

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Radosław Skocki

BADANIA WPŁYWU TEMPERATURY PODWYŻSZONEJ NA WŁAŚCIWOŚCI CYKLICZNE STALI P91

PROMOTOR

DR HAB. INŻ. STANISŁAW MROZIŃSKI

*Składam serdeczne podziękowanie
Panu dr hab. inż. Stanisławowi Mrozińskiemu, prof. UTP
za umożliwienie udziału w projekcie badawczym Nr 1215/B/T02/2011/40
oraz pomoc i cenne wskazówki podczas końcowej redakcji rozprawy doktorskiej.*

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń.....	7
1. Wprowadzenie	9
1.1. Wstęp.....	9
1.2. Teza pracy	12
1.3. Cel pracy.....	12
1.4. Zakres pracy	12
2. Wybrane zagadnienia zmęczenia niskocyklowego metali w podwyższonych temperaturach.....	14
2.1. Podstawowe pojęcia i opisy.....	14
2.2. Opisy odkształceń i naprężeń	15
2.3. Badania i obliczenia trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych w temperaturach podwyższonych	19
2.4. Wpływ temperatury na właściwości mechaniczne metali i stopów	24
2.4.1. Właściwości statyczne.....	25
2.4.2. Właściwości cykliczne	28
2.4.3. Wpływ programu obciążenia.....	47
2.4.4. Trwałość zmęczeniowa.....	55
2.5. Krytyczna ocena stanu wiedzy i wytyczne do badań	59
2.6. Wytyczne do badań własnych	60
3. Opis badań	61
3.1. Cel i zakres badań własnych.....	61
3.2. Materiał na próbki, skład chemiczny, właściwości mechaniczne..	62
3.3. Warunki badań.....	65
3.3.1. Próby statycznego rozciągania	65
3.3.2. Próby zmęczeniowe stałoamplitudowe (próby izotermiczne).....	65
3.3.3. Badania w warunkach obciążenia programowanego i stałej temperatury.....	67
4. Wyniki badań.....	75
4.1. Próby statyczne.....	75
4.2. Próby stałoamplitudowe w warunkach niezmienniej temperatury ($T=const$).....	76
4.3. Próby programowane.....	83
4.3.1. Programy dwustopniowe	83
4.3.2. Programy wielostopniowe	85

5. Analiza wyników badań	87
5.1. Wpływ temperatury na właściwości statyczne	87
5.2. Próby zmęczeniowe stałoamplitudowe.....	89
5.2.1. Kryterium końca prób zmęczeniowych	89
5.3. Wpływ temperatury na zmiany właściwości cyklicznych	94
5.4. Wpływ temperatury na trwałość	105
5.5. Wpływ temperatury na przebieg kumulacji uszkodzeń.....	107
5.5.1. Próby stałoamplitudowe	107
5.5.2. Obciążenia programowane dwustopniowe	111
5.5.3. Obciążenia programowane wielostopniowe	116
6. Podsumowanie i wnioski	125
Literatura	130
Streszczenia	139

Wykaz ważniejszych oznaczeń

$A_{12,5}$	– wydłużenie względne próbki proporcjonalnej po rozerwaniu
b, c	– wykładniki odkształceniowego wykresu zmęczeniowego
E	– moduł sprężystości wzdłużnej
K'	– współczynnik wytrzymałości cyklicznej
k	– liczba stopni w bloku programu obciążenia
n'	– wykładnik cyklicznego umocnienia materiału dla stanu ustalonego
n_c	– liczba cykli w bloku programu (pojemność bloku)
$2N_f$	– 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_{eksp}	– 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
R_m	– wytrzymałość doraźna na rozciąganie
R_e	– granica plastyczności
TP	– temperatura pokojowa
λ	– liczba powtórzeń bloku programu obciążenia do pęknięcia zmęczeniowego
ΔW_{pl}	– energia odkształcenia plastycznego
$\Sigma \Delta W_{pl}$	– skumulowana energia odkształcenia plastycznego podczas próby zmęczeniowej
σ	– ogólne oznaczenie naprężenia
ε	– ogólne oznaczenie odkształcenia
ε_{ac}	– amplituda odkształcenia całkowitego
ε_{ap}	– amplituda odkształcenia plastycznego
ε_{ae}	– amplituda odkształcenia sprężystego
ε_{acmax}	– największa amplituda odkształcenia całkowitego w programie obciążenia
ε_{acj}	– amplituda odkształcenia całkowitego dla j-tego stopnia programu obciążenia
ζ	– współczynnik wypełnienia widma obciążenia
ε_j'	– współczynnik cyklicznego odkształcenia plastycznego
$\Delta \varepsilon_{ac}$	– zakres odkształcenia całkowitego
$\Delta \varepsilon_{ap}$	– zakres odkształcenia plastycznego

$\Sigma\Delta\epsilon_{ap}$	–	skumulowane odkształcenie plastyczne
$\Delta\epsilon_{ae}$	–	zakres odkształcenia sprężystego
σ_a	–	amplituda naprężenia
σ_m	–	naprężenie średnie
$\Delta\sigma$	–	zakres naprężenia

1. WPROWADZENIE

1.1. WSTĘP

Coraz wyższe wymagania stawiane obiektom technicznym eksploatowanym w wysokich temperaturach oraz przy wysokich ciśnieniach powodują, że trwają intensywne poszukiwania nowych materiałów do budowy tych obiektów. Konstruktorzy podczas obliczeń oraz badań tego typu urządzeń starają się uwzględniać wszystkie zjawiska, jakie występują w trakcie ich użytkowania [1, 2].

