \quad (3.3)$$

gdzie:

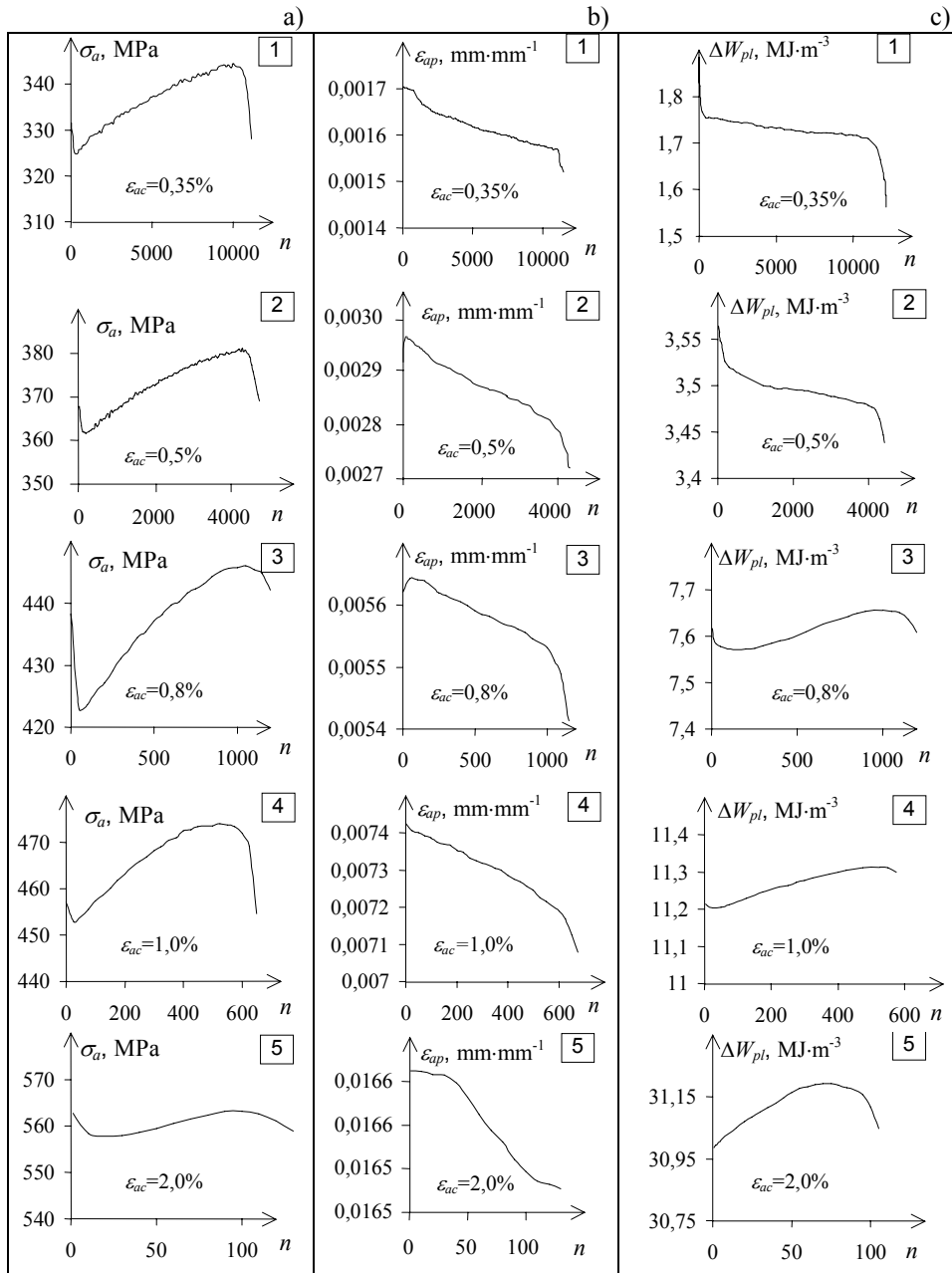
n – liczba zapisów chwilowych wartości siły i odkształcenia podczas jednego cyklu obciążenia ($n = 200$ punktów).

Schemat przebiegu obliczeń energii ΔW_{pl} przedstawiono na rysunku 3.5.

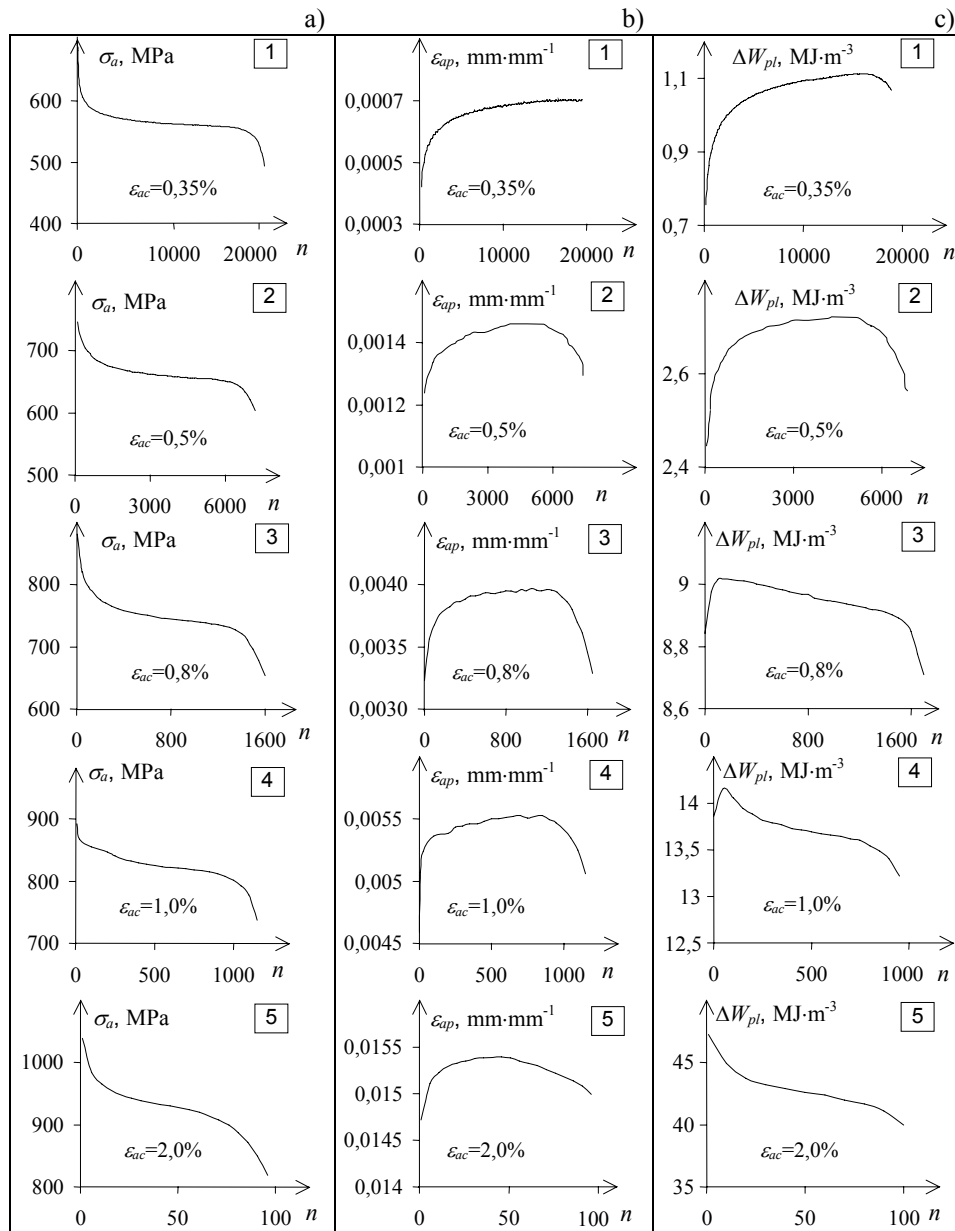


Rys. 3.5. Schemat numerycznego obliczania pola pętli histerezy [155]

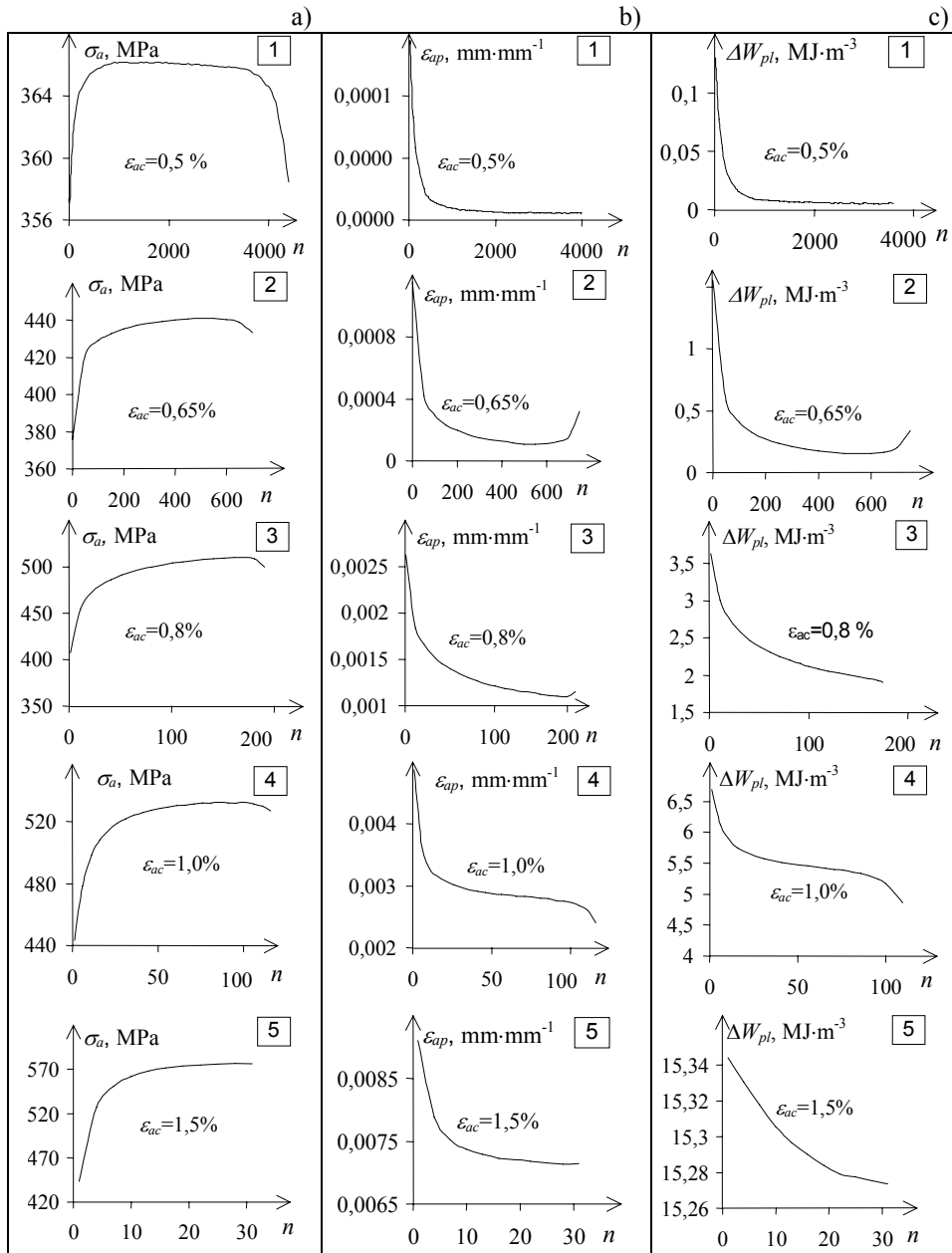
Przykładowe przebiegi zmian wymienionych parametrów pętli histerezy w funkcji liczby cykli obciążenia dla pięciu poziomów odkształceń całkowitych i trzech materiałów przedstawiono na rysunkach 3.6÷3.8.



Rys. 3.6. Zmiany parametrów pętli histerezy podczas obciążenia stałoamplitudowego próbek ze stali C45: a) σ_a , b) ϵ_{ap} , c) ΔW_{pl}



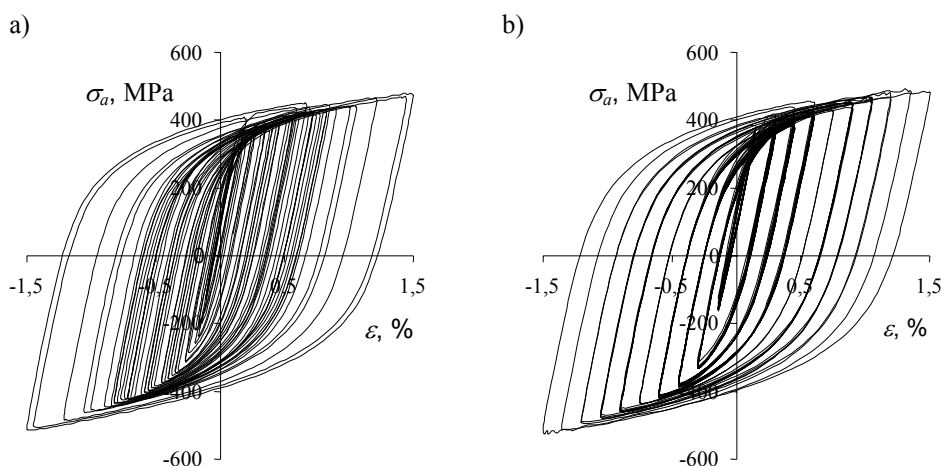
Rys. 3.7. Zmiany parametrów pętli histerezy podczas obciążenia stałoaamplitudowego próbek ze stali 30HGSA: a) σ_a , b) ϵ_{ap} , c) ΔW_{pl}



Rys. 3.8. Zmiany parametrów pętli histerezy podczas obciążenia stałoaamplitudowego próbek ze stopu AW-2024: a) σ_a , b) ϵ_{ap} , c) ΔW_{pl}

B. Obciążenia losowe i programowane

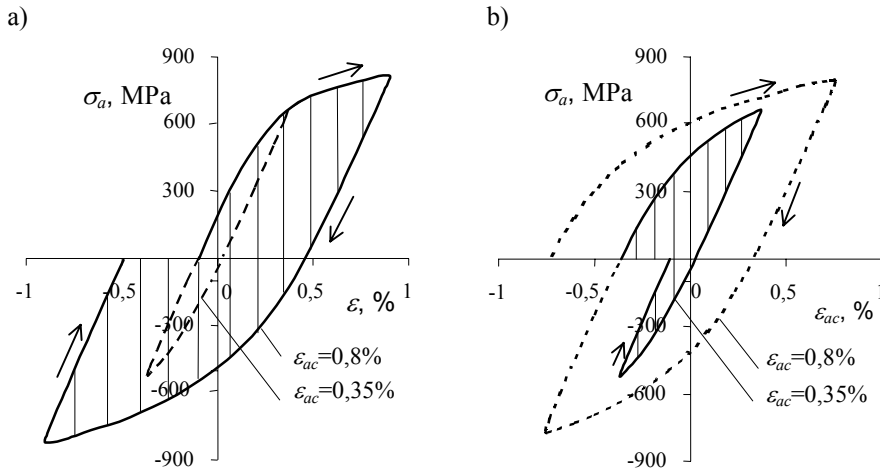
Zarejestrowane podczas badań chwilowe wartości siły obciążającej i odkształcenia wykorzystano do określenia podstawowych parametrów pętli histerezy dla poszczególnych cykli bloków obciążenia. Na rysunku 3.9 pokazano przykładowe pętle histerezy zarejestrowane w jednym bloku obciążenia losowego (R) i programowanego (I) próbek ze stali C45.



Rys. 3.9. Pętle histerezy zarejestrowane podczas badań ($\varepsilon_{acmax} = 1,5\%$, $\zeta = 0,56$):
a) obciążenie losowe (R), b) obciążenie programowane (I)

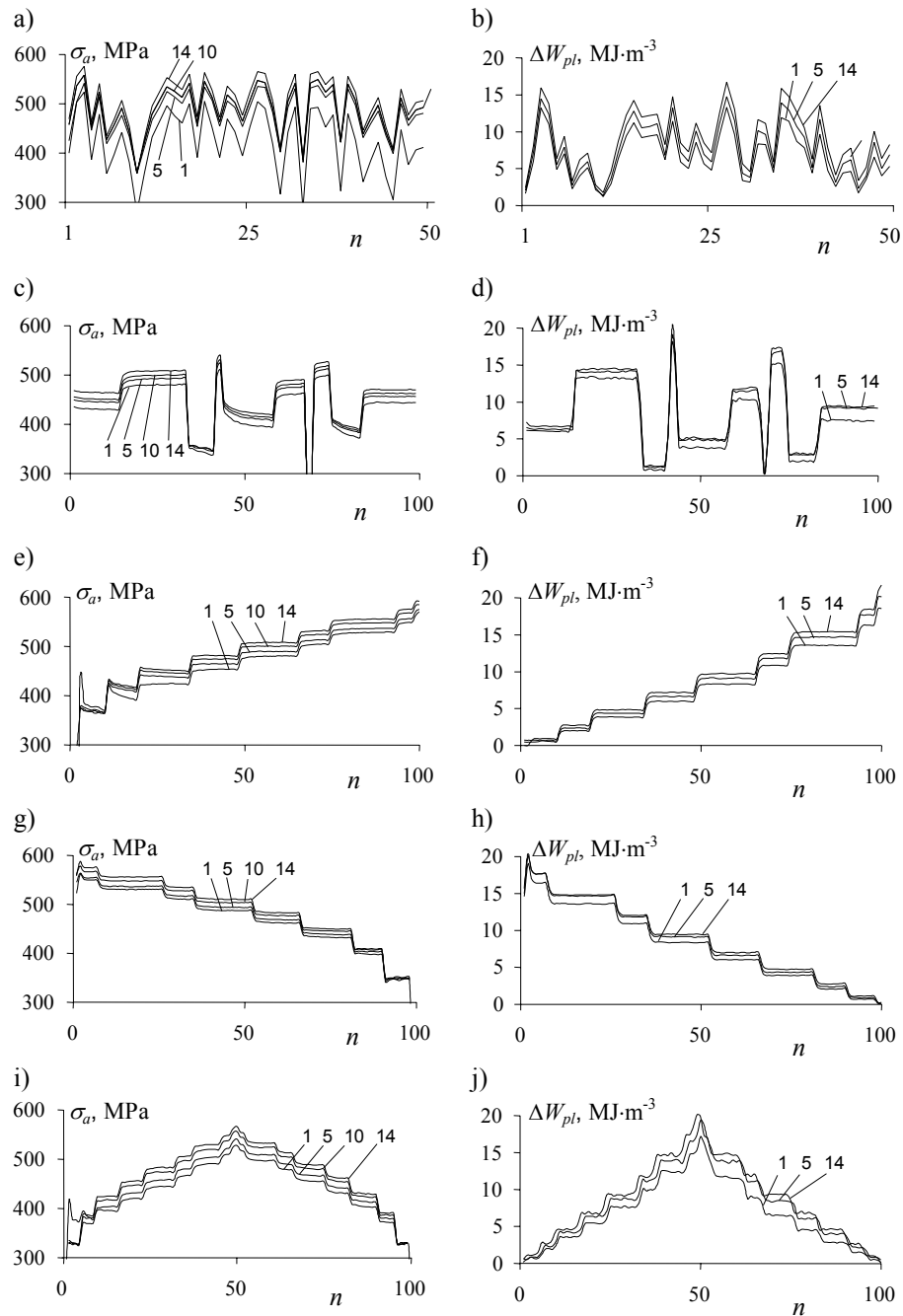
Jak należało oczekiwać, poszczególne cykle obciążenia programowanego (rys. 3.9b) powodują uzyskanie poza okresami zmiany poziomów odkształcenia „zamkniętych” pętli histerezy. W przypadku obciążenia losowego pętle histerezy najczęściej nie ulegają „zamknięciu”. Powoduje to konieczność przyjęcia odpowiednich założeń do obliczeń energii ΔW_{pl} w warunkach obciążeń losowych. Przyjęty w pracy sposób postępowania podczas obliczeń energii ΔW_{pl} dla poszczególnych cykli obciążenia losowego pokazano w sposób schematyczny na rysunku 3.10.

Z przedstawionych schematów wynika, że podczas obliczeń energii ΔW_{pl} w zależności od sekwencji zmiany obciążenia w kolejnych cyklach obciążenia może występować jej niedoszacowanie lub zawyżenie w stosunku do energii ΔW_{pl} dla pętli uzyskanej na tym samym poziomie odkształcenia w warunkach obciążenia stałoamplitudowego czy programowanego. Niedoszacowanie występuje na poziomie wyższym przy sekwencji zmiany poziomów mały–duży (rys. 3.10a), natomiast zawyżenie na poziomie niższym przy sekwencji zmiany poziomów duży–mały (rys. 3.10b).

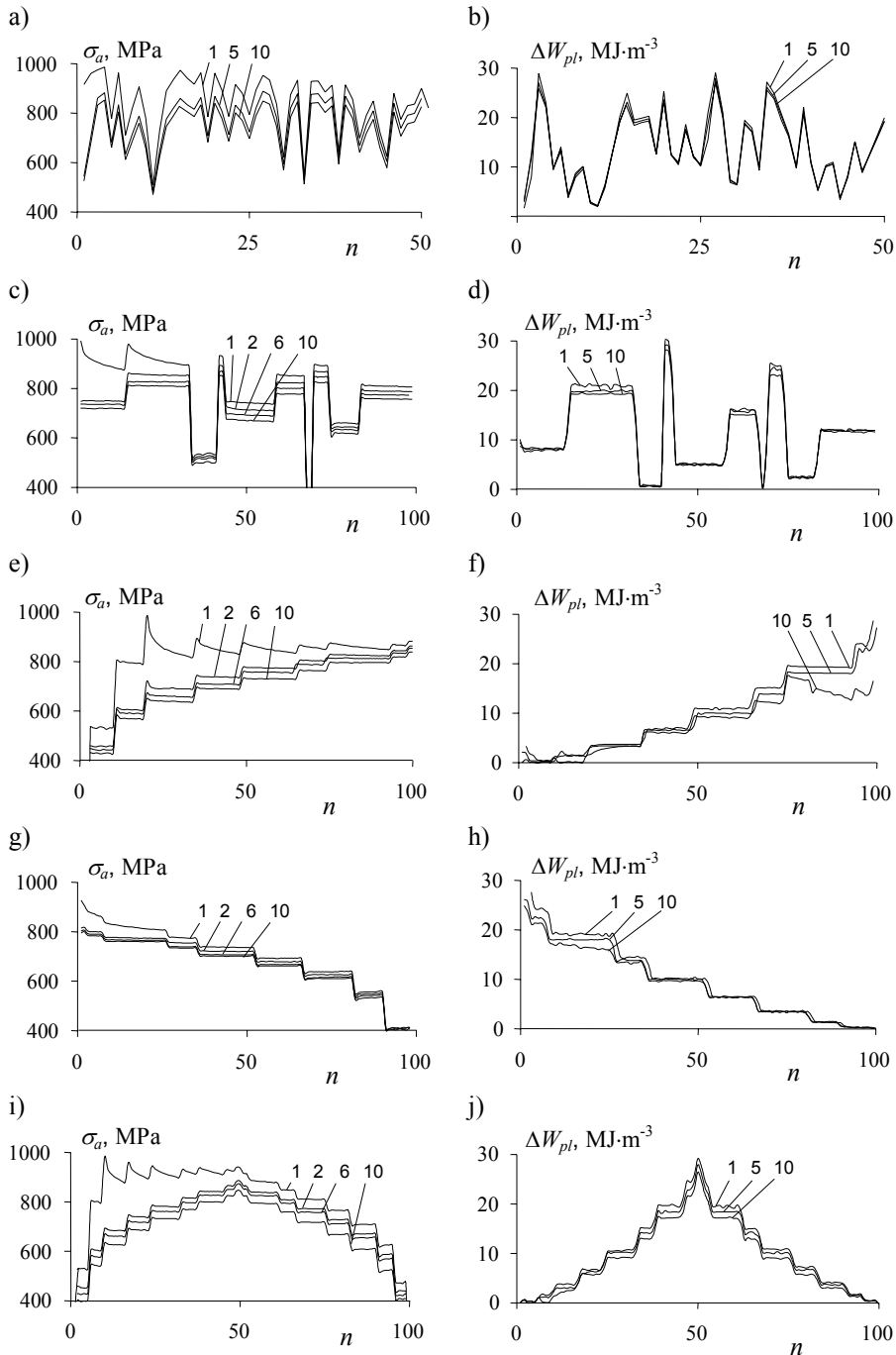


Rys. 3.10. Energia ΔW_{pl} w warunkach obciążenia losowego: a) dla $\varepsilon_{ac} = 0,8\%$ – zmiana obciążenia z poziomu mniejszego na większy, b) dla $\varepsilon_{ac} = 0,35\%$ – zmiana poziomu obciążenia z większego na mniejszy

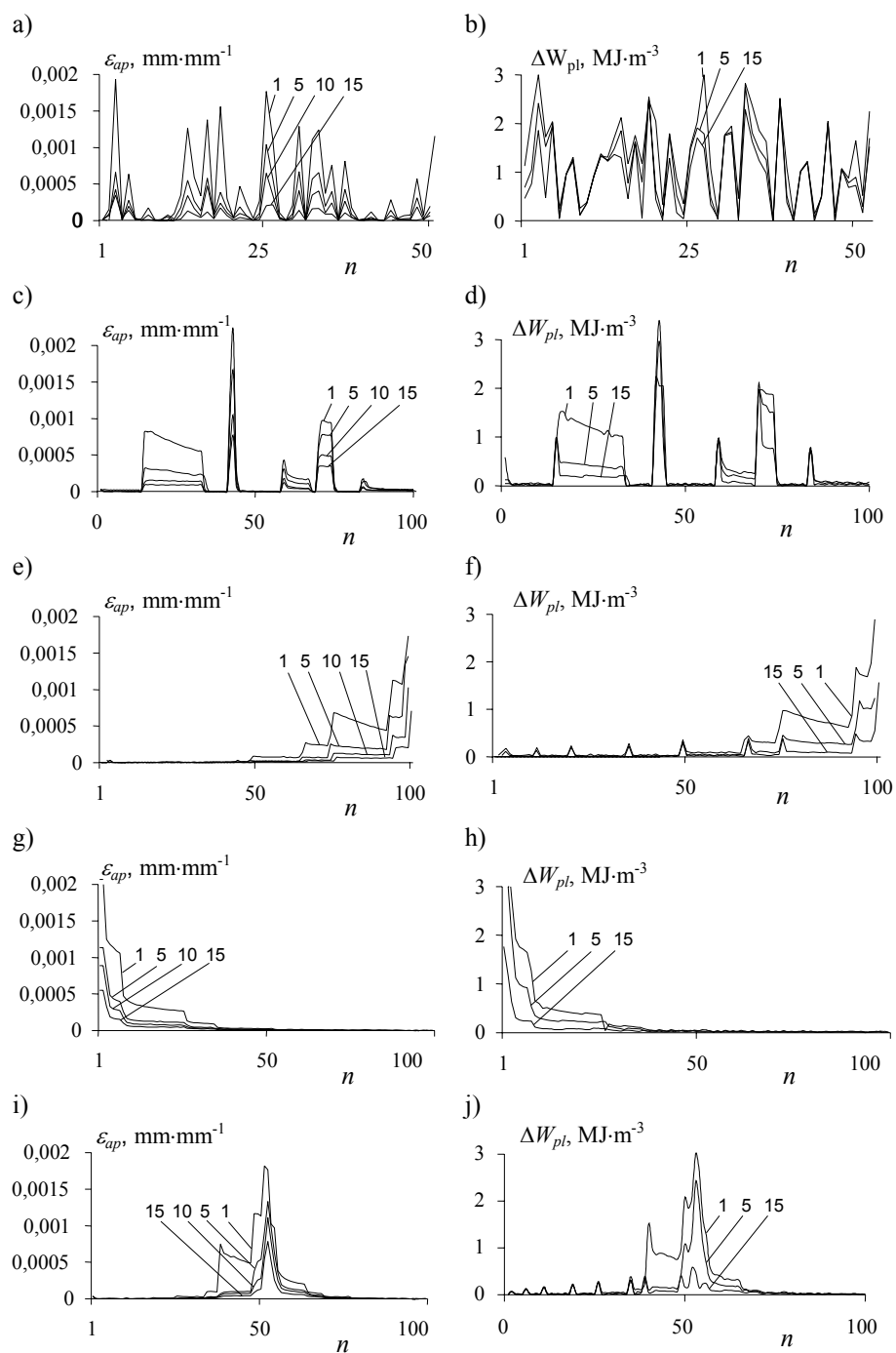
Zmiany własności cyklicznych materiałów w warunkach obciążeń losowych i programowanych oceniano na podstawie analizy przebiegu tych samych parametrów pętli histerezy, które wykorzystywano podczas przedstawiania wyników badań uzyskanych w warunkach obciążeń stałoamplitudowych. Dla wszystkich zrealizowanych sekwencji obciążeń losowych i programowanych obserwowano podobne przebiegi zmian własności cyklicznych. Ich szczegółową analizę przedstawiono w rozdziale 4. W celu zobrazowania, na rysunkach 3.11÷3.13 pokazano przykładowe wykresy zmian dwóch parametrów pętli histerezy w blokach obciążenia losowego i programowanego rejestrowanych w różnych okresach trwałości zmęczeniowej. W przypadku próbek ze stali C45 i stali 30HGSA wykresy wykonano, wykorzystując naprężenia σ_a i energię odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} , a w przypadku stopu AW-2024 odkształcenia plastyczne ε_{ap} i energię odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} . Celem wyboru tych parametrów pętli histerezy do przedstawienia wyników badań było porównanie wielkości zmian klasycznych parametrów pętli histerezy (naprężenie i odkształcenie) ze zmianami parametru uwzględniającego wzajemne interakcje pomiędzy nimi. Na rysunkach cyframi oznaczono numery powtórzenia bloku, dla którego wykonano wykres. W celu poprawy czytelności wykresów parametrów pętli histerezy uzyskanych w warunkach obciążeń losowych ograniczono je do połowy pojemności bloku programu obciążenia ($0,5n_o = 50$ cykli).



Rys. 3.11. Zmiany σ_a – (a,c,e,g,i), ΔW_{pl} – (b,d,f,h,j) dla zróżnicowanych programów obciążenia próbek ze stali C45 ($\zeta = 0,56$ i $\varepsilon_{acmax} = 1,5\%$): a,b) R, c,d) I, e,f) Lo-Hi, g,h) Hi-Lo, i,j) Lo-Hi-Lo



Rys. 3.12. Zmiany σ_a – (a,c,e,g,i), ΔW_{pl} – (b,d,f,h,j) dla zróżnicowanych programów obciążenia próbek ze stali 30HGSA ($\zeta = 0,56$ i $\varepsilon_{acmax} = 1,5\%$): a,b) R, c,d) I, e,f) Lo-Hi, g,h) Hi-Lo, i,j) Lo-Hi-Lo

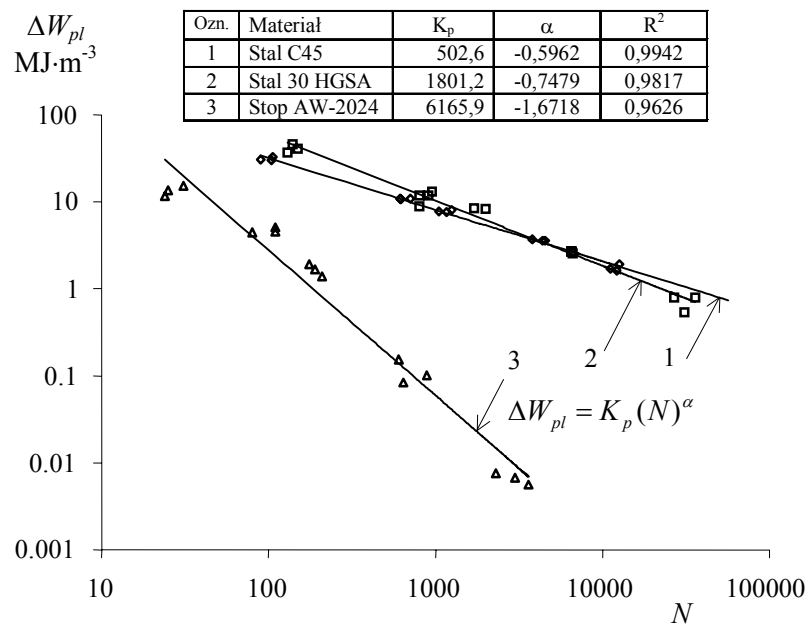


Rys. 3.13. Zmiany σ_a – (a,c,e,g,i), ΔW_{pl} – (b,d,f,h,j) dla zróżnicowanych programów obciążenia próbek ze stopu AW-2024 ($\zeta = 0,56$ i $\varepsilon_{acmax} = 0,8\%$): a,b) R, c,d) I, e,f) Lo-Hi, g,h) Hi-Lo, i,j) Lo-Hi-Lo

3.3.2. Wykresy zmęczeniowe

A. Obciążenia stałoamplitudowe (C)

Uzyskane podczas badań zmęczeniowych w warunkach obciążeń stałoamplitudowych na poszczególnych poziomach odkształcenia ε_{ac} liczby cykli do pęknięcia zmęczeniowego N opracowano w postaci wykresów zmęczeniowych, które wykonano w układzie współrzędnych podwójnie logarymicznych: liczba cykli obciążenia do pęknięcia N – energia odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} . Opracowanie wyników polegało na wyznaczeniu metodą najmniejszych kwadratów prostej regresji opisanej równaniem (2.15). Ze względu na występujące zmiany parametrów pętli histerezy (rys. 3.6÷3.8) i trudności określenia wyraźnego okresu stabilizacji na poszczególnych poziomach odkształcenia, niezbędne do wykonania wykresów wartości energii ΔW_{pl} , przyjęto za pracę [61] z okresów odpowiadających połowie trwałości zmęczeniowej ($n = 0,5N$). Uzyskane dla badanych materiałów wykresy zmęczeniowe oraz ich parametry przedstawiono na rysunku 3.14.

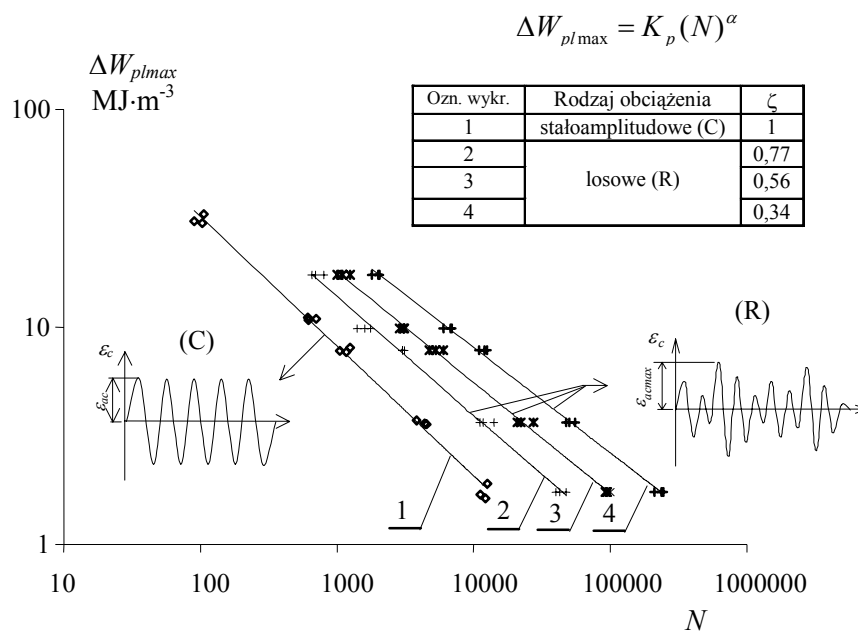


Rys. 3.14. Wykresy zmęczeniowe badanych materiałów ujęciu energetycznym

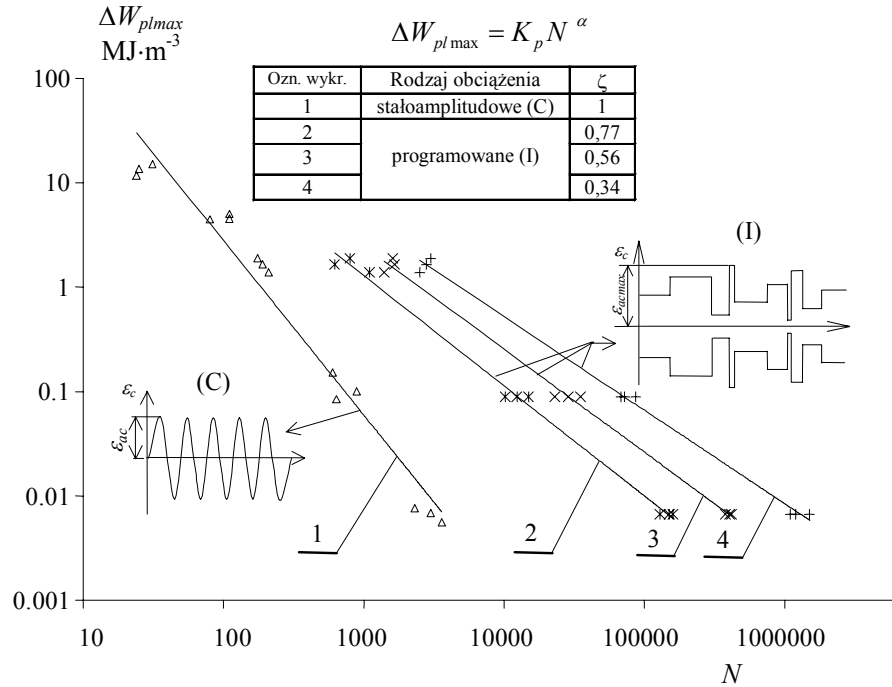
B. Obciążenia losowe (R) i programowane o nieregularnym następstwie stopni (I)

W przypadku trzech badanych materiałów obserwowano podobny wpływ parametrów programu obciążenia (współczynnika wypełniania widma ζ i am-

plitudy odkształcenia ε_{acmax}) na wyniki trwałości. Wpływ ten odzwierciedla położenie wykresów zmęczeniowych dla wyników badań uzyskanych w warunkach obciążeń losowych i programowanych w stosunku do wykresów zmęczeniowych uzyskanych w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych. Przykłady wykresów zmęczeniowych w układzie współrzędnych podwójnie logarytmicznych $N - \Delta W_{plmax}$, ilustrujące wpływ postaci i parametrów programu na trwałość, przedstawiono na rysunkach 3.15 (dla obciążenia losowego i stali C45) oraz 3.16 (dla obciążenia programowanego i stali 30HGSA). W celu ułatwienia analizy porównawczej uzyskanych wyników na rysunkach naniesiono dodatkowo wykresy zmęczeniowe uzyskane dla tych materiałów w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych. Wartości parametrów wykresów zmęczeniowych wykonanych na podstawie zrealizowanych badań zestawiono w tabeli 3.5.