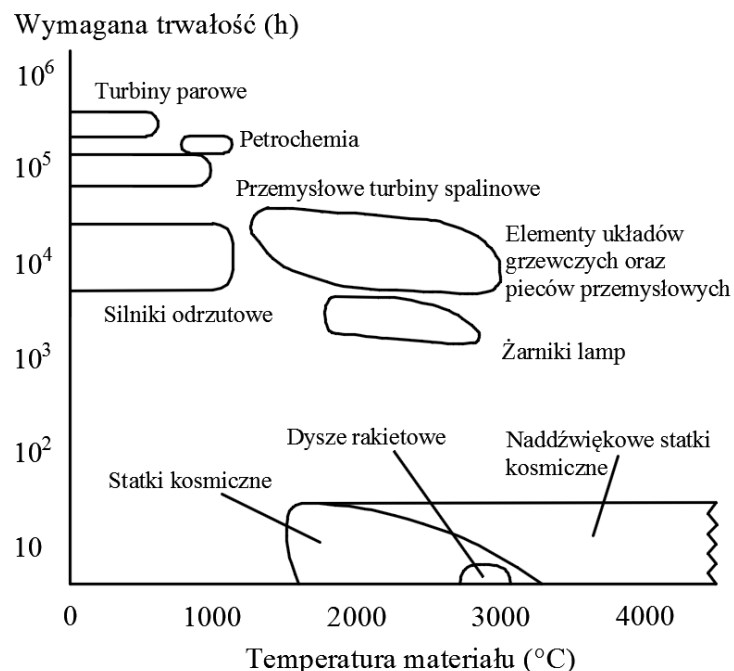
W Polsce aktualnie większość energii pochodzi z elektrowni opalanych węglem. Eksploatowane obecnie bloki energetyczne zostały zaprojektowane kilkadziesiąt lat temu. Z tego też względu ich sprawność nie jest wysoka i wynosi $33\div 36\%$, natomiast średnia europejska to 40% [3]. W przemyśle energetycznym widoczny jest stały trend wzrostu wymagań technicznych i eksploatacyjnych wykorzystywanych obiektów. Dotyczy on między innymi poprawy sprawności i niezawodności bloków energetycznych. Wzrost sprawności bloku energetycznego jest możliwy np. poprzez podwyższenie parametrów medium, tj. ciśnienia i temperatury pary. Poza względami ekologicznymi, zaledwie kilkuprocentowa zmiana tych parametrów skutkuje istotnym zwiększeniem sprawności a tym samym poprawą ekonomiczności pracy tych urządzeń [4, 5, 6, 7, 8, 9].

Niezbędne bezpieczeństwo i niezawodność wykorzystywanych współcześnie urządzeń energetycznych uzyskiwano na etapie projektowania, stosując wysokie współczynniki bezpieczeństwa. Pozwala to obecnie na niewielki wzrost sprawności tych urządzeń bez specjalnych dodatkowych nakładów finansowych czy modyfikacji obiektów. Należy jednak podkreślić, że nawet niewielki wzrost parametrów pracy wiąże się ze zwiększonym wyężeniem materiałów zastosowanych na te obiekty co w konsekwencji powoduje konieczność ponownego oszacowania trwałości zmęczeniowej odpowiednich komponentów. Podstawą do obliczeń ich trwałości są dane materiałowe uzyskiwane na próbkach pobranych z eksploatowanych obiektów. Najczęściej próbki te pobiera się z obszarów, w których nie powoduje to zmiany właściwości mechanicznych. Ze względu na warunki eksploatacji badania próbek prowadzi się w warunkach podwyższonej temperatury, zmęczenia cieplnego lub cieplno-mechanicznego [10-14].

Zmęczenie cieplne lub cieplno-mechaniczne należy do podstawowych zjawisk, które w istotny sposób przyczyniają się do uszkodzeń elementów części maszyn i urządzeń pracujących w warunkach jednoczesnego oddziaływania obciążeń mechanicznych oraz cieplnych. Podczas pracy urządzeń w tych warunkach generowane są obciążenia zmienne wywołujące

cykliczne zmiany naprężeń oraz odkształceń często przekraczających granicę plastyczności. Powoduje to powstawanie deformacji i pęknięć zmęczeniowych. Odkształcenia plastyczne występujące w częściach maszyn i urządzeń uznaje się za dopuszczalne do takich poziomów, przy których nie dochodzi do uszkodzeń tych części. Muszą być zatem określone właściwości zmęczeniowe materiału na te części (np. matryce, łopatki wirników turbin parowych lub silników odrzutowych, kolektory wydechowe silników spalinowych, etc.). Do realizacji tego celu konieczne są niskocyklowe badania zmęczeniowe wykonywane między innymi w temperaturach podwyższonych. Istotny rozwój tego typu badań nastąpił w latach osiemdziesiątych XX wieku. Głównym powodem była potrzeba projektowania urządzeń ze względu na niewielką liczbę cykli obciążenia (kotły, reaktory, zbiorniki ciśnieniowe, itp.). Dalszy rozwój badań z zakresu niskocyklowego zmęczenia był spowodowany zastosowaniem do opisu procesu zmęczenia nowych wielkości kryterialnych, takich jak np. odkształcenie plastyczne, energia odkształcenia całkowitego czy plastycznego jak również doskonaleniem metod i technik badawczych w zakresie pomiaru i rejestracji podstawowych wielkości fizycznych. Rozwój eksperymentalnych metod w badaniach zmęczeniowych przy wykorzystaniu różnych wielkości fizycznych, jak: odkształcenie całkowite, odkształcenie plastyczne, odkształcenie sprężyste oraz energia odkształcenia całkowitego lub plastycznego spowodował postęp w sterowaniu próbami zmęczeniowymi. Obecne metody badań są ciągle udoskonalane przy stosowaniu przetworników pomiarowych o coraz lepszej jakości i dokładności. Skutkiem tego jest między innymi poprawa trwałości zmęczeniowej.

Znajomość podstawowych właściwości mechanicznych materiału w temperaturach podwyższonych (takich jak wytrzymałość na rozciąganie, moduł Younga, Kirchhoffa czy odporność na pękanie) jest bazą do projektowania szerokiego spektrum maszyn i urządzeń pracujących m.in. w przemyśle energetycznym, lotniczym czy w motoryzacji. Gdy elementy urządzenia pracują w specyficznych warunkach, tj. pojawiają się obciążenia w warunkach niskocyklowego zmęczenia, wspomniane cechy stają się już niewystarczające. Niezbędna jest wiedza na temat właściwości materiału w zakresie sprężysto – plastycznym w warunkach temperatury podwyższonej. W celu ich określenia wykonuje się próby statyczne i zmęczeniowe, których procedury określone są w normach państwowych i branżowych [15,16]. Na rysunku 1.1 schematycznie przedstawiono warunki pracy wybranych obiektów technicznych. Trwałość obiektów eksploatowanych w bardzo wysokich temperaturach jest niska i wraz z obniżaniem temperatury pracy wzrasta.



Rys. 1.1. Trwałość obiektów technicznych w zależności od temperatury i warunków pracy [17]

Przykładowo elementy statków kosmicznych bezwzględnie muszą poprawnie funkcjonować w temperaturze powyżej 2000°C lecz po zaledwie kilku godzinach lotu poszczególne części wymienia się, niezależnie od ich zużycia. Zupełnie inna sytuacja jest w przypadku elementów wykorzystywanych w przemyśle energetycznym. W temperaturach do 800°C części poszczególnych urządzeń muszą mieć już trwałość nawet kilkuset tysięcy godzin, ich wymiana wiąże się z ogromnymi kosztami wynikającymi z przestojów m.in. bloków energetycznych.

Podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych przy stosowaniu nowych opisów zmęczeniowych z wykorzystaniem nowych bądź modyfikowanych hipotez zmęczeniowych [18] uzyskuje się wyniki, których rozbieżność w stosunku do badań jest znaczna. Z tego powodu zasadnym jest poszukiwanie przyczyn tych rozbieżności w celu poprawy skuteczności obliczeń.

Obliczenia trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych wiążą się z zagadnieniem sumowania uszkodzeń zmęczeniowych i koniecznością przyjęcia odpowiedniej hipotezy kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych. Ze względu na zjawiska umocnienia czy osłabienia materiału, które występują podczas niskocyklowego zmęczenia metali oraz niejednokrotnie brak wyraźnego okresu stabilizacji właściwości cyklicznych, proces kumulacji uszkodzeń staje się trudny do opisanego już podczas obliczeń trwałości

elementów konstrukcyjnych poddanych obciążeniom zmiennym w temperaturach pokojowych [19]. Komplikuje się on jednak istotnie, gdy przestaje zależeć jedynie od właściwości materiałowych czy programu obciążenia, a na jego przebieg zaczyna wpływać zmienna temperatura otoczenia [20-23]. Występujące wówczas zmiany właściwości cyklicznych materiału są wynikiem interakcji procesów charakterystycznych dla niskocyklowego zmęczenia mechanicznego oraz zmęczenia cieplnego. W praktyce dla obydwu rodzajów zmęczenia przyjmuje się najczęściej te same modele obliczeniowe. Nie jest jednak możliwe zastosowanie ich do wszystkich metali. Zmiany temperatury mogą bowiem wywoływać zarówno zmiany właściwości mechanicznych, jak również zmiany struktury materiału.

1.2. TEZA PRACY

Temperatura podwyższona ma wpływ na przebieg procesów towarzyszących niskocyklowemu zmęczeniu stali konstrukcyjnych (osłabienie, umocnienie). Większy zakres zmian właściwości cyklicznych tych stali w temperaturach podwyższonych powoduje, że wraz ze wzrostem temperatury obniżeniu ulega skuteczność metod obliczeń trwałości zmęczeniowej.

1.3. CEL PRACY

Celem podstawowym pracy jest określenie wpływu temperatury podwyższonej na trwałość zmęczeniową oraz właściwości cykliczne stali P91 w obszarze niskocyklowego zmęczenia.

Cele dodatkowe to:

- ilościowy i jakościowy opis kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych w warunkach obciążeń stałoamplitudowych i programowanych,
- określenie wpływu temperatury oraz parametrów programu obciążenia na przebieg kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych,
- doświadczalna weryfikacja hipotezy liniowej sumowania uszkodzeń zmęczeniowych PM w zróżnicowanych temperaturach,
- określenie ilościowych i jakościowych związków pomiędzy temperaturą, stopniem uszkodzenia zmęczeniowego i przebiegiem zmian właściwości cyklicznych,
- weryfikacja modeli analitycznych stosowanych do opisu właściwości cyklicznych stali w temperaturze pokojowej do opisu właściwości cyklicznych w temperaturach podwyższonych.

1.4. ZAKRES PRACY

W ramach pracy zrealizowano badania zmęczeniowe z wykorzystaniem próbek wykonanych ze stali P91. Badania obejmowały:

- próby statycznego rozciągania w zróżnicowanych temperaturach, tj.:

- badania wpływu temperatury podwyższonej na podstawowe parametry wytrzymałościowe określone w próbie statycznego rozciągania,
- próby niskocyklowe w warunkach obciążeń stałoamplitudowych dla zróżnicowanych poziomów odkształcenia oraz różnych temperatur, tj.:
badanie wpływu temperatury na przebieg zmian właściwości cyklicznych w różnych temperaturach,
 - próby niskocyklowe w warunkach obciążeń programowanych dla zróżnicowanych temperatur (obciążenia dwustopniowe i wielostopniowe o różnej kolejności i sekwencji stopni w programie), tj.: badania wpływu temperatury na trwałość zmęczeniową i przebieg właściwości cyklicznych w różnych temperaturach,
 - obliczenia trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń programowanych.