Rys. 3.15. Trwałość zmęczeniowa stali C45 w warunkach obciążenia losowego i stałoaamplitudowego



Rys. 3.16. Trwałość zmęczeniowa stali 30HGSA w warunkach obciążenia programowanego i stałoaamplitudowego


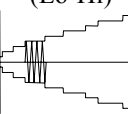
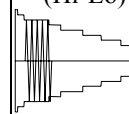
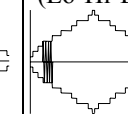
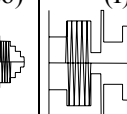
Tabela 3.5. Parametry wykresów zmęczeniowych uzyskanych w warunkach obciążeń losowych i programowanych

Materiał	Obciążenie	ξ	$K_p, \text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$	α	R^2
Stal C45	losowe (R)	0,77	598,5219	-0,5454	0,9933
		0,56	613,1705	-0,5107	0,9966
		0,34	700,3640	-0,4848	0,9977
	programowane (I)	0,77	705,1349	-0,5611	0,9974
		0,56	755,4896	-0,5303	0,9960
		0,34	830,9768	-0,5028	0,9977
Stal 30HGSA	losowe (R)	0,77	5323,9150	-0,8138	0,9900
		0,56	7698,3657	-0,7903	0,9933
		0,34	7296,2750	-0,7208	0,9986
	programowane (I)	0,77	4926,5324	-0,8075	0,9989
		0,56	7245,5061	-0,7866	0,9982
		0,34	7007,6972	-0,7240	0,9990
Stop AW-2024	losowe (R)	0,77	1894,9516	-1,0556	0,9950
		0,56	2280,9040	-0,9878	0,9955
		0,34	2011,4253	-0,8964	0,9958
	programowane (I)	0,77	1440,9263	-1,0056	0,9949
		0,56	1976,1204	-0,9776	0,9959
		0,34	2135,3851	-0,9173	0,9979

C. Obciążenia programowane o różnej sekwencji stopni w bloku

Wyniki trwałości zmęczeniowej uzyskane podczas badań w warunkach obciążeń programowanych o różnej sekwencji stopni w programie (program Lo-Hi, Hi-Lo, Lo-Hi-Lo) zestawiono w tabeli 3.6. Dla ułatwienia analizy porównawczej wyników trwałości w tabeli zamieszczono również wyniki badań zmęczeniowych w warunkach obciążeń losowych (R) i programowanych (I).

Tabela 3.6. Wyniki trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń losowych i programowanych o zróżnicowanej sekwencji stopni w bloku

Material	Nr próbki	ϵ_{acmax} %	ξ	Liczba nawrotów $2N_f$, Liczba powtórzeń programu λ										
				(R)		(Lo-Hi)		(Hi-Lo)		(Lo-Hi-Lo)		(I)		
				λ	$2N_f$	λ	$2N_f$	λ	$2N_f$	λ	$2N_f$	λ	$2N_f$	
C45	1	1,5	0,56											
	2			17,7	3540	17,2	3450	17,8	3568	18,7	3754	14,2	2830	
	3			16,0	3201	15,7	3150	14,5	2900	17,7	3540	15,1	3020	
				16,6	3330	15,3	3060	15,3	3067	15,5	3100	15,8	3160	
30HGSA	1	1,5	0,56											
	2			12,3	2470	11,0	2200	12,2	2450	13,0	2600	11,3	2250	
	3			12,8	2560	12,2	2450	11,0	2200	11,8	2350	14,3	2850	
				13,5	2710	11,7	2320	10,5	2100	12,2	2430	13,5	2700	
AW-2024	1	0,8	0,56											
	2			23,3	4660	20,7	4150	23,4	4680	23,8	4760	20,6	4120	
	3			21,2	4250	21,5	4300	21,7	4350	21,0	4200	22,7	4540	
				20,3	4060	21,3	4260	22,2	4430	23,3	4650	23,8	4760	

4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

4.1. WPLYW WIELKOŚCI ODKSZTAŁCENIA NA ZMIANY WŁASNOŚCI CYKLICZNYCH PODCZAS OBCIĄŻEŃ STAŁOAMPLITUDOWYCH

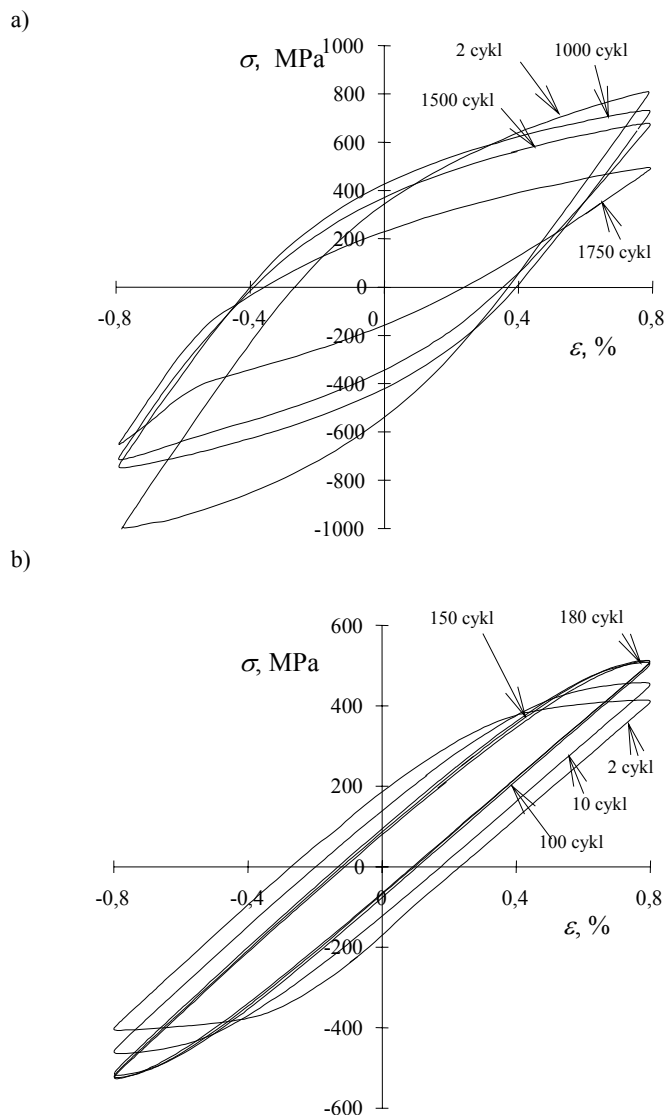
Analiza zmian parametrów pętli histerezy σ_a , ε_{ap} i ΔW_{pl} uzyskanych w warunkach obciążenia stałoamplitudowych próbek ze stali C45 na pięciu poziomach odkształcenia (rys. 3.6 – 1,2,3,4,5) uwidacznia ich zmiany w funkcji liczby cykli obciążenia. Podczas obciążenia cyklicznego materiał ten ulega na początku niewielkiemu osłabieniu, a następnie umocnieniu, które trwa aż do pęknięcia zmęczeniowego. Przedstawione zmiany własności cyklicznych są widoczne przede wszystkim w przebiegach zmian amplitud naprężenia σ_a (rys. 3.6a), jak i amplitud odkształcenia plastycznego ε_{ap} (rys. 3.6b). Na podstawie wykresów zmian energii ΔW_{pl} (rys. 3.6c) można stwierdzić, że własności cykliczne stali C45 w ujęciu energetycznym zależą od poziomu amplitudy odkształcenia ε_{ac} . Dla poziomów odkształcenia o amplitudzie $\varepsilon_{ac} \geq 0,8\%$ (rys. 3.6c – 3,4,5) energia ΔW_{pl} wzrasta wraz z liczbą cykli obciążenia, natomiast dla poziomów o amplitudzie $\varepsilon_{ac} < 0,8\%$ (rys. 3.6c – 1,2) energia ΔW_{pl} wraz z liczbą cykli obciążenia ulega zmniejszeniu.

Analiza zmian tych samych parametrów pętli histerezy dla próbek ze stali 30HGSA na poszczególnych poziomach odkształcenia (rys. 3.7) wskazuje, że cechują je również zmiany w funkcji liczby cykli obciążenia. Stopniowe zmniejszanie się amplitud naprężenia σ_a (rys. 3.7a) i jednoczesny wzrost amplitud odkształcenia ε_{ap} w funkcji liczby cykli (rys. 3.7b) na wszystkich poziomach odkształcenia ε_{ac} świadczy o ciągłym cyklicznym osłabieniu stali 30HGSA. Na podstawie analizy przebiegów zmian energii ΔW_{pl} (rys. 3.7c) można stwierdzić, że własności cykliczne stali 30HGSA w ujęciu energetycznym zależą, podobnie jak własności stali C45, od poziomu odkształcenia całkowitego. Dla poziomów $\varepsilon_{ac} = 0,35\%$ i $\varepsilon_{ac} = 0,5\%$ (rys. 3.7c – 1,2) energia ΔW_{pl} nieznacznie wzrasta wraz z liczbą cykli obciążenia, a dla pozostałych poziomów odkształcenia maleje.

Wzajemne interakcje naprężeń i odkształceń występujące w opisie energetycznym powodują, że w przypadku próbek wykonanych ze stali C45 i stali 30HGSA opis energetyczny własności cyklicznych przy wykorzystaniu energii ΔW_{pl} nie zawsze odzwierciedla własności cykliczne obserwowane przy wykorzystaniu opisu naprężeniowego czy odkształceniowego. Sytuacja jest inna w przypadku próbek ze stopu AW-2024 (rys. 3.8), gdzie charakter zmian własności cyklicznych widoczny w przebiegach σ_a i ε_{ap} odzwierciedlają również przebiegi energii ΔW_{pl} . Na wszystkich poziomach odkształcenia występują wyraźne zmiany analizowanych parametrów, tj. wzrost amplitudy naprężenia σ_a w kolejnych cyklach obciążenia (rys. 3.8a) oraz stopniowe zmniejszanie amplitudy odkształcenia plastycznego ε_{ap} (rys. 3.8b), jak i energii ΔW_{pl} (rys. 3.8c). Charakter

zmian analizowanych parametrów świadczy o cyklicznym umocnieniu próbek ze stopu AW-2024 na wszystkich poziomach odkształcenia.

Odzwierciedleniem zmian parametrów pętli histerezy w funkcji liczby cykli obciążenia są zmiany kształtu rejestrowanych w różnych okresach trwałości pętli histerezy. Na rysunku 4.1 przedstawiono przykładowe pętle na jednym poziomie odkształcenia ($\varepsilon_{ac} = 0,8\%$) uzyskane w różnych okresach trwałości dla materiału podlegającego podczas badań cyklicznemu osłabieniu (stal 30HGSA) i cyklicznemu umocnieniu (stop AW-2024).

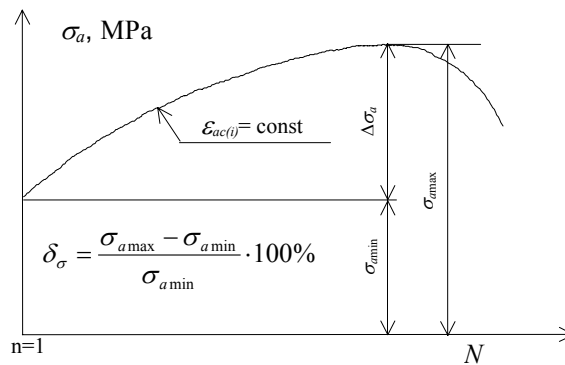


Rys. 4.1. Pętli histerezy na poziomie odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 0,8\%$:
a) stal 30HGSA, b) stop AW-2024

Na podstawie analizy przebiegów wybranych parametrów pętli histerezy oraz ich kształtu można stwierdzić, że zakres zmian własności cyklicznych zależy od poziomu amplitudy odkształcenia ε_{ac} . W celu oceny czułości wykorzystywanych podczas analizy przebiegu stabilizacji parametrów pętli histerezy (σ_a , ε_{ap} , ΔW_{pl}) wprowadzono za propozycją podaną w pracy [52] współczynniki zmian własności cyklicznych: δ_σ – dla opisu naprężeniowego, δ_ε – dla opisu odkształceniowego oraz δ_W – dla opisu energetycznego. Przykładowo, wartości współczynnika zmian własności cyklicznych dla opisu naprężeniowego δ_σ wyrażono zależnością:

$$\delta_\sigma = \left(\frac{\sigma_{a \max} - \sigma_{a \min}}{\sigma_{a \min}} \right) 100\% \quad (4.1)$$

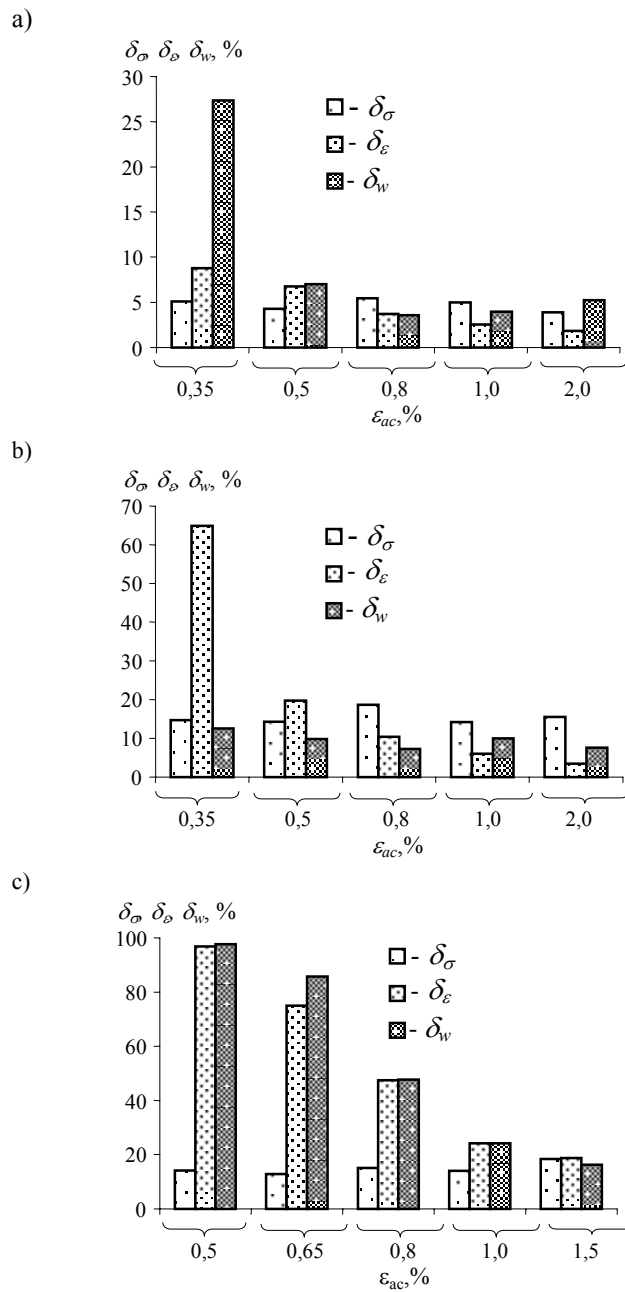
Interpretację graficzną współczynnika δ_σ przedstawiono schematycznie na rysunku 4.2.



Rys. 4.2. Graficzna interpretacja współczynnika δ_σ

Wykorzystując zależności analogiczne do (4.1), wyrażono wartości współczynników δ_ε oraz δ_W . Uzyskane wyniki obliczeń współczynników zmian własności cyklicznych dla poszczególnych poziomów amplitudy odkształcenia ε_{ac} przedstawiono w postaci wykresów na rysunku 4.3.

Analiza wykresów pozwala stwierdzić, że dla badanych materiałów najmniej czułym na zmiany własności cyklicznych jest opis naprężeniowy. Wartość δ_σ zmienia się od około 5% dla stali C45 do około 20% dla stopu aluminium AW-2024.



Rys. 4.3. Zmiany współczynników δ_σ , δ_ε oraz δ_W :
a) stal C45, b) stal 30HGSA, c) stop AW-2024

Wartość współczynnika δ_σ dla trzech badanych materiałów praktycznie nie zależy od poziomu amplitudy odkształcenia ε_{ac} . Wpływ poziomu ε_{ac} na

wielkość zmian własności cyklicznych widać natomiast wyraźnie dla opisu odkształceniowego oraz energetycznego, gdzie wartości δ_ε i δ_w wzrastają wraz z obniżaniem poziomu odkształcenia. Najwyższe wartości współczynniki δ_ε i δ_w osiągają w obszarze najniższych poziomów ε_{ac} ; wynoszą one prawie 90% dla próbek ze stopu AW-2024 i 65% dla próbek ze stali 30HGSA (opis odkształceniowy) oraz około 28% dla próbek ze stali C45 (opis energetyczny).

4.2. WPLYW CZYNNIKÓW ZWIĄZANYCH Z OBCIĄŻENIEM NA ZMIANY WŁASNOŚCI CYKLICZNYCH W WARUNKACH OBCIĄŻEŃ LOSOWYCH I PROGRAMOWANYCH

Zrealizowany program badań eksperymentalnych w warunkach obciążeń losowych i programowanych pozwolił przeprowadzić analizę wpływu czynników związanych z obciążeniem na zmiany własności cyklicznych badanych materiałów. Spośród wielu czynników mających wpływ na przebieg zmian własności cyklicznych szczegółowej analizie poddano najważniejsze, tj.:

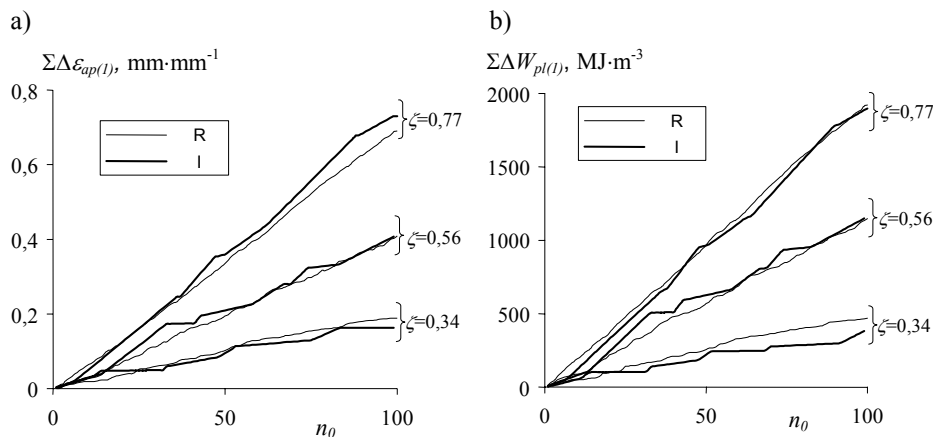
- postać programu obciążenia,
- wartość odkształcenia maksymalnego ε_{acmax} w programie obciążenia,
- wartość odkształcenia ε_{ac} na stopniu,
- współczynnik wypełnienia widma ζ ,
- sekwencję stopni w programie obciążenia.

A. Postać programu obciążenia

Na podstawie analizy wykresów σ_a , ε_{ap} oraz ΔW_{pl} , przedstawionych na rysunkach 3.11÷3.13, można stwierdzić, że w warunkach obciążenia losowego i programowanego, podobnie jak podczas obciążenia stałoamplitudowego, badane materiały charakteryzują się zmianami własności cyklicznych oraz brakiem okresu stabilizacji. Świadczą o tym zróżnicowane położenia wykresów σ_a oraz ΔW_{pl} dla poszczególnych cykli (obciążenie losowe) oraz stopni (obciążenie programowane) dla bloków obciążenia realizowanych w różnych okresach trwałości. Położenie wykresów parametrów pętli histerezy w kolejnych blokach obciążenia losowego i programowanego zależy głównie od rodzaju badanego materiału. Obydwie postaci programów obciążenia powodują występowanie podobnych zmian analizowanych parametrów pętli histerezy. Przykładowo dla stali C45 (rys. 3.11a,c) wykresy zmian σ_a dla kolejnych bloków obciążenia są położone powyżej wykresów uzyskanych dla bloków zrealizowanych wcześniej. W przypadku opisu energetycznego (rys. 3.11b,d) kolejne wykresy energii ΔW_{pl} są położone również powyżej wykresu uzyskanego dla bloku zrealizowanego wcześniej. Takie położenie wykresów świadczy o cyklicznym umocnieniu stali C45 podczas realizowanych programów obciążenia. Umocnienie to dotyczy zarówno cykli i stopni o amplitudzie odkształcenia zbliżonej do wartości maksymalnej ε_{acmax} , jak również najmniejszych poziomów odkształcenia występujących w bloku.

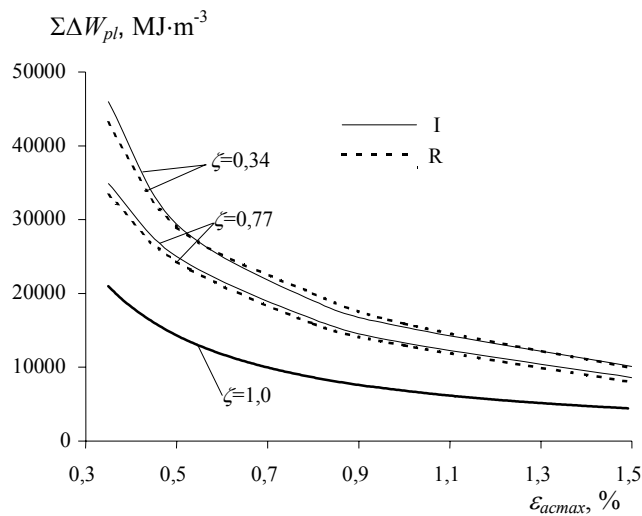
Podobny charakter zmian parametrów pętli histerezy do obserwowanych w przypadku stali C45 dotyczy wykresów uzyskanych dla próbek ze stopu AW-2024. Położenia kolejnych wykresów ε_{ap} (rys. 3.13a,c) oraz ΔW_{pl} (rys. 3.13b,d) w bloku świadczą w tym przypadku również o procesie cyklicznego umocnienia tego materiału.

W przypadku stali 30HGSA (rys. 3.12) zmiany własności cyklicznych mają charakter odwrotny w stosunku do wykresów uzyskanych dla stali C45 i stopu AW-2024. Kolejne wykresy zmian naprężenia σ_a (rys. 3.12a,c) są położone poniżej wykresów uzyskanych dla bloków obciążenia zrealizowanych wcześniej. W przypadku opisu energetycznego (rys. 3.12b,d) kolejne wykresy również znajdują się poniżej wykresów uzyskanych dla bloków zrealizowanych wcześniej. Takie położenie wykresów w przypadku stali 30HGSA świadczy o jej cyklicznym osłabieniu obserwowanym również podczas obciążenia stałoamplitudowego. Podobny przebieg zmian parametrów pętli histerezy (σ_a , ε_{ap} oraz ΔW_{pl}) obserwowanych podczas obciążenia losowego (R) oraz programowanego (I) świadczy o podobnym przebiegu kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych w rozpatrywanych warunkach obciążenia. Powyższe spostrzeżenie potwierdzają wyniki analizy porównawczej przebiegu kumulacji odkształceń $\Delta\varepsilon_{ap}$ i energii ΔW_{pl} w rozpatrywanych warunkach obciążenia. Wartości skumulowanego odkształcenia $\Sigma\Delta\varepsilon_{ap(i)}$ i energii $\Sigma\Delta W_{pl(i)}$ w jednym bloku obciążenia nie zależą od postaci programu obciążenia. W celu zilustrowania powyższego spostrzeżenia, na rysunku 4.4 przedstawiono schemat przebiegu kumulacji odkształceń $\Delta\varepsilon_{ap}$ i energii ΔW_{pl} w próbkach ze stali 30HGSA w pierwszym bloku obciążenia programowanego i losowego o zróżnicowanych poziomach współczynnika wypełnienia widma ζ .



Rys. 4.4. Kumulacja odkształceń $\Delta\varepsilon_{ap}$ (a) i energii ΔW_{pl} (b) w pierwszym bloku obciążenia programowanego i losowego ($\varepsilon_{acmax} = 1,5\%$) próbek ze stali 30HGSA w zależności od współczynnika wypełnienia widma ζ

Na podstawie wzajemnego położenia wykresów kumulacji odkształceń i energii w pierwszym bloku można stwierdzić, że zarówno sam przebieg kumulacji wymienionych parametrów, jak również wartość skumulowanego odkształcenia $\Sigma\Delta\varepsilon_{ap(1)}$ i energii $\Sigma\Delta W_{pl(1)}$ są bardzo zbliżone i w niewielkim stopniu zależą od postaci programu obciążenia. Powyższe spostrzeżenie dotyczy również wartości skumulowanego odkształcenia $\Sigma\Delta\varepsilon_{ap}$ i energii $\Sigma\Delta W_{pl}$ w całej próbie zmęczeniowej. Na rysunku 4.5 przedstawiono wykres obrazujący zależność energii skumulowanej $\Sigma\Delta W_{pl}$ w próbie zmęczeniowej od postaci i parametrów programu obciążenia. W celu uzyskania przejrzystości rysunku nie naniesiono na nim wykresów energii skumulowanej w programach o współczynniku $\zeta = 0,56$.

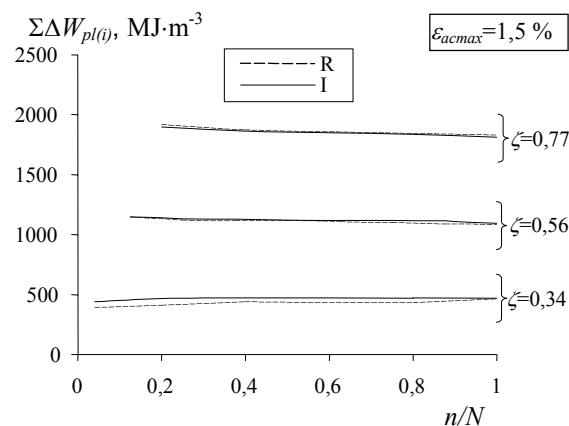


Rys. 4.5. Energia skumulowana $\Sigma\Delta W_{pl}$ w warunkach obciążenia programowanego i losowego próbek ze stali C45 w zależności od ε_{acmax}

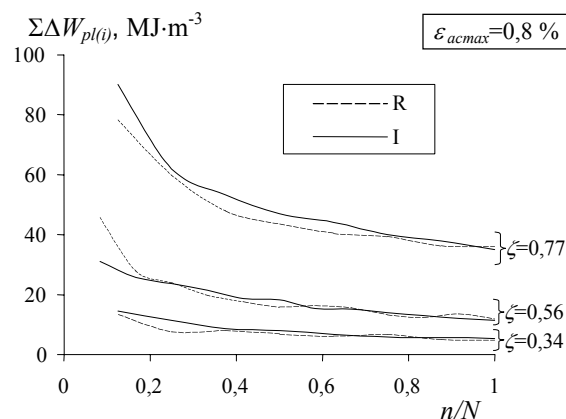
Na podstawie wykresów przedstawionych na rysunku 4.5 można stwierdzić, że wartość energii skumulowanej $\Sigma\Delta W_{pl}$ zależy od parametrów programu obciążenia. Największą wartość energii skumulowanej osiąga dla najniższych poziomów odkształcenia ε_{acmax} w programie obciążenia. Uzyskane wyniki stanowią w tym zakresie potwierdzenie doniesień przytaczanych w literaturze [56, 57, 122]. Szczegółowa analiza wartości skumulowanego odkształcenia $\Sigma\Delta\varepsilon_{ap(i)}$ i energii $\Sigma\Delta W_{pl(i)}$ w kolejnych blokach obciążenia wykazała, że wartość ich zależy od okresu trwałości, w którym był położony blok obciążenia. Jest to widoczne w warunkach obciążenia losowego oraz programowanego. Jak należało oczekiwać, najmniejsze zmiany energii skumulowanej w jednym bloku występują w przypadku stali C45 i stali 30HGSA, natomiast największe w przypadku próbek ze stopu AW-2024. Na rysunku 4.6 przedstawiono przykładowe wykresy obrazujące poziom energii skumulowanej w jednym bloku obciążenia progra-

mowanego i losowego $\Sigma\Delta W_{pl(i)}$ realizowanym w różnych okresach trwałości próbek ze stali 30HGSA i stopu AW-2024.

a)



b)



Rys. 4.6. Energia $\Sigma\Delta W_{pl(i)}$ skumulowana w jednym bloku obciążenia programowanego i losowego w różnych okresach trwałości: a) próbki ze stali 30HGSA, b) próbki ze stopu AW-2024

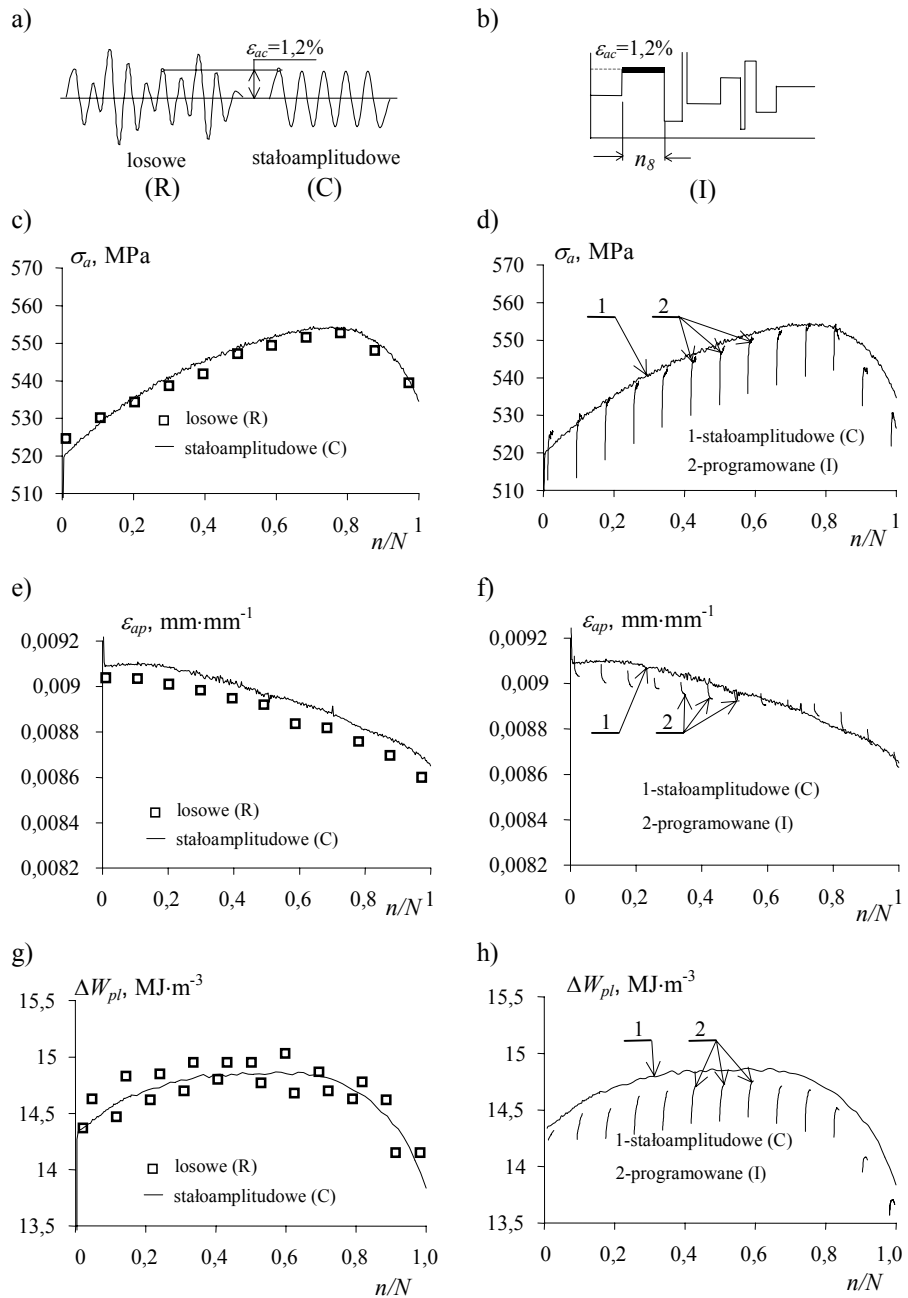
Największe zmiany energii skumulowanej $\Sigma\Delta W_{pl(i)}$ w jednym bloku obciążenia, występujące w przypadku próbek ze stopu AW-2024, są skutkiem zmian energii ΔW_{pl} dla poszczególnych cykli lub stopni programu w kolejnych jego powtórzeniach, a obserwowanych dla tego materiału na rysunku 3.13. Na podstawie wykresów przedstawionych na rysunku 4.6 można stwierdzić, że niezależnie od postaci programu obciążenia (losowe, programowane) wartości energii skumulowanej w jednym bloku programu są zawsze porównywalne. War-

tość jej zależy jedynie od okresu trwałości i parametrów programu obciążenia. Powyższe stwierdzenie potwierdzają również wyniki analizy porównawczej parametrów pętli histerezy σ_a , ε_{ap} oraz ΔW_{pl} na tych samych poziomach odkształcenia całkowitego, realizowanego w warunkach obciążenia losowego i programowanego z parametrami pętli histerezy uzyskanej na tych samych poziomach odkształcenia stosowanego w warunkach obciążenia stałoaamplitudowego. Ze względu na zróżnicowanie trwałości uzyskiwanej w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych, losowych i programowanych, wartości parametrów pętli histerezy analizowano w funkcji trwałości względnej n/N . Na rysunkach 4.7÷4.9 przedstawiono przykładowe wykresy zmian parametrów pętli histerezy uzyskane w warunkach obciążenia losowego i programowanego ($\varepsilon_{acmax} = 1,5\%$, $\zeta = 0,56$) na jednym poziomie odkształcenia ($\varepsilon_{ac} = 1,2\%$ – dla próbek ze stali C45 i 30HGSA oraz $\varepsilon_{ac} = 0,65\%$ – dla próbek ze stopu AW-2024). Dla porównania na rysunkach naniesiono wykresy zmian analizowanych parametrów pętli histerezy uzyskane na tym samym poziomie odkształcenia w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych.

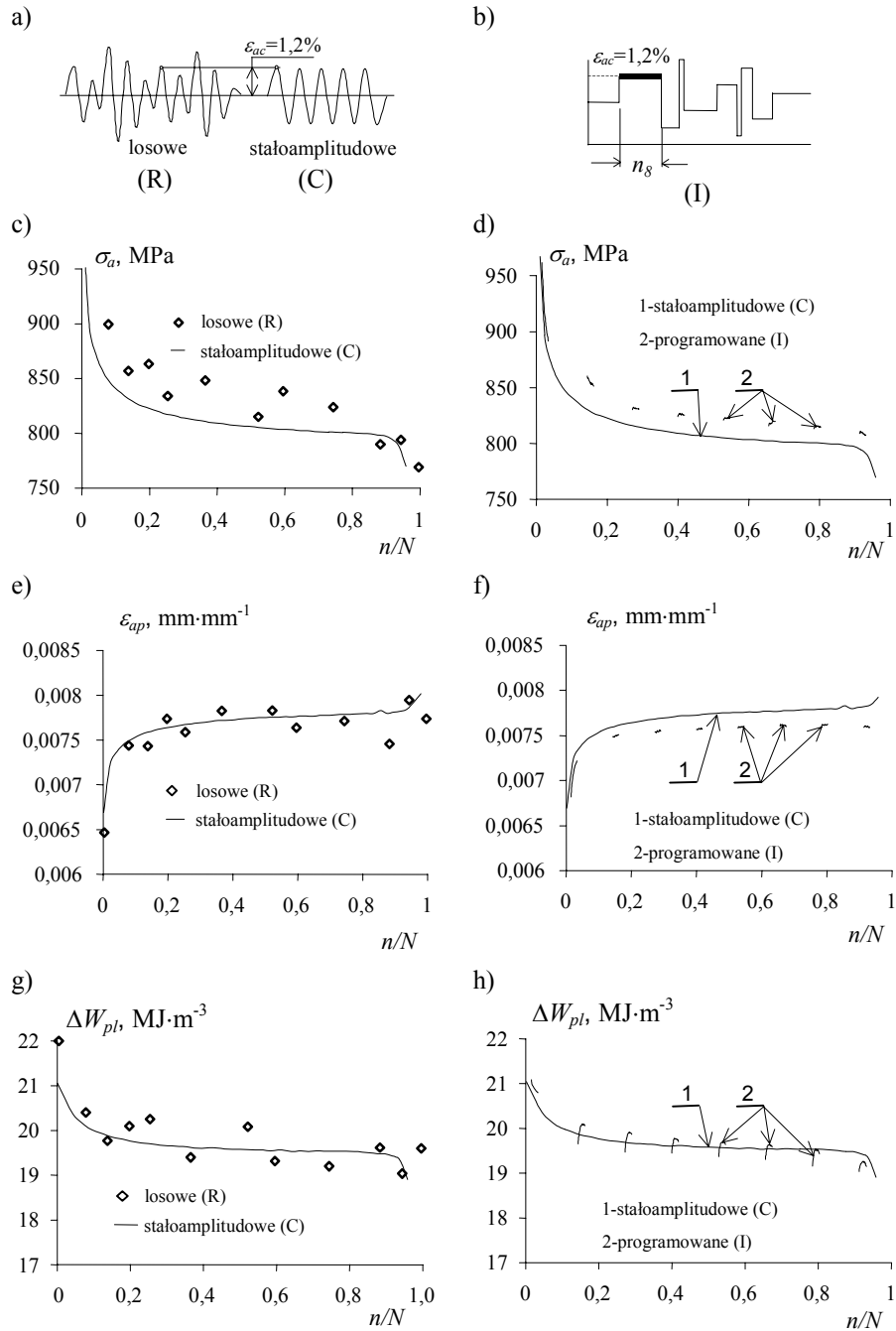
Na podstawie analizy przedstawionych wykresów można stwierdzić, że przebieg zmian parametrów pętli histerezy dla trzech badanych metali w warunkach obciążeń losowych i programowanych jest zbliżony do przebiegu obserwowanego w warunkach obciążenia stałoaamplitudowego. Przeprowadzona analiza porównawcza zmian własności cyklicznych na wybranych poziomach odkształcenia pozwala stwierdzić, że ich zróżnicowanie jest nieznaczne, a jego skala zależy od parametru pętli histerezy wykorzystywanego podczas analizy. Największe zróżnicowanie dotyczy opisu energetycznego (rys. 4.9). Na przykład na poziomie odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 0,65\%$ dla stopu AW-2024 wynosi około 25%. Może być ono jednak spowodowane założeniami przyjętymi podczas obliczeń energii ΔW_{pl} w warunkach obciążeń losowych podanymi w rozdziale 3. (rys. 3.10).

Podobne wykresy parametrów pętli histerezy uzyskane na tych samych poziomach odkształcenia oraz zbliżone przebiegi kumulacji odkształceń plastycznych $\Delta\varepsilon_{ap}$ i energii ΔW_{pl} w zrealizowanych programach obciążenia świadczą, że postać programu obciążenia nie wpływa na przebieg zmian własności cyklicznych.

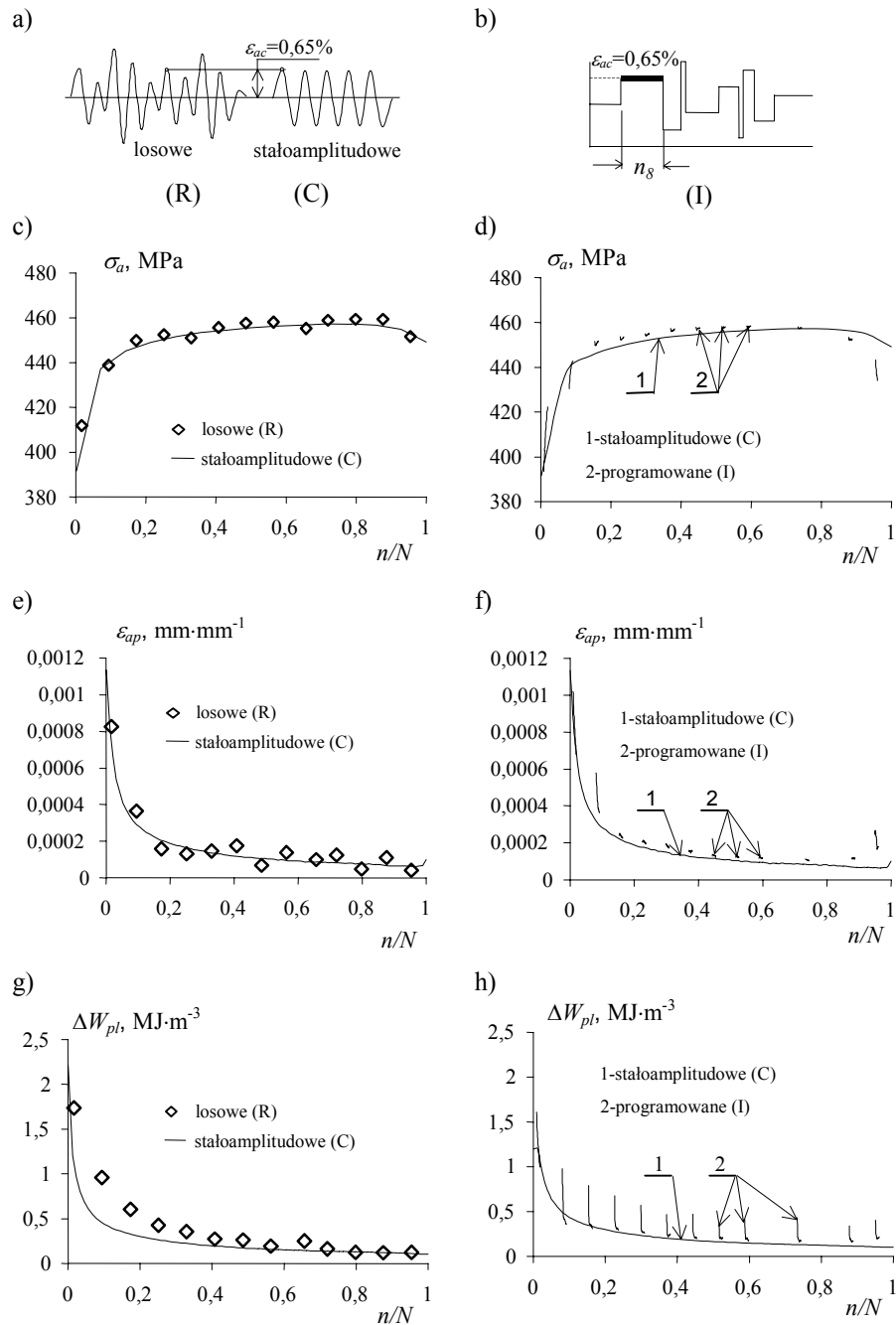
Brak wyraźnego wpływu postaci programu obciążenia na przebieg zmian własności cyklicznych potwierdzają również wyniki trwałości zmęczeniowej dla dwóch postaci programu obciążenia. Z przeprowadzonej analizy wynika, że trwałości uzyskane dla tych samych parametrów programów obciążenia losowego i programowanego charakteryzuje podobieństwo ilościowe. Dla zilustrowania tego spostrzeżenia na rysunku 4.10 przedstawiono wyniki porównania trwałości uzyskanych w warunkach obciążeń losowych i programowanych dla próbek wykonanych ze stali C45.



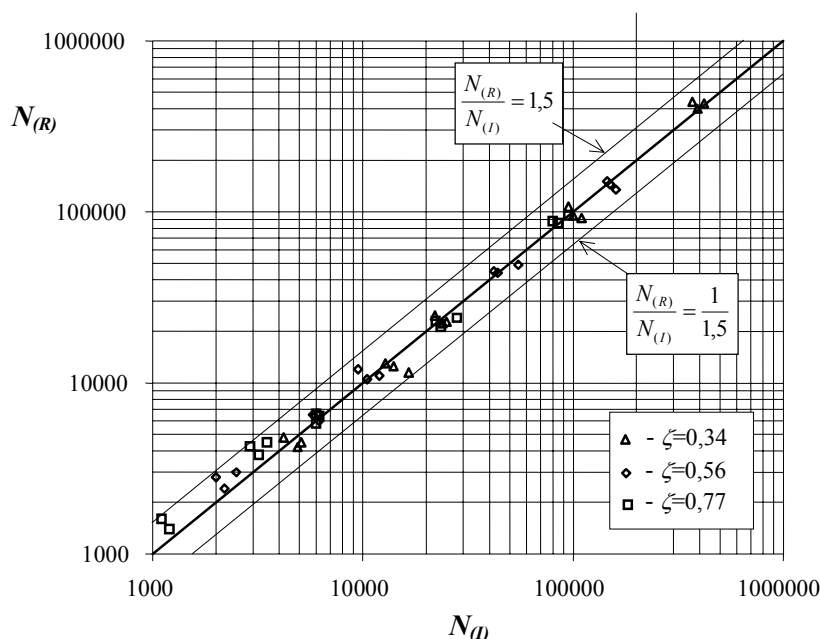
Rys. 4.7. Parametry pętli histerezy dla próbek ze stali C45 w warunkach obciążenia stałoamplitudowego, losowego i programowanego na poziomie $\varepsilon_{ac} = 1,2\%$: a,b) schematy programów obciążenia, c,d) zmiany σ_a , e,f) zmiany ε_{ap} , g,h) zmiany ΔW_{pl}



Rys. 4.8. Parametry pętli histerezy dla próbek ze stali 30HGSA w warunkach obciążenia stałoaamplitudowego, losowego i programowanego na poziomie $\epsilon_{ac} = 1,2\%$: a,b) schematy programów obciążenia, c,d) zmiany σ_a , e,f) zmiany ϵ_{ap} , g,h) zmiany ΔW_{pl}



Rys. 4.9. Parametry pętli histerezy dla próbek ze stopu AW-2024 w warunkach obciążenia stałoaamplitudowego, losowego i programowanego na poziomie $\varepsilon_{ac} = 0,65\%$: a,b) schematy programów obciążenia, c,d) zmiany σ_a , e,f) zmiany ε_{ap} , g,h) zmiany ΔW_{pl}



Rys. 4.10. Trwałość zmęczeniowa stali C45 w warunkach obciążeń losowych $N_{(R)}$ i programowanych $N_{(I)}$

Punkty znajdujące się nad przekątną wykresu wskazują na wyższą (dla takich samych parametrów programu obciążenia ζ i ε_{acmax}) trwałość podczas realizacji obciążenia losowego (R). Punkty znajdujące się pod przekątną wykresu świadczą o wyższej trwałości próbek w warunkach obciążenia programowanego (I). Na podstawie analizy wykresu można stwierdzić, że większość punktów znajduje się na lub w bardzo bliskim sąsiedztwie przekątnej w paśmie rozrzutu o współczynniku równym 1,5. Występujące zróżnicowanie uzyskanych trwałości jest czysto przypadkowe i trudno na jego podstawie wnioskować o wpływie którejkolwiek postaci programu lub jego parametrów na trwałość zmęczeniową. Analiza porównawcza wartości współczynników kierunkowych i wyrazów wolnych w równaniach prostych regresji podanych w tabeli 3.5 wskazuje na małe ich zróżnicowanie dla dwóch postaci programu obciążenia. W pracy przeprowadzono ocenę istotności występujących różnic na podstawie analizy statystycznej obejmującej sprawdzenie hipotez o równości średnich wartości trwałości zmęczeniowej (test analizy wariancji dla wielu średnich) oraz sprawdzenie hipotezy o równoległości prostych regresji opisujących wyniki badań uzyskanych w warunkach obciążeń losowych (R) i programowanych (I). Test analizy wariancji dla wielu średnich przeprowadzono dla wszystkich wyników trwałości zmęczeniowej na wszystkich poziomach odkształceń maksymalnych ε_{acmax} , dla których wyznaczono wykresy zmęczeniowe. Przeprowadzona analiza wariancji wykazała, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o równości śred-

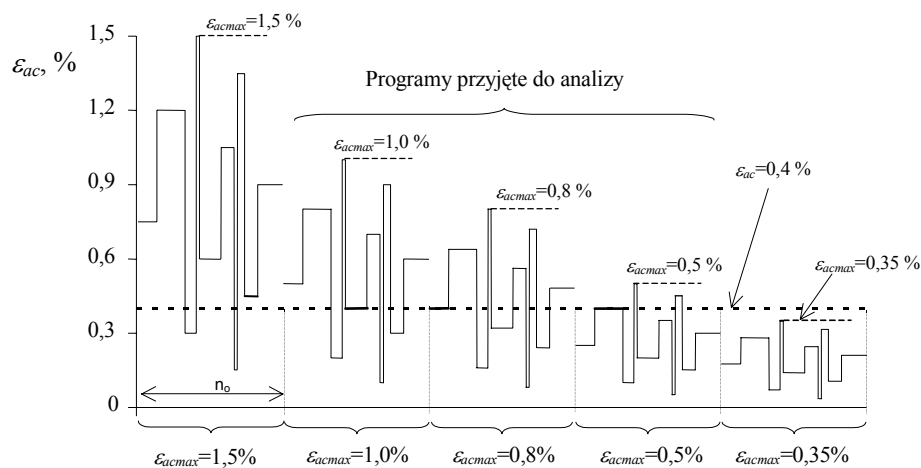
nich trwałości zmęczeniowych uzyskanych dla poszczególnych postaci programów obciążenia (R) i (I) oraz hipotezy o równoległości wyznaczonych prostych regresji odpowiadających poszczególnym wykresom trwałości.

Potwierdzają to również takie same w blokach programów obciążenia o zróżnicowanej postaci. Z przeprowadzonej analizy statystycznej wynika, że różnice pomiędzy wykresami zmęczeniowymi uzyskanymi dla dwóch postaci programu obciążenia są nieistotne. Dotyczy to całego zakresu odkształceń maksymalnych ε_{acmax} występujących w programach obciążenia.

Uzyskane w powyższym podrozdziale spostrzeżenia mają również duże znaczenie praktyczne. Potwierdzają bowiem, jako zasadne zastępowanie w warunkach laboratoryjnych obciążenia eksploatacyjnego, charakteryzującego się losowym następstwem amplitud cykli obciążających, ekwiwalentnym obciążeniem programowanym.

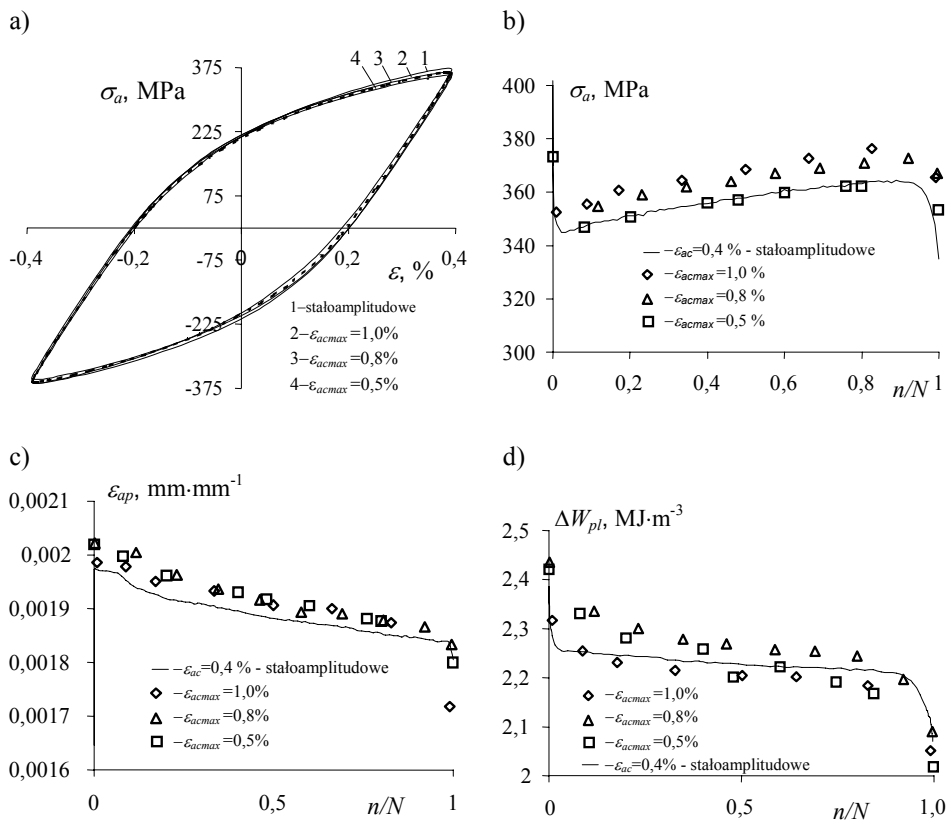
B. Wpływ odkształcenia maksymalnego ε_{acmax} w programie

Oceny wpływu wielkości odkształcenia maksymalnego ε_{acmax} występującego w programie na zmiany własności cyklicznych dokonano, porównując wartości parametrów pętli histerezy na tym samym stopniu, realizowanym w programach o różnej wartości maksymalnej odkształcenia ε_{acmax} . Analizę porównawczą własności cyklicznych przeprowadzono na jednym poziomie odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 0,4\%$. Poziom ten występował w trzech programach obciążenia o wartościach maksymalnych odkształcenia $\varepsilon_{acmax} = 0,5; 0,8$, i $1,5\%$. Zilustrowano to w sposób schematyczny na rysunku 4.11.



Rys. 4.11. Położenie stopnia o amplitudzie $\varepsilon_{ac} = 0,4\%$ w zależności od ε_{acmax} ($\zeta = 0,56$)

Na podstawie przeprowadzonej analizy porównawczej parametrów pętli histerezy zarejestrowanych na poziomie odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 0,4\%$ można stwierdzić, że niezależnie od poziomu odkształcenia maksymalnego ε_{acmax} w programie, przebieg zmian własności cyklicznych jest na nim bardzo podobny. Potwierdzeniem tego są np. zbliżone kształty i położenie pętli histerezy uzyskanej na tym poziomie w programach o zróżnicowanej wartości odkształcenia maksymalnego ε_{acmax} . Na rysunku 4.12a przedstawiono przykładowe pętli histerezy uzyskane podczas badań próbek ze stali C45 na poziomie odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 0,4\%$ w warunkach obciążeń programowanych o trzech wartościach odkształcenia maksymalnego ε_{acmax} . Pętli pobrano z okresu trwałości zmęzeniowej $n/N = 0,5$. Na rysunku umieszczono dodatkowo pętlę histerezy z tego samego okresu trwałości uzyskaną na tym poziomie odkształcenia w warunkach obciążenia stałoaamplitudowego.



Rys. 4.12. Parametry pętli histerezy dla próbek ze stali C45 na poziomie odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 0,4\%$ dla różnych wartości ε_{acmax} w programie o nieregularnym następie stopni: a) kształt pętli, b) σ_a , c) ε_{ap} , d) ΔW_{pl}

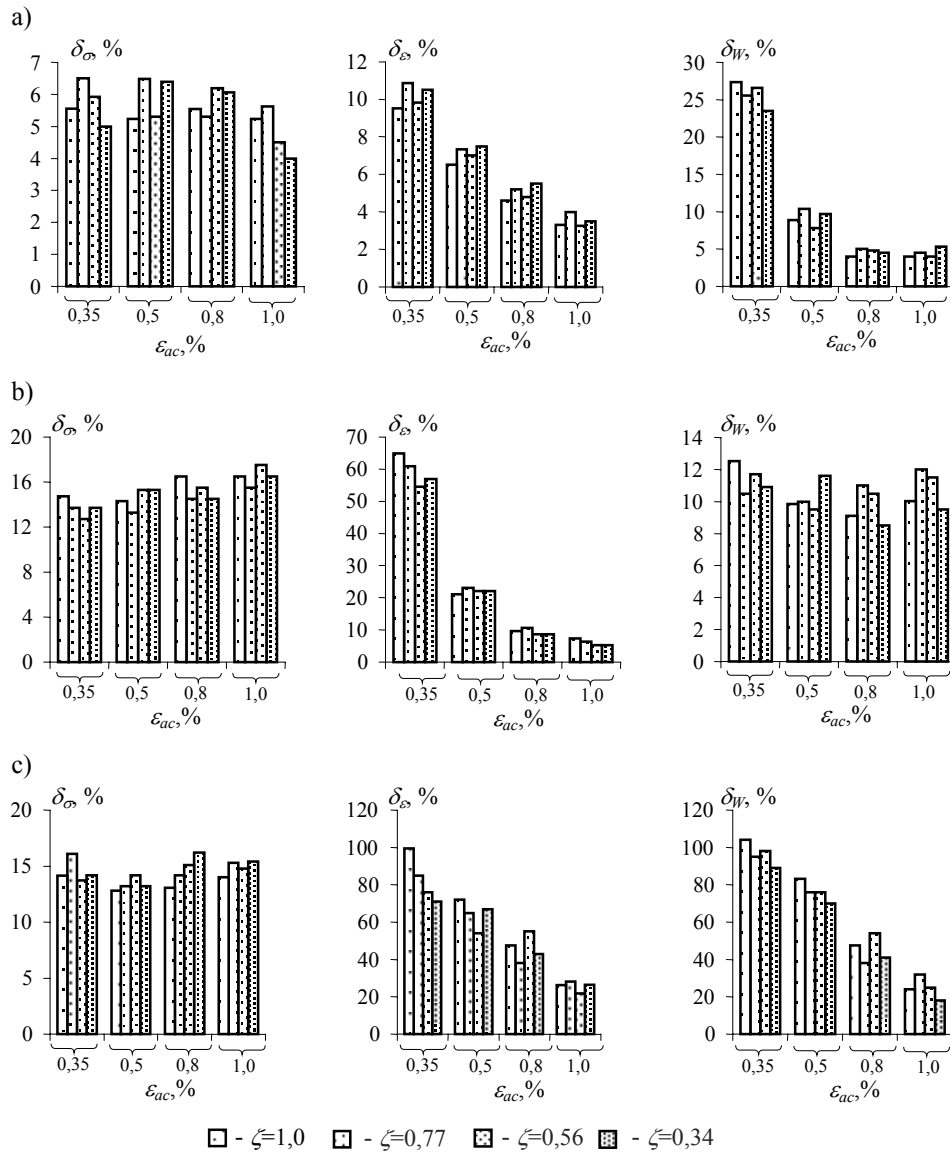
Przeprowadzona analiza statystyczna dla wielu średnich σ_a , ε_{ap} i ΔW_{pl} nie pozwala odrzucić hipotezy o równości średnich parametrów pętli histerezy uzyskanej w programach o różnych wartościach odkształcenia maksymalnego ε_{acmax} w programie. Podobieństwo ilościowe dotyczy również wartości parametrów pętli histerezy na rozpatrywanym poziomie odkształcenia w innych okresach trwałości. Na rysunkach 4.12b,c,d przedstawiono przebiegi zmian trzech parametrów pętli histerezy na poziomie odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 0,4\%$ w zależności od okresu trwałości i odkształcenia ε_{acmax} . Cechą charakterystyczną wykresów uzyskanych dla zróżnicowanych wartości ε_{acmax} jest występowanie tych samych zjawisk, które obserwowano na tym samym poziomie odkształcenia w warunkach obciążenia stałoamplitudowego. Przyjęty do analizy poziom odkształcenia był jednym z największych w programie o wartości maksymalnej odkształcenia $\varepsilon_{acmax} = 0,5\%$ i jednym z najmniejszych w programie o wartości maksymalnej odkształcenia $\varepsilon_{acmax} = 1,0\%$.

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że bez względu na poziom odkształcenia maksymalnego w programie obciążenia przebieg zmian własności cyklicznych na nim jest zawsze bardzo zbliżony. Podobnymi cechami charakteryzowały się wszystkie badane materiały, co wskazuje, że dla przyjętych warunków badań poziom odkształcenia maksymalnego w programie nie wpływa w sposób widoczny na przebieg zmian własności cyklicznych badanych materiałów.

C. Wpływ poziomu odkształcenia na stopniach programu

Program obciążeń o nieregularnym następcie stopni (I) składał się z dziesięciu poziomów odkształcenia. Analizę porównawczą przebiegu zmian własności cyklicznych przeprowadzono na czterech poziomach odkształceń występujących na wybranych stopniach programu obciążenia. Wpływ poziomu odkształcenia na przebieg stabilizacji przyjęto oceniać wykorzystując do tego celu współczynniki zmian własności cyklicznych opisanych zależnością (4.1). Na rysunku 4.13 przedstawiono wykresy obrazujące wartości współczynników δ_σ , δ_ε , δ_W dla czterech poziomów odkształcenia ε_{ac} w warunkach obciążeń programowanych o zróżnicowanej wartości współczynnika wypełnienia widma ζ . W celu porównania na wykresach naniesiono również wartości wymienionych współczynników uzyskanych na tych samych poziomach odkształcenia ε_{ac} w warunkach obciążenia stałoamplitudowego ($\zeta = 1$).

Analiza wartości współczynników δ_σ , δ_ε , δ_W uzyskanych dla czterech poziomów odkształcenia realizowanego w warunkach obciążeń programowanych o zróżnicowanej wartości współczynnika wypełnienia widma ζ pozwala stwierdzić, że skala zmian własności cyklicznych na poszczególnych poziomach jest porównywalna.



Rys. 4.13. Zmiany δ_σ , δ_ϵ , δ_W na zróżnicowanych poziomach odkształcenia ϵ_{ac} w warunkach obciążenia programowanego (I) i stałoaamplitudowego: a) stal C45, b) stal 30HGSA, c) stop AW-2024

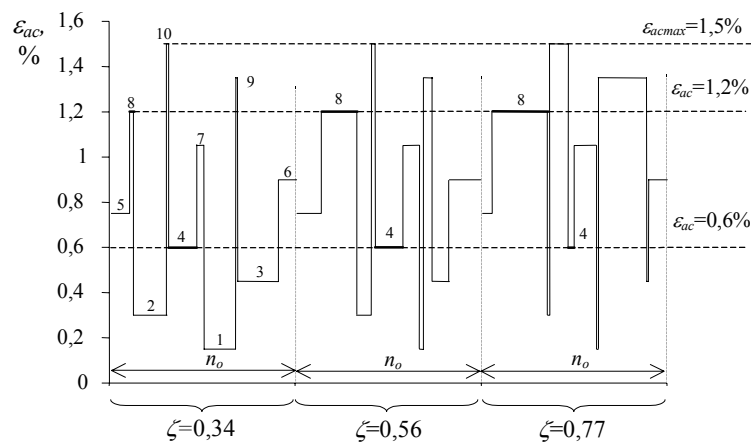
Trudno na podstawie przedstawionych wyników dostrzec wpływ na przebieg zmian własności cyklicznych parametru programu, jakim jest współczynnik wypełnienia widma. O wartości współczynników δ_σ , δ_ϵ , δ_W decyduje poziom odkształcenia. Przeprowadzona analiza wartości współczynników zmian własności cyklicznych dla różnych opisów wykazała, że wielkość zmian wzra-

sta wraz z obniżaniem poziomu odkształcenia. Podobnie jak w warunkach obciążenia stałoaamplitudowego, najwyższe wartości współczynniki δ_ε i δ_W osiągną w obszarze najniższych poziomów odkształceń i wynoszą dla stopu AW-2024 około 90%, stali 30HGSA około 65% oraz dla stali C45 około 30%.

Analiza porównawcza zmian własności cyklicznych na tych samych poziomach odkształcenia realizowanego w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych i programowanych pozwala stwierdzić, że sam przebieg zmian własności cyklicznych na danym poziomie odkształcenia jest cechą charakterystyczną dla danego materiału. Nie zależy on od postaci programu obciążenia. Na wielkość występujących zmian własności cyklicznych wpływa poziom odkształcenia na stopniu.

D. Wpływ współczynnika wypełnienia widma ζ

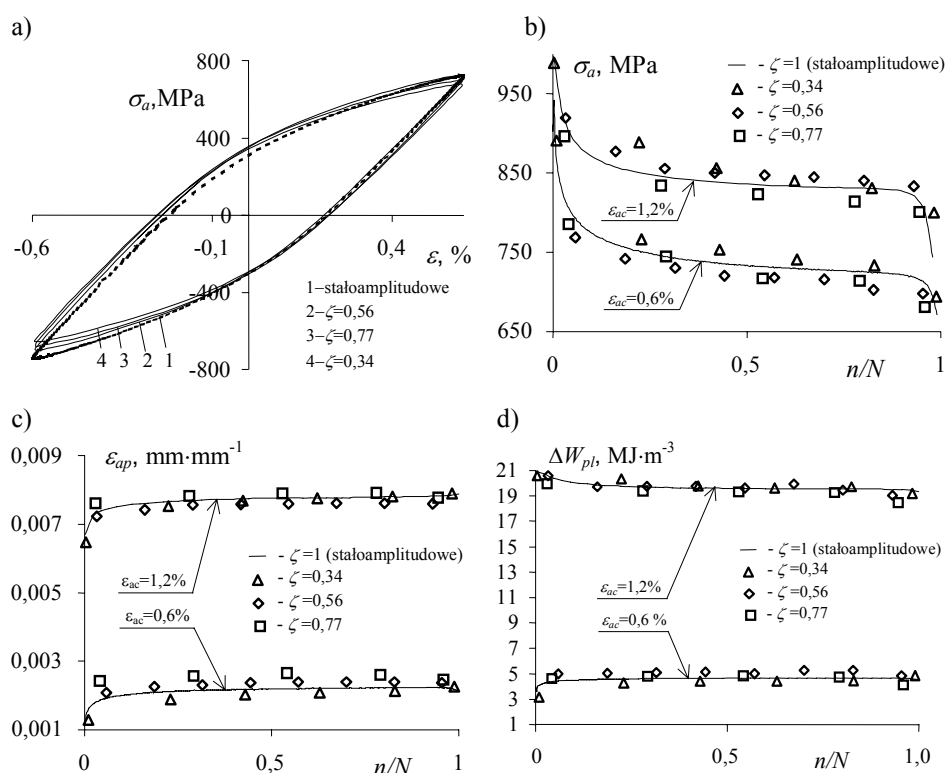
Zmianę współczynnika wypełnienia widma ζ w warunkach obciążenia programowanego realizowano, zmieniając liczbę cykli obciążenia na poszczególnych stopniach obciążenia i zachowując wszystkie stopnie i pojemność bloku programu. Oceny wpływu współczynnika wypełnienia widma dokonano, porównując zmiany parametrów pętli na tych samych stopniach odkształcenia w programach o zróżnicowanej wartości współczynnika wypełnienia widma ζ . Do analizy przyjęto dwa poziomy odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ i $\varepsilon_{ac} = 1,2\%$ oraz programy o wartości maksymalnej odkształcenia $\varepsilon_{acmax} = 1,5\%$ (rys. 4.14).



Rys. 4.14. Ocena wpływu współczynnika wypełnienia na własności cykliczne

Podobnie jak w podrozdziale B przeprowadzono analizę porównawczą kształtów pętli histerezy uzyskanych w programach o różnej wartości współczynnika wypełnienia widma ζ . Podczas analizy nie stwierdzono dla badanych materiałów zauważalnego wpływu współczynnika wypełnienia widma na kształt pętli histerezy. Uzyskane na analizowanych poziomach odkształcenia pętle histerezy, niezależnie od wartości współczynnika wypełnienia widma ζ , charaktery-

zowały się w tych samych okresach trwałości podobieństwem jakościowym dotyczącym kształtu pętli oraz ilościowym w zakresie wartości parametrów je charakteryzujących. Na rysunku 4.15a pokazano przykładowe pętle histerezy zarejestrowane w połowie trwałości zmęczeniowej próbek ze stali 30HGSA na poziomie $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ dla różnych wartości współczynnika wypełnienia ζ , natomiast na rysunku 4.15b,c,d przebiegi zmian parametrów pętli histerezy (σ_a , ε_{ap} i ΔW_{pl}) dla cykli o amplitudzie $\varepsilon_{ac} = 0,6$ i $1,2\%$ w funkcji trwałości względnej n/N . Podobnie jak w podrozdziale C, do analizy przyjęto parametry pętli histerezy dla cykli z okresu trwałości $n/N = 0,5$.



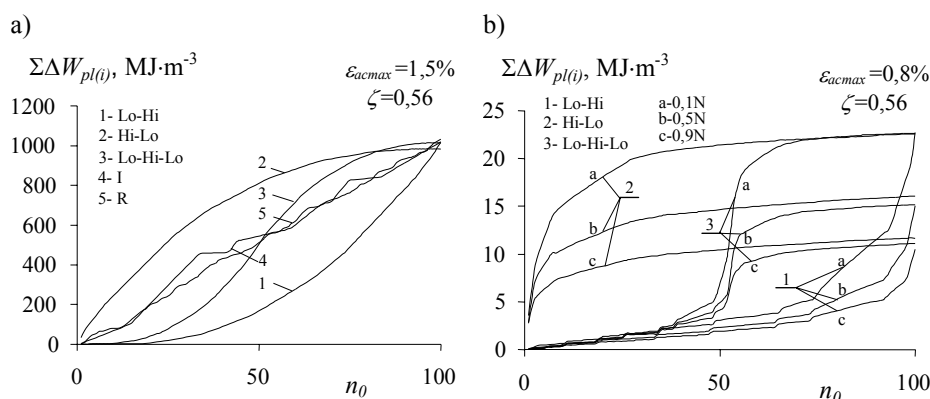
Rys. 4.15. Parametry pętli histerezy na poziomach $\varepsilon_{ac} = 0,6$ i $1,2\%$ w warunkach obciążeń programowanych próbek ze stali 30HGSA o różnej wartości ζ : a) kształt pętli, b) σ_a , c) ε_{ap} , d) ΔW_{pl}

Na podstawie analizy porównawczej wykonanych wykresów zmian parametrów pętli histerezy uzyskanych na poziomie odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ i $1,2\%$ w warunkach obciążeń programowanych i stałoaamplitudowych można stwierdzić, że ich przebieg nie zależy od wartości współczynnika wypełnienia widma. Czynnikiem wpływającym na ten przebieg jest, podobnie jak podczas badań stałoaamplitudowych, poziom odkształcenia całkowitego.

E. Wpływ sekwencji stopni w programie obciążenia

Podobnie jak w warunkach obciążeń losowych, podczas realizacji obciążeń programowanych o zróżnicowanej sekwencji stopni w programie nie występuje okres stabilizacji. Potwierdzają to położenia wykresów σ_a , ε_{ap} , ΔW_{pl} uzyskane dla bloków obciążenia rejestrowanych w różnych okresach trwałości (rys. 3.11-3.13). Na podstawie analizy wykonanych wykresów można stwierdzić, że przebieg zmian własności cyklicznych poszczególnych materiałów zależy w niewielkim stopniu od sekwencji stopni w programie obciążenia. Wzajemne położenie wykresów uzyskanych w kolejnych blokach obciążenia programowanego o różnej sekwencji stopni w programie obciążenia świadczy o występowaniu w materiale podobnych procesów do obserwowanych również podczas obciążenia stałoamplitudowego, tj. osłabienia stali 30HGSA oraz umocnienia stali C45 i stopu AW-2024.

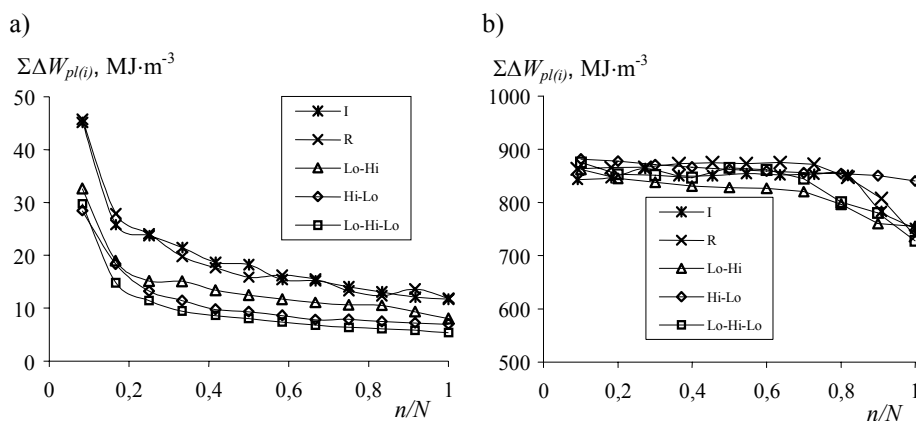
Jak należało oczekiwać, sekwencja stopni w programie obciążenia ma wpływ na przebieg kumulacji odkształceń plastycznych $\Sigma\Delta\varepsilon_{ap(i)}$ i energii $\Sigma\Delta W_{pl(i)}$ w jednym bloku programu obciążenia. Na rysunku 4.16 pokazano przebieg kumulacji energii w pierwszym bloku obciążenia programowanego próbek ze stali 30HGSA o różnej sekwencji stopni (rys. 4.16a) i w blokach obciążenia o różnej sekwencji stopni położonych w różnych okresach trwałości dla próbek ze stopu AW-2024 (rys. 4.16b).



Rys. 4.16. Kumulacja energii ΔW_{pl} w jednym bloku obciążenia programowanego o różnej sekwencji stopni: a) próbki ze stali 30HGSA – pierwszy blok obciążenia, b) próbki ze stopu AW-2024 – bloki położone w różnych okresach trwałości

Pomimo zróżnicowanego przebiegu kumulacji energii w jednym bloku obciążenia o różnej sekwencji stopni, wartość skumulowanego odkształcenia $\Sigma\Delta\varepsilon_{ap(i)}$ i energii $\Sigma\Delta W_{pl(i)}$ w kolejnych blokach położonych w tych samych okresach trwałości jest bardzo podobna. Zgodnie z oczekiwaniami największe zmiany energii skumulowanej w jednym bloku $\Sigma\Delta W_{pl(i)}$ w różnych okresach trwałości występują dla próbek wykonanych ze stopu AW-2024, a najmniejsze dla

próbek ze stali C45. Dla próbek ze stopu AW-2024 najwyższe wartości energii skumulowanej w jednym bloku występują dla pierwszych bloków obciążenia i ulegają zmniejszeniu wraz z liczbą zrealizowanych powtórzeń programu obciążenia. W celu zilustrowania powyższego zjawiska na rysunku 4.17 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów skumulowanej energii $\Sigma\Delta W_{pl(i)}$ w blokach obciążenia realizowanych w różnych okresach trwałości.

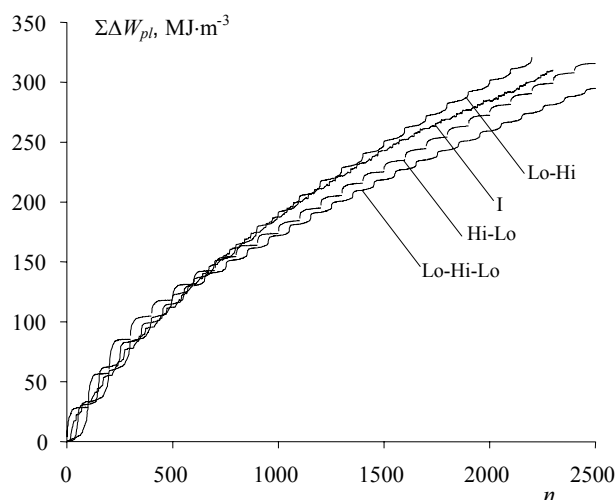


Rys. 4.17. Energia skumulowana $\Sigma\Delta W_{pl(i)}$ w jednym bloku obciążenia w różnych okresach trwałości: a) próbki ze stopu AW-2024, b) próbki ze stali C45

Zależność poziomu energii skumulowanej $\Sigma\Delta W_{pl(i)}$ w jednym bloku obciążenia od okresu trwałości stanowi również potwierdzenie obserwowanych na rysunkach 3.11÷3.13 zmian energii ΔW_{pl} na poszczególnych stopniach obciążenia programowanego. Na podstawie analizy porównawczej wzajemnego położenia wykresów energii skumulowanej $\Sigma\Delta W_{pl(i)}$ w jednym bloku programu obciążenia o zróżnicowanej sekwencji stopni można stwierdzić, że nie zależy ona od sekwencji stopni w programie obciążenia oraz od postaci programu obciążenia.

Analiza porównawcza energii skumulowanej w całej próbie zmęczeniowej $\Sigma\Delta W_{pl}$ dla różnych sekwencji programu obciążenia wykazała, że na jej wartość nie wpływa również sekwencja stopni w programie obciążenia. Na rysunku 4.18 przedstawiono w sposób schematyczny przebieg kumulacji energii podczas prób zmęczeniowych realizowanych dla różnych sekwencji stopni w programie obciążenia.

Pomimo zróżnicowanego przebiegu kumulacji energii w pojedynczym bloku programu obciążenia, wartość energii skumulowanej $\Sigma\Delta W_{pl}$ w całej próbie zmęczeniowej dla różnych sekwencji stopni w bloku jest zawsze bardzo zbliżona. Wartości energii skumulowanej $\Sigma\Delta W_{pl}$ w próbach zmęczeniowych dla zróżnicowanych sekwencji obciążenia i próbek z różnych materiałów zestawiono w tabeli 4.3.

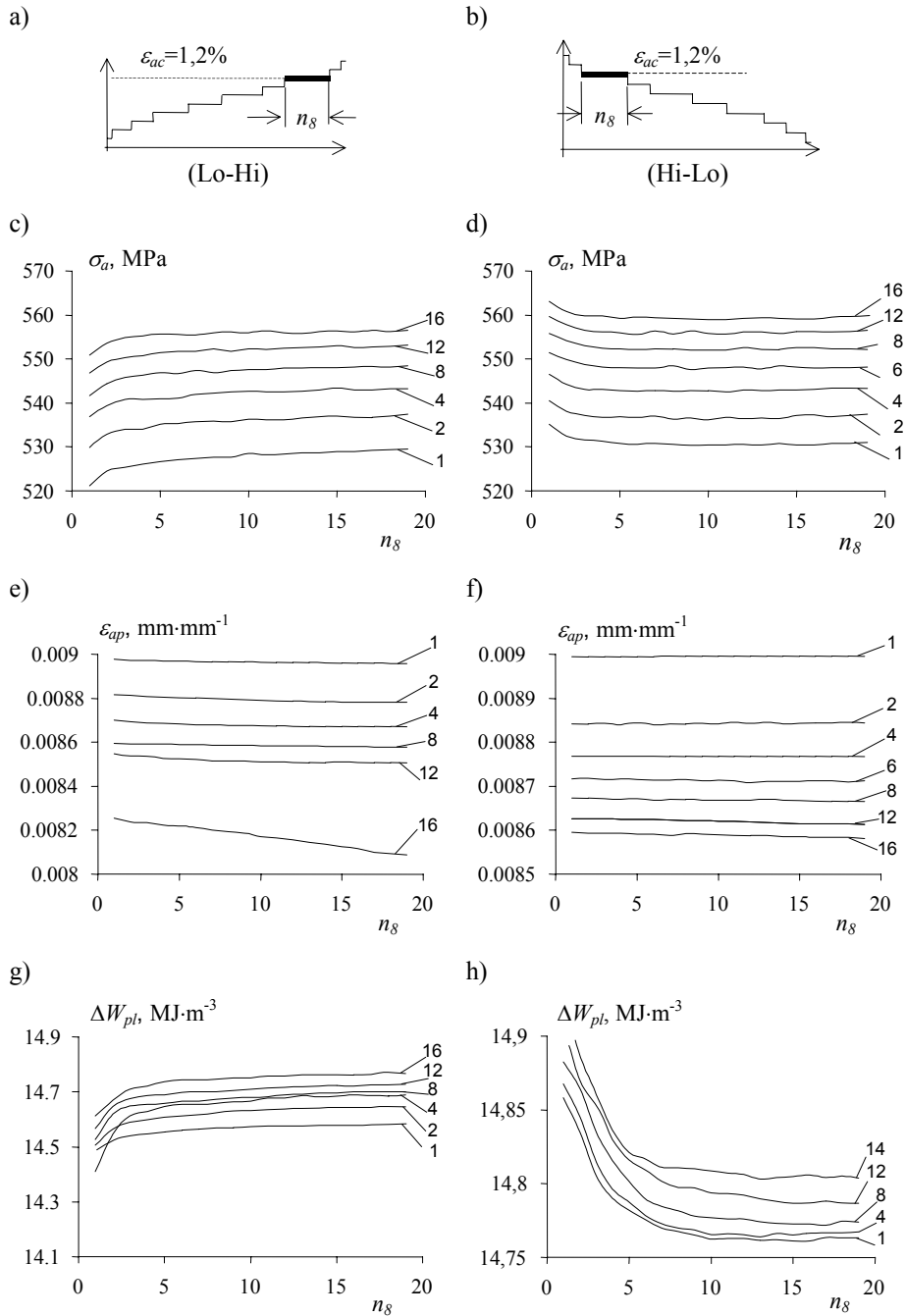


Rys. 4.18. Kumulacja energii w próbkach ze stopu AW-2024 dla zróżnicowanych sekwencji stopni w programie obciążenia ($\varepsilon_{acmax} = 0,8\%$, $\zeta = 0,56$)

Tabela 4.3. Wartości średnie energii skumulowanej $\Sigma\Delta W_{pl}$ podczas prób zmęczeniowych dla zróżnicowanych sekwencji i postaci programu obciążenia

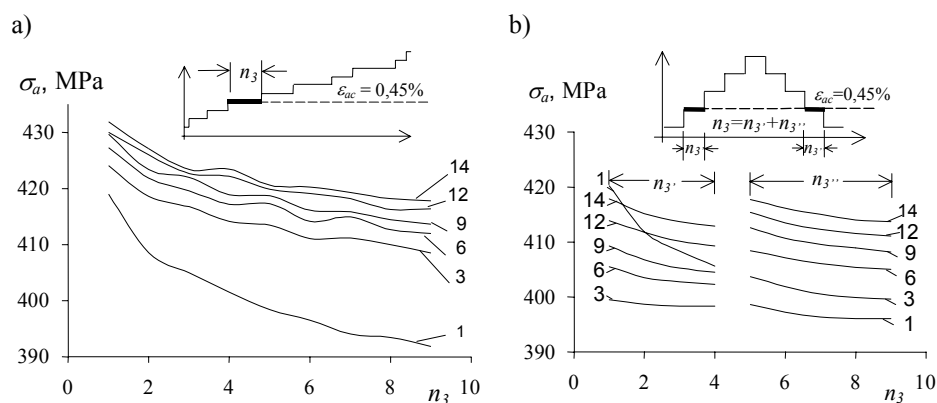
Nazwa programu	Energia skumulowana $\Sigma\Delta W_{pl}$, MJ·m ⁻³		
	stal C45	stal 30HGSA	stop AW-2024
	$\varepsilon_{acmax} = 1,5\%$, $\zeta = 0,56$		$\varepsilon_{acmax} = 0,8\%$, $\zeta = 0,56$
R	10428	13200	290
I	11304	14120	335
Lo-Hi	10700	11428	315
Hi-Lo	11300	12320	342
Lo-Hi-Lo	10500	12350	310

Oprócz wpływu na przebieg kumulacji odkształceń i energii w jednym bloku sekwencja stopni w programie obciążenia wpływa w niewielkim stopniu na zmiany własności cyklicznych na poszczególnych stopniach. Wpływ ten uwiadcza się głównie w przebiegu zmian parametrów pętli na stopniu zaraz po zmianie poziomu obciążenia. Na podstawie szczegółowej analizy zmian parametrów pętli histerezy, uzyskanych podczas obciążenia programowanego próbek ze stali C45, można stwierdzić, że przebieg zmian własności cyklicznych na danym stopniu zależy od poziomu odkształcenia na stopniu poprzednim. Dla przykładu dla amplitud odkształcenia $\varepsilon_{ac} > 0,6\%$ zmiana poziomu z mniejszego na większy (programy Lo-Hi, Lo-Hi-Lo oraz I) prowadzi do chwilowego umocnienia materiału na kolejnym stopniu i uzyskania na nim nowego poziomu stabilizacji. Przykład ilustrujący tę właściwość stali C45 pokazano na rysunku 4.19a,c,e,g, oznaczając na nim numery powtórzeń bloku programu obciążenia.