2. WYBRANE ZAGADNIENIA ZMĘCZENIA NISKOCYKLOWEGO METALI W PODWYŻSZONYCH TEMPERATURACH

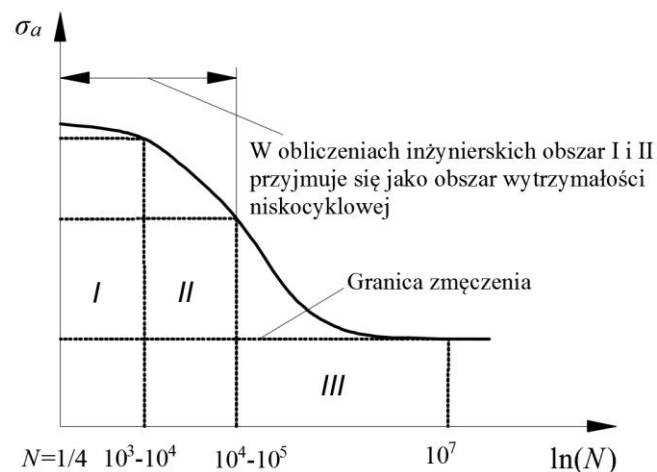
2.1. PODSTAWOWE POJĘCIA I OPISY

Zmęczeniem nazywamy proces zmian, które występują w materiale pod wpływem cyklicznie zmiennych naprężeń bądź odkształceń. Zmiany te ujawniają się w postaci obniżenia trwałości oraz wytrzymałości materiału i prowadzą do jego zniszczenia [24, 25].

Przy szacowaniu liczby cykli do inicjacji pęknięcia zmęczeniowego (zniszczenia) danej konstrukcji narażonej na obciążenia zmienne niezbędne są wyniki badań (dane materiałowe, wykresy zmęczeniowe). Uzyskuje się je podczas badań zmęczeniowych próbek na poziomach, które będą odpowiadały obciążeniom obiektu rzeczywistego.

Dane materiałowe mogą być w postaci tabel lub wykresów zmęczeniowych (wykresy naprężenie-liczba cykli zmęczeniowych σ - N lub z ang. stress-life (no. of cycles) S - N). Należy przy tym zauważyć, że przyjęło się, że naprężenie jest liczone jako stosunek siły do początkowego pola przekroju poprzecznego próbki [26]. Na wykresie zmęczeniowym na pionowej osi układu współrzędnych zaznacza się amplitudę naprężenia σ_a , zakres naprężeń $\Delta\sigma$ lub naprężenia maksymalne σ_{max} , dobrane jako wartość sterowana lub niezależna zmienna w funkcji liczby cykli n do zniszczenia. Istnieje wiele metod wyznaczania wykresów zmęczeniowych. Zostały one szeroko omówione w pracach [27, 28]. Dla większości materiałów wykres w układzie współrzędnych logarytmicznych jest aproksymowany linią prostą. Dla wielu stopów, włączając w to metale żelazne, dodatkowo dochodzi pozioma linia prosta wskazująca granicę zmęczenia (rys. 2.1).

Wykresy zmęczeniowe można wyznaczać w różnych warunkach obciążenia (rozciąganie-ściskanie, zginanie, skręcanie, ścinanie). Do wyznaczenia wykresu zmęczeniowego σ - N zazwyczaj wykorzystuje się około 18 próbek z danego materiału o określonym kształcie [15, 16]. Pierwsze kilka próbek jest poddawanych cyklicznym naprężeniom równym około 70% wytrzymałości na rozciąganie (naprężenie musi być poniżej granicy sprężystości). Wówczas oczekuje się, że liczba cykli do zniszczenia będzie wynosić od 10^4 do 10^5 (obszar niskocyklowego zmęczenia). Pozostałe próbki wykorzystuje się do badań zmęczeniowych na niższym poziomie naprężenia, tj. gdy liczba cykli do zniszczenia osiąga wartości od 10^5 do 10^7 (obszar wysokocyklowego zmęczenia). Poszczególne obszary wytrzymałości zmęczeniowej przedstawiono na rysunku 2.1.



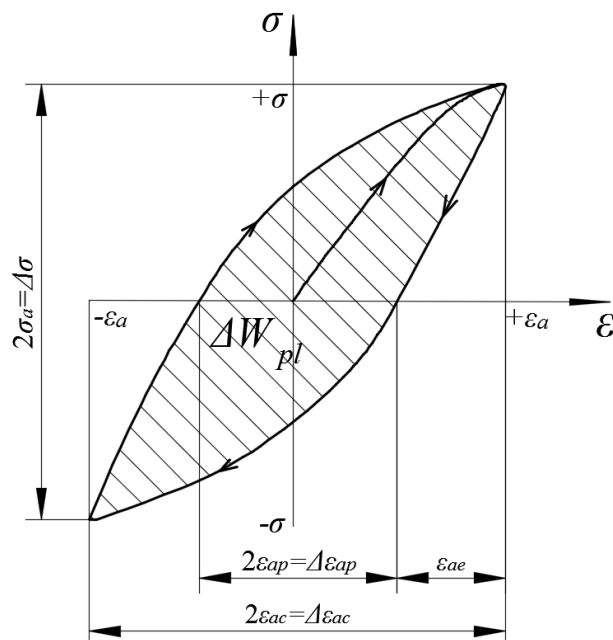
Rys. 2.1. Wykres zmęczeniowy Wöhlera $\sigma - \log N$ [32]

- I. Wytrzymałość quasi-statyczna, od $1/4$ do 10^3-10^4 cykli
- II. Wytrzymałość niskocyklowa, od 10^4 do 10^5 cykli
- III. Wytrzymałość wysokocyklowa, powyżej 10^5 cykli

Obszarem zainteresowań autora poniższej pracy jest zakres niskocyklowego zmęczenia i w tym właśnie obszarze przeprowadzono badania zmęczeniowe.