Rys. 4.19. Zmiany parametrów pętli histerezy dla stali C45 podczas obciążenia na stopniu o amplitudzie $\varepsilon_{ac} = 1,2\%$: a,b) schemat programów obciążenia i położenie stopnia w bloku, c,d) zmiany σ_a , e,f) zmiany ε_{ap} , g,h) zmiany ΔW_{pl}

Nowy poziom stabilizacji w przypadku opisu naprężeniowego i energetycznego (rys. 4.19a,g) jest wyższy od poziomu stabilizacji na danym stopniu uzyskanym w poprzednim bloku. Dla opisu odkształceniowego poziom ten jest niższy. Natomiast w przypadku odkształceń na stopniach o amplitudzie $\varepsilon_{ac} < 0,6\%$ zmiana poziomu odkształcenia z mniejszego na większy (Lo-Hi oraz Lo-Hi-Lo) powoduje niewielkie osłabienie. Jest to szczególnie widoczne w przypadku opisu naprężeniowego. W celu zilustrowania tej własności na rysunku 4.20 pokazano przebieg zmian σ_a na poziomie $\varepsilon_{ac} = 0,45\%$ dla programów Lo-Hi oraz Lo-Hi-Lo.



Rys. 4.20. Zmiany σ_a w próbkach ze stali C45 na poziomie odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 0,45\%$: a) program Lo-Hi, b) program Lo-Hi-Lo

Niezależnie od sekwencji programu, po zmianie poziomu obciążenia, na stopniu o amplitudzie $\varepsilon_{ac} = 0,45\%$ (rys. 4.20) materiał ulega niewielkiemu osłabieniu. Analiza porównawcza wartości σ_a na danym stopniu w kolejnych blokach obciążenia pozwala stwierdzić, że pomimo chwilowego osłabienia materiału – po zmianie poziomu w kolejnych blokach programu obciążenia – podlegał on nadal cyklicznemu umocnieniu.

W przypadku próbek ze stali C45 nie stwierdzono wyraźnego wpływu poziomu odkształcenia na przebieg własności cyklicznych podczas zmiany odkształcenia z większego na mniejszy (programy Hi-Lo, Lo-Hi-Lo oraz I). Dla wszystkich analizowanych sekwencji programów na nowym poziomie odkształcenia dochodziło do chwilowego osłabienia materiału i uzyskania na nim również nowego poziomu stabilizacji parametru pętli histerezy (rys. 4.19d,f,h). Poziom ten, pomimo chwilowego osłabienia, jest jednak wyższy dla opisu naprężeniowego i energetycznego oraz niższy dla opisu odkształceniowego od poziomu zrealizowanego w poprzednim bloku programu obciążenia. Zmiany przebiegów σ_a i ε_{ap} wskazują, że podczas realizacji programów obciążenia o różnej sekwencji stopni stal C45 podlega cyklicznemu umocnieniu. Do innych wniosków może prowadzić analiza energii odkształcenia ΔW_{pl} . Wynika z niej, że dla stopni o amplitudzie $\varepsilon_{ac} \geq 0,8\%$ materiał podlega osłabieniu, natomiast

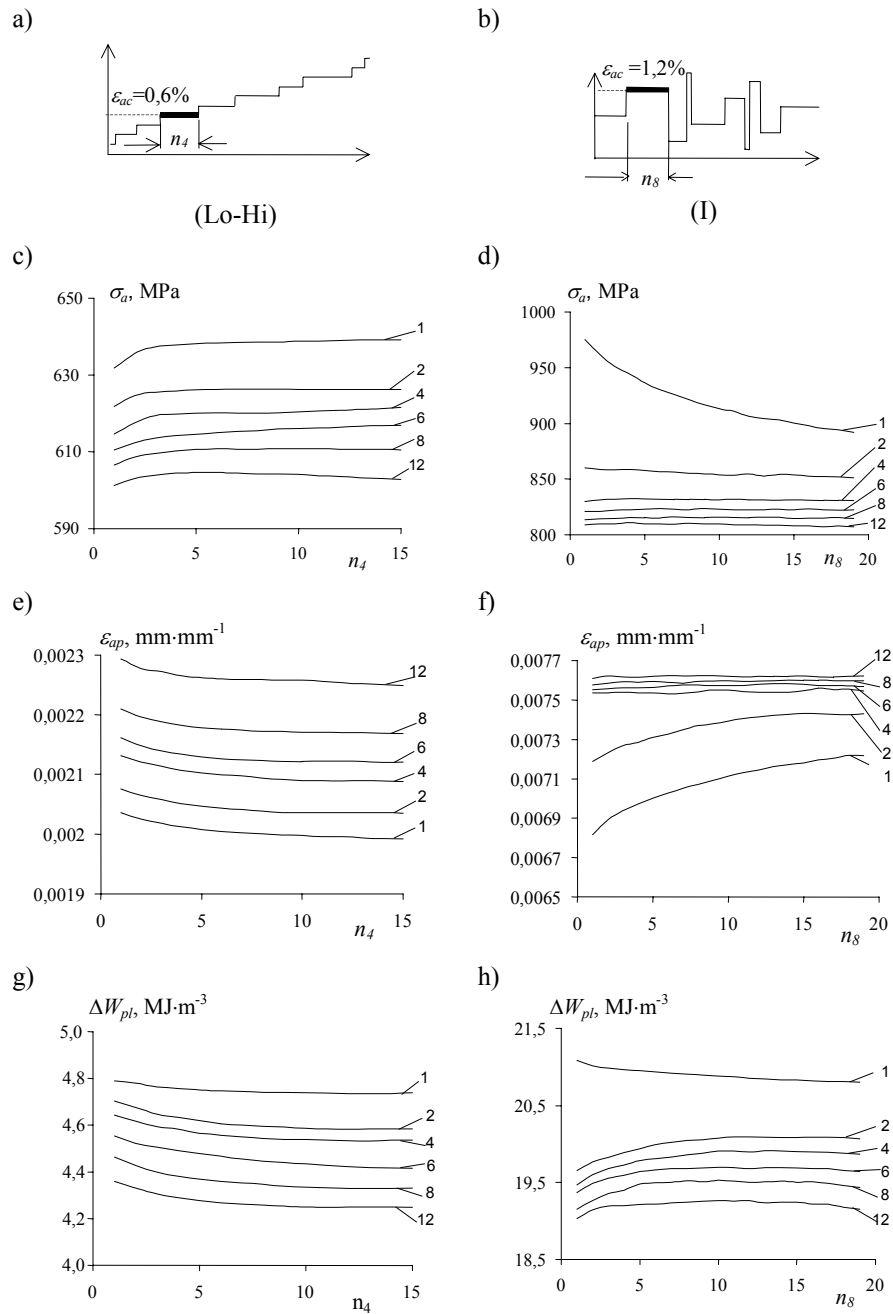
dla stopni o amplitudzie $\varepsilon_{ac} < 0,8\%$ materiał ten ulega umocnieniu. Taki sam charakter zmian energii ΔW_{pl} dla tych zakresów odkształcenia stali C45 zaobserwowano również w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych.

W przypadku stali 30HGSA zmiany własności cyklicznych obserwowanych na jednym stopniu po zmianie poziomu obciążenia z mniejszego na większy oraz z większego na mniejszy są widoczne jedynie dla amplitud $\varepsilon_{ac} < 0,8\%$ (rys. 4.21a,c,e,g). Dla tego zakresu odkształceń, niezależnie od sekwencji zmiany poziomów, występowało zawsze niewielkie osłabienie. Nowy poziom stabilizacji na analizowanych stopniach w kolejnych blokach jest coraz niższy dla naprężenia σ_a oraz wyższy dla odkształcenia ε_{ap} . Ilustrują to przykłady przebiegów zmian parametrów pętli histerezy na stopniu o amplitudzie $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ w programie Lo-Hi. Trudno natomiast mówić o występowaniu procesów umocnienia czy osłabienia na stopniach, których odkształcenie $\varepsilon_{ac} > 0,8\%$ (rys. 4.21b,d,f,h). Poza pierwszym blokiem obciążenia zmiany parametrów pętli histerezy na danym stopniu w jednym bloku są praktycznie niezauważalne. Pomimo to zmianie ulegają na nim wartości parametrów w kolejnych blokach programu obciążenia. Nowe poziomy są coraz niższe w przypadku σ_a oraz wyższe w przypadku ε_{ap} . Powyższe spostrzeżenie w powiązaniu z poprzednim, sformułowanym dla odkształceń $\varepsilon_{ac} < 0,6\%$, świadczy o procesie osłabienia stali stopowej niezależnie od sekwencji programu obciążenia.

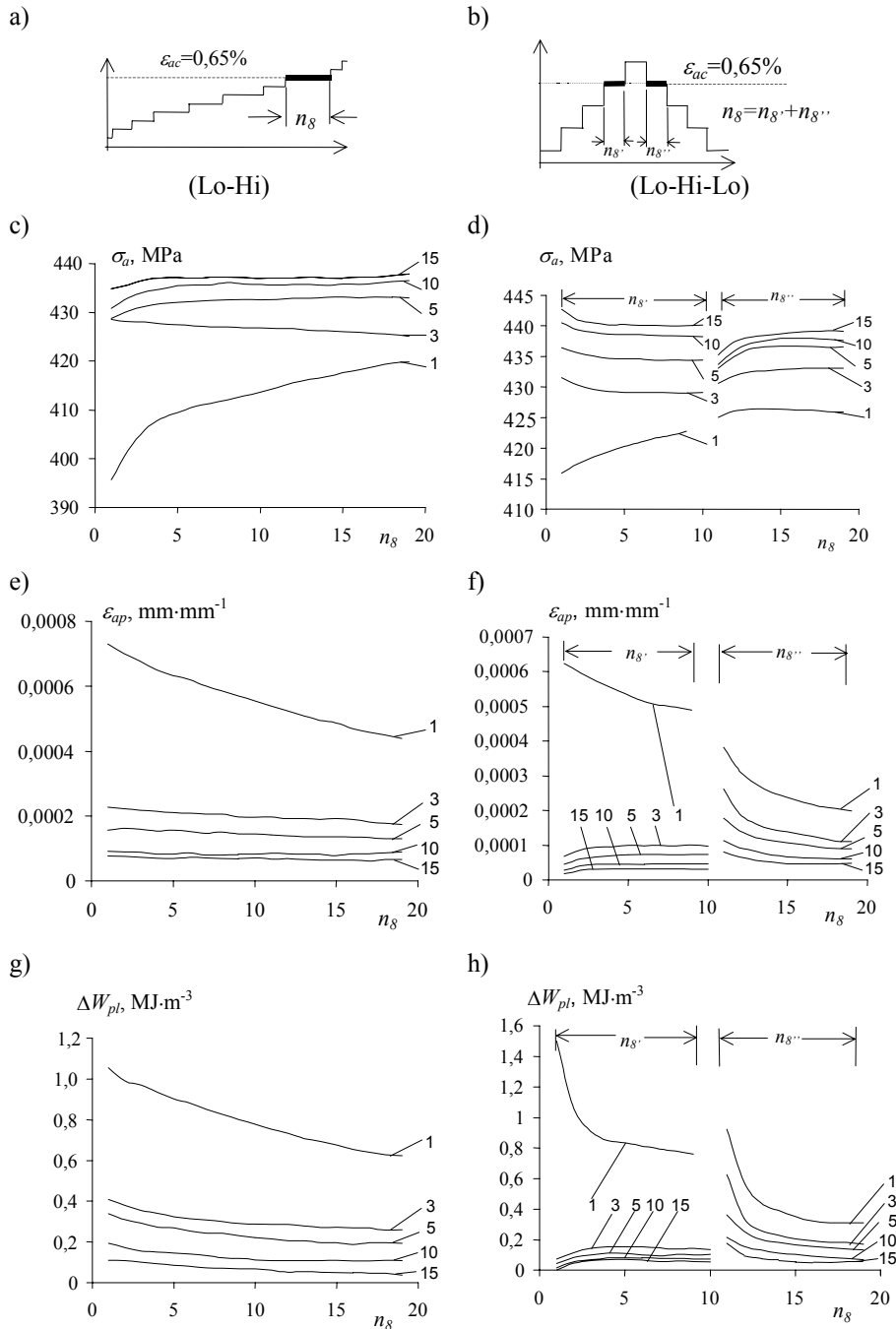
Podobnie jak podczas obciążeń stałoaamplitudowych stali 30HGSA w warunkach obciążeń o różnej sekwencji stopni, opis energetyczny nie zawsze odzwierciedla własności cykliczne materiału obserwowane przy wykorzystaniu opisu naprężeniowego i odkształceniowego. Potwierdzeniem tego są na przykład coraz niższe poziomy energii ΔW_{pl} w kolejnych blokach programów Lo-Hi, Hi-Lo lub I na stopniu o amplitudzie $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ (rys. 4.21a,c,e,g) oraz na stopniu o amplitudzie $\varepsilon_{ac} = 1,2\%$ (rys. 4.21b,d,f,h).

W przypadku stopu AW-2024, niezależnie od poziomu odkształcenia na stopniu poprzedzającym i sekwencji zmian poziomów odkształcenia w programie materiał ulega ciąglemu umocnieniu na analizowanych stopniach programu (rys. 4.22).

Procesy umocnienia na stopniach dotyczą jednak głównie pierwszych bloków obciążenia, co zilustrowano na rysunku 4.22 na przykładzie przebiegów zmian parametrów pętli histerezy na stopniu o amplitudzie $\varepsilon_{ac} = 0,65\%$ w programach Lo-Hi oraz Lo-Hi-Lo. Na stopniu tym, realizowanym w końcowych blokach obciążenia, procesy umocnienia są praktycznie niezauważalne. Pomimo braku na nich wyraźnych zmian własności cyklicznych, w kolejnych powtórzeniach programu poziomy parametrów pętli histerezy są coraz wyższe (σ_a) lub coraz niższe (ε_{ap} i ΔW_{pl}).



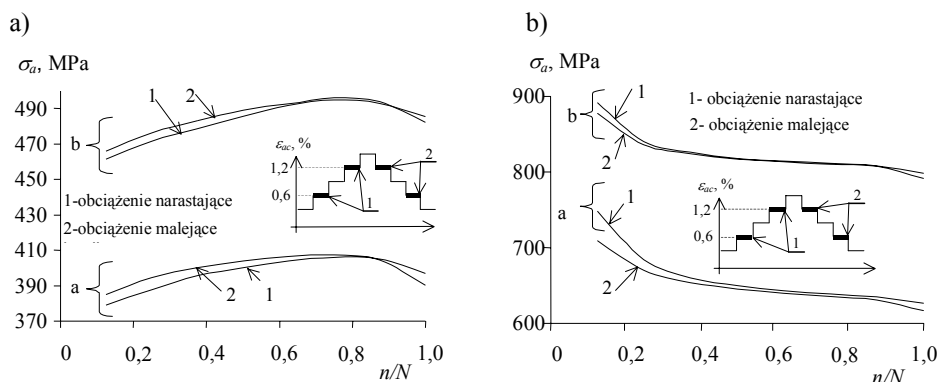
Rys. 4.21. Zmiany parametrów pętli histerezy dla stali 30HGSA podczas obciążenia na stopniu o amplitudzie $\epsilon_{ac} = 0,6\%$ oraz $\epsilon_{ac} = 1,2\%$: a,b) schemat programów obciążenia i położenie stopnia w bloku; c,d) zmiany σ_a ; e,f) zmiany ϵ_{ap} ; g,h) zmiany ΔW_{pl}



Rys. 4.22. Zmiany parametrów pętli histerezy dla stopu AW-2024 podczas obciążenia na stopniu o amplitudzie $\varepsilon_{ac} = 0,65\%$: a,b) schemat programów obciążenia i położenie stopnia w bloku, c,d) zmiany σ_a , e,f) zmiany ε_{ap} , g,h) zmiany ΔW_{pl}

Powyższy charakter zmian wielkości kryterialnych świadczy o zachodzącym umocnieniu stopu AW-2024 na wszystkich stopniach zrealizowanych sekwencji programów obciążenia. Największa intensywność umocnienia występuje na danym stopniu w pierwszym bloku obciążenia i maleje wraz ze wzrostem liczby powtórzeń bloku.

Potwierdzeniem największych zmian własności cyklicznych badanych materiałów na początku próby są np. zróżnicowane przebiegi parametrów pętli histerezy na stopniach o jednakowej amplitudzie odkształcenia programu Lo-Hi-Lo położonych po stronie narastającej i malejącej programu (rys. 4.22b,d,f,h). Analiza zmian parametrów pętli histerezy badanych materiałów w warunkach programu Lo-Hi-Lo pozwala zauważyć, że największe różnice poziomów parametrów pętli histerezy na stopniach po narastającej i malejącej stronie programu obciążenia występują dla pierwszych powtórzeń bloków programu obciążenia. Zróżnicowanie pomiędzy nimi zanika w końcowym okresie trwałości zmęczeniowej. Powyższą cechę badanych materiałów zilustrowano na rysunku 4.23, na przykładzie wyników badań próbek ze stali C45 i 30HGSA. Na rysunku pokazano przebiegi zmian σ_a w ostatnim cyklu stopni o amplitudzie $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ i $\varepsilon_{ac} = 1,2\%$ położonych w bloku po stronie narastającej i malejącej programu Lo-Hi-Lo.



Rys. 4.23. Naprężenie σ_a dla Lo-Hi-Lo na końcu stopni $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ i $1,2\%$: a) stal C45, b) stal 30HGSA

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że najszybciej różnice pomiędzy wykresami zanikają w przypadku stopu AW-2024, a najpóźniej w przypadku stali C45. Największe zróżnicowanie wartości σ_a w bloku po rosnącej i malejącej stronie programu obciążenia występuje podczas badań próbek ze stopu AW-2024, natomiast najmniejsze w przypadku próbek ze stali C45.

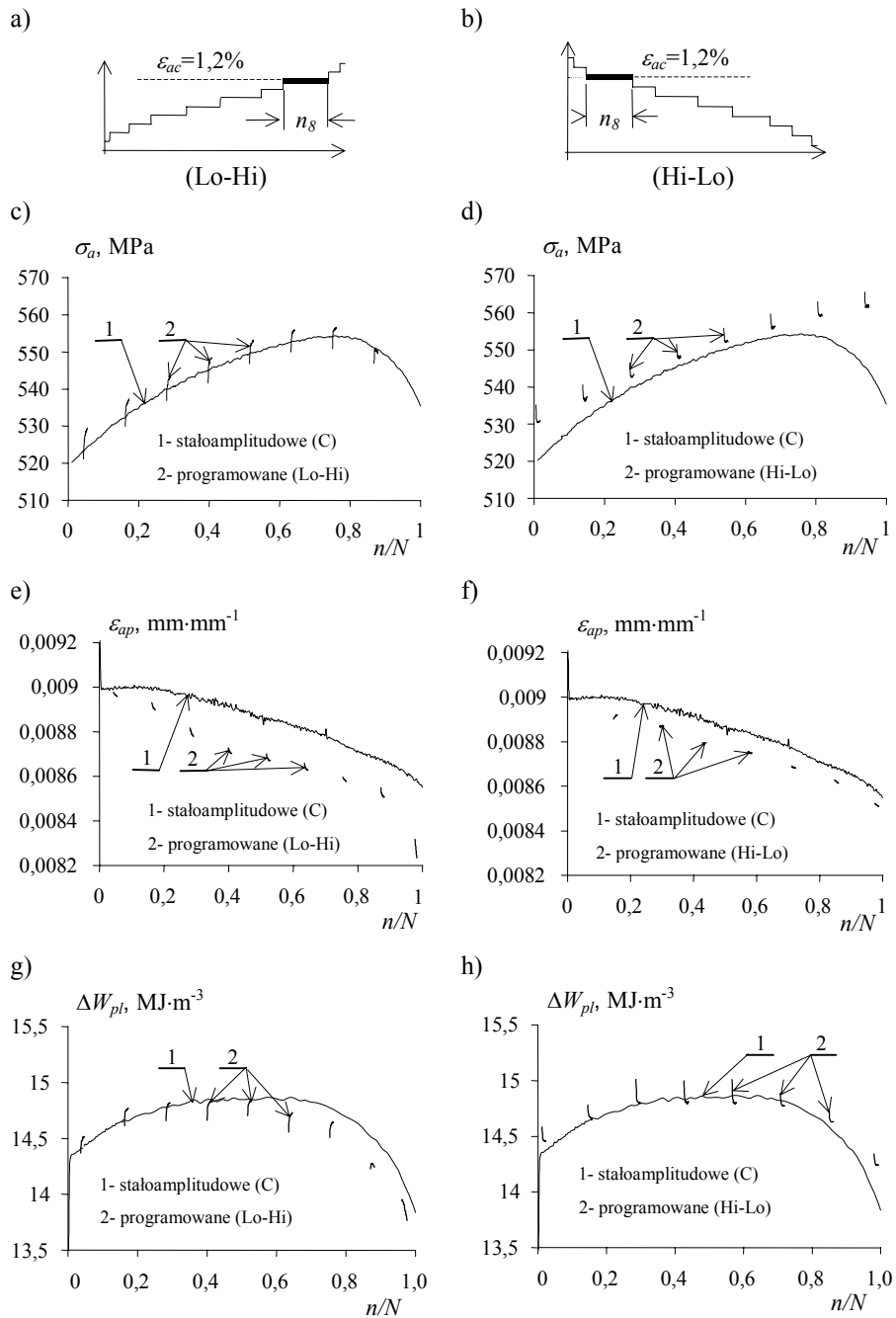
Analiza porównawcza wartości parametrów pętli histerezy na wybranych poziomach obciążenia i różnych okresach trwałości pozwala stwierdzić, że wszystkie sekwencje programu obciążenia powodują bardzo podobny przebieg zmian analizowanych parametrów pętli histerezy. Potwierdzają to zbliżone za-

kresy zmian parametrów pętli histerezy na analizowanych poziomach odkształcenia w kolejnych powtórzeniach programu. Ponadto na podstawie przeprowadzonej analizy porównawczej można stwierdzić, że wartości parametrów pętli histerezy na tych samych poziomach odkształcenia realizowanego w warunkach obciążenia programowanego są w ujęciu ilościowym i jakościowym bardzo podobne do zmian obserwowanych w warunkach obciążenia stałoamplitudowego. Powyższy charakter zmian zilustrowano na rysunkach 4.24÷4.26 na podstawie przykładowych wykresów parametrów pętli histerezy w funkcji trwałości względnej n/N uzyskanych podczas realizacji wybranych sekwencji obciążenia programowanego i obciążenia stałoamplitudowego dla jednego poziomu odkształcenia ($\varepsilon_{ac} = 1,2\%$) dla próbek ze stali C45 i 30HGSA oraz $\varepsilon_{ac} = 0,65\%$ dla próbek ze stopu AW-2024) i jednego poziomu współczynnika wypełnienia widma $\zeta = 0,56$.

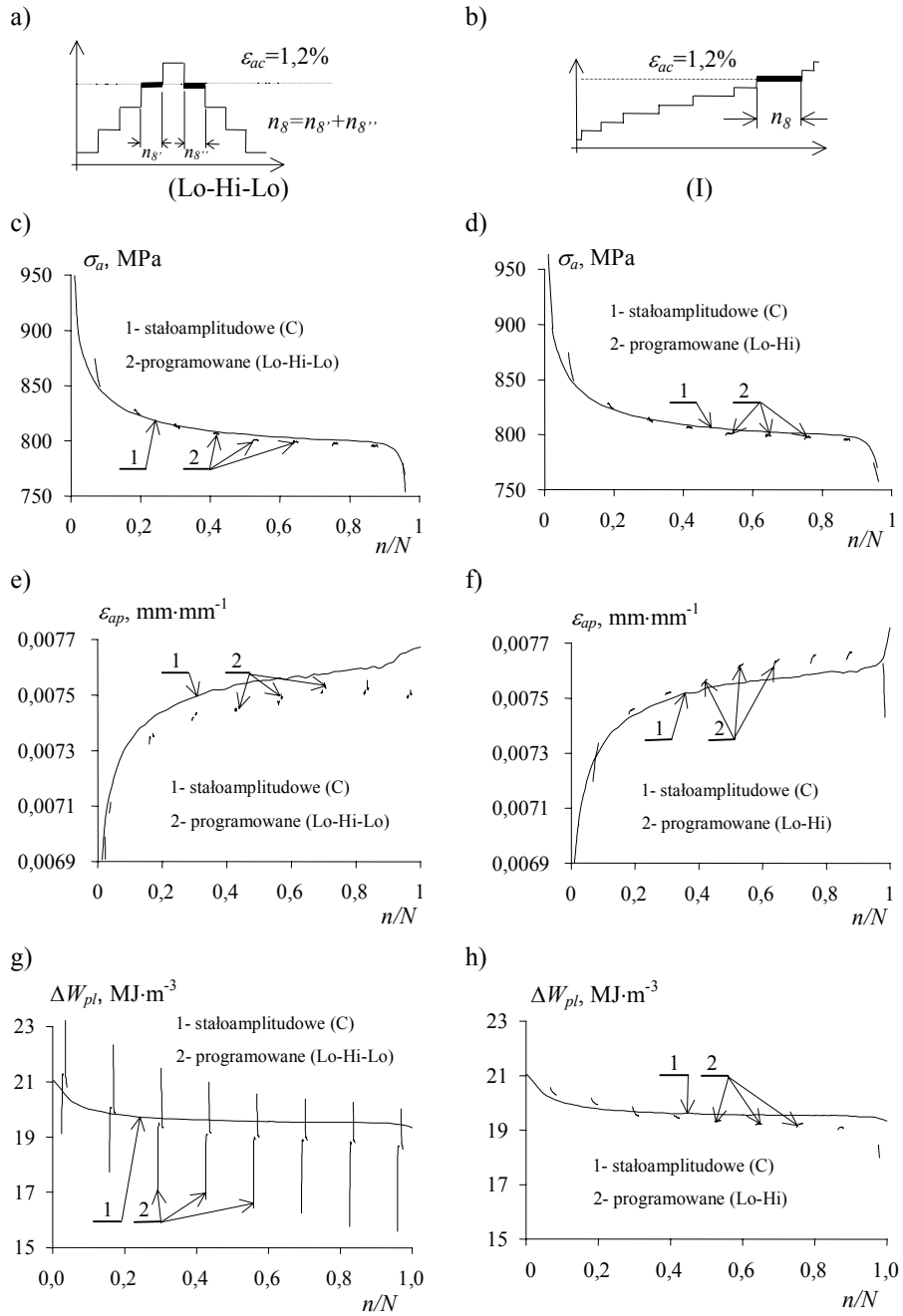
Na podstawie wzajemnego położenia wykresów zmian parametrów pętli histerezy na jednym stopniu bloku programu w kolejnych jego powtórzeniach można stwierdzić, że pomimo zaburzenia procesu stabilizacji w wyniku zmian poziomu amplitudy odkształcenia, materiał wydaje się „pamiętać” przebieg zmian własności cyklicznych, który jest charakterystyczny dla danego poziomu odkształcenia. Na wykresach poszczególnych parametrów pętli histerezy uzyskanych w warunkach obciążeń o różnej sekwencji stopni widać trend tych zmian. Uzyskiwane w końcowych cyklach poszczególnych stopni obciążenia programowanego wartości parametrów pętli histerezy zbiegają do ich poziomu uzyskanego podczas obciążenia stałoamplitudowego.

W celu sformułowania wniosków o charakterze ogólnym przeprowadzono również analizę porównawczą wykresów parametrów pętli histerezy dla wszystkich postaci obciążeń i materiałów wykorzystywanych w badaniach. W tym celu porównano wartości parametrów pętli histerezy w tych samych okresach trwałości względnej n/N dla obciążeń stałoamplitudowych i programowanych. W przypadku obciążeń programowanych blokowych o różnej sekwencji stopni (I, Lo-Hi, Hi-Lo, Lo-Hi-Lo) do analizy porównawczej wykorzystano parametry pętli histerezy określone dla ostatniego cyklu poszczególnych stopni programu.

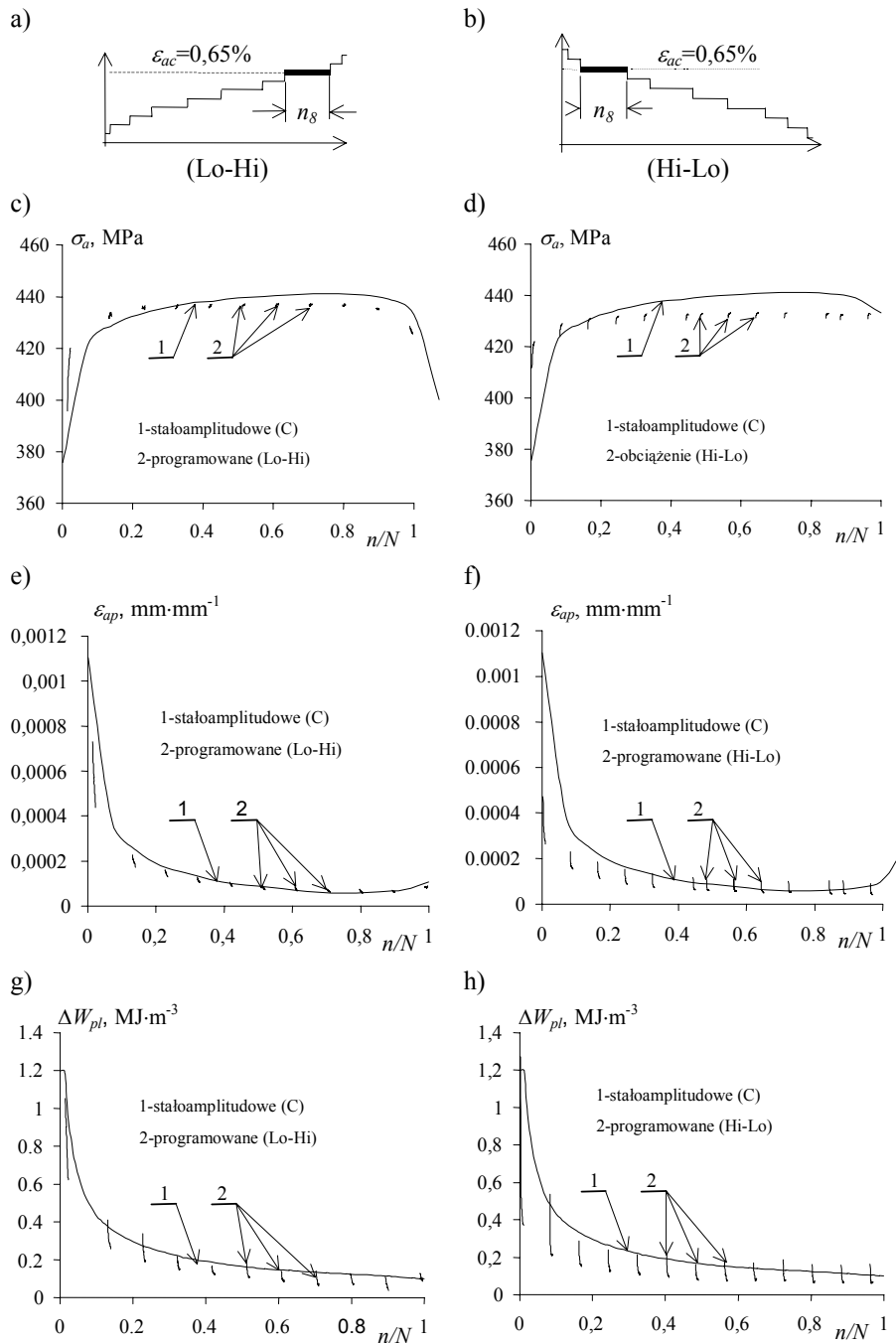
Na wszystkich analizowanych poziomach odkształcenia uzyskano wyniki potwierdzające wcześniejsze spostrzeżenia dotyczące braku wyraźnego wpływu kształtu programu na przebieg zmian własności cyklicznych.



Rys. 4.24. Zmiany parametrów pętli histerezy dla stali C45 podczas obciążenia stałoaamplitudowego i programowanego na stopniu o amplitudzie $\varepsilon_{ac} = 1,2\%$: a,b) schematy programów obciążenia i położenie stopnia w bloku, c,d) zmiany σ_a , e,f) zmiany ε_{ap} , g,h) zmiany ΔW_{pl}

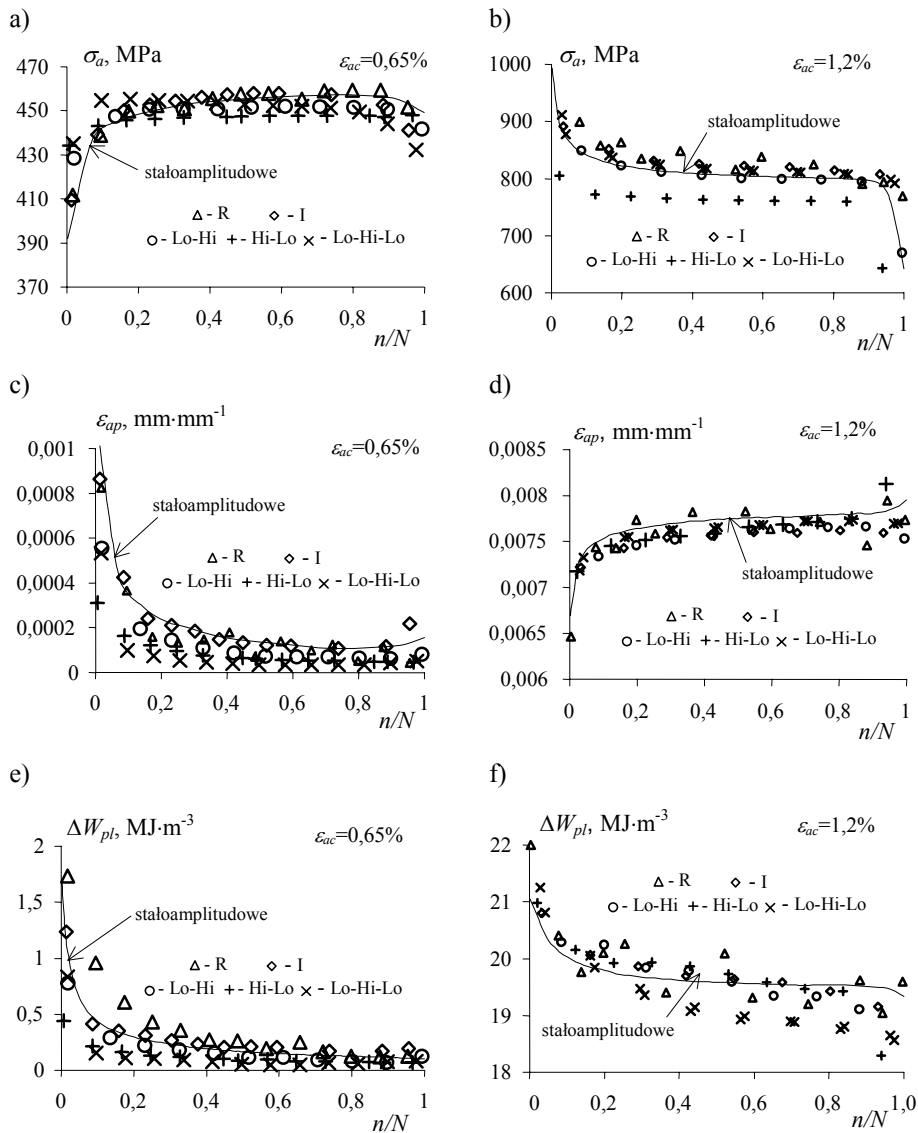


Rys. 4.25. Zmiany parametrów pętli histerezy dla stali 30HGSA podczas obciążenia stałoaamplitudowego i programowanego na stopniu o amplitudzie $\epsilon_{ac} = 1,2\%$: a,b) schematy programów obciążenia i położenie stopnia w bloku, c,d) zmiany σ_a , e,f) zmiany ϵ_{ap} , g,h) zmiany ΔW_{pl}



Rys. 4.26. Zmiany parametrów pętli histerezy dla stopu AW-2024 podczas obciążenia stałoamplitudowego i programowanego na stopniu o amplitudzie $\varepsilon_{ac}=0,65\%$: a,b) schematy programów obciążenia i położenie stopnia w bloku, c,d) zmiany σ_a , e,f) zmiany ε_{ap} , g,h) zmiany ΔW_{pl}

Na rysunku 4.27 pokazano przykładowe wykresy zmian parametrów pętli na dwóch poziomach odkształcenia uzyskane dla dwóch metali (stal 30HGSA i stop AW-2024). W celu zapewnienia czytelności wykresów naniesiono na nich jedynie wyniki otrzymane podczas jednej z trzech prób realizowanych dla każdej sekwencji programu obciążenia oraz jeden wykres parametru pętli uzyskany w warunkach obciążenia stałoaamplitudowego.



Rys. 4.27. Parametry pętli histerezy dla stopu AW-2024 (a,c,e) i stali 30HGSA (b,d,f) w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych i programowanych: a,b) zmiany σ_a , c,d) zmiany ϵ_{ap} , e,f) zmiany ΔW_{pl}

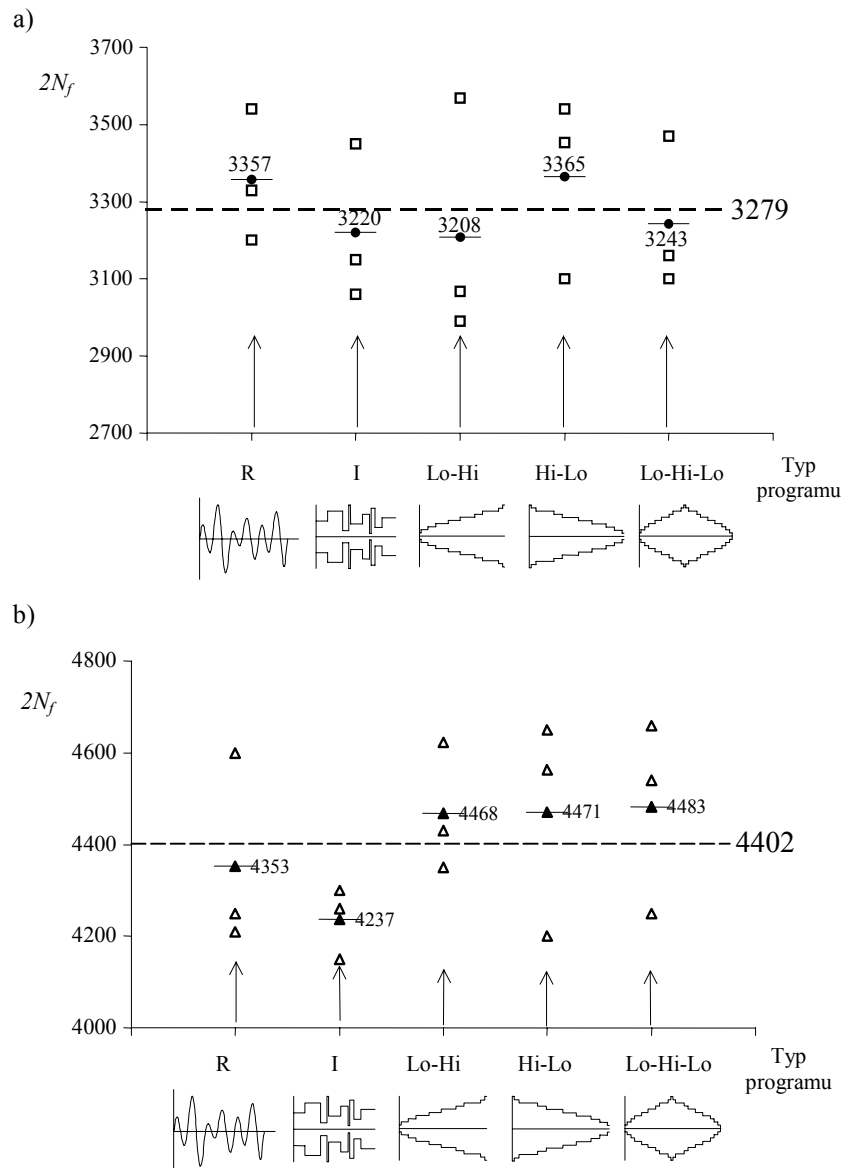
Na podstawie analizy porównawczej wykresów parametrów pętli histerezy uzyskanych na dwóch poziomach odkształcenia realizowanego w programach o zróżnicowanej postaci można stwierdzić, że plasują się one w bardzo bliskim sąsiedztwie wykresów obrazujących przebiegi zmian tych parametrów charakterystycznych dla obciążenia stałoamplitudowego.

W celu oceny statystycznej przeprowadzono analizę wariancji na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ i wielu średnich wartości parametrów pętli histerezy, otrzymanych w tych samych okresach trwałości w warunkach obciążenia stałoamplitudowego, programowanego i losowego. Analiza wariancji wielu średnich wykazała, że przy tych samych parametrach programów obciążenia (liczba stopni k , pojemność bloku n_o i współczynnik wypełnienia widma ζ) nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o równości wartości średnich parametrów pętli histerezy w tych samych okresach trwałości i tych samych poziomach odkształcenia realizowanych przy różnych sekwencjach programów obciążenia.

Brak wpływu sekwencji stopni w programie obciążenia na przebieg zmian własności cyklicznych badanych próbek potwierdzają również wyniki trwałości zmęczeniowej uzyskane dla poszczególnych sekwencji programu obciążenia zamieszczone w tabeli 3.6. Na podstawie analizy wyników trwałości zmęczeniowej próbek wykonanych z trzech metali w warunkach obciążeń programowanych o zróżnicowanej kolejności stopni można stwierdzić, że charakteryzuje je podobieństwo ilościowe. Niezależnie od sekwencji programu obciążenia uzyskane trwałości są bardzo zbliżone. Na rysunku 4.28 przedstawiono w sposób graficzny wyniki trwałości w warunkach obciążeń programowanych próbek ze stali C45 i stopu AW-2024.

Analiza wariancji dla wielu średnich wykazała, podobnie jak podczas oceny statystycznej parametrów pętli histerezy, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o równych wartościach średnich trwałości uzyskanych dla różnych sekwencji programów obciążenia.

Wyniki przeprowadzonych badań świadczą o braku wpływu postaci programu obciążenia oraz jego kształtu na trwałość zmęczeniową. Potwierdza to doniesienia literaturowe opracowane na podstawie badań zmęczenia wysokocyklowego [151, 153]. Znaczenie praktyczne ma wykazany brak wpływu postaci i kształtu programu obciążenia na przebieg zmian własności cyklicznych badanych materiałów. Umożliwia to bowiem przewidywanie zmian własności cyklicznych materiału podczas obciążenia eksploatacyjnego na podstawie znajomości tego procesu w warunkach obciążenia stałoamplitudowego.

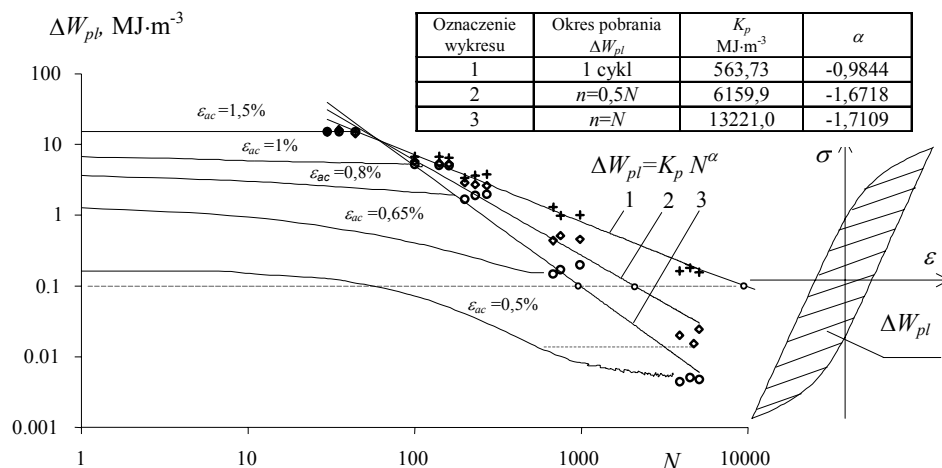


Rys. 4.28. Trwałość zmęczeniowa próbek ze stali C45 (a) i stopu AW-2024 (b) w warunkach obciążenia programowanego o różnej sekwencji stopni ($\zeta = 0,56$, $\varepsilon_{acmax} = 1,5\%$)

4.3. WPŁYW ZMIAN WŁASNOŚCI CYKLICZNYCH NA OPISY I MODELE WYKORZYSTYWANE PODCZAS OBLICZEŃ TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

A. Wykresy zmęczenia

Korzystając z wykresów zmęczenia w ujęciu energetycznym przedstawionych na rysunku 3.14, należy mieć na uwadze fakt, że zostały one wykonane w sposób pośredni na podstawie badań realizowanych w warunkach kontrolowanego odkształcenia. Natomiast wielkość kryterialna, jaką jest energia ΔW_{pl} , była obliczana po przeprowadzeniu próby zmęczeniowej. W przypadku materiałów niestabilnych cyklicznie występują również trudności opisu wykresu zmęczeniowego. Dotyczą one określenia na poszczególnych poziomach odkształcenia reprezentatywnej dla nich energii ΔW_{pl} . Przyjęty do jej określenia okres trwałości, jak i sama wartość energii ΔW_{pl} , mają bowiem istotny wpływ na przebieg wykresu zmęczeniowego. W celu jego zilustrowania na rysunku 4.29 pokazano trzy wykresy zmęczenia uzyskane z wykorzystaniem energii ΔW_{pl} z trzech różnych okresów trwałości zmęczeniowej próbek ze stopu AW-2024. Oprócz wykresu zmęczeniowego, uzyskanego przy wykorzystaniu energii ΔW_{pl} z okresu odpowiadającego połowie trwałości, na rysunku pokazano dodatkowo dwa wykresy, opracowane z wykorzystaniem energii ΔW_{pl} odpowiadającej pierwszemu cyklowi obciążenia oraz cyklowi ostatniemu przed pęknięciem zmęczeniowym. Na rysunku przedstawiono również przebiegi zmian energii pętli histerezy uzyskane na pięciu poziomach odkształcenia realizowanych podczas badań.



Rys. 4.29. Wpływ okresu trwałości przyjętego do określenia energii ΔW_{pl} na położenie wykresu zmęczeniowego próbek ze stopu AW-2024

Na podstawie porównania położenia wyznaczonych wykresów zmęczeniowych można stwierdzić, że okres trwałości, w którym zostanie pobrana pętla

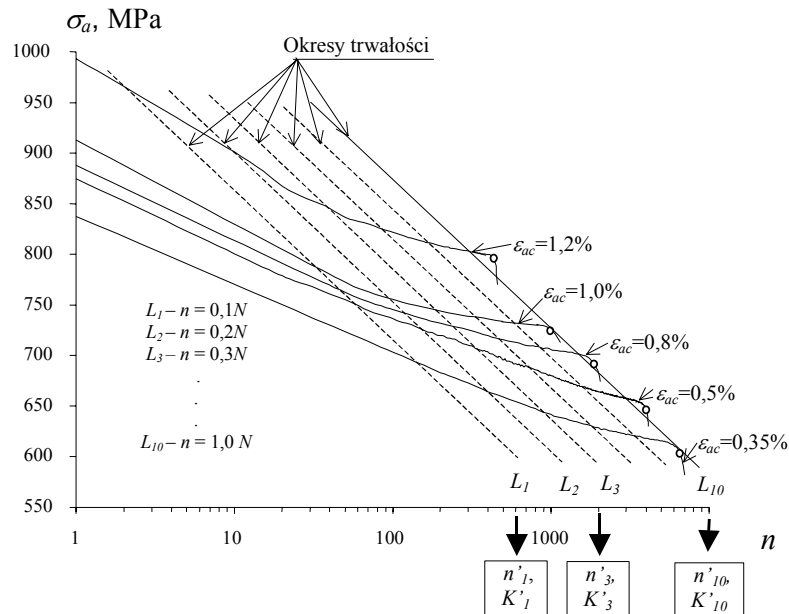
histerezy, ma istotny wpływ na otrzymaną charakterystykę zmęczenia. Wpływ ten zależny jest również od poziomu obciążenia i wzrasta w miarę obniżania odkształcenia ε_{ac} . Przykładowo, na stałym poziomie energii $\Delta W_{pl} = 0,1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ trwałość określona z wykresu 1 (wykres uzyskany dla ΔW_{pl} z pierwszego cyklu obciążenia) jest prawie 10-krotnie wyższa w stosunku do trwałości uzyskanej z wykresu 3. (energia ΔW_{pl} z ostatniego cyklu obciążenia). Wartości pośrednie trwałości można uzyskać przy wykorzystaniu wykresu 2. (energia ΔW_{pl} z okresu odpowiadającego połowie trwałości zmęczeniowej).

Ze względu na wstępujące zmiany energii pętli histerezy podczas badań stałoaamplitudowych (rys. 3.6÷3.8 oraz 4.1) problem określenia energii ΔW_{pl} , reprezentatywnej dla danego poziomu odkształcenia, dotyczy również wykonania wykresu zmęczeniowego w ujęciu energetycznym dla próbek ze stali 30HGSA. Najmniejsze zmiany energii ΔW_{pl} na poszczególnych poziomach odkształcenia próbek ze stali C45 powodują, że wpływ okresu trwałości, przyjętego do określenia energii ΔW_{pl} na przebieg wykresu zmęczeniowego, jest dla tego materiału najmniejszy. Uzyskane wyniki potwierdzają doniesienia literaturowe dotyczące wpływu okresu stabilizacji na uzyskane wykresy zmęczeniowe, a w konsekwencji na wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej [58, 112]. Są one jednocześnie potwierdzeniem zasadności wykonywania wykresów zmęczeniowych na podstawie badań prowadzonych np. w warunkach kontrolowanej energii ΔW_{pl} czy ΔW_c [11, 59, 60, 115].

B. Parametry n' i K'

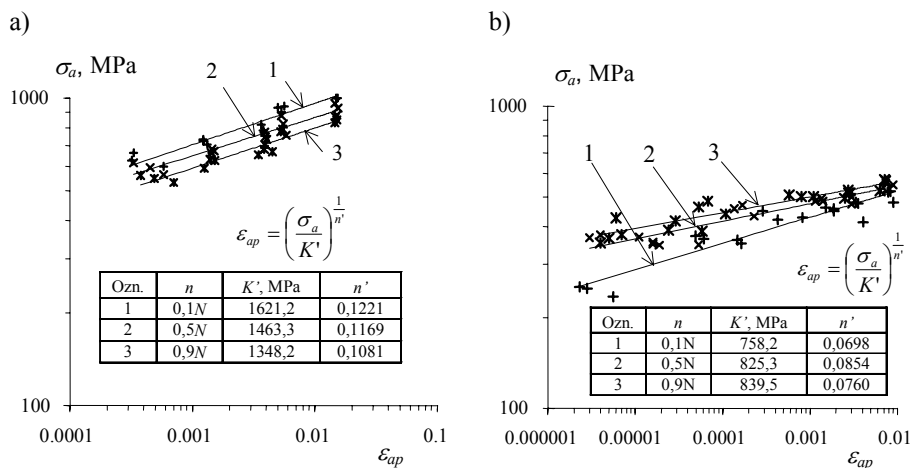
Jak wspomniano w rozdziale 2., do podstawowych danych materiałowych określanych zgodnie z [N1] i [N2] podczas niskocyklowych badań zmęczeniowych i wykorzystywanych podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej należą, oprócz wykresów zmęczeniowych, parametry równania (2.1): n' i K' . Konsekwencją stwierdzonych podczas badań eksperymentalnych zmian parametrów pętli histerezy i zarazem własności cyklicznych jest zróżnicowanie wartości wyznaczanych parametrów n' i K' w zależności od okresu trwałości, dla którego zostały one wyznaczone. W celu określenia wpływu okresu trwałości na zakres zmian wyznaczanych parametrów n' i K' określono je w dziesięciu okresach rozmieszczonych równomiernie w całym zakresie trwałości zmęczeniowej. Przyjętą metodę postępowania wyjaśniono na rysunku 4.30, na którym pokazano przykładowo zarejestrowane przebiegi zmian amplitudy naprężenia w funkcji liczby cykli obciążenia, na pięciu poziomach odkształcenia próbek ze stali 30HGSA.

Okresy trwałości, w których określono parametry pętli histerezy σ_a i ε_{ap} na poszczególnych poziomach odkształcenia ε_{ac} definiowano, wykorzystując trwałość względną n/N .



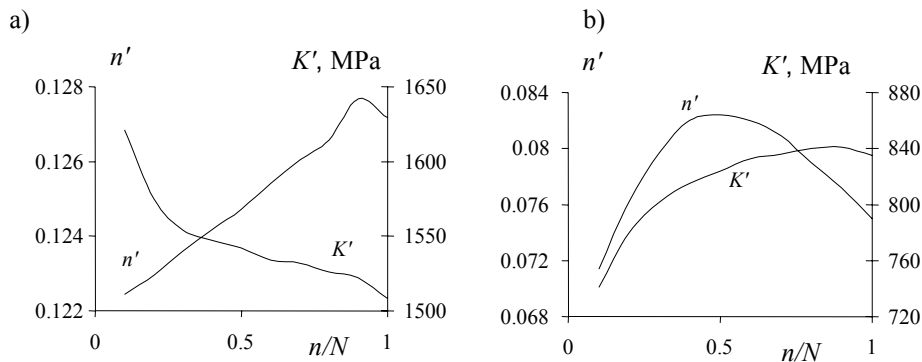
Rys. 4.30. Określanie n' i K' na podstawie stałoamplitudowych badań zmęczeniowych próbek ze stali 30HGSA

Otrzymane sekwencje parametrów pętli histerezy σ_a i ϵ_{ap} z różnych okresów trwałości aproksymowano w bilogarytmicznym układzie współrzędnych prostymi regresji o postaci opisanej równaniem (2.1). Przykładowe wyniki aproksymacji w postaci wykresów dla dwóch materiałów (stal 30HGSA i stop aluminium AW-2024) i trzech okresów trwałości przedstawiono na rysunku 4.31.



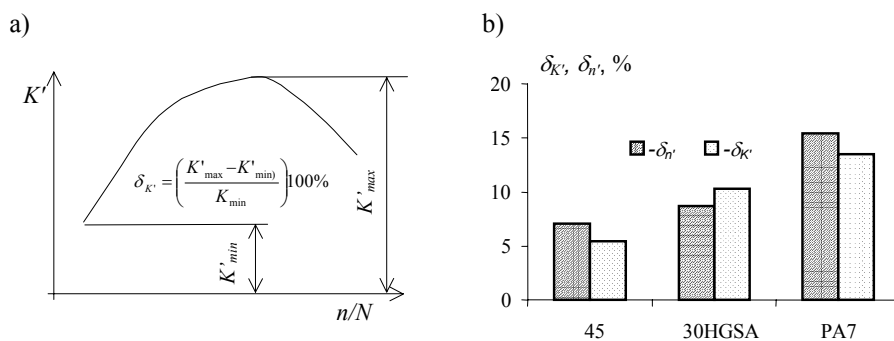
Rys. 4.31. Opis odkształceń plastycznych równaniem (2.1) w różnych okresach trwałości: a) stal 30HGSA, b) stop AW-2024

Wzajemne położenie uzyskanych wykresów, jak również zróżnicowanie wartości parametrów n' i K' , jest skutkiem zmian parametrów pętli histerezy w funkcji liczby cykli obciążenia obserwowanych na rysunkach 3.6÷3.8 oraz 4.30. Wyznaczone w różnych okresach trwałości względnej n/N wartości parametrów n' i K' dla stali 30HGSA i stopu AW-2024 przedstawiono w formie wykresów na rysunku 4.32.



Rys. 4.32. Zmiany n' i K' w funkcji n/N : a) stal 30 HGSA, b) stop AW-2024

Na podstawie wykresów można stwierdzić, że wartości parametrów n' i K' zależą od okresu trwałości, z którego zostały pobrane parametry pętli histerezy σ_a i ε_{ap} . W pracy przeprowadzono ocenę zakresu zmian analizowanych w różnych okresach trwałości parametrów n' i K' . W tym celu, podobnie jak podczas analizy zmian parametrów pętli histerezy, wprowadzono pojęcia współczynników ich zmian, tj.: $\delta_{K'}$ dla K' oraz $\delta_{n'}$ dla n' . Interpretację graficzną współczynnika $\delta_{K'}$ oraz uzyskane wyniki obliczeń $\delta_{K'}$ i $\delta_{n'}$ przedstawiono na rysunku 4.33.

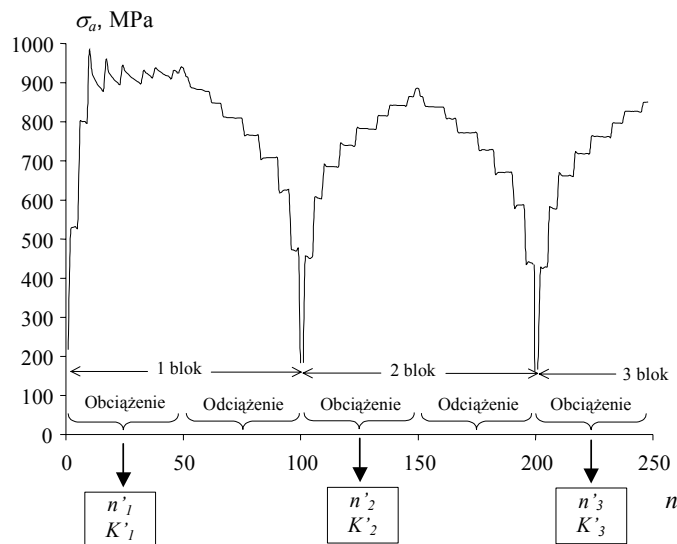


Rys. 4.33. Współczynniki $\delta_{n'}$ i $\delta_{K'}$: a) interpretacja graficzna, b) wyniki obliczeń

Analiza współczynników $\delta_{K'}$ i $\delta_{n'}$ wskazuje, że najwyższe wartości osiągają one dla stopu AW-2024 ($\delta_{K'} = 15\%$, $\delta_{n'} = 17\%$), a najniższe w przypadku stali

C45 ($\delta_{K'} = 5\%$, $\delta_{n'} = 7\%$). W celu wykorzystania podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej, np. metodą cykl po cyklu, należałoby rozważyć możliwość analitycznego opisu zmian wartości parametrów n' i K' przy wykorzystaniu wielomianu. Wymaga to jednak przeprowadzenia dalszych badań eksperymentalnych.

W pracy dokonano doświadczalnej weryfikacji uproszczonej metody wyznaczania parametrów n' i K' zaproponowanej w pracy [71]. Kolejne bloki obciążenia programowanego o zróżnicowanej sekwencji były zbiorami pętli histerezy na 10 poziomach odkształcenia. Zbiory te wykorzystano do określenia parametrów n' i K' w różnych okresach trwałości. Ze względu na obserwowane na jednym stopniu zmiany własności cyklicznych, parametry pętli histerezy σ_a i ε_{ap} pobierano z ostatnich cykli kolejnych stopni programu. Na rysunku 4.34 przedstawiono schematycznie przyjęty sposób postępowania podczas określania danych materiałowych n' i K' w warunkach programu obciążenia Lo-Hi-Lo. W przypadku tego programu odrębnymi równaniami opisywano parametry pętli w bloku o narastającej i malejącej amplitudzie odkształcenia.

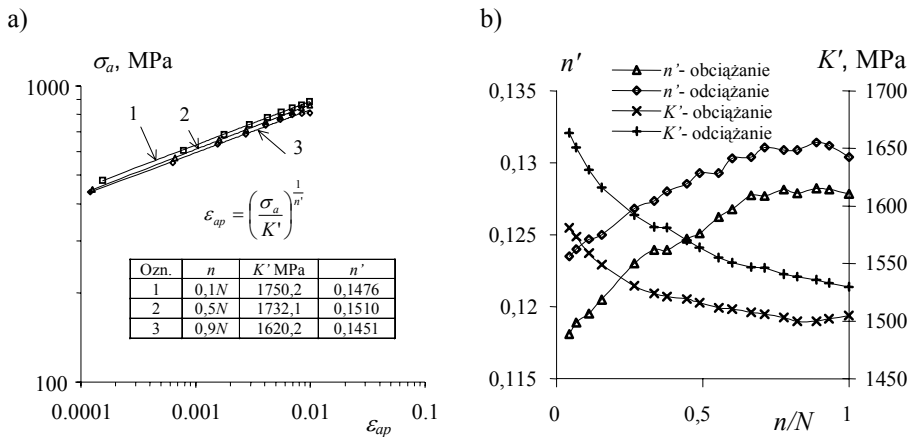


Rys. 4.34. Określanie n' i K' w warunkach obciążenia programowanego Lo-Hi-Lo

Na rysunku 4.35a przedstawiono przykładowe wyniki aproksymacji zależnością (2.1) parametrów pętli histerezy σ_a i ε_{ap} z trzech bloków obciążenia programowanego (Lo-Hi-Lo) próbek ze stali 30HGSA.

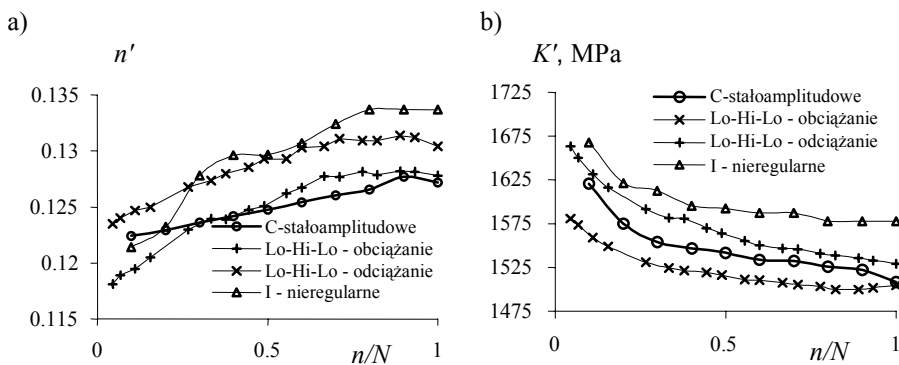
Skutkiem zmian parametrów pętli histerezy σ_a i ε_{ap} obserwowanych na poszczególnych stopniach kolejnych powtórzeń programu są zróżnicowane położenia opisujących je wykresów. Ze względu na stwierdzone podczas analizy parametrów pętli w warunkach realizacji programu Lo-Hi-Lo zróżnicowanie własności cyklicznych po stronie narastającej i malejącej obciążenia, wartości parametrów n' i K' wyznaczano również dla obciążenia narastającego i maleją-

cego. Uzyskane wartości parametrów n' i K' w 10 okresach trwałości przedstawiono na rysunku 4.35b.



Rys. 4.35. Właściwości cykliczne stali 30HGSA w warunkach obciążenia programowanego Lo-Hi-Lo: a) wykresy $\sigma_a - \varepsilon_{ap}$ w różnych okresach trwałości, b) zmiany n' i K' w funkcji trwałości względnej

Podobnie jak dla obciążenia Lo-Hi-Lo postąpiono w przypadku pozostałych sekwencji obciążeń programowanych. Dla wszystkich sekwencji programów uzyskano statystycznie takie same wartości parametrów n' i K' . Przykładowe wykresy zmian parametrów n' i K' w funkcji trwałości względnej n/N dla obciążenia Lo-Hi-Lo oraz I przedstawiono na rysunku 4.36a i 4.36b. Na wykresach naniesiono dodatkowo wartości wyznaczonych parametrów n' i K' w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych.



Rys. 4.36. Zmiany n' (a) oraz K' (b) dla próbek ze stali 30HGSA uzyskane w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych i programowanych

Na podstawie wzajemnego położenia wykresów można stwierdzić, że podczas obciążenia programowanego stali 30HGSA, podobnie jak w próbie stałoa-

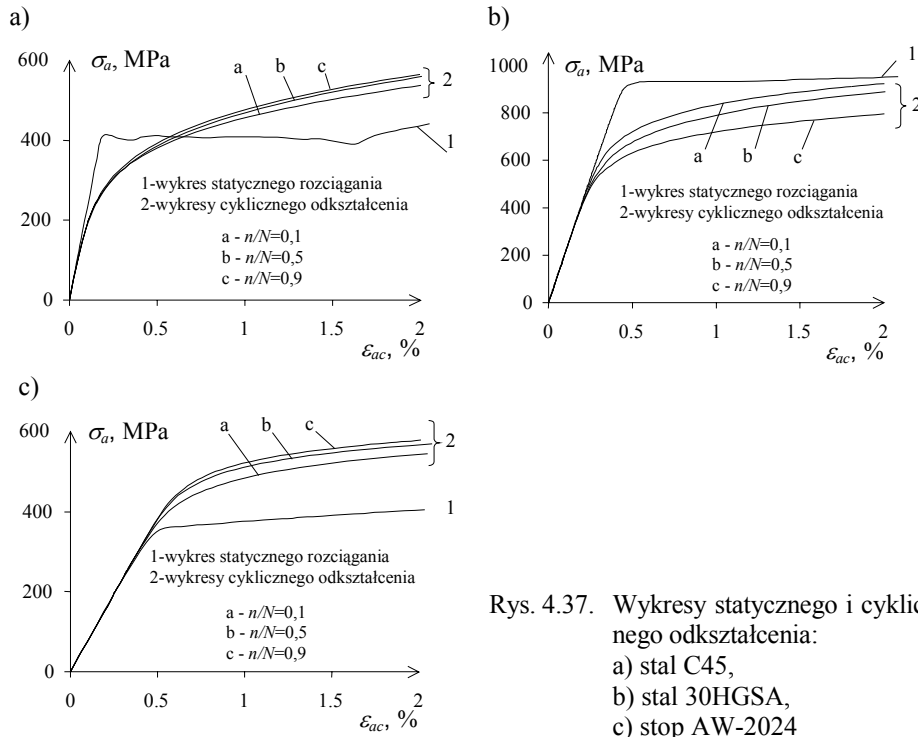
amplitudowej, wartości parametrów n' i K' zależą od okresu trwałości, w którym zostały pobrane parametry pętli histerezy. W przypadku wyznaczania parametrów n' i K' w warunkach obciążeń programowanych (metoda uproszczona) stwierdzono, że dla prostej regresji opisującej zależność pomiędzy σ_a i ε_{ap} współczynnik korelacji $R^2 < 0,9$. Trudności opisu dużego zakresu odkształceń niezmienną funkcją potęgową opisaną równaniem (2.1) sygnalizowano również w pracach [18, 70].

Podobieństwo ilościowe i jakościowe wyznaczonych w zróżnicowanych warunkach obciążenia parametrów n' i K' stanowi potwierdzenie możliwości wykorzystywania uproszczonych metod badań do wyznaczania własności cyklicznych metali opisywanych między innymi w pracach [4, 62, 70, 99]. Uzyskane wyniki mają również duże znaczenie praktyczne. Wskazują bowiem na możliwość wykorzystywania uproszczonych metod wyznaczania własności cyklicznych do określania wartości danych materiałowych w różnych okresach trwałości zmęczeniowej, bez potrzeby czasochłonnej analizy wyników badań w warunkach obciążeń stałoamplitudowych.

C. Wykresy cyklicznego odkształcenia

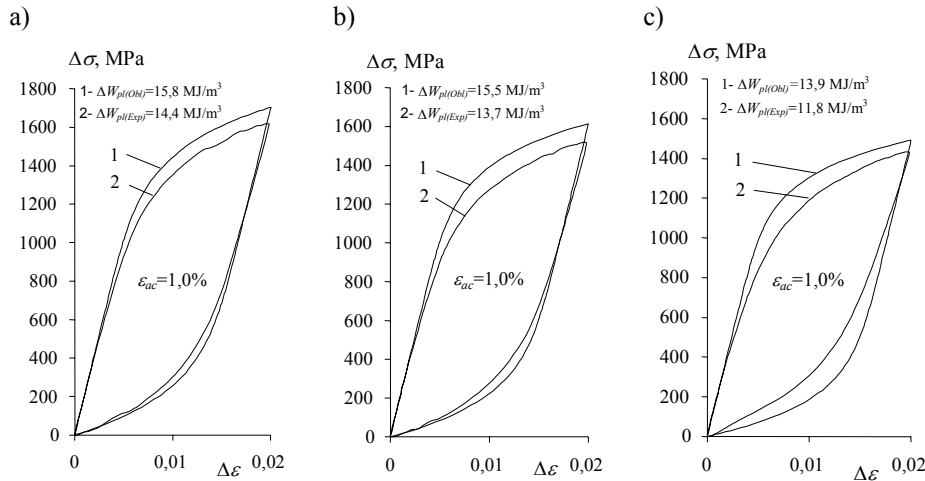
Zmiany parametrów n' i K' powodują, że analityczny opis wykresów cyklicznego odkształcenia, np. z wykorzystaniem zależności (2.2), zależy również od okresu trwałości zmęczeniowej, dla którego parametry te zostały określone. Na rysunku 4.37 przedstawiono przykładowe wykresy cyklicznego odkształcenia dla badanych materiałów wykorzystując n' i K' z trzech okresów trwałości. Na rysunkach naniesiono dodatkowo wykresy statycznego rozciągania, uzyskane dla tych materiałów.

Wykonane wykresy cyklicznego odkształcenia odzwierciedlają własności cykliczne badanych materiałów w trzech różnych okresach trwałości w warunkach obciążenia stałoamplitudowego. Wzajemne położenie wykresów cyklicznego odkształcenia oraz statycznego rozciągania potwierdza wyniki analizy własności cyklicznych przy wykorzystaniu parametrów pętli histerezy, tj. umocnienie stopu AW-2024 oraz osłabienie stali 30HGSA. Przecinanie się wykresów statycznego i cyklicznego odkształcenia uzyskanych dla próbek ze stali C45 wskazuje na wpływ poziomu odkształcenia na zmiany własności cyklicznych. Na podstawie położenia wykresów cyklicznego i statycznego rozciągania można stwierdzić, że odkształcenie, przy którym zmianie ulegają własności cykliczne stali C45, wynosi około 0,7%. Uzyskane wyniki stanowią potwierdzenie doniesień literaturowych o możliwości przewidywania zachowania materiału w warunkach obciążeń cyklicznych na podstawie wzajemnego położenia wykresów cyklicznego i statycznego rozciągania [61].



D. Analityczny opis pętli histerezy

Przedstawione na rysunkach 3.6÷3.8 wykresy zmian parametrów pętli histerezy w funkcji liczby cykli obciążenia oraz istniejący związek pomiędzy wykresem cyklicznego odkształcenia a odpowiednimi gałęziami pętli histerezy opisanych zależnością (2.3) powodują, że odwzorowywana podczas obliczeń trwałości wartość energii odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} również zależy od okresu trwałości, w którym zostały określone parametry n' i K' . Wykorzystując zależność opisaną równaniem (2.16), w rozprawie przeprowadzono ocenę skuteczności odwzorowywania odpowiednich gałęzi pętli, jak również samej energii ΔW_{pl} . Podczas obliczeń energii ΔW_{pl} przyjęto założenie, że badane materiały podlegają zasadzie Masinga [84]. Przykładowe pętli histerezy dla jednego poziomu odkształcenia ($\varepsilon_{ac} = 1,0\%$), uzyskane z obliczeń i badań próbek ze stali 30HGSA w różnych okresach trwałości przedstawiono na rysunku 4.38. Podczas opisu poszczególnych gałęzi histerezy wykorzystywano zależność (2.4) i zróżnicowanie wartości n' i K' w różnych okresach trwałości.



Rys. 4.38. Pętle histerezy dla stali 30HGSA w warunkach obciążenia stałoaamplitudowego w różnych okresach trwałości uzyskane z obliczeń i z badań: a) $n/N = 0,1$, b) $n/N = 0,5$, c) $n/N = 0,9$

Jak należało oczekiwać, okres określenia danych materiałowych n' i K' wpływa zarówno na kształt uzyskanej pętli oraz na wartości energii odkształcenia $\Delta W_{pl(obl)}$. W celu oceny skuteczności odwzorowania energii ΔW_{pl} określono jej błędy odwzorowania δ_W :

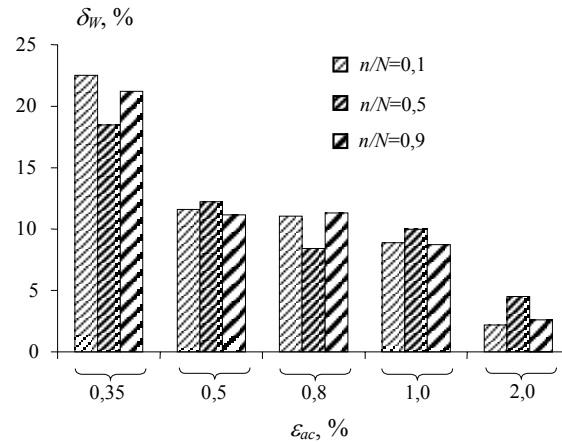
$$\delta_W = \left(\frac{\Delta W_{pl(obl)} - \Delta W_{pl(exp)}}{\Delta W_{pl(exp)}} \right) \cdot 100\% \quad (4.2)$$

gdzie:

- $\Delta W_{pl(obl)}$ – energia odkształcenia plastycznego uzyskana z obliczeń,
- $\Delta W_{pl(exp)}$ – energia odkształcenia plastycznego uzyskana z badań.

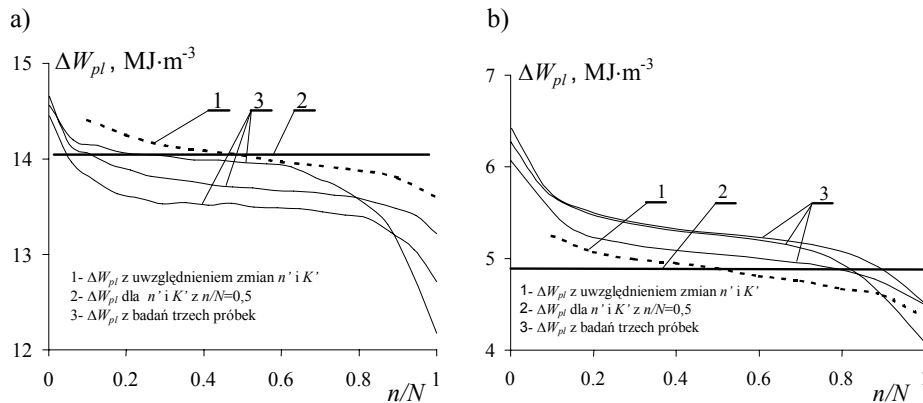
Przykładowe wyniki obliczeń błędów odwzorowania energii δ_W w trzech okresach trwałości zmęczeniowej i pięciu poziomach odkształcenia dla próbek ze stali 30HGSA przedstawiono na rysunku 4.39.

Analiza uzyskanych wyników wykazała, że błąd odwzorowania energii δ_W zależy od rodzaju materiału, poziomu odkształcenia i okresu trwałości, w którym dokonano porównania. Najmniejsze wartości błędu uzyskano dla stali C45, a największe dla stopu AW-2024. Dla wszystkich badanych materiałów wartość δ_W ulegała obniżeniu wraz ze wzrostem odkształcenia całkowitego i wynosiła np. dla stali 45 od 3,2% dla odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 2\%$ do 14,2% dla odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 0,35\%$. Dla stali 30HGSA od 3% dla odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 2\%$ do około 16% dla odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 0,35\%$, a dla stopu AW-2024 od 13% dla odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 1,5\%$ do 26% dla odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 0,5\%$.



Rys. 4.39. Wpływ okresu trwałości na wartość błędu δ_W dla próbek ze stali 30HGSA

Znajomość zmian parametrów n' i K' w funkcji trwałości względnej n/N umożliwia odwzorowanie przebiegu zmian wielkości kryterialnej, jaką jest energia ΔW_{pl} w warunkach obciążenia stałoaamplitudowego. Na rysunku 4.40 przedstawiono wykresy zmian energii ΔW_{pl} dla jednego poziomu odkształcenia w funkcji trwałości względnej n/N uzyskane podczas badań i obliczeń dla próbek wykonanych z dwóch materiałów (stal 30HGSA i stop AW-2024).