2.2. OPISY ODKSZTAŁCEŃ I NAPRĘŻEŃ

Obciążając cyklicznie próbkę powyżej granicy plastyczności, uzyskuje się pętlę odkształceniowo-naprężeniową (pętlę histerezy). Na rysunku 2.2 przedstawiono schemat powstawania pętli oraz jej podstawowe parametry.

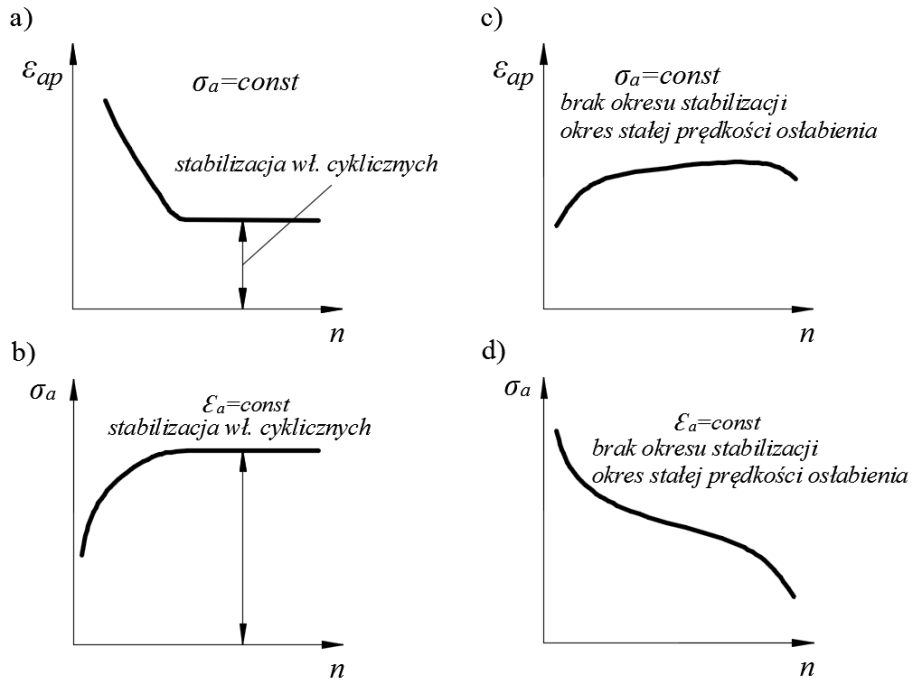


Rys. 2.2. Przebieg powstawania pętli histerezy

Zmiany zmęczeniowe mogą być opisywane za pomocą różnych wielkości fizycznych. Wielkości te są mierzalne lub możliwe do obliczenia w trakcie obciążenia. Są to podstawowe parametry pętli histerezy, mianowicie: ε_{ac} , ε_{ap} , ε_{ae} , σ_a . Parametrem wykorzystywanym do opisu pętli histerezy jest także energia odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} (rys. 2.2). Jej miarą jest pole powierzchni odkształceniowej pętli histerezy, które określa energię rozproszoną w materiale podczas jednego cyklu obciążenia [29].

Właściwości cykliczne materiałów określane są np. przez związki między parametrami pętli histerezy a liczbą cykli obciążenia n dla różnych okresów trwałości zmęczeniowej. Właściwości cykliczne mogą być stałe lub się zmieniać. Gdy są stałe, mówi się wówczas o stabilizacji tych właściwości. Oznacza to, że dla ustalonej wartości obciążenia ($\varepsilon_{ac} = \text{const}$) pozostałe wielkości, tj. ε_{ap} , σ_a , ΔW_{pl} nie zmieniają się bądź zmiany są bardzo małe. Odpowiadające temu stanowi naprężenie nazywa się naprężeniem nasycenia (stabilizacji) σ_{as} lub odpowiednio odkształceniem nasycenia ε_{as} , zgodnie z [15, 16]. W przypadku zmiennych właściwości mówi się o cyklicznym umocnieniu lub osłabieniu materiału. Umocnienie jest cechą materiału, która polega na stopniowym wzroście σ_a i obniżeniu ε_{ap} przy stałej wartości ε_{ac} (także obniżaniu ε_{ac} przy stałej σ_a). W przypadku osłabienia cyklicznego następuje obniżenie σ_a i wzrost ε_{ap} (oraz analogicznie wzrost ε_{ac} przy stałej σ_a). Na rysunku 2.3 dla przykładu schematycznie przedstawiono zmiany właściwości cyklicznych, w przypadku gdy

material się osłabia z okresem stabilizacji (rys. 2.3a, b) oraz bez okresu stabilizacji (rys. 2.3c, d).