Rys. 4.40. Zmiany energii ΔW_{pl} uzyskanej z obliczeń i badań na poziomie odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 1\%$: a) stal 30HGSA, b) stop AW-2024

Przebiegi energii $\Delta W_{pl(obl)}$ określono uwzględniając zróżnicowanie wartości parametrów n' i K' w różnych okresach trwałości. Podczas obliczeń $\Delta W_{pl(obl)}$ w różnych okresach trwałości przyjęto założenie, że badane materiały podlegają zasadzie Masinga. W celu analizy porównawczej na rysunku 4.40 naniesiono również wykres poziomu energii uzyskany z obliczeń dla danych z jednego okresu trwałości zmęczeniowej ($n/N = 0,5$).

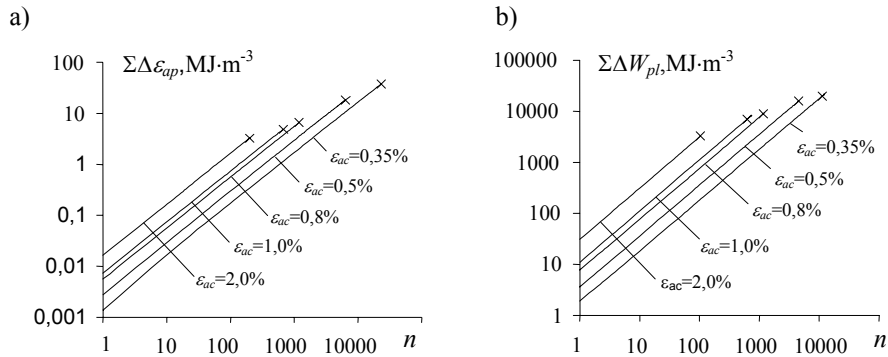
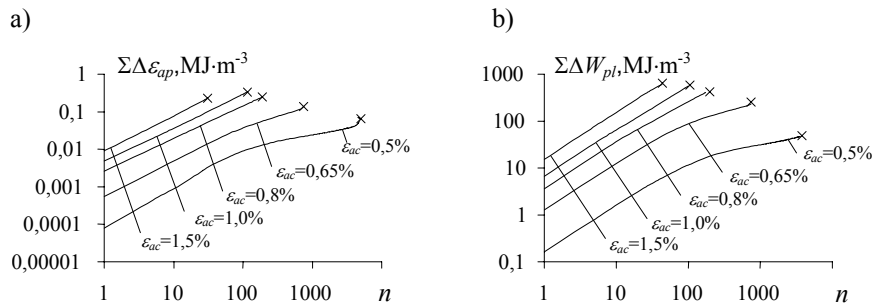
Na podstawie wykonanych wykresów energii ΔW_{pl} z obliczeń i badań można stwierdzić, że charakteryzuje je zróżnicowanie. Wielkość zróżnicowania zależy od poziomu odkształcenia, dla którego energię obliczano, oraz od okresu trwałości, w którym dokonywano porównania. Przeprowadzona doświadczalna weryfikacja analitycznego opisu pętli histerezy dla różnych materiałów i różnych poziomów odkształceń pozwala zauważyć przybliżony charakter wyników obliczeń w stosunku do wyników badań. Nieuwzględnienie podczas obliczeń energii zmian własności cyklicznych powoduje, że wartości energii ΔW_{pl} uzyskane z wykorzystaniem danych tylko z jednego okresu trwałości są aproksymowane na cały zakres trwałości zmęczeniowej. Powoduje to, że charakteryzują się one zadowalającą zgodnością w stosunku do wyników badań tylko w jednym okresie trwałości. W pozostałych okresach trwałości wyniki obliczeń i badań cechuje istotne zróżnicowanie, widoczne w sposób szczególny w początkowym i końcowym okresie trwałości. Uwzględnienie podczas obliczeń energii $\Delta W_{pl(obl)}$ chwilowych własności materiału powoduje, że zróżnicowanie uzyskanych wykresów energii obliczonej $\Delta W_{pl(obl)}$ w stosunku do wykresów energii $\Delta W_{pl(exp)}$ uzyskanej z badań ulega zmniejszeniu. Jest to widoczne zwłaszcza w początkowym i końcowym okresie trwałości.

Uwzględniając fakt, że podczas obliczeń trwałości dochodzi do wielokrotnego kumulowania się błędów odwzorowania wielkości kryterialnej, można stwierdzić, że nawet niewielkie zmniejszenie jej błędów odwzorowania może prowadzić do istotnej poprawy zgodności trwałości uzyskanej z obliczeń i badań.

E. Przebieg kumulacji odkształceń i energii

Cykliczne osłabienie lub umocnienie badanych metali, które obserwowano w przebiegach wykresów podstawowych parametrów pętli histerezy w funkcji liczby cykli obciążenia (rys. 3.6÷3.8), znajduje również odzwierciedlenie w przebiegu kumulacji odkształceń plastycznych ε_{ap} i energii odkształcenia ΔW_{pl} . Przykładowe wykresy kumulacji odkształceń plastycznych ε_{ap} i energii ΔW_{pl} dla stali C45 i stopu AW-2024 w układzie podwójnie logarytmicznym przedstawiono odpowiednio na rysunkach 4.41 i 4.42.

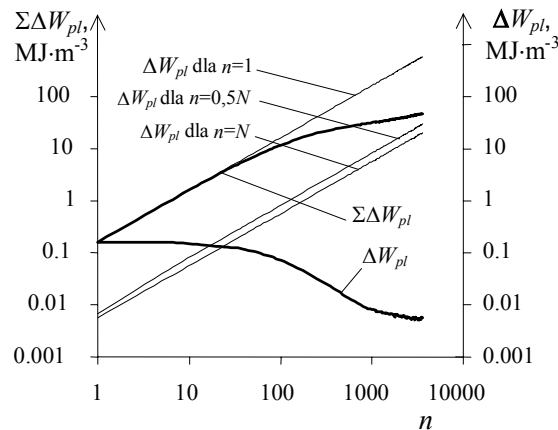
Na podstawie wykresów można stwierdzić, że dla obydwu materiałów zarówno sam przebieg kumulacji, jak również wartość skumulowanego w próbie zmęczeniowej odkształcenia $\Sigma \Delta \varepsilon_{ap}$ i energii $\Sigma \Delta W_{pl}$ zależą od poziomu amplitudy odkształcenia. W przypadku próbek ze stopu AW-2024 wykresy kumulacji odkształceń i energii (rys. 4.42) cechuje degresywny przebieg, widoczny wyraźnie na niskich poziomach odkształcenia ($\varepsilon_{ac} = 0,65\%$ i $\varepsilon_{ac} = 0,5\%$). Tej cechy nie wykazują wspomniane wykresy dla próbek ze stali 45 (rys. 4.41). Można zauważyć, że wartość skumulowanego odkształcenia ε_{ap} i energii $\Sigma \Delta W_{pl}$ w próbkach ze stali C45 wzrasta wraz z obniżaniem poziomu odkształcenia. Powyższej zasadzie nie podlega natomiast proces kumulacji odkształceń i energii w próbkach ze stopu AW-2024, dla którego energia skumulowana ulega zmniejszeniu wraz z obniżaniem poziomu odkształcenia.

Rys. 4.41. Kumulacja odkształceń ε_{ap} i energii ΔW_{pl} w próbkach ze stali C45:a) ε_{ap} , b) ΔW_{pl} Rys. 4.42. Kumulacja odkształceń ε_{ap} i energii ΔW_{pl} w próbkach ze stopu AW-2024:a) ε_{ap} , b) ΔW_{pl}

Różne poziomy skumulowanego odkształcenia i energii w materiale do chwili pęknięcia zmęczeniowego nie potwierdzają energetycznego kryterium zniszczenia, sformułowanego między innymi w pracy [31], gdzie stwierdzono, że o zniszczeniu decyduje krytyczna wartość energii skumulowanej, którą można wyznaczyć z tzw. rzeczywistego wykresu rozciągania. Tego kryterium zniszczenia nie potwierdzono również w pracy autora [100]. Uzyskane wyniki kumulacji energii $\Sigma\Delta W_{pl}$ uzyskane dla próbek ze stopu AW-2024 nie potwierdzają również założenia przedstawionego w pracy [50], że skumulowana energia odkształcenia plastycznego nie jest wielkością stałą, ale wzrasta wraz z trwałością zmęczeniową.

Degresywny charakter kumulacji energii na najniższych poziomach odkształcenia w przypadku próbek ze stopu AW-2024 powoduje, że utrudnione staje się na nich modelowanie procesu kumulacji energii $\Sigma\Delta W_{pl}$. Podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej przyjmuje się założenie, że energia skumulowana $\Sigma\Delta W_{pl}$ jest iloczynem liczby cykli i energii ΔW_{pl} . Ilość energii skumulowanej $\Sigma\Delta W_{pl}$ dla stopu AW-2024 zależy od poziomu energii ΔW_{pl} dla jednego cyklu obciążenia, a w tym przypadku od okresu trwałości, w którym zostaje ona okre-

ślona. Szczegółową analizę wpływu przyjętego poziomu energii jednostkowej na wartość energii skumulowanej $\Sigma\Delta W_{pl}$ zamieszczono w pracach [39, 57, 114]. Na rysunku 4.43 przedstawiono proces kumulowania energii na poziomie odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 0,5\%$, wykorzystując trzy poziomy energii ΔW_{pl} . Poziomy te odpowiadały, podobnie jak podczas wykonywania wykresów zmęczeniowych, trzem okresom trwałości, tj. cyklowi pierwszemu, połowie trwałości i cyklowi ostatniemu przed pęknięciem zmęczeniowym.



Rys. 4.43. Kumulacja energii ΔW_{pl} w próbkach ze stopu AW-2024 na poziomie $\varepsilon_{ac} = 0,5\%$

W przypadku próbek ze stopu AW-2024 wielkość energii skumulowanej $\Sigma\Delta W_{pl}$ zależy od okresu trwałości, z którego pobrano wartość energii ΔW_{pl} do obliczeń. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że spośród trzech charakterystycznych poziomów energii ΔW_{pl} przyjętych do obliczeń energii skumulowanej, najbardziej zbliżone do wyników badań eksperymentalnych są wartości energii $\Sigma\Delta W_{pl}$, uzyskane z wykorzystaniem danych z okresu odpowiadającego połowie trwałości zmęczeniowej.

Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że nieuwzględnienie podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej w ujęciu energetycznym występujących zmian własności cyklicznych oraz przebiegu kumulacji odkształceń i energii może prowadzić do zróżnicowania wyników obliczeń trwałości zmęczeniowej w stosunku do wyników badań eksperymentalnych.

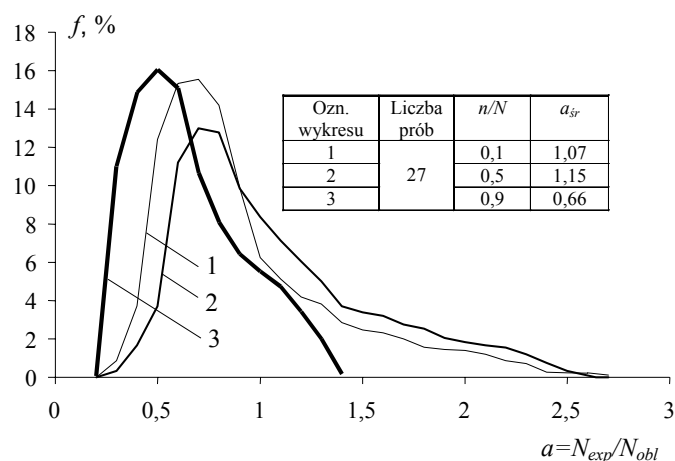
4.4. WPŁYW ZMIAN WŁASNOŚCI CYKLICZNYCH NA WYNIKI OBLICZEŃ TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

Wpływ okresu trwałości n/N na wartości parametrów pętli histerezy oraz na wartości danych materiałowych n' i K' powoduje, że w konsekwencji decyduje on również o wynikach obliczeń trwałości zmęczeniowej prowadzonych np. w ujęciu energetycznym. W pracy dokonano ilościowej oceny wpływu okresu

n/N , z którego zostały pobrane dane materiałowe na wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej. Powyższe przeprowadzono, wykonując obliczenia trwałości zmęczeniowej z wykorzystaniem danych materiałowych określonych w różnych okresach trwałości. Podczas obliczeń trwałości wykorzystano liniową hipotezę sumowania uszkodzeń zmęczeniowych. Opis postępowania, przyjęty podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej w ujęciu energetycznym w warunkach obciążenia programowanego, omówiono w rozdziale 2. Wykresem bazowym podczas sumowania uszkodzeń zmęczeniowych był wykres opisany równaniem (2.15), wykonany dla parametrów pętli histerezy z okresu odpowiadającego połowie trwałości zmęczeniowej. Niezależne obliczenia trwałości prowadzono dla każdej z 10 sekwencji parametrów n' i K' określonych w różnych okresach trwałości. Uzyskane wyniki obliczeń trwałości analizowano w aspekcie wpływu samego okresu trwałości na wyniki obliczeń oraz porównując uzyskane wyniki z wynikami badań. Jako miarę oceny liniowej hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych przyjęto rozrzut parametru „ a ”, określanego z zależności:

$$a = \frac{N_{\text{exp}}}{N_{\text{obl}}} \quad (4.3)$$

Na rysunku 4.44 przedstawiono wyniki w postaci histogramu wartości parametru „ a ” uzyskanego podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej próbek ze stopu AW-2024 z wykorzystaniem danych z trzech różnych okresów trwałości zmęczeniowej.

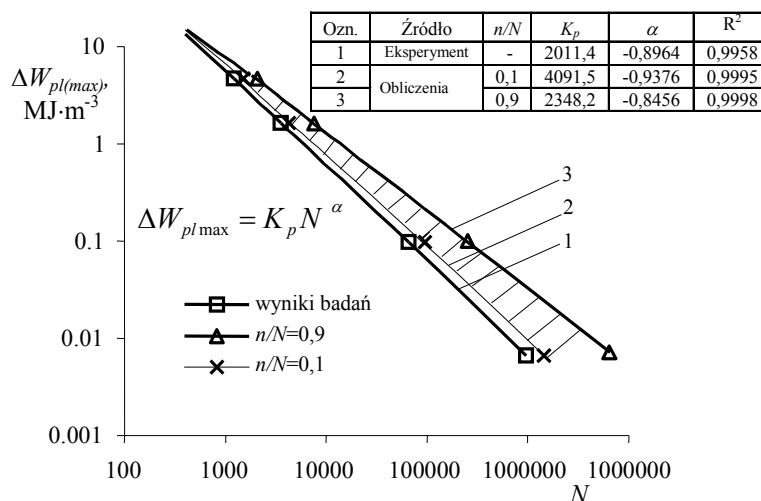


Rys. 4.44. Histogram częstości występowania parametru „ a ” uzyskany dla próbek ze stopu AW-2024

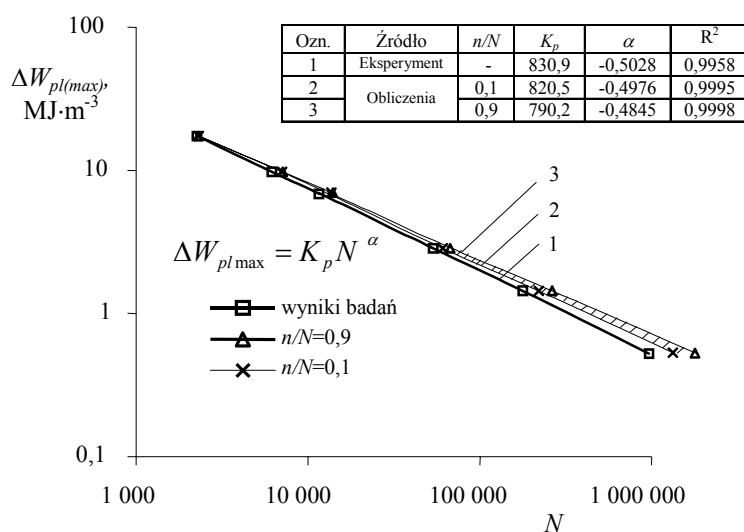
Na wykresie zestawiono wyniki obliczeń parametru „ a ” ze wszystkich zrealizowanych sekwencji obciążenia programowanego o nieregularnym następnym stopniu w bloku.

Na podstawie wykonanych wykresów można stwierdzić, że okres trwałości zmęczeniowej, przyjęty do określenia danych materiałowych próbek ze stopu AW-2024, ma wpływ na wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej. Uwidacznia się on w postaci zróżnicowanych wartości średnich parametru „ a ”, jak również jego rozrzutu. Najmniejszym rozrzutem charakteryzują się wyniki obliczeń trwałości uzyskane przy wykorzystaniu danych z okresu $n/N = 0,9$, a największym z okresu $n/N = 0,1$. Największy wpływ okresu trwałości przyjętego do określenia danych materiałowych na wartości średnie oraz rozrzut parametru „ a ” stwierdzono w przypadku próbek ze stopu AW-2024, a najmniejszy w przypadku próbek ze stali C45 i stali 30HGSA.

Konsekwencją zróżnicowania wyników obliczeń trwałości jest położenie wykresów zmęczeniowych. Wyniki obliczeń trwałości w postaci przykładowych wykresów zmęczeniowych próbek ze stopu AW-2024 i stali C45 poddanych obciążeniu programowanemu o nieregularnym następstwie stopni (I) o współczynniku wypełnienia widma $\zeta = 0,34$ przedstawiono na rysunkach 4.45 i 4.46.



Rys. 4.45. Wpływ okresu trwałości n/N przyjętego do określenia danych materiałowych na wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej próbek ze stopu AW-2024



Rys. 4.46. Wpływ okresu trwałości n/N przyjętego do określenia danych materiałowych na wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej próbek ze stali C45

Miarą wpływu okresu trwałości zmęczeniowej, przyjętego do określenia danych materiałowych na uzyskane wyniki obliczeń trwałości, jest obszar zakresowany pomiędzy wykresami 2 i 3. Analiza porównawcza tych obszarów dla wszystkich sekwencji programów wykazała, że wpływ okresu trwałości przyjętego do określenia danych materiałowych zależy zarówno od samego materiału, jak również poziomu odkształcenia maksymalnego ε_{acmax} , występującego w programie oraz współczynnika wypełnienia widma ζ . Dotyczy to jednak w sposób wyraźny próbek z dwóch badanych materiałów, tj. stopu AW-2024 (rys. 4.45) i stali 30HGSA. Dla tych materiałów wpływ miejsca określenia danych materiałowych na wyniki obliczeń jest niewielki dla programów obciążenia o dużych wartościach współczynnika wypełnienia oraz charakteryzujących się występowaniem odkształceń zbliżonych do wartości maksymalnej ε_{acmax} . Wpływ ten wzrasta w miarę obniżania poziomów odkształcenia maksymalnego ε_{acmax} występującego w programie obciążenia oraz współczynnika wypełnienia widma.

Dla próbek ze stali C45 okres trwałości, w którym zostały określone dane materiałowe, nie ma praktycznie wpływu na uzyskane wyniki obliczeń trwałości (rys. 4.46). Dotyczy to wszystkich sekwencji wykorzystywanych podczas badań programów obciążenia. Brak wpływu okresu trwałości na uzyskane wyniki obliczeń trwałości próbek ze stali C45 stanowi potwierdzenie niewielkich (najmniejszych spośród badanych metali) zmian własności cyklicznych tej stali obserwowanych w warunkach obciążenia stałoamplitudowego, losowego i programowanego.

Do oceny stopnia wpływu danych materiałowych na wyniki obliczeń trwałości dla zróżnicowanych sekwencji programu obciążenia przyjęto współczynnik zmienności trwałości V_s obliczony z zależności [46]:

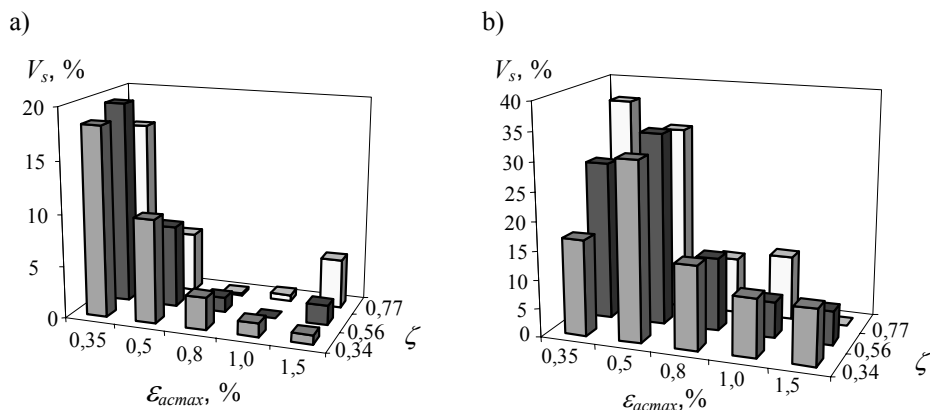
$$V_s = \frac{S}{N_{\bar{s}r}} * 100\% \quad (4.4)$$

gdzie:

S – odchylenie standardowe dla trwałości,

$N_{\bar{s}r}$ – wartość średnia trwałości z obliczeń z wykorzystaniem danych z różnych okresów trwałości.

Wyniki obliczeń współczynnika zmienności trwałości V_s dla próbek wykonanych ze stali 30HGSA i ze stopu AW-2024 w zależności od poziomu odkształcenia maksymalnego ε_{acmax} w bloku programu oraz współczynnika wypełnienia widma ζ przedstawiono na rysunku 4.47.

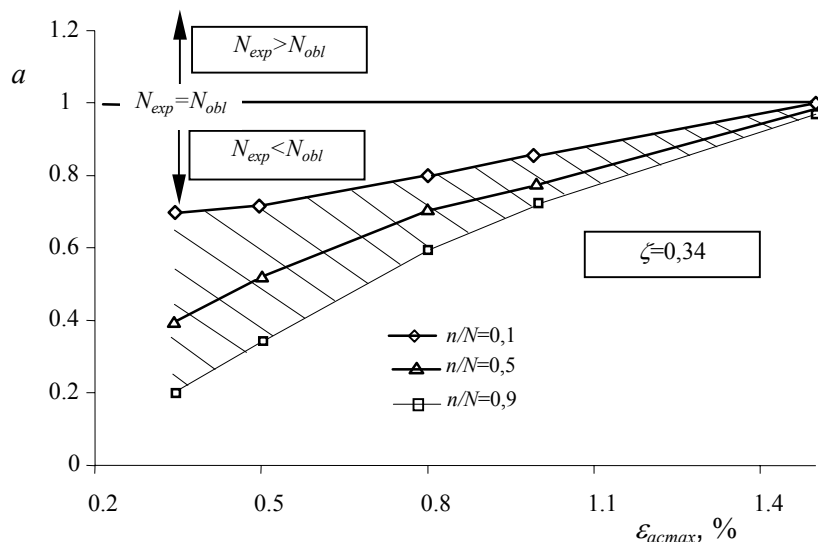


Rys. 4.47. Współczynnik zmienności trwałości V_s : a) stal 30HGSA, b) stop AW-2024

W przypadku stali C45 i stali 30HGSA najwyższe wartości współczynnika V_s osiąga dla sekwencji programu obciążenia o najmniejszych poziomach ε_{acmax} . Reguła ta nie obowiązuje dla próbek ze stopu ze stopu AW-2024, gdzie w przypadku dwóch sekwencji programu ($\zeta = 0,34$ oraz $\zeta = 0,56$) najwyższe wartości współczynnika V_s stwierdzono dla $\varepsilon_{acmax} = 0,5\%$. Dla wszystkich sekwencji programów obciążenia, dla których $V_s > 10\%$ można mówić o statystycznie istotnym zróżnicowaniu uzyskanych wyników obliczeń trwałości zmęczeniowej.

Analiza porównawcza wykresów trwałości zmęczeniowej uzyskanych z obliczeń oraz z badań (rys. 4.45) pozwala zauważyć, że niezależnie od okresu trwałości, w którym zostały określone dane materiałowe, wyniki obliczeń usytuowane są w większości badanych przypadków po stronie niebezpiecznej trwałości ($N_{exp} < N_{obl}$). Ponadto na skuteczność samej hipotezy wpływ ma poziom

maksymalnych odkształceń, występujących w programie obciążenia. W celu graficznego zilustrowania wpływu poziomu odkształceń maksymalnych na wyniki obliczeń trwałości, na rysunku 4.48 pokazano przykładowe wyniki obliczeń parametru „ a ” dla próbek ze stopu AW-2024 i danych n' i K' określanych w trzech różnych okresach trwałości ($n/N = 0,1$; $n/N = 0,5$; $n/N = 0,9$).

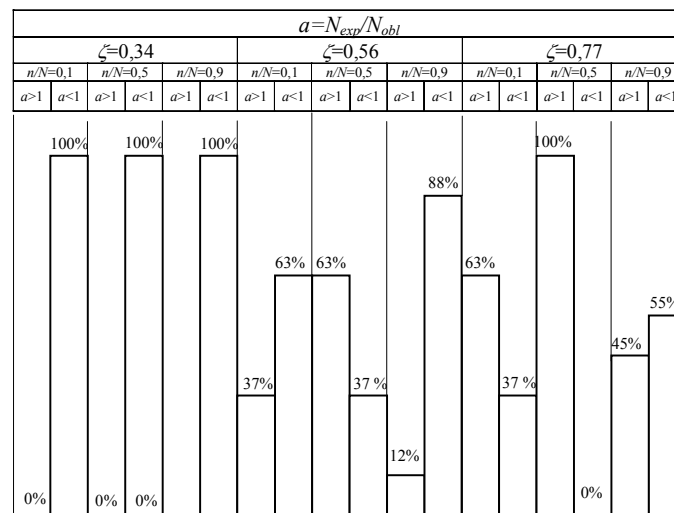


Rys. 4.48. Wyniki badań i obliczeń trwałości zmęczeniowej stopu AW-2024 ($\zeta = 0,34$)

Zakreskowany obszar przedstawia pole możliwych położenia parametru „ a ”, uzyskanych dla danych z różnych okresów trwałości. Na podstawie przedstawionych na rysunku 4.48 wykresów można stwierdzić, że niezależnie od okresu trwałości, z którego zaczerpnięto dane materiałowe, wyniki obliczeń znajdują się w obszarze niebezpiecznym trwałości zmęczeniowej ($N_{obl} > N_{exp}$). Jak należało oczekiwać, zróżnicowanie wyników obliczeń i badań zależy od poziomu odkształcenia maksymalnego w programie obciążenia i maleje wraz ze wzrostem tego odkształcenia. Największe zróżnicowanie trwałości uzyskanych z obliczeń i badań wyników uzyskano dla sekwencji programu $\epsilon_{acmax} = 0,35\%$, $\zeta = 0,34$, wykorzystując podczas obliczeń dane z okresu $n/N = 0,9$. Dla tej sekwencji danych materiałowych trwałość zmęczeniowa uzyskana podczas obliczeń jest około 500% wyższa od trwałości uzyskanej z badań. Największą zgodność wyników obliczeń i badań otrzymano, stosując podczas obliczeń dane materiałowe z okresu $n/N = 0,1$. Uzyskana dla tej sekwencji danych trwałość jest jedynie 40% wyższa w stosunku do wyników badań. Realizując obliczenia metodą klasyczną (dane materiałowe z okresu $n/N = 0,5$), uzyskano trwałość około 250% wyższą od wyników badań.

Poza miejscem określenia danych materiałowych i poziomem odkształcenia maksymalnego w programie, na zgodność hipotezy z wynikami badań do-

świadczalnych wpływ ma również wartość współczynnika wypełniania widma. W celu zilustrowania tego wpływu na rysunku 4.49 przedstawiono procentowy udział wartości parametru „ a ”, uzyskanego podczas obliczeń trwałości próbek ze stopu AW-2024, w warunkach programów obciążenia o zróżnicowanych poziomach współczynnika wypełnienia widma ζ dla danych materiałowych z różnych okresów trwałości n/N .



Rys. 4.49. Wyniki doświadczalnej weryfikacji hipotezy Palmgrena-Minera dla próbek ze stopu AW-2024 w zależności od współczynnika ζ i okresu n/N

Z analizy przedstawionych danych wynika, że na udział w wynikach badań wartości parametru „ a ” mniejszych i większych od jedności wpływ ma zarówno wartość współczynnika wypełnienia widma ζ , jak również okres trwałości wyznaczenia danych materiałowych n/N . Wpływ okresu n/N przyjętego do określenia danych materiałowych na zgodność hipotezy z wynikami badań uwiadcza się dla współczynników wypełnienia widma $\zeta = 0,56$ i $0,77$ poprzez zmianę udziałów wartości parametru „ a ” w rozpatrywanych przedziałach. Szczegółowa analiza uzyskanych wyników obliczeń parametru dla tych programów wykazała, że jego wartości są tam zbliżone do jedności. W przypadku programów obciążenia o współczynniku $\zeta = 0,34$ okres trwałości przyjęty do określenia danych materiałowych ma wpływ na trwałość, ale uzyskane wyniki obliczeń nadal znajdują się w obszarze niebezpiecznym trwałości, co przedstawiono na rysunkach 4.45 i 4.48.

Uzyskanie wysokiej zgodności hipotezy z wynikami badań dla programów obciążenia o najwyższych wartościach współczynnika wypełnienia ζ ($\zeta = 0,77$), zawierających cykle o wysokich poziomach amplitudy odkształcenia ε_{acmax} potwierdza doniesienia literaturowe o znacznie wyższej skuteczności hipotez su-

mowania uszkodzeń zmęczeniowych w obszarze niskocyklowego zmęczenia w stosunku do obszaru zmęczenia wysokocyklowego [112, 153, 155].

Największe zróżnicowanie wyników obliczeń i badań na najniższych poziomach odkształcenia uzasadnić można wielokrotnym sumowaniem błędów odwzorowania wielkości kryterialnej omówionych w punkcie 4.2C dla tego obszaru trwałości. Na wzrost rozbieżności wyników obliczeń trwałości zmęczeniowej może mieć również wpływ, oprócz okresu określenia danych materiałowych, metoda obliczeń trwałości. Polega ona na ekstrapolowaniu własności materiału określonych dla zmęczenia niskocyklowego z dominującymi odkształceniami sprężysto-plastycznymi i związanymi z tym zmianami własności cyklicznych w obszar trwałości, w którym dominują głównie odkształcenia sprężyste.

Na podstawie analizy porównawczej trwałości uzyskanej z obliczeń i badań wynika, że okres trwałości, przyjęty do określenia danych materiałowych wykorzystywanych podczas obliczeń, ma wpływ na wyniki obliczeń trwałości. Wpływ ten zależy od zakresu zmian własności cyklicznych opisanych zmiennością parametrów pętli histerezy oraz parametrów programu obciążenia.

Jest on niezauważalny w przypadku materiałów o niewielkich zmianach własności cyklicznych (podczas zrealizowanych badań stal C45), natomiast jest wyraźny w przypadku materiałów, które charakteryzują istotne zmiany własności cyklicznych (podczas badań stop AW-2024). Dla tych materiałów wpływ okresu trwałości przyjętego do określenia danych materiałowych na wyniki obliczeń wzrasta wraz z obniżaniem współczynnika wypełnienia widma ζ i poziomu odkształcenia maksymalnego w programie ε_{acmax} .

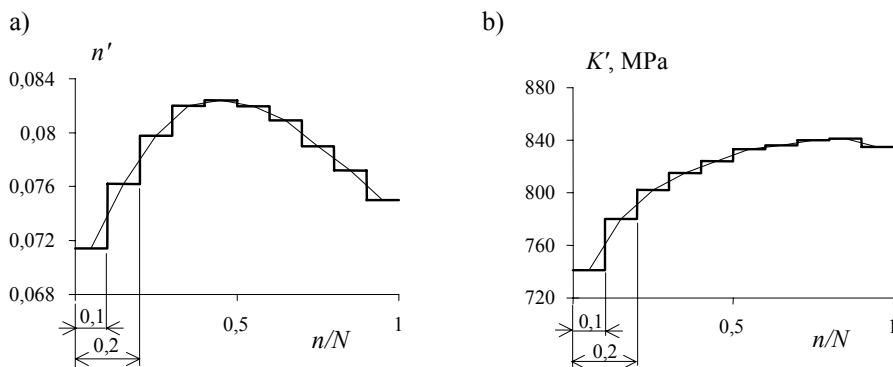
Wpływ okresu trwałości przyjętego do określenia danych materiałowych na wyniki obliczeń trwałości stanowi potwierdzenie postawionej w pracy tezy o wpływie przebiegu zmian własności cyklicznych na trwałość zmęczeniową.

W celu poprawy wiarygodności metod obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych niezbędne jest uwzględnienie w nich występujących podczas cyklicznego obciążenia zmian własności cyklicznych materiału. Wykazane w pracy podobieństwo jakościowe oraz ilościowe przebiegu zmian własności cyklicznych w warunkach obciążeń stałoamplitudowych i programowanych pozwala stwierdzić, że przebieg zmian własności cyklicznych w warunkach obciążeń eksploatacyjnych można przewidywać na podstawie wyników badań stałoamplitudowych (próby klasyczne) lub programowanych (próby uproszczone). Pozwala to sformułować założenia do metody obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych przy uwzględnieniu chwilowych własności cyklicznych (metoda CWC).

5. OBLICZENIA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ Z WYKORZYSTANIEM CHWILOWYCH WŁASNOŚCI CYKLICZNYCH (METODA CWC)

5.1. ZAŁOŻENIA DO OBLICZEŃ TRWAŁOŚCI METODĄ CWC

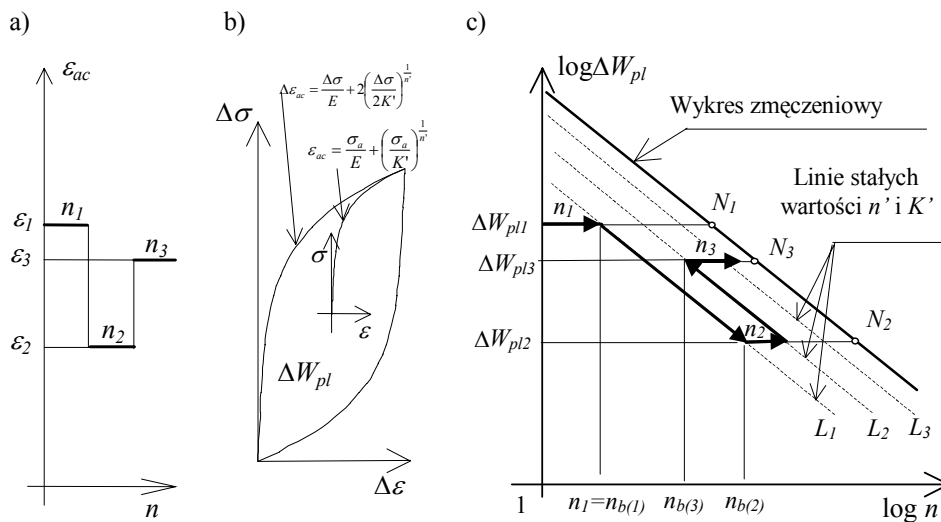
Przedstawiony w rozdziale 4 sposób określania parametrów n' i K' w różnych okresach trwałości powoduje, że ich wartości na różnych poziomach obciążenia określone są przez 10 linii chwilowych własności L_1, L_2, \dots, L_{10} , równoległych do wykresu zmęczeniowego (rys. 4.30). Linie te można traktować jako szczególny przypadek linii stałych uszkodzeń zmęczeniowych lub linii resztkowych trwałości występujących w hipotezach sumowania uszkodzeń zmęczeniowych opisanych w rozdziale 2. Uwzględnianie podczas obliczeń trwałości zmian własności cyklicznych wymaga znajomości wartości parametrów n' i K' , również w okresach trwałości, w których one nie zostały określone (okresy pomiędzy liniami L_1, L_2, \dots, L_{10}). Można to osiągnąć w wyniku aproksymacji wyznaczonych parametrów n' i K' wielomianem. Zabieg taki pozwala na opis ich wartości w dowolnym okresie trwałości względnej n/N , a jednocześnie na realizację obliczeń trwałości z uwzględnieniem zmian własności cyklicznych, np. po każdym cyklu obciążenia. Taki sposób postępowania powoduje jednak znaczne wydłużenie czasu trwania obliczeń trwałości. Z tego względu, jak również w celu uproszczenia programu komputerowego przyjęto, że wartości parametrów n' i K' określonych dla badanych metali w 10 różnych okresach trwałości będą się zmieniać okresowo. Powyższe przedstawiono w sposób schematyczny na rysunku 5.1.



Rys. 5.1. Własności cykliczne w różnych okresach trwałości:
a) $n' = f(n/N)$, b) $K' = f(n/N)$

Prowadzenie obliczeń trwałości zmęczeniowej z uwzględnieniem zmian własności cyklicznych jest związane z koniecznością przyjęcia odpowiedniej hipotezy sumowania uszkodzeń. Na podstawie analizy różnych hipotez sumo-

wania uszkodzeń zmęczeniowych, przedstawionych w rozdziale 2. niniejszej pracy, można stwierdzić, że hipotezą sumowania, która pozwala uwzględnić podczas obliczeń trwałości zmiany własności cyklicznych (opisywane zmianami parametrów n' i K') jest hipoteza liniowa Palmgren-Minera. Opierając się na jej założeniach, zaproponowano metodę obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych w ujęciu energetycznym, w której uwzględniane będą zmiany własności cyklicznych materiału (metoda CWC). Warunkiem realizacji obliczeń trwałości zmęczeniowej metodą CWC jest znajomość własności cyklicznych, programu obciążenia oraz wykresu zmęczeniowego w ujęciu energetycznym. Proponowany sposób postępowania podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej metodą CWC przedstawiono schematycznie na rysunku 5.2.