Rys. 2.3. Krzywe cyklicznego osłabienia (a, b) wykazujące stabilizację właściwości cyklicznych oraz brak okresu stabilizacji (g, h)

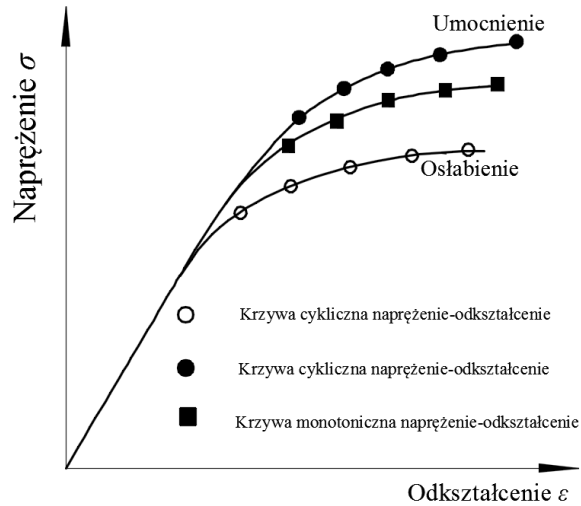
Ogólnie można przyjąć, że materiały w stanie wyżarzonym umacniają się. Te, w których wcześniej wprowadzono odkształcenia plastyczne zazwyczaj ulegają osłabieniu [27, 30]. Ponadto porównując wytrzymałość danego materiału do jego granicy plastyczności zgodnie z poniższymi relacjami, gdy:

$$\frac{R_m}{R_e} > 1,4 \quad (2.1)$$

materiał będzie ulegał umocnieniu, natomiast osłabieniu gdy:

$$\frac{R_m}{R_e} < 1,2 \quad (2.2)$$

Dla wartości pomiędzy 1,2 a 1,4 może zajść umocnienie lub osłabienie. W celu zilustrowania zjawiska umocnienia i osłabienia na rysunku 2.4 pokazano przykładowe położenie wykresów cyklicznego odkształcenia dla materiału osłabiającego się i umacniającego względem wykresu statycznego rozciągania.



Rys. 2.4. Wzajemne położenie wykresów statycznego oraz cyklicznego umocnienia i osłabienia we współrzędnych naprężenie-odkształcenie

W celu wykreślenia wykresu cyklicznego odkształcenia dla danego materiału, konieczne jest przeprowadzenie kilkunastu testów zmęczeniowych przeprowadzonych przy $R=-1$ ($R = \varepsilon_{\min} / \varepsilon_{\max}$) przy kontrolowanej amplitudzie odkształcenia ($\varepsilon_a = \text{const}$) lub naprężenia ($\sigma_a = \text{const}$). Wykres jest wyznaczany z połączenia wierzchołków ustabilizowanych pętli histerezy dla różnych amplitud odkształcenia.

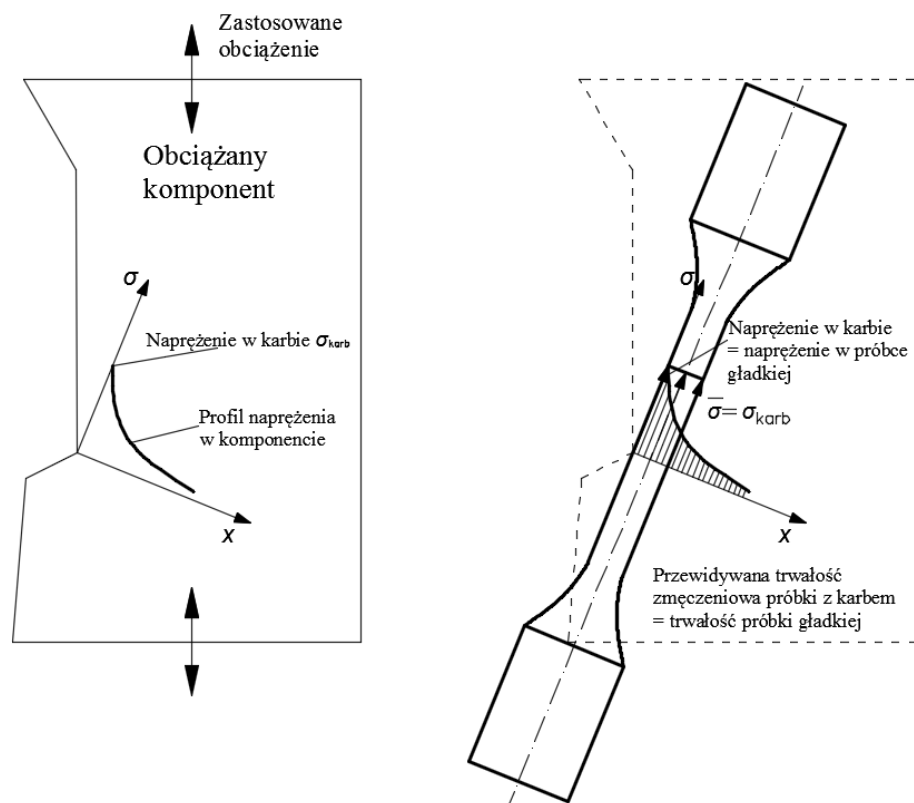
Do analitycznego opisu zależności pomiędzy parametrami pętli histerezy uzyskanymi na kilku poziomach odkształcenia wykorzystuje się zależność Morrowa o postaci [15]:

$$\varepsilon_{ap} = \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (2.3)$$

Wykresy przedstawiające zależności między amplitudą naprężenia σ_a a odkształcenia ε_{ap} przedstawiane są graficznie zazwyczaj w układzie podwójnie logarytmicznym. Wówczas są to linie proste. Gdy brak jest okresu stabilizacji, parametry pętli histerezy, tj. ε_{ap} oraz σ_a dobierane są z okresu odpowiadającego połowie trwałości zmęczeniowej ($n/N=0,5$) [15, 16].

2.3. BADANIA I OBLICZENIA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ ELEMENTÓW KONSTRUKCYJNYCH W TEMPERATURACH PODWYŻSZONYCH

Z uwagi na przeznaczenie oraz zabiegi technologiczne w elementach konstrukcyjnych istnieje wiele nieciągłości spowodowanych różnego rodzaju karami wykonanych ze względów technologicznych lub powstałych na skutek różnego rodzaju zabiegów technologicznych. W miejscach tych dochodzi do spiętrzenia naprężeń i odkształceń. Na rysunku 2.5 pokazano schemat ilustrujący sposób modelowania odkształceń na dnie karbu np. w matrycy za pomocą próbki gładkiej poddanej zmiennemu obciążeniu osiowemu.