Rys. 5.2. Postępowanie podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej metodą CWC w ujęciu energetycznym: a) program obciążenia, b) obliczenia energii ΔW_{pl} , c) sumowanie uszkodzeń zmęczeniowych

Wartości parametrów n' , K' , niezbędne do obliczeń energii $\Delta W_{pl(j=1)}$ dla pierwszego cyklu pierwszego stopnia programu obciążenia, określa się z pierwszego okresu trwałości zawierającego się w przedziale $0 < n/N \leq 0,1$. Zgodnie z liniową hipotezą sumowania uszkodzeń, stopień uszkodzenia zmęczeniowego na poziomie ΔW_{pl1} po realizacji bieżącej liczby cykli $n_{b(1)} = n_1$ jest taki sam jak stopień uszkodzenia zmęczeniowego na poziomie ΔW_{pl2} po realizacji liczby cykli $n_{b(2)}$. Przejście z poziomu obciążenia o energii ΔW_{pl1} na poziom ΔW_{pl2} następuje po linii L_1 . Zmiana okresu trwałości n/N , z którego przyjmowane są wartości parametrów n' i K' , wykorzystywanych do obliczeń energii odkształcenia plastycznego w kolejnym cyklu ma miejsce wówczas, gdy dla kolejnego stopnia lub cyklu programu obciążenia zostanie spełniony warunek $n_{b(j)}/N_j > 0,1$. Od tego momentu wartości n' i K' , niezbędne do obliczeń energii ΔW_{pl} dla następ-

nych cykli, przyjmowane będą z okresu trwałości zawierającego się w przedziale $0,1 < n/N \leq 0,2$. Kolejne stopnie programu obciążenia oraz jego powtórzenia realizowane są do chwili spełnienia warunku pęknięcia zmęczeniowego, który dla hipotezy liniowej można zapisać jako:

$$D = \lambda \cdot \sum_{j=1}^k \frac{n_j}{N_j} = 1 \quad (5.1)$$

Trwałość zmęczeniowa N w warunkach obciążeń wielostopniowych równa jest sumie liczb cykli na poszczególnych poziomach zrealizowanych do pęknięcia zmęczeniowego:

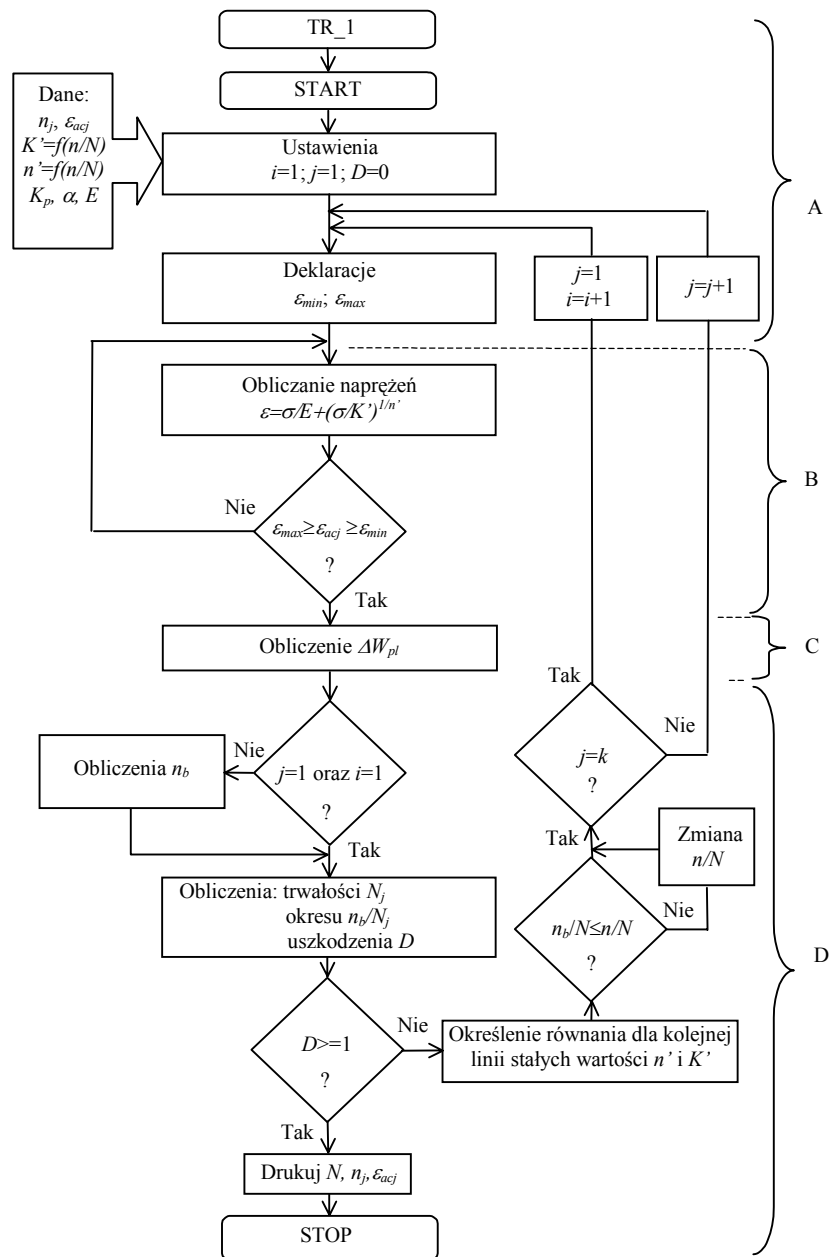
$$N = \sum_{i=1}^{\lambda} \sum_{j=1}^k n_j^i \quad (5.2)$$

Podobne założenia można sformułować do obliczeń trwałości w warunkach obciążeń losowych, w których zmiana własności cyklicznych zostanie uwzględniona po każdym cyklu obciążenia. W tym przypadku niezbędne wydaje się jednak wcześniejsze aproksymowanie wielomianem zmian n^i i K^i .

5.2. OBLICZENIA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ METODĄ CWC

A. Narzędzia wykorzystywane podczas obliczeń trwałości – programy komputerowe

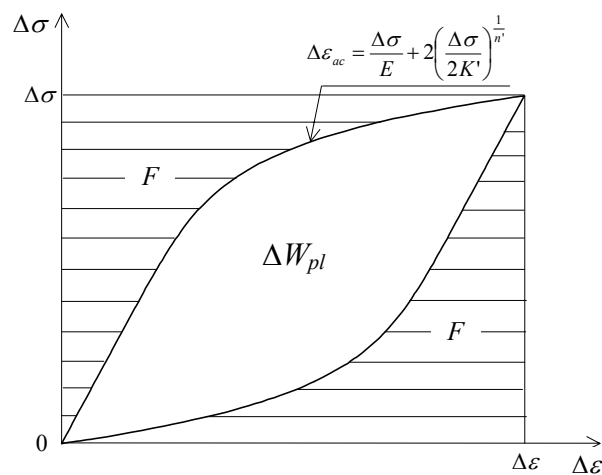
Sformułowane w poprzednim podrozdziale założenia do obliczeń trwałości, jak również opis sumowania uszkodzeń zmęczeniowych wykorzystano do opracowania programu komputerowego, pozwalającego realizować obliczenia trwałości zmęczeniowej metodą CWC. Na rysunku 5.3 przedstawiono schemat blokowy programu komputerowego TR_1 do obliczeń trwałości zmęczeniowej próbek gładkich, podanych obciążeniom programowanym o nieregularnym następstwie stopni w programie (I). Przyjęte wcześniej w pracy oznaczenia zachowują swoją aktualność również dla przedstawionego na rysunku 5.3 schematu blokowego programu komputerowego.



Rys. 5.3. Schemat blokowy programu komputerowego TR_1 do obliczeń trwałości zmęczeniowej w ujęciu energetycznym próbek gładkich

W strukturze programu komputerowego można wyróżnić cztery zasadnicze bloki (A, B, C, D), w których realizowane są odpowiednie obliczenia.

- Blok A – Następuje w nim wczytanie niezbędnych podczas obliczeń danych. Najważniejsze z nich to parametry programu obciążenia (liczba cykli n_j oraz wartości amplitud odkształcenia ε_{acj} na kolejnych stopniach programu obciążenia), parametry wykresu zmęczeniowego w ujęciu energetycznym, opisanego równaniem (2.15) oraz wartości parametrów n' i K' w różnych okresach trwałości n/N . W bloku tym następuje również zdefiniowanie precyzji określania naprężeń σ_{aj} na poszczególnych poziomach odkształcenia ε_{acj} . Odbywa się to przez zdefiniowanie wartości maksymalnej ε_{max} i minimalnej ε_{min} odkształcenia przyjmowanego do dalszych obliczeń w stosunku do wartości odkształcenia ε_{acj} , występującego na danym stopniu programu obciążenia.
- Blok B – Następuje w nim obliczenie poziomu naprężenia σ_{aj} , odpowiadającego poziomowi odkształcenia ε_{acj} na danym stopniu programu obciążenia. Do obliczenia naprężenia σ_{aj} wykorzystuje się równanie wykresu cyklicznego odkształcenia opisanego równaniem (2.1). Podczas obliczeń σ_{aj} uwzględnia się zróżnicowanie wartości parametrów n' i K' w zależności od bieżącego okresu trwałości n_b/N .
- Blok C – Następuje w nim obliczenie wielkości kryterialnej, jaką jest energia odkształcenia plastycznego ΔW_{plj} , odpowiadająca poziomowi odkształcenia ε_{acj} . Podczas obliczeń energii ΔW_{plj} wykorzystano równanie (2.4) opisujące rosnącą gałąź pętli histerezy. Całkując pole pod tym wykresem, uzyskano możliwość obliczenia energii odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} . Przyjęty sposób postępowania podczas obliczeń energii ΔW_{pl} wyjaśniono w sposób schematyczny na rysunku 5.4.



Rys. 5.4. Postępowanie podczas obliczeń energii odkształcenia plastycznego ΔW_{pl}

Zgodnie ze schematem przedstawiony na rysunku 5.4 zależność na energię odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} można zapisać w postaci:

$$\Delta W_{pl} = \Delta\sigma \cdot \Delta\varepsilon - 2F = \Delta\sigma \cdot \Delta\varepsilon - 2 \int_0^{\Delta\sigma} \left(\frac{\Delta\sigma}{E} + 2 \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \right) d\sigma \quad (5.3)$$

Po przekształceniach uzyskano zależność, która wiąże własności cykliczne opisywane zmiennością n' i K' z energią odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} . Ostateczną postać zależności na energię ΔW_{pl} można zapisać następująco:

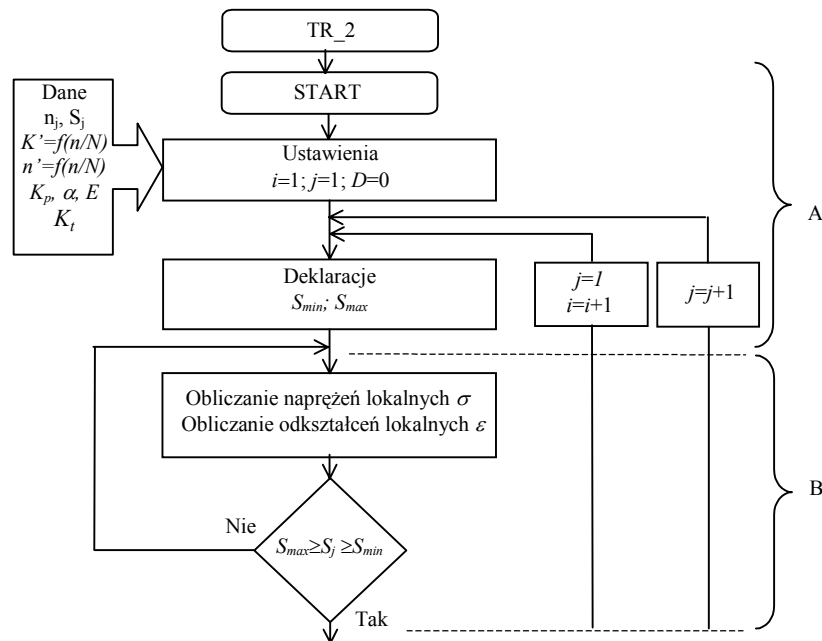
$$\Delta W_{pl} = \Delta\sigma \cdot \Delta\varepsilon - \frac{\Delta\sigma^2}{E} - 4 \frac{\Delta\sigma^{\frac{1}{n'}+1}}{(2K')^{\frac{1}{n'}}} \quad (5.4)$$

Blok D – W bloku D ma miejsce kilka operacji. Następuje w nim między innymi określanie bieżącej liczby cykli n_b na danym poziomie energii ΔW_{plj} obliczanie równań dla kolejnych linii stałych wartości n' i K' , po których następuje zmiana poziomów obciążenia, jak również sprawdzanie warunku zmiany okresu trwałości z którego są pobierane parametry n' i K' ($n_{b(j)}/N_j \leq n/N$). W bloku tym ma również miejsce sumowanie uszkodzeń zmęczeniowych. Całość kończy wydruk liczby cykli do pęknięcia zmęczeniowego oraz numer i parametry stopnia programu obciążenia, podczas realizacji którego został spełniony warunek wystąpienia uszkodzenia zmęczeniowego ($D = 1$).

Po wprowadzeniu niewielkich modyfikacji w programie komputerowym do obliczeń trwałości zmęczeniowej próbek gładkich istnieje możliwość jego wykorzystania do obliczeń trwałości próbek zawierających karby. Niezbędne modyfikacje dotyczą tylko dwóch pierwszych bloków programu komputerowego (A, B). Stąd na rysunku 5.5 przedstawiono jedynie ten fragment schematu blokowego programu komputerowego TR_2 do obliczeń trwałości zmęczeniowej próbek z karbem.

Blok A – Podobnie jak w programie TR_1 w bloku A ma miejsce wczytanie danych. W przeciwieństwie do obliczeń trwałości próbek gładkich (rys. 5.3) w TR_2 program obciążenia stanowią poziomy amplitud naprężenia nominalnego S_j i liczby cykli n_j na odpowiednich stopniach. Dodatkową wielkością podawaną w danych do programu komputerowego jest współczynnik kształtu karbu K_t . Podobnie jak w TR_1, w bloku A mają również miejsce deklaracje dotyczące precyzji określania naprężeń lokalnych σ na poszczególnych poziomach naprężenia nominalnego S_j . Odbywa się to w wyniku zdefiniowania możliwego rozrzutu naprężenia S_j , przyjmowanego do dal-

szych obliczeń w stosunku do jego pierwotnej wartości występującej w programie obciążenia. Odbywa się to poprzez podanie wartości maksymalnej S_{max} i minimalnej S_{min} amplitudy naprężenia nominalnego.

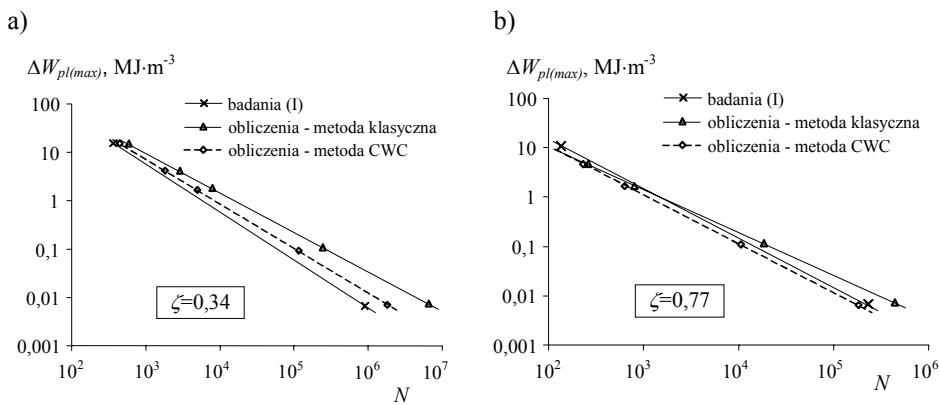


Rys. 5.5. Schemat dwóch bloków (A i B) programu komputerowego TR_2 do obliczeń trwałości zmęczeniowej metodą CWC dla próbek z karbem

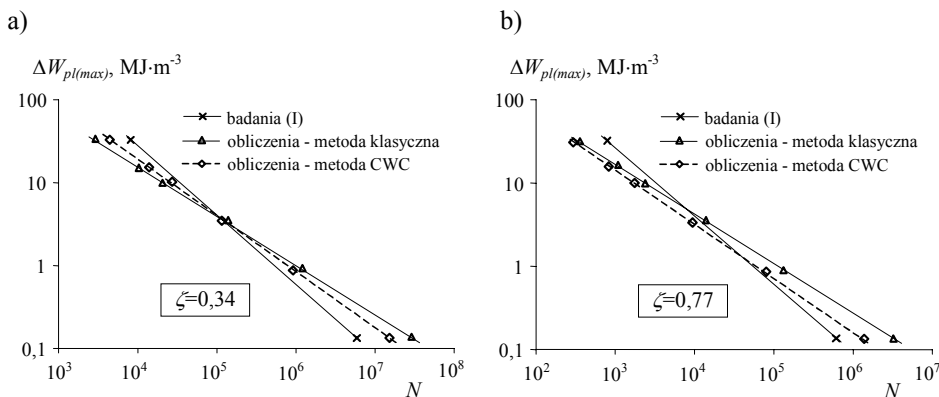
Blok B – Obliczenia wielkości kryterialnej mające miejsce w bloku C zostają poprzedzone określeniem poziomu naprężeń i odkształceń występujących na dnie karbu. Do ich wyznaczenia wykorzystano propozycję Neubera omówioną w rozdziale 2. rozprawy (równanie 2.13). Umożliwia ona – przy znajomości cech geometrycznych karbu (K_t) oraz naprężeń nominalnych S – określenie poziomu naprężeń lokalnych σ . Następnie z równania (2.1) określono poziom odkształceń lokalnych ε odpowiadających wcześniej określonym naprężeniom σ . Podczas obliczeń odkształceń lokalnych ε uwzględnia się zróżnicowanie wartości parametrów n' i K' w zależności od okresu trwałości n/N . Dalsze obliczenia w programie TR_2 są analogiczne do występujących w TR_1.

B. Wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej metodą CWC

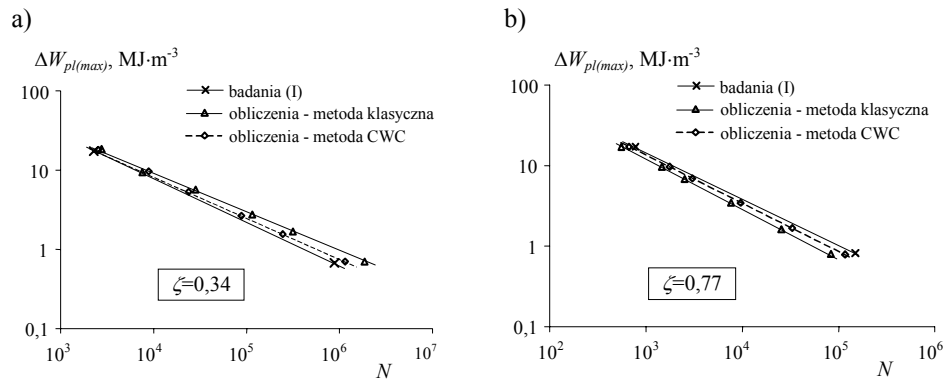
Obliczenia trwałości zmęczeniowej metodą CWC przeprowadzono dla obciążenia programowanego o nieregularnym następstwie stopni (I), realizowanego podczas badań doświadczalnych opisanych w rozdziale 3. Uzyskane wyniki obliczeń trwałości z wykorzystaniem nowej metody obliczeń przedstawiono na rysunkach 5.6÷5.8 w postaci wykresów zmęczeniowych w układzie współrzędnych logarytmicznych: liczba cykli obciążenia do pęknięcia zmęczeniowego N – energia odkształcenia plastycznego $\Delta W_{pl(max)}$. Zamieszczono na nich dodatkowo wykresy zmęczeniowe uzyskane z badań oraz z obliczeń metodą klasyczną (dla niezmiennych danych materiałowych z okresu $n/N = 0,5$). Wykresy zmęczeniowe opisano równaniem (2.15). Wartości współczynnika K_p i wykładnika α dla wykonanych wykresów zestawiono w tabeli 5.1.



Rys. 5.6. Wyniki obliczeń i badań trwałości zmęczeniowej próbek ze stopu AW-2024: a) $\zeta = 0,34$, b) $\zeta = 0,77$



Rys. 5.7. Wyniki obliczeń i badań trwałości zmęczeniowej próbek ze stali 30HGSA: a) $\zeta = 0,34$, b) $\zeta = 0,77$



Rys. 5.8. Wyniki obliczeń i badań trwałości zmęczeniowej próbek ze stali C45:
a) $\zeta = 0,34$, b) $\zeta = 0,77$

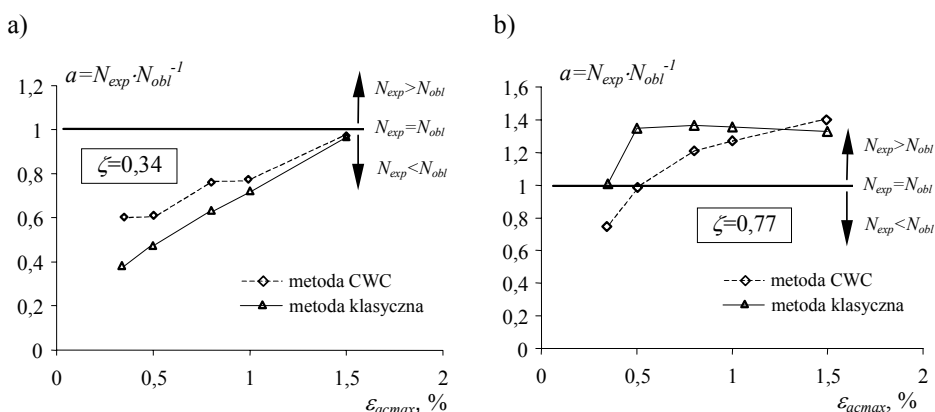
Tabela 5.1. Parametry wykresów zmęczeniowych

Materiał	Metoda obliczeń	Parametr		
		ξ	K_p	α
Stal C45	klasyczna	0,34	858,83	-0,4997
		0,56	642,05	-0,5284
		0,77	604,25	-0,5649
	CWC	0,34	961,96	-0,5153
		0,56	615,79	-0,5257
		0,77	540,99	-0,5545
Stal 30HGSA	klasyczna	0,34	1731,20	-0,5416
		0,56	1072,30	-0,5596
		0,77	1017,60	-0,6089
	CWC	0,34	3778,0	-0,6316
		0,56	1836,70	-0,6266
		0,77	1391,7	-0,6500
Stop AW-2024	klasyczna	0,34	2348,20	-0,8456
		0,56	873,60	-0,8486
		0,77	646,58	-0,9014
	CWC	0,34	4091,50	-0,9376
		0,56	923,29	-0,8744
		0,77	880,33	-0,9658

Na podstawie analizy położenia wykresów zmęczeniowych uzyskanych z badań i obliczeń można stwierdzić, że trwałość zmęczeniowa uzyskana z obliczeń metodą CWC w większości przypadków charakteryzuje się większą zgodnością z wynikami badań w stosunku do wyników uzyskanych z obliczeń metodą klasyczną.

Jak można było oczekiwać, największy wpływ proponowanej metody obliczeń trwałości na uzyskane wyniki uwidacznia się w przypadku próbek wykonanych ze stopu AW-2024 (rys. 5.6) i stali 30HGSA (rys. 5.7), natomiast jest niewielki w przypadku próbek ze stali C45 (rys. 5.8).

Wpływ zastosowanej metody obliczeń trwałości zmęczeniowej na uzyskane wyniki zależy od wartości odkształcenia maksymalnego ε_{acmax} w programie obciążenia oraz współczynnika wypełnienia widma ζ . Zróżnicowanie wyników obliczeń uzyskanych dwiema metodami jest niewielkie dla programów obciążenia o największych wartościach tych parametrów ($\varepsilon_{acmax} = 1,5\%$ oraz $\zeta = 0,77$). Wzrasta jednak w sposób wyraźny wraz z obniżaniem odkształceń maksymalnych ε_{acmax} występujących w programie obciążenia oraz wartości współczynnika wypełnienia widma ζ . Powyższą właściwością charakteryzują się wyniki trwałości uzyskane dla próbek ze stopu AW-2024 i stali 30HGSA. W celu porównania wpływu parametrów programu obciążenia (ε_{acmax} i ζ) na wyniki obliczeń trwałości metodą CWC oraz metodą klasyczną na rysunku 5.9 pokazano wartości parametru „a” dla próbek wykonanych ze stopu AW-2024 i dwóch wartości współczynnika wypełnienia widma ζ .



Rys. 5.9. Analiza porównawcza wyników obliczeń próbek ze stopu AW-2024 uzyskanych metodą CWC oraz metodą klasyczną: a) $\zeta = 0,34$, b) $\zeta = 0,77$

W przypadku próbek ze stopu AW-2024 wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej uzyskane metodą klasyczną (dane materiałowe niezmiennie) na najniższym poziomie odkształcenia $\varepsilon_{acmax} = 0,35\%$ oraz $\zeta = 0,34$ są prawie 2,5-krotnie większe w porównaniu z wynikami uzyskanymi podczas badań eksperymentalnych. Sygnalizowany już w rozdziale 4. wpływ stabilizacji własności cyklicznych na rozrzut wyników dla tych parametrów programu obciążenia potwierdzają wyniki obliczeń trwałości uzyskane metodą CWC. Analiza porównawcza wyników obliczeń uzyskanych tą metodą z wynikami badań wskazuje, że uwzględnienie podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej chwilowych danych materiałowych pozwala uzyskać dla tych samych parametrów programu obciążenia

żenia ($\varepsilon_{acmax} = 0,35\%$ oraz $\zeta = 0,34$) istotną poprawę zgodności wyników obliczeń i badań. Wyniki trwałości uzyskane z obliczeń metodą CWC są w tym przypadku już tylko około 1,6 razy większe od wyników badań. Zgodność wyników trwałości uzyskanych z badań z wynikami obliczeń zarówno metodą klasyczną, jak również metodą CWC ulega również wyraźnej poprawie na poziomie odkształcenia $\varepsilon_{acmax} = 0,35\%$, występującego w programie obciążenia o współczynniku wypełnienia widma $\zeta = 0,77$ (rys. 5.9b).

Potwierdzeniem wpływu przebiegu stabilizacji na wyniki obliczeń trwałości są również rezultaty uzyskane metodą klasyczną i CWC dla próbek ze stali C45. Uzyskane wykresy zmęczeniowe niezależnie od przyjętej metody obliczeń trwałości cechuje niewielkie zróżnicowanie. Dużą zgodność wyników obliczeń i badań, jak również brak wpływu metody obliczeń na uzyskane wyniki, uzasadnić można w tym przypadku niewielkimi zmianami własności cyklicznych (najmniejszych wśród materiałów przyjętych do badań) próbek z tego materiału, obserwowanych w warunkach obciążeń stałoamplitudowych.

Brak wpływu metody obliczeń na uzyskane wyniki trwałości zmęczeniowej potwierdzają wyniki testów równoległości i wyrazu wolnego dla prostych regresji, opisujących wyniki obliczeń trwałości uzyskane metodą CWC i metodą klasyczną. Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotez o równości współczynników regresji, jak również wyrazów wolnych wykresów zmęczeniowych.

5.3. ZAKRES ZASTOSOWANIA METODY CWC

W zaproponowanej metodzie obliczeń trwałości zmęczeniowej bazującej na chwilowych własnościach cyklicznych została podjęta próba powiązania procesu sumowania uszkodzeń oraz przebiegu zmian własności cyklicznych. Analiza wyników doświadczalnej weryfikacji pozwala stwierdzić, że metodę obliczeń trwałości zmęczeniowej uwzględniającą zmiany własności cyklicznych można zastosować przede wszystkim do przewidywania trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych, wykonanych z materiałów charakteryzujących się znacznymi zmianami własności cyklicznych oraz brakiem wyraźnego okresu stabilizacji. Z oczywistych względów, wyniki obliczeń trwałości metodą CWC elementów wykonanych z materiałów o niewielkich zmianach własności cyklicznych oraz materiałów cyklicznie stabilnych będą porównywalne z wynikami uzyskanymi metodą klasyczną.

Weryfikację nowej metody obliczeń trwałości przeprowadzono dla zróżnicowanych sekwencji parametrów programów obciążenia. Były wśród nich zarówno przebiegi, w których większość cykli powodowała występowanie w materiale próbek odkształceń plastycznych, jak również programy, w których tylko część cykli powodowała występowanie odkształceń plastycznych. Poprawa zgodności wyników trwałości uzyskanej z badań i obliczeń dla większości sek-

wencji w stosunku do wyników uzyskanych metodą klasyczną wskazuje na możliwość jej zastosowania w obszarze zmęczenia nisko- i wysokocyklowego.

W niniejszej rozprawie występujące podczas obciążenia zmiany własności cyklicznych uwzględniano podczas sumowania uszkodzeń zmęczeniowych zgodnie z propozycją Palmgrena-Minera. Przeprowadzona analiza założeń znanych hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych, przedstawiona między innymi w pracach [29, 82, 160], wskazuje, że zmiany własności cyklicznych podczas obliczeń trwałości można uwzględnić również w hipotezach opartych na liniach stałych uszkodzeń zmęczeniowych oraz liniach resztkowych trwałości zmęczeniowych.

Przedstawioną w rozprawie propozycję uwzględniania podczas obliczeń trwałości zmian własności cyklicznych materiału zweryfikowano dla energetycznego opisu procesu zmęczenia. Podobne jakościowo wyniki analizy procesu stabilizacji z wykorzystaniem innych wielkości kryterialnych (naprężenia, odkształcenia) pozwalają przypuszczać, że możliwe jest także uwzględnianie zmian własności cyklicznych podczas obliczeń trwałości prowadzonych w ujęciu odkształceniowym lub naprężeniowym.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzona w pracy analiza doniesień literaturowych wskazuje, że obecne metody obliczeń trwałości zmęczeniowej w niewielkim stopniu powiązane są z przebiegiem stabilizacji własności cyklicznych, a niekiedy tych związków są zupełnie pozbawione. W pracy przedstawiono wyniki badań przebiegu stabilizacji własności cyklicznych trzech metali, poddanych programom obciążenia o zróżnicowanej postaci i parametrach. Przyjęty program badań umożliwił analizę przebiegu zmian własności cyklicznych, jak również czynników związanych z obciążeniem mających na nie wpływ.

Na podstawie analizy wyników badań zmęczeniowych w zróżnicowanych warunkach obciążenia można stwierdzić, że obecnie wśród parametrów pętli histerezy, wykorzystywanych podczas obliczeń trwałości brak parametrów niewrażliwych na zmiany własności cyklicznych. Wielkość zmian własności cyklicznych, obserwowanych podczas badań zmęczeniowych, zależy zarówno od samego materiału, jak również od parametrów przyjętych do ich oceny. Na podstawie przeprowadzonych badań trudno wskazać parametr pętli histerezy, charakteryzujący się w przypadku wszystkich badanych metali najmniejszą wrażliwością na zmiany własności cyklicznych.

Zmienność parametrów pętli histerezy w funkcji liczby cykli obciążenia powoduje, że wartości danych materiałowych, wykorzystywanych podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej, zależą od okresu trwałości, w którym je określono. Nieuwzględnianie podczas obliczeń trwałości zmian własności cyklicznych i jednocześnie danych materiałowych powoduje w przypadku materiałów cyklicznie niestabilnych zróżnicowanie wyników obliczeń i badań.

Stwierdzony podczas badań własnych wpływ okresu określenia danych materiałowych na wyniki obliczeń stanowi jednocześnie potwierdzenie postawionej w pracy tezy o wpływie zmian własności cyklicznych materiału na wyniki obliczeń trwałości. Po analizie wpływu stabilizacji własności cyklicznych na trwałość zmęczeniową zaproponowano metodę obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych, uwzględniającą występujące zmiany własności cyklicznych. Przeprowadzone badania umożliwiły sformułowanie szeregu wniosków szczegółowych, dotyczących przebiegu stabilizacji własności cyklicznych i jej wpływu na wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej.

A. Wnioski z badań

Na podstawie przeprowadzonej w rozdziałach 4. i 5. analizy uzyskanych wyników można sformułować następujące wnioski:

1. W warunkach obciążeń stałoaamplitudowych, losowych i programowanych mają miejsce zmiany własności cyklicznych materiału, które utrudniają jednoznaczne określenie na poszczególnych poziomach odkształcenia tzw. okresu stabilizacji, a tym samym wyznaczenie niezbędnych podczas obliczeń trwa-

łości zmęczeniowej danych materiałowych. Powoduje to, że na wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej ma wpływ zarówno sam przebieg zmian własności cyklicznych, jak również okres trwałości przyjęty do określenia niezbędnych danych materiałowych.

2. Przebieg zmian własności cyklicznych jest cechą charakterystyczną materiału i zależy przede wszystkim od poziomu odkształcenia. Najmniejsze zmiany parametrów pętli histerezy dotyczą stali C45, natomiast największe stopu AW-2024 i stali 30HGSA. Największe zmiany własności cyklicznych występują na początku próby zmęczeniowej. Spośród analizowanych parametrów pętli histerezy największe zmiany w funkcji liczby cykli obciążenia dotyczą amplitudy odkształcenia plastycznego i energii odkształcenia.
3. Wpływ okresu trwałości przyjętego do określenia danych materiałowych na wyniki obliczeń trwałości zależy jest od parametrów programu obciążenia i przebiegu zmian własności cyklicznych. Jest on niewielki w przypadku programów charakteryzujących się największą wartością odkształcenia maksymalnego ε_{acmax} i współczynnika wypełnienia widma ξ . Wpływ ten wzrasta w miarę zmniejszania poziomów obciążeń maksymalnych ε_{acmax} występujących w programie oraz wartości współczynnika wypełnienia widma ξ . Dla programu o parametrach $\xi = 0,34$ oraz $\varepsilon_{acmax} = 0,35\%$ i skrajnych wartości danych materiałowych zróżnicowanie wyników trwałości uzyskanych z obliczeń i badań może wynosić od 10% dla stali C45 do około 500% w przypadku próbek ze stopu AW-2024.
4. Wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej, uzyskane metodą klasyczną (z wykorzystaniem danych z jednego okresu trwałości $n/N = 0,5$), różnią się istotnie od wyników badań doświadczalnych. Zróżnicowanie wyników z obliczeń i badań zależy zarówno od materiału próbek, jak również parametrów programów obciążenia i wynosi od 8% dla próbek ze stali C45 do około 250% dla próbek ze stopu AW-2024. Powiązanie podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej procesu sumowania uszkodzeń zmęczeniowych z występującymi zmianami własności cyklicznych materiału powoduje istotne zmniejszenie zróżnicowania wyników obliczeń i badań. Największą poprawę zgodności wyników trwałości z obliczeń i badań uzyskano dla próbek wykonanych ze stopu AW-2024 i programów obciążenia o najmniejszych wartościach współczynnika wypełnienia widma ξ i odkształcenia maksymalnego ε_{acmax} .
5. Postać i parametry programu obciążenia mają niewielki wpływ na przebieg stabilizacji badanych materiałów. Dla wszystkich postaci programów obciążenia na tych samych poziomach odkształcenia obserwuje się podobne przebiegi zmian parametrów pętli histerezy. Ich cechą charakterystyczną jest to, że w warunkach obciążenia losowego i programowanego nie występuje, podobnie jak w warunkach obciążenia stałoamplitudowego, stan stabilizacji. Analiza przebiegów podstawowych parametrów pętli histerezy wskazuje na występowanie zależnego od poziomu odkształcenia ε_{ac} umocnienia lub osłabienia materiału.

6. Podobny ilościowo oraz jakościowo przebieg zmian własności cyklicznych podczas obciążenia stałoaamplitudowego i programowanego uzasadnia korzystanie podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń eksploatacyjnych wyłącznie z wykresów zmęczeniowych, wyznaczonych podczas obciążenia stałoaamplitudowego, jak również danych materiałowych określanych w różnych okresach trwałości w warunkach obciążenia stałoaamplitudowego.
7. Występujące podobieństwa jakościowe i ilościowe w przebiegu stabilizacji dla różnych postaci i parametrów programów obciążenia wydają się potwierdzać niezauważalne różnice trwałości uzyskane dla różnych postaci i kształtu programu obciążenia. Analiza porównawcza trwałości zmęczeniowej uzyskanej dla zróżnicowanych postaci i kształtu programów obciążenia (z nieregularnym następstwem cykli i stopni) nie wykazała zauważalnego wpływu którejkolwiek postaci programu na trwałość zmęczeniową. Fakt ten ma istotne znaczenie praktyczne. Potwierdza bowiem jako zasadne stosowanie metody programowanych obciążeń w badaniach i obliczeniach trwałości zmęczeniowej elementów maszyn.
8. Konsekwencją zmian parametrów pętli histerezy, wykorzystywanych podczas analizy stabilizacji, są zmiany danych materiałowych stosowanych podczas obliczeń trwałości, a określanych w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych. Wartości ich zależą od okresu trwałości zmęczeniowej, w którym zostały określone. Zakres zmian podstawowych danych materiałowych określanych w różnych okresach trwałości jest zależny od rodzaju materiału. Przebiegi zmian wyznaczonych danych materiałowych, podobnie jak parametry pętli histerezy materiału, odzwierciedlają zmiany własności cyklicznych. Analiza porównawcza danych materiałowych wyznaczonych metodą klasyczną i uproszczoną uwypukla niezauważalne różnice występujące pomiędzy nimi. Powyższy fakt w powiązaniu z wnioskiem 7. i 8. potwierdza zasadność wykorzystywania uproszczonych metod badań do określania chwilowych własności materiałowych, niezbędnych podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej.
9. Parametry programu obciążenia mają istotny wpływ na trwałość zmęczeniową. Dla obydwu postaci programu obciążenia (losowego R i programowanego I) oraz wszystkich sekwencji programów obciążenia określonych maksymalną amplitudą odkształcenia całkowitego ε_{acmax} oraz współczynnikiem wypełnienia widma ζ , wraz ze wzrostem tego ostatniego trwałość maleje i zbliża się do wyników badań w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych, dla których $\zeta = 1$.
10. Skuteczność odwzorowania jednostkowej energii odkształcenia plastycznego zależy od danych materiałowych wykorzystywanych w opisach, jak również poziomu odkształcenia. Dla niezmiennych danych materiałowych (z jednego okresu trwałości) zróżnicowanie wyników obliczeń energii ΔW_{pl} wynosi od 10% dla poziomu odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 1\%$ w przypadku stali 30HGSA do

około 20% dla poziomu $\varepsilon_{ac} = 0,35\%$ w przypadku stopu AW-2024. Uwzględnienie podczas obliczeń energii ΔW_{pl} zmian danych materiałowych pozwala obniżyć zróżnicowanie wyników obliczeń do poziomu około 5% w przypadku stali 30HGSA oraz około 8% dla stopu AW-2024.

B. Wytyczne do dalszych badań

Uzyskane wyniki badań oraz przeprowadzona na ich podstawie analiza ujawniła kilka zagadnień wymagających dalszych badań eksperymentalnych. Najistotniejsze z nich omówiono poniżej:

1. Przebieg procesu stabilizacji trzech metali oceniano w pracy na podstawie badań zmęczeniowych w warunkach programów obciążenia o zróżnicowanej postaci i parametrach. W celu uproszczenia analizy przebiegu stabilizacji, programy obciążenia składały się wyłącznie z cykli wahadłowych, realizowanych w warunkach kontrolowanego odkształcenia całkowitego ε_{ac} . Sygnalizowany w literaturze wpływ wartości średniej obciążenia na przebieg stabilizacji wskazuje, że w celu sformułowania wniosków o charakterze ogólnym niezbędna jest realizacja badań w warunkach obciążeń o wartości średniej różnej od zera ($R \neq -1$) i przy kontrolowanej wartości siły obciążającej.
2. Dane materiałowe wyznaczane w obszarze niskocyklowego zmęczenia wykorzystuje się najczęściej do modelowania zachowania się elementów konstrukcyjnych w obszarach nieciągłości geometrycznych i strukturalnych. W prezentowanej pracy analizę stabilizacji badanych materiałów w warunkach obciążeń losowych i programowanych oraz doświadczalną weryfikację nowej metody obliczeń trwałości przeprowadzono na podstawie badań próbek gładkich. W celu uogólnienia wniosków niezbędne jest podjęcie prac badawczych, których celem będzie analiza procesu stabilizacji materiału w małych obszarach korbów konstrukcyjnych.
3. W pracy stwierdzono poprawę skuteczności obliczeń trwałości zmęczeniowej z wykorzystaniem nie mającej uzasadnienia fizycznego, najprostszej, liniowej hipotezy sumowania uszkodzeń Palmgrena-Minera. Należy przypuszczać, że uwzględnienie zmian własności cyklicznych w innych, doskonalszych i mających fizyczne uzasadnienie hipotezach sumowania uszkodzeń zmęczeniowych, np. opartych na liniach stałych uszkodzeń zmęczeniowych spowoduje, że zróżnicowanie uzyskanych wyników obliczeń i badań może być jeszcze mniejsze. Wymaga to jednak sformułowania założeń do obliczeń trwałości z wykorzystaniem tych hipotez oraz ich weryfikacji.
4. Podczas doświadczalnej weryfikacji zaproponowanej metody prowadzenia obliczeń trwałości z uwzględnieniem chwilowych własności materiałowych bazowano na wykresach trwałości zmęczeniowej w ujęciu energetycznym, w którym wielkością kryterialną była energia odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} . Ze względów praktycznych interesująca wydaje się również jej doświadczal-

na weryfikacja z wykorzystaniem innych parametrów energetycznych oraz wykresów zmęczeniowych w ujęciu odkształceniowym oraz naprężeniowym.