Rys. 2.5. Próbką gładką – modelowanie elementu konstrukcyjnego w karbie

Przyjmuje się założenie, że jeśli próbka gładka zostanie poddana odkształceniom zmiennym o takiej samej wartości jak element konstrukcyjny na dnie karbu, to ich trwałości będą takie same. W celu wykorzystania wspomnianej metody

obliczeń niezbędne są dane materiałowe uzyskane przy wykorzystaniu próbek gładkich wyznaczone w warunkach odzwierciedlających warunki eksploatacji np. matryc.

Zależność między amplitudą naprężenia σ_a a liczbą cykli do zniszczenia N przedstawia się za pomocą równania Basquina [31], który już w 1910 r. jako pierwszy zaproponował następujące równanie:

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (2.4)$$

Użycie nawrotów do pęknięcia zmęczeniowego $2N_f$ zamiast liczby cykli N_f jest często stosowane w literaturze. Zniszczenie następuje w trakcie półcyklu (nawrotu) N_f . Tak więc cały cykl oznacza się jako dwa nawroty $2N_f$.

W zakresie sprężystym zależność (2.4) można zapisać za pomocą amplitudy odkształcenia sprężystego:

$$\varepsilon_{ae} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b \quad (2.5)$$

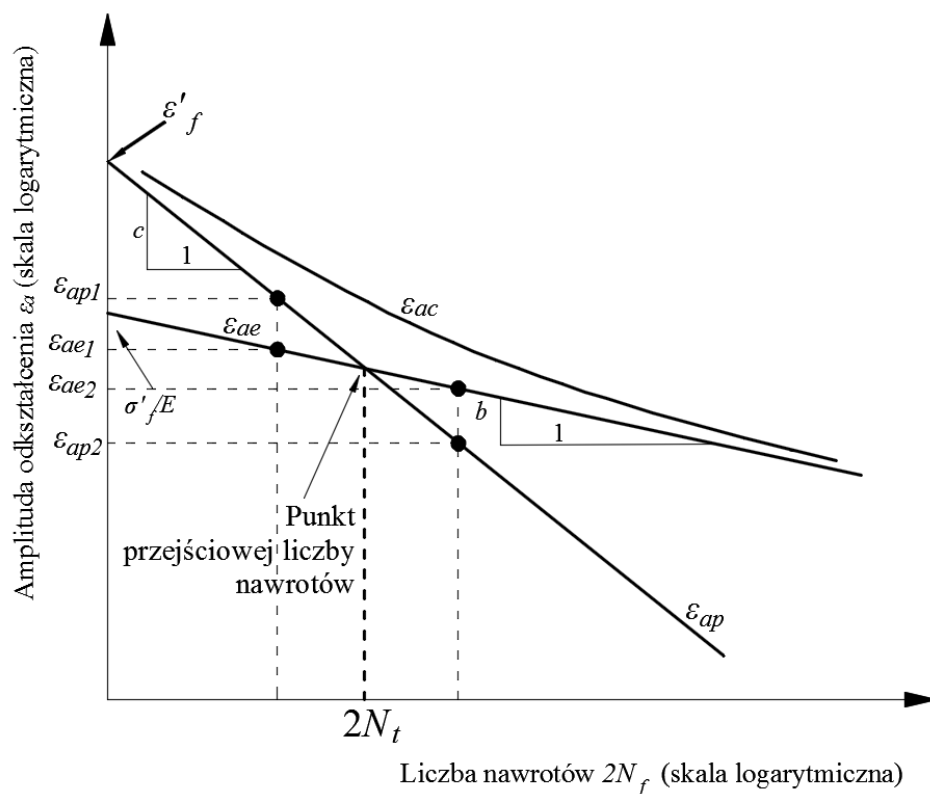
W zakresie plastycznym amplitudę odkształcenia można zapisać za pomocą zależności Mansona-Coffina [43, 44]:

$$\varepsilon_{ap} = \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (2.6)$$

Łącząc zależności (2.5) i (2.6), amplitudę odkształcenia całkowitego można zapisać za pomocą zależności (Mansona-Coffina-Basquina):

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

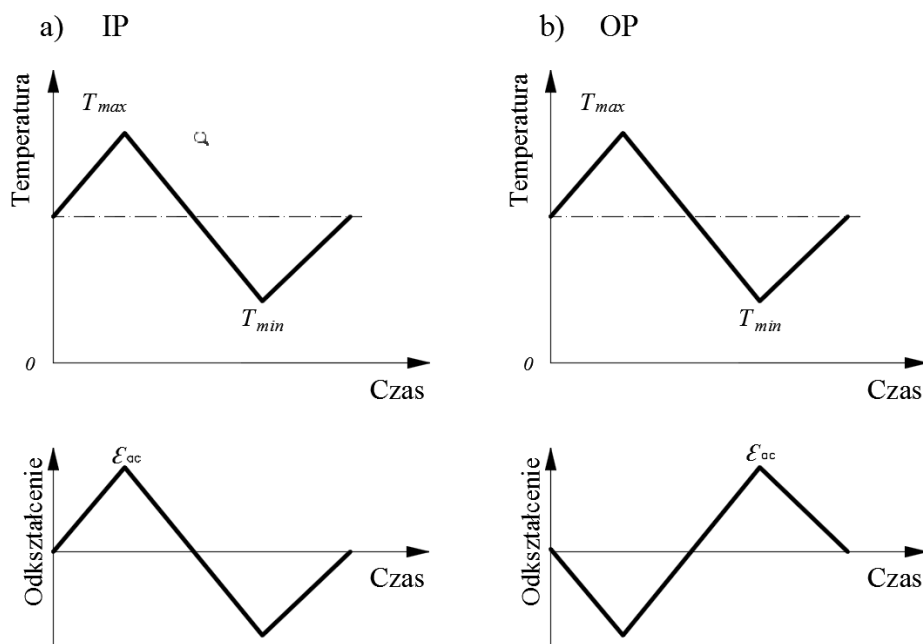
Parametry występujące w równaniu (2.7) uzyskiwane są na podstawie wyników badań zmęczeniowych próbek poddanych zmiennym obciążeniom przy stałym kontrolowanym odkształceniu całkowitym ε_{ac} lub plastycznym ε_{ap} . Zgodnie z rysunkiem 2.6. składowa plastyczna zazwyczaj jest większa w zakresie małej liczby cykli - $\varepsilon_{ap1} > \varepsilon_{ae1}$; dla większej liczby cykli większa jest składowa sprężysta $\varepsilon_{ap2} < \varepsilon_{ae2}$. Wykresy zależności (2.5), (2.6), (2.7) zostały schematycznie przedstawione na rysunku 2.6.