5. Przyjęcie do opisu procesu zmęczenia energii odkształcenia plastycznego, lub sprężystego i plastycznego stworzyło nowe możliwości sumowania uszkodzeń zmęczeniowych. Jednak pomimo wielu zalet (między innymi wzajemnych interakcji naprężeń i odkształceń), są one nadal wielkościami wynikowymi, obliczanymi na podstawie badań realizowanych w warunkach kontrolowanego odkształcenia czy naprężenia. Powoduje to w przypadku realizacji obciążeń z zakresu wysokocyklowego zmęczenia trudności wyodrębnienia odkształcenia plastycznego, a tym samym obliczenia pola powierzchni pętli histerezy. Niezbędna wydaje się realizacja badań, w których parametry energetyczne byłyby parametrami sterującymi próbą zmęczeniową. Analiza wyników tak zrealizowanych badań może pozwolić na uściślenie energetycznego opisu procesu zmęczenia w wyniku opracowania innych, nowych parametrów, charakteryzujących się brakiem wrażliwości na zmiany własności cyklicznych.

LITERATURA

- [1] Abel A., 1987. Comparison of Low Cycle Axial, Rotating and Bending Fatigue of Aluminium Alloys. Second International Conference on Low Cycle Fatigue and Elasto-Plastic Behaviour of Materials, Munich, 610-615.
- [2] Aubin V., Quaegebeur P., Degallaix S., 2003. Cyclic plasticity of duplex stainless steel under nonproportional loading. *Materials Science & Engineering A346*, 208-215.
- [3] Aurzednik B., 1981. Vlijanie predvaritelnoj malociklovoj pjeregruzki na mnogociklovuju dolgovečnost nizekouglerodistoj stali. *Mechaniceskaja ustalost metallov. Materialy VI Mezdunarodnowo Kolukviuma AN SSSR, AN USSR, Instytut Problemy Procnosti, Kiev 1981, Naukova Dumka, 349-356.*
- [4] Bayerlein H., Christ J., Mughrabi H., 1987. A Critical Evaluation of the Incremental Step Test. Second International Conference on Low Cycle Fatigue and Elasto-Plastic Behaviour of Materials, Munich, 149-154.
- [5] Berling J., Conway J.B., 1969. Effect of hold time on low cycle resistance of 304 stainless steel at 1200 F. *Proc. of Fifth Intern. Conf. on Pressure Vessel Technology, Delft, Part 2, 1233-1246.*
- [6] Bonnen J.J.F., Conle F.A., Topper T.H., 2001. The role of in-phase and out-of-phase overloads on torsional fatigue of normalized SAE-1045 steel. *International Journal of Fatigue* 23, 385-394.
- [7] Bonnen J.J.F., Topper T.H., 1999. The effect of bending overloads on torsional fatigue in normalized 1045 steel. *International Journal of Fatigue* 21, 23-33.
- [8] Boroński D., 1999. Badania rozkładu odkształceń i naprężeń lokalnych w próbkach z karbem w warunkach cyklicznego obciążenia. *Praca doktorska, ATR w Bydgoszczy.*
- [9] Boroński D., 2004. The effect of the method of determination of Young's modulus on the estimation of fatigue life of structural elements. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 42(2), Warsaw, 269-283.
- [10] Boroński D., 2005. Doświadczalna analiza rozkładów odkształceń w strefach zmęczeniowego pęknięcia. *Zesz. Nauk. ATR w Bydgoszczy, Rozprawy* 115.
- [11] Boroński D., Cieszyński T., Topoliński T., Araszkiwicz M., 2006. Badania zmęczeniowe przy kontrolowanym poziomie energii dyssypacji. *Konceptja badań i wyniki wstępne. XXI Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pęknięcia, Pieczyska k. Bydgoszczy, 59-66.*
- [12] Boroński D., Mroziński S., 2000. Badania energii odkształcenia w próbie rozciągania – stanowisko badawcze. *XIX Sympozjum Mechanika Eksperymentalna Ciała Stałego, Jachranka k. Warszawy, 151-157.*
- [13] Boroński D., Mroziński S., 2000. Energia dyssypowana w materiale podczas obciążenia monotonicznego i cyklicznego. *XIX Sympozjum Mechanika Eksperymentalna Ciała Stałego, Jachranka k. Warszawy, 392-398.*

- [14] Boroński D., Szala G., 2002. The hybrid strain analysis in fatigue loading conditions. Proc. of the 8th International Fatigue Congress, Stockholm, EMAS, 2775-2782.
- [15] Caligiana G., Curioni S., 1992. Testing Rig Low Cycle Fatigue Tests in Combined Bending and Torsion. Fatigue Design 1992, Vol. 2, Helsinki, Finland, 211-226
- [16] Chen D.L., Weiss B., Stickler R., 1997. Cyclic plasticity of recrystallized Mo at low temperatures. Materials Science & Engineering A234-236, 766-769.
- [17] Chen L.J., Eang Z.G., Yao G., Tian J.F., 1999. The influence of temperature on low cycle fatigue behavior of nickel base superalloy GH4049. International Journal of Fatigue 21, 791-797.
- [18] Christ H.J., Hoffmann G., Öttinger O., 1995. History effects in metals during constant and variable amplitude testing. Materials Science & Engineering A201, 1-12.
- [19] Coffin L.F., 1954. A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal. Trans. ASME 76, 931-950.
- [20] Collins J.A., 1993. Failure of Materials in Mechanical Design, Analysis, Prediction, Prevention. John Wiley & Sons, New York.
- [21] Corten H.T., Dolan T.L., 1956. Cumulative Fatigue Damage. International Conference on Fatigue of Metals, London.
- [22] DuQuesnay D. L., MacDougall C., Dabayeh A., Topper T.H., 1995. Notch fatigue behaviour as influenced by periodic overloads. International Journal of Fatigue 17(2), 91-99.
- [23] Duga J.J. et al., 1983. The economic effects of fracture in the United States, Part 2-A. Report to NBS by Battelle Columbus Laboratories.
- [24] Duyi Y., Zhenlin W., 2001. A new approach to low cycle fatigue damage based on exhaustion of static toughness and dissipation of cyclic plastic strain energy during fatigue. International Journal of Fatigue 23, 679-687.
- [25] Duyi Y., Zhenlin W., 2001. Change characteristics of static mechanical property parameters and dislocation structures of 45[#] medium carbon structural steel during fatigue failure process. Materials Science & Engineering A297, 54-61.
- [26] Eisenberg M.A., 1976. Plastic Flow Theory with Application to Cyclic Hardening and Softening Phenomena. J. of Engn. Mater. and Tech., Trans. ASME, 221-228.
- [27] Ellyin F., Kujawski D., 1984. Plastic strain energy in fatigue failure. Journal Pressure Vessel Technology, Trans. ASME 106, 342-347.
- [28] Ellyin F., Kujawski D., 1985. An energy based fatigue failure criterion. Proc. of the International Symposium on Microstructure and Mechanical Behaviour of Materials, Xi'an, China, Gu Haicheng and He Jiawen (eds.), 595-600.

- [29] Fatemi A., Yang L., 1998. Cumulative Fatigue Damage and Life Prediction Theories: A Survey of the State of the Art for Homogeneous Materials. *International Journal of Fatigue* 20(1), 9-34.
- [30] *Fatigue Design Handbook*, 1988. Society of Automotive Engineers.
- [31] Feltner C.E., Morrow J.D., 1961. Microplastic strain hysteresis energy as a criterion for fatigue fracture. *Journal Basic Engineering ASME*, March, 15-22.
- [32] Ganesh Sundara Raman S., Padmanabhan K.A., 1995. A comparison of the room-temperature behaviour of AISI 304LN stainless steel and Nimonic 90 under strain cycling. *International Journal of Fatigue* 17(4), 271-277.
- [33] Glinka G., 1981. Powstawanie i rozwój pęknięć zmęczeniowych. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Mechanika* 75.
- [34] Glinka G., Stephens R.J., 1979. Fatigue Life Predictions in Notched Members Under Variable Loading Histories. *ASME, Journal of Engineering Materials and Technology*, 267-272.
- [35] Gołoś K., 1988. Energetic formulation o fatigue strength criterion. *Archiwum Budowy Maszyn XXXV(1/2)*, 5-16.
- [36] Gołoś K., 1988. Plastic Strain Energy under Cyclic Multiaxial States of Stress. *Mechanika Teoretyczna i Stosowana* 1(26), 171-177.
- [37] Gołoś K., 1989. Trwałość zmęczeniowa stali w ujęciu energetycznym. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Mechanika* 123.
- [38] Gołoś K., Ellyin F., 1988. A total strain energy theory for cumulative fatigue damage. *Trans. ASME, Journal of Pressure Vessel Technology*, 110, 35-41.
- [39] Goss Cz., 1982. Doświadczalna i teoretyczna analiza własności stali o podwyższonej wytrzymałości w zakresie małej liczby cykli obciążenia. Dodatek do *Biuletynu* 11(363) *Wojskowej Akademii Technicznej*.
- [40] Goss Cz., 1983. Niskocyklowa trwałość zmęczeniowa stali o podwyższonej wytrzymałości w ujęciu energetycznym. *Mechanika Teoretyczna i Stosowana* 2/3, 341-360.
- [41] Goss Cz., Kłysz S., Telega J., 2004. Wpływ sekwencji obciążeń na kształt pętli histerezy w zakresie małej liczby cykli obciążenia. *XX Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania, Pieczyska k. Bydgoszczy*, 97-103.
- [42] Goss Cz., Kocańda S., 1976. O osłabieniu stali 45 przy małej liczbie cykli zmian obciążenia. *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej* 12.
- [43] Goss Cz., Kocańda S., Kur J., Zielosko R., 1986. Badania zmęczeniowe stali o podwyższonej wytrzymałości 18G2A przy zginaniu w zakresie małej liczby cykli. *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej* 10, 3-17.
- [44] Goss Cz., Kocańda S., Mróz Z., 1980. Modelowanie cyklicznego zachowania się stali o podwyższonej wytrzymałości w zakresie małej liczby cykli. *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej* 5, 25-51.

- [45] Goss Cz., Zielosko R., 1986. Badania trwałości zmęczeniowej stali o podwyższonej wytrzymałości przy niskocyklowym zginaniu. XII Symposium Doświadczalne Badania w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa.
- [46] Greń J., 1988. Statystyka matematyczna modele i zadania. PWN Warszawa.
- [47] Guagliano M., Vergani L., 1997. Effect of nitriding on low-cycle fatigue properties. *International Journal of Fatigue* 19(1), 67-73.
- [48] Hai Ni, Zhirui Wang, 2001. Effect of pre-strain and mean stress on cyclic plastic deformation response of iron - based alloys. *Materials Science & Engineering A314*, 12-23.
- [49] Haibach E., 1970. Modifizierte Lineare Schadensakkumulations-Hypothese zur Berticksichtigung. *Laboratorium fur Betriebsfestigkeit, Darmstadt, Technische Mitteilungen* 50/70.
- [50] Halford G.R., 1966. The energy required for fatigue. *Journal of Materials* 1(1), 3-18.
- [51] Hashin Z., Rotem A., 1978. A Cumulative Damage Theory of Fatigue Failure. *Mater. Sci. Engn.* 34, 147-160.
- [52] He Y.H., Chen L.J., Liaw P.K., McDaniels R.L, Brooks C.R., Seeley R.R., Kalstrom D.L., 2002. Low-Cycle fatigue behavior of HAYNES HR-120 alloy. *International Journal of Fatigue* 24, 931-942.
- [53] Jhansale H.R., 1985. A new parameter for hysteresis stress-strain behavior of metals. *Journal of Engineering Materials and Technology, Trans. ASME* 107, 119-125.
- [54] Jhansale H.R., Topper T.H., 1973. Engineering analysis of the inelastic stress response of a structural metal under variable cyclic strains. *ASTM STP 519, American Society of Testing and Materials*, 246-270.
- [55] Jones A., Hudd R.C., 1999. Cyclic stress-strain curves generated from random cyclic strain amplitude tests. *International Journal of Fatigue* 21, 521-530.
- [56] Kaleta J., 1998. Doświadczalne podstawy formułowania energetycznych hipotez zmęczeniowych. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*.
- [57] Kaleta J., Korabik A., 1992. Kumulacja energii odkształcenia plastycznego w procesie nisko- i wysokocyklowego zmęczenia mosiądzu M63. *XV Symposium Mechanika Eksperymentalna Ciała Stałego, Jachranka k. Warszawa*, 119-122.
- [58] Karolczuk A., Łagoda T., Walat K., 2007. Wpływ parametrów krzywej cyklicznego odkształcenia na wyznaczenie trwałości zmęczeniowej materiałów. *XI Krajowa Konferencja Naukowo-Szkoleniowa Mechanika Pękania, Kielce/Cedzyna*, 56-57.
- [59] Kasprzyczak L., 2007. Systemy mechatroniczne maszyn wytrzymałościowych. *Praca doktorska, Politechnika Opolska*.
- [60] Kasprzyczak L., Macha E., 2006. Selection of the PID controller structure for control of stress, strain and energy parameter at the hydraulic fatigue test stand. *II International Conference Mechatronic Systems and Materials*, 1-10.
- [61] Kocańda S., 1985. Zmęczeniowe pękanie metali. *WNT Warszawa*.

- [62] Kocańda S., Kocańda A., 1989. Niskocyklowa wytrzymałość zmęczeniowa metali. PWN Warszawa.
- [63] Kocańda S., Szala J., 1997. Podstawy obliczeń zmęczeniowych. PWN Warszawa.
- [64] Koh S.K., 2002. Fatigue damage evaluation of high pressure tube steel using cyclic strain energy density. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 79, 791-798.
- [65] Kruml T., Polak J., 2001. Fatigue softening of X10CrA124 ferritic steel. *Materials Science & Engineering A319-321*, 564-568.
- [66] Kućera J., Kufa T., 1987. Możliwości określania parametrów zmęczeniowych stali z próby rozciągania. *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza* 1-2.
- [67] Kujawski D., 1991. Modelowanie trwałości zmęczeniowej i propagacji pęknięć w metalach. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Mechanika* 133.
- [68] Kujawski D., Ellyin F., 1984. A cumulative damage theory of fatigue crack initiation and propagation. *International Journal of Fatigue* 6, 83-88.
- [69] Kunz L., Lukas P., 2001. Cyclic stress-strain behavior of 9 Cr1Mo steel at positive mean stress. *Materials Science and Engineering A319-321*, 555-558.
- [70] Kunz L., Lukas P., Weiss B., Melisova D., 2001. Effect of loading history on cyclic stress-strain response. *Materials Science & Engineering A314*, 1-6.
- [71] Landgraf R.W., Morrow J., Endo T., 1969. Determination of the Cyclic Stress-Strain Curve. *Journal of Materials* 4, 1621-1653.
- [72] Leffebvre D., Ellyin F., 1984. Cyclic response and inelastic strain energy in low cycle fatigue. *International Journal of Fatigue* 6(1), 9-15.
- [73] Li D.M., Kim K.W., Lee C.S., 1997. Low cycle fatigue data evaluation for a high-strength spring steel. *International Journal of Fatigue* 19(8-9), 607-612.
- [74] Lin H., 1994. Multiaxial plasticity and fatigue life predictions of anisotropic Al-6061-T6. PhD thesis, Mechanical Engineering Department Northeastern University, Boston.
- [75] Lin X., Haicheng G., 1998. Plastic energy dissipation model for lifetime prediction of zirconium and zircaloy-4 fatigued at RT and 400 C. *Journal Engn. Mater. Technol. ASME* 120, 114-118.
- [76] Łagoda T., 2001. Energetyczne modele trwałości zmęczeniowej materiałów konstrukcyjnych w warunkach jednoosiowych i wieloosiowych obciążeń losowych. *Studia i monografie* 121, Wyd. Politechniki Opolskiej.
- [77] Malecki I., Ranachowski J., 1994. Emisja akustyczna. Źródła, metody, zastosowania. IPPT PAN, Warszawa.
- [78] Manson S.S., 1953. Behaviour of materials under conditions of thermal stress. *NACA TN – 2933*.
- [79] Manson S.S., 1971. Avoidance, Control, and Repair of Fatigue Damage. *Metal Fatigue Damage-Mechanism, Detection, Avoidance and Repair*, ASTM STP, 495.

- [80] Manson S.S., Halford G.R., 1981. Practical implementation of the double linear damage rule and damage curve approach for treating cumulative fatigue damage. *International Journal of Fracture* 17, 169-192.
- [81] Manson S.S., Halford G.R., 1986. Re-Examination of Cumulative Fatigue Damage Analysis – an Engineering Perspective. *Engineering Fracture Mechanics* 25(5/6), 539-571.
- [82] Manson S.S., Muralidharan U., 1987. Fatigue life prediction in bending from axial fatigue information. *Fatigue Frac. Engng Mater. Struct.* 9(5), 357-372.
- [83] Martin D.E., 1961. An energy criterion for low-cycle fatigue. *ASME J. Basic Engineering* 83, 565-575.
- [84] Masing G., 1962. Eigenspannungen und Verfestigung beim Messing. *Proc. 2nd Inter. Congress of Appl. Mechanics, Zurich*, 332-335.
- [85] Mathis K., Trojanova Z., Lukac P., 2002. Hardening and softening in deformed magnesium alloys. *Materials Science & Engineering A324*, 141-144.
- [86] Megahed M.M., 1990. Prediction of bending fatigue behaviour by the reference stress approach. *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.* 13(4), 361-374.
- [87] Miner M.A., 1945. Cumulative Damage in Fatigue. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Applied Mechanics* 67, 159-164.
- [88] Morrow J.D., 1964 *Fatigue properties of metals. Manual Society Automotive Engineers. ISTC Div. 4.*
- [89] Morrow J.D.W., 1965. *Cyclic Plastic Strain Energy and Fatigue of Metals, Internal Friction, Damping and Cyclic Plasticity. ASMT STP-378 Philadelphia*, 45-87.
- [90] Moscato M.G., Avalos M., Alvarez-Armas I., Petersen C., Armas A.F., 1997. Effect of strain rate on the cyclic hardening of Zircaloy-4 in the dynamic strain aging temperature range. *Materials Science and Engineering, A234-236*, 834-837.
- [91] Mroziński S., 1994. Analiza porównawcza niskocyklowego zmęczenia stali 45 w warunkach obciążenia osiowego i płaskiego zginania. *Zesz. Nauk. Wojskowej Akademii Technicznej* 2262, 175-180.
- [92] Mroziński S., 1994. Wybrane zagadnienia niskocyklowego zmęczenia stali konstrukcyjnych. *Zesz. Nauk. Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, Mechanika* 13(3), 401-411.
- [93] Mroziński S., 1995. Analiza porównawcza niskocyklowego zmęczenia stali 45 w warunkach obciążenia osiowego i płaskiego zginania. *Praca doktorska, ATR w Bydgoszczy.*
- [94] Mroziński S., 1995. Niskocyklowe zmęczenie w warunkach obciążenia osiowego i zginania. *Przegląd Mechaniczny* 20, 21-24.

- [95] Mroziński S., 1996. Niskocyklowe zmęczenie stali 45 w warunkach obciążeń programowanych. XVI Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pęknięcia Materiałów i Konstrukcji, Pieczyska k. Bydgoszczy, 131-134.
- [96] Mroziński S., 1998. Doświadczalna ocena procesu stabilizacji własności cyklicznych materiałów konstrukcyjnych podczas obciążenia stałoamplitudowego i nieregularnego. XVIII Sympozjum Mechanika Eksperymentalna Ciała Stałego, Jachranka k. Warszawy, 327-332.
- [97] Mroziński S., 1998. Przewidywanie trwałości zmęczeniowej w zakresie niskocyklowego zmęczenia podczas obciążeń nieregularnych. VII Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pęknięcia, Pieczyska k. Bydgoszczy, 199-204.
- [98] Mroziński S., 2000. A Fatigue damage accumulation method in low cycle fatigue zone. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 4(38), 767-780.
- [99] Mroziński S., 2000. Comparison analysis of low-cycle properties of 45 steel under uniaxial loading and bending. *Archive of Mechanical Engineering XLVII(2)*, 105-117.
- [100] Mroziński S., 2000. Energia dyssypowana w materiale podczas obciążenia monotonicznego i cyklicznego. XIX Sympozjum Mechanika Eksperymentalna Ciała Stałego, Jachranka k. Warszawy, 392-398.
- [101] Mroziński S., 2000. Sumowanie uszkodzeń zmęczeniowych w ujęciu energetycznym. XVIII Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pęknięcia, Pieczyska k. Bydgoszczy, 337-344.
- [102] Mroziński S., 2001. Badania materiałów konstrukcyjnych z wykorzystaniem emisji akustycznej. Projekt stanowiska badawczego. *Zesz. Nauk. Politechniki Opolskiej* 271, *Mechanika* 69, 257-266.
- [103] Mroziński S., 2001. Emisja akustyczna w materiałach konstrukcyjnych poddanych obciążeniu monotonicznemu i stopniowo narastającemu. *Zesz. Nauk. Politechniki Opolskiej* 271, *Mechanika* 69, 267-274.
- [104] Mroziński S., 2001. Metoda sumowania uszkodzeń zmęczeniowych w obszarze niskocyklowego zmęczenia. *Problemy Eksploatacji* 3(42), 175-184.
- [105] Mroziński S., 2002. Acoustic emission in composite materials tested under cyclic loading. 19th Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics, Danubia Adria, Polanica Zdrój, 202-203.
- [106] Mroziński S., 2002. Weryfikacja analitycznego opisu pętli histerezy. XIX Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pęknięcia, Pieczyska k. Bydgoszczy, 259-266.
- [107] Mroziński S., 2003. Influence of loading program sequence on the course of the 45 steel stabilization process. *The Archive of Mechanical Engineering* L(4), 387-399.
- [108] Mroziński S., 2003. O zmienności danych materiałowych do obliczeń trwałości zmęczeniowej. II Sympozjum Mechanika i Zniszczenie Materiałów i Konstrukcji, Augustów, 259-262.
- [109] Mroziński S., 2004. Analiza porównawcza dwóch metod wyznaczania własności cyklicznych metali. *Przegląd Mechaniczny* 4, 30-36.

- [110] Mroziński S., 2004. Własności cykliczne stali 30HGSA w warunkach występowania przeciążeń. XXI Sympozjum Mechanika Eksperymentalna Ciała Stałego, Jachranka k. Warszawy, 331-336.
- [111] Mroziński S., 2004. Wpływ sekwencji programu obciążenia na przebieg procesu stabilizacji stali 45. Zesz. Nauk. ATR w Bydgoszczy, Mechanika 54, 197-207.
- [112] Mroziński S., 2005. Wpływ danych materiałowych na wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej. Przegląd Mechaniczny 2, 24-28.
- [113] Mroziński S., 2006. Comparative analysis of cyclic properties of 30HGSA steel under constant-amplitude and incremental step loading. The Archive of Mechanical Engineering LIII(2), 191-205.
- [114] Mroziński S., 2006. Uwagi o wyznaczaniu charakterystyk zmęczeniowych w ujęciu energetycznym. XXI Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania, Pieczyska k. Bydgoszczy, 281-286.
- [115] Mroziński S., Boroński D., 2006. Badania niskocyklowe stali 45 w warunkach kontrolowanej energii odkształcenia. XXI Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania, Pieczyska k. Bydgoszczy, 287-292.
- [116] Mroziński S., Boroński D., 2007. Charakterystyki zmęczeniowe metali w ujęciu energetycznym. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej 217, 91-97.
- [117] Mroziński S., Szala J., 1992. Niskocyklowe badania zmęczeniowe w warunkach obrotowego zginania – stanowisko badawcze oraz wybrane wyniki badań. Zesz. Nauk. ATR w Bydgoszczy, Mechanika 36, 65-77.
- [118] Mroziński S., Szala J., 1993. An analysis of the influence of overloads on a fatigue life of 45-steel within the range of low – cycle fatigue. Journal of Theoretical and Applied Mechanics 4(31), 111-123.
- [119] Mroziński S., Szala J., 1995. Plane bending low – cycle fatigue investigations of 45-steel. Journal of Theoretical and Applied Mechanics 1(33), 99-113.
- [120] Mroziński S., Szala J., 1996. Fatigue life under axial loading and plane bending conditions experiment and calculations result. The Sixth International Fatigue Congress, Berlin, Elsevier Science Ltd., Fatigue '96, 153-157.
- [121] Mroziński S., Szala J., 1998. Summing the fatigue damage during irregular loading. 32nd Solid Mechanics Conference, Zakopane, 357-358.
- [122] Mroziński S., Topoliński T., 1999. New energy model of fatigue damage accumulation and its verification for 45-steel. Journal of Theoretical and Applied Mechanics 2(37), 223-239.
- [123] Mróz Z., 1969. An Attempt to Describe the Behavior of Metals under Cyclic Loads Using a More General Work Hardening Model. Acta Mech., 199-212.
- [124] Nagesha A., Valsan M., Kannan R., Bhanu Sankara Rao K., Mannan S.L., 2002. Influence of temperature on the low cycle fatigue behaviour

- of a modified 9Cr-1 Mo ferritic steel. *International Journal of Fatigue* 24, 1285-1293.
- [125] Nagode M., Hack M., 2004. An online algorithm for temperature influenced fatigue life estimation: stress-life approach. *International Journal of Fatigue* 26, 163-171.
- [126] Nagode M., Zingsheim M., 2004. An online algorithm for temperature influenced fatigue life estimation: strain-life approach. *International Journal of Fatigue* 26, 155-161.
- [127] Neuber H., 1961. Theory of stress concentration for shear strained prismatical bodies with arbitrary nonlinear stress-strain law. *Journal of Applied Mech. E* 28(4), 544-550.
- [128] Ohchuda H., 1979. *Analysis of Services Failure of Hitachi Products 1970-1975*. Tokyo.
- [129] Ong J.H., 1993. An improved technique for the prediction of axial fatigue life from tensile. *International Journal of Fatigue* 15(3), 213-219.
- [130] Osiński Z., Kocańda W., Kujawski D., 1988. Własności tłumiące, a moduł styczny i sieczny dla stali 45 w zakresie niskocyklowego zmęczenia. XIII Sympozjum Mechanika Doświadczalna Ciała Stałego, Jadwisin, 236-239.
- [131] Palmgren A., 1924. Die Lebensdauer von Kugellagem. *Verfahrenstechnik Berlin* 68, 339-341.
- [132] Park J.H., Song J.H., 1995. Detailed evaluation of methods for estimation of fatigue properties. *International Journal of Fatigue* 17(5), 365-373.
- [133] Ramberg W., Osgood W.R., 1943. Description of stress-strain curves by three parameters. NACA, Tech. Note 402.
- [134] Rosochacki W., Hann M., 2006. Badania rekonesansowe granicy plastyczności stali 18G2A w warunkach działania losowego procesu naprężeń. XXI Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pęknięcia, Pieczyńska k. Bydgoszczy, 343-349.
- [135] Rossele M.L., Fatemi A., 2000. Strain-controlled fatigue properties of steels and some simple approximations. *International Journal of Fatigue* 22, 495-511.
- [136] Schijve J., 2001. *Fatigue of Structures and Materials*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht – Boston – London.
- [137] Schijve J., 2003. Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art. *International Journal of Fatigue* 25, 679-702.
- [138] Schott G., 1981. Lebensdauerberechnung für Schwingbelastungen auf der Grundlage von Folgenwöhlerkurven. *Maschinenbautechnik* 7.
- [139] Serensen S.V., Kogaev V.P., 1996. Dolgovečnost detalej masin s učetom verojatnosti rozrusenia pri nestacionanom peremennom nagruženii. *Vestnik Masinostroenia* 1.
- [140] Shi X.Q., Pang H.L.J., Zhou W., Wang Z.P., 2002. Low cycle fatigue analysis of temperature and frequency effects in eutectic solder alloy. *International Journal of Fatigue* 22, 217-228.

- [141] Shingai K., Hirasouzu T., Matuso K., 1999. Cyclic elastic-plastic strain behaviour ahead of notch during fatigue under plane bending. Proc. of the 6th International Fatigue Congress, Pekin, 2, 1181-1182.
- [142] Singh N., Gouthama, Singh V., 2002. Low cycle fatigue behavior of alloy IMI 834 at room temperature. Materials Science & Engineering A325, 324-332.
- [143] Skorupa M., 1989. Przewidywanie żywotności zmęczeniowej połączeń spawanych. Zesz. Nauk. Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, Mechanika 18.
- [144] Słowik J., Kasprzyczak L., Macha E., 2006. Układ sterowania maszyny wytrzymałościowej UFP 400 do wyznaczania energetycznej charakterystyki zmęczeniowej materiałów. XXI Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania, Pieczyska k. Bydgoszczy, 383-390.
- [145] Smith K.N., Watson P., Topper T.H., 1970. A stress-strain function for the fatigue of metals. Journal Materials 5, 767-776.
- [146] Sobczykiewicz W., 1994. Wymiarowanie spawanych konstrukcji nośnych maszyn w zakresie trwałości zmęczeniowej. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Mechanika 157.
- [147] Song X.P., Chen G.L., Gu H.C., 2002. Low cycle fatigue behavior of commercial purity titanium in liquid nitrogen. International Journal of Fatigue 24, 49-56.
- [148] Stephens R.I., 1987. Wpływ przeciążeń na wzrost szczelin zmęczeniowych. Mechanika Teoretyczna i Stosowana 2(16), 123-149.
- [149] Subramanyan S., 1976. A Cumulative Damage Rule Based on the Knee Point of the S-N Curve. Trans.ASME, Journal of Engineering Materials and Technology A, 125-135.
- [150] Sun Q.Y., Song X.P., Gu H.C., 2001. Cyclic deformation behaviour of commercially pure titanium at cryogenic temperature. International Journal of Fatigue 23, 187-191.
- [151] Szala J., 1978. Wpływ sekwencji obciążenia na trwałość zmęczeniową. Mechanika Teoretyczna i Stosowana 2, 125-134.
- [152] Szala J., 1979. Badania i obliczenia zmęczeniowe elementów maszyn w warunkach obciążeń losowych i programowanych. Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa.
- [153] Szala J., 1980. Ocena trwałości zmęczeniowej elementów maszyn w warunkach obciążeń losowych i programowanych. Zesz. Nauk. ATR w Bydgoszczy, Mechanika 22.
- [154] Szala J., 1981. Sumowanie uszkodzeń zmęczeniowych w warunkach naprężeń stochastycznych i programowanych. Archiwum Budowy Maszyn XXVIII(4), 409-417.
- [155] Szala J., 1998. Hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych. Wyd. Uczeln. ATR w Bydgoszczy.

- [156] Szala J., Ligaj B., Szala G., 2002. Wytrzymałość wstępnie cyklicznie obciążonych próbek ze stopu aluminium D16CzATW. XIX Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania, Pieczyska k. Bydgoszczy, 373-382.
- [157] Szala J., Mroziński S., 1993. An analysis of influence of overloads on a fatigue life of 45-steel within the range of low-cycle fatigue. *Mechanika Teoretyczna i Stosowana* 4(31), 111-123.
- [158] Szala J., Mroziński S., Boroński D., 1998. Badanie procesu sumowania uszkodzeń zmęczeniowych w zakresie niskocyklowego zmęczenia. Sprawozdanie z projektu badawczego nr 7 T07A03508 finansowanego przez KBN, Część opisowa oraz protokoły z badań, ATR Bydgoszcz.
- [159] Taheri S., 1992. A Modified Miner Rule To Predict Crack Initiation, *Fatigue Design 1992*, VTT Symposium 131, Technical Research Centre of Finland.
- [160] Topper T.H., Lam T.S., 1997. Effective strain-fatigue life data for variable amplitude fatigue. *International Journal of Fatigue* 19, Supp. 1, 137-143.
- [161] Tucker L.E., 1972. A Procedure for Designing Against Fatigue Failure of Notched Parts. Society of Automotive Engineers, Inc., SAE Paper No 720265, New York.
- [162] Urashima C., Nishida S., 1987. Comparison Between Rotating Bending and Push-Pull Fatigue Strength in Low Cycle Region. Second International Conference on Low Cycle Fatigue and Elasto-Plastic Behaviour of Materials, Munich, 538-543.
- [163] Wallgren G., 1949. Fatigue Tests with Cycles of Varying Amplitude. *FFA*, 28.
- [164] Wang S., 2000. Relationship between the fatigue limit and the mechanical strength of metals. *Journal of Materials Processing Technology* 100, 42-46.
- [165] Zhao L.G., Tong J., Vemeulen B., Byrne J., 2001. On the uniaxial mechanical behaviour of an advanced nickel base superalloy at high temperature. *Mechanics of Materials* 33, 593-600.
- [166] Zheng X.L., 1995. Overload effects on fatigue behavior and life prediction of low-carbon steels. *International Journal of Fatigue* 17(5), 331-337.
- [167] Zhentao Yu., Lian Z., Ju D., Haicheng G., 2000. Investigation on monotonic and cyclic stress strain characteristics of Ti-2.5Zr alloy. *Materials Science & Engineering A280*, 192-198.

Normy

- [N1] ASTM E606-92: Standard Practice for Strain – Controlled Fatigue Testing.
- [N2] PN-84/H-04334: Badania niskocyklowego zmęczenia metali.

STABILIZACJA WŁASNOŚCI CYKLICZNYCH METALI I JEJ WPŁYW NA TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWĄ

Streszczenie

Praca dotyczy problematyki obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych metodą bazującą na analizie lokalnych odkształceń i naprężeń. Podczas obliczeń trwałości wspomnianą metodą wykorzystywane są dane materiałowe, określane podczas niskocyklowych badań zmęczeniowych z tzw. okresu stabilizacji własności cyklicznych.

W pracy dokonano przeglądu obecnego stanu wiedzy, obejmującego między innymi opis własności cyklicznych, stosowane modele oraz ich wykorzystywanie w trakcie obliczeń trwałości zmęczeniowej. Przeprowadzono również analizę wpływu różnych czynników związanych z obciążeniem i warunkami badań na przebieg stabilizacji własności cyklicznych. Na podstawie przeprowadzonej analizy danych literaturowych stwierdzono, że w przypadku wielu metali i ich stopów okres stabilizacji własności cyklicznych występuje bardzo krótko, a częstokroć nie występuje wcale. Nieuwzględnianie tego faktu podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych wykonanych z metali cyklicznie niestabilnych powoduje duże rozbieżności wyników trwałości uzyskanych z obliczeń i badań eksperymentalnych.

W ramach własnych badań doświadczalnych przeprowadzono testy zmęczeniowe próbek wykonanych z trzech metali (stal C45, stal 30HGSA, stop aluminium AW-2024) w warunkach obciążeń stałoamplitudowych, losowych i programowanych. Cechą wspólną programów obciążenia o zróżnicowanej postaci i formie był taki sam współczynnik wypełnienia widma obciążenia, pojemność bloku programu oraz wartość maksymalna odkształceń w nim występujących. Wyniki badań przedstawiono w formie zarejestrowanych podczas badań wykresów podstawowych parametrów pętli histerezy w funkcji liczby cykli obciążenia oraz w postaci wykresów zmęczeniowych w ujęciu energetycznym.

Do oceny przebiegu stabilizacji własności cyklicznych wykorzystano wartości podstawowych parametrów pętli histerezy określanych w różnych okresach trwałości obciążenia stałoamplitudowego i programowanego. Analizę wyników badań prowadzono w aspekcie wpływu postaci i parametrów programu obciążenia na przebieg stabilizacji własności cyklicznych oraz na trwałość zmęczeniową. Podczas analizy dokonano również ilościowej oceny wpływu przebiegu zmian własności cyklicznych na wykorzystywane podczas obliczeń trwałości dane materiałowe.

W pracy wykazano, że zarówno wartości parametrów pętli histerezy, jak również danych materiałowych wykorzystywanych podczas obliczeń trwałości zależą od okresu trwałości zmęczeniowej, w którym zostały określone. Ponadto stwierdzono, że przebieg stabilizacji na tych samych poziomach odkształcenia, realizowanego w warunkach obciążenia stałoamplitudowego i programowanego, charakteryzuje podobieństwo jakościowe co do jego przebiegu oraz ilościowe,

dotyczące wartości parametrów pętli histerezy opisujących przebieg stabilizacji. Zwrócono również uwagę na możliwość wykorzystywania uproszczonych metod badań do określania danych materiałowych w różnych okresach trwałości.

W rozprawie dokonano oceny wpływu przebiegu stabilizacji własności cyklicznych na trwałość zmęczeniową. Przeprowadzona analiza wyników obliczeń trwałości wykazała, że istotny wpływ na ich zgodność z wynikami badań ma okres trwałości przyjęty do określania danych materiałowych. W pracy wykazano ponadto, że wpływ ten jest zależny od skali zmian własności cyklicznych, jak również od parametrów programów obciążenia. Największy wpływ okresu trwałości przyjętego do określania danych materiałowych stwierdzono w przypadku próbek ze stopu aluminium AW-2024, a najmniejszy dla próbek ze stali C45.

W rozprawie zaproponowano metodę obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych z wykorzystaniem chwilowych własności cyklicznych (metoda CWC). W metodzie tej podjęto próbę powiązania podczas obliczeń trwałości procesu sumowania uszkodzeń oraz przebiegu zmian własności cyklicznych. Na podstawie porównania wyników obliczeń według metody CWC z wynikami badań można stwierdzić ich zadowalającą zgodność, która jest w większości przypadków wyższa niż stwierdzona podczas obliczeń metodą klasyczną, bez uwzględnienia zmian własności cyklicznych.

STABILIZATION OF CYCLIC PROPERTIES IN METALS AND ITS INFLUENCE ON FATIGUE LIFE

Summary

The thesis deals with the issue of fatigue life calculations of construction elements with the use of the method based on the local stress and strain analysis. During this life calculations based on the above mentioned method there are used material data determined during low cycle fatigue tests from the so called cyclic properties stabilization period.

In the thesis the review of present state of knowledge was presented. It included among other things description of the cyclic properties, applied models and their application during fatigue life calculations. An analysis of the influence of various factors connected with the loading and test conditions on the course of cyclic properties stabilization was also carried out. Basing on the literature data analysis it was stated that in the case of many metals and their alloys the cyclic properties stabilization period is very short and very often there is none. When this fact is not considered during fatigue life calculations of construction elements made of cyclically unstable metals it leads to the high discrepancy of the obtained life calculations and test results.

In the framework of the author's own experimental research the fatigue tests of specimens made of three metals (C45 steel, 30HGSA steel, AW-2024 aluminium alloy) were carried out under constant-amplitude, random and programmed loading. The common feature of those various loading forms was the same value of the load spectrum, capacity of the program block and maximum strain values appearing in that block. Test results were presented as basic charts of hysteresis loop parameters which were recorded during the tests in the function of loading cycles number and as fatigue charts in the energetic aspect.

For the evaluation of the course of cyclic properties stabilisation there were used some values of basic hysteresis loop parameters determined in different life periods of constant-amplitude and programmed loading. The analysis of test results was carried out in the aspect of the influence of the form and loading program parameters on the course of cyclic properties stabilization and on fatigue life. During the analysis there was also performed the quantitative evaluation of the influence of the course of cyclic properties changes on material data used during life calculation. In the thesis it was proved that both the values of hysteresis loop parameters and material data used during life calculation depend on the period of life in which they were determined. Moreover, it was stated that the course of stabilization on the same levels of strain realized under constant-amplitude and programmed loading is characterized both by the qualitative similarity concerning the course as well as by the quantitative one concerning values of hysteresis loop parameters which describe the course of stabilization. In the thesis the possibility of application of simplified test methods for determination of material data in different periods of life was also emphasised.

In this dissertation the influence of the course of cyclic properties stabilization on fatigue life was evaluated. This evaluation was carried out by making fatigue life calculations with the usage of the material data determined in different periods of fatigue life. Obtained calculation results showed the essential influence of the assumed period of life on the conformity of life results obtained from the calculations and the tests. In the thesis it was proven that this influence depends on the scale of cyclic properties changes and also on the loading programs parameters. The most significant influence of the life period assumed for the material data determination was observed in the case of specimens made of the AW-2040 aluminium alloy and the least one for the specimens made of the C45 steel.

In the dissertation there was proposed the author's own method of fatigue life calculations of construction elements with the use of the temporary cyclic properties (abbr. the CWC method). In this method there the author tried to connect the damage addition with the course of cyclic properties changes during life calculations the process. On the base of comparison of the CWC calculations with test results the conformity of both methods can be stated. In most cases the conformity is higher than the one observed during calculations with the use of classic method.