Rys. 2.6. Przykładowe wykresy zmian odkształceń ε_{ae} , ε_{ap} , ε_{ac} przy wahadłowym rozciąganiu-ściskaniu

Dla większości metali wykresy przedstawione na rysunku 2.6 mogą być wykreślone na podstawie badań około 10 próbek na poziomach odkształcenia w przedziale od $\pm 0,0025$ do $\pm 0,08$ [15, 16, 32]. Badania są zazwyczaj prowadzone przy kontrolowanym odkształceniu przy ściskaniu-rozciąganiu, ponieważ unika się tym samym złożoności spowodowanych obecnością gradientu naprężeń w materiale jak to ma miejsce w przypadku zginania [33]. Przy rozciąganiu-ściskaniu naprężenia w całym przekroju są takie same. Ponadto wyniki badań można łatwo porównać z wynikami uzyskanymi w próbie statycznego rozciągania [26].

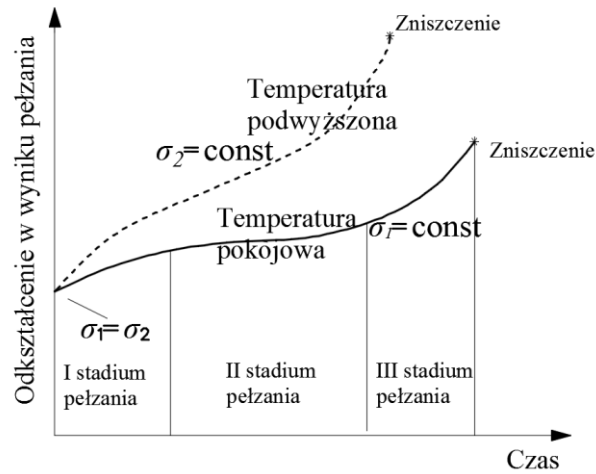
Podczas eksploatacji maszyn i urządzeń przemysłu energetycznego ma miejsce jednoczesne oddziaływanie obciążenia cieplnego i mechanicznego. Taki typ obciążenia nazywa się obciążeniem cieplno-mechanicznym, co w przypadku procesów zmęczeniowych schematycznie przedstawiono na rysunku 2.7.



Rys. 2.7. Zmęczenie cieplno-mechaniczne: a) w fazie IP, b) poza fazą OP

Z uwagi na wiele możliwości przesunięcia fazowego w cyklach temperaturowych jak i mechanicznych stwierdzić można, że badania cieplno-mechanicznego zmęczenia mogą być różnorodnie prowadzone. Jednak najczęściej stosuje się kombinację parametrów faz zgodnych w czasie (rys. 2.7a) oraz faz przeciwnych – przesuniętych o 180° (rys. 2.7b). Poniższa praca dotyczy jedynie obciążeń izotermicznych, a więc takich, w których temperatura jest niezmienna w czasie. Tematyką zmęczenia cieplno-mechanicznego szczegółowo zajęto się m. in. w pracach [10, 34, 35].

Gdy obciążenie danego obiektu trwa przez dłuższy okres czasu, wówczas może dojść do zjawiska pełzania. Podobnie jak wytrzymałość na rozciąganie tak również odporność na pełzanie w sposób ścisły zależy od temperatury. Jest to proces bardzo charakterystyczny dla obiektów eksploatowanych w warunkach jednoczesnego występowania obciążeń mechanicznych oraz cieplnych. Uszkodzenia spowodowane pełzaniem skutkują odkształceniem plastycznym, które zwiększa się z upływem czasu pod wpływem działania stałego obciążenia i stałej temperatury do momentu, gdy skumulowane odkształcenia uniemożliwiają danej części maszynowej pełnić zamierzonej funkcji. Wpływ temperatury na wielkość występujących odkształceń opisuje wykres pełzania [10] (rys. 2.8).



Rys. 2.8. Krzywe pełzania dla temperatury pokojowej oraz podwyższonej wraz z etapami prędkości odkształceń.

Na podstawie przedstawionego wykresu można stwierdzić, że na tym samym poziomie naprężenia uszkodzenie podczas pełzania w temperaturze podwyższonej występuje z udziałem istotnie większych odkształceń niż to ma miejsce w temperaturze otoczenia. Ponadto czas jaki upływa do wystąpienia uszkodzenia jest w temperaturze podwyższonej mniejszy niż w temperaturze otoczenia. Pełzanie może nastąpić przy kombinacji szerokiego zakresu temperatur, naprężeń oraz czasu [10, 36, 37].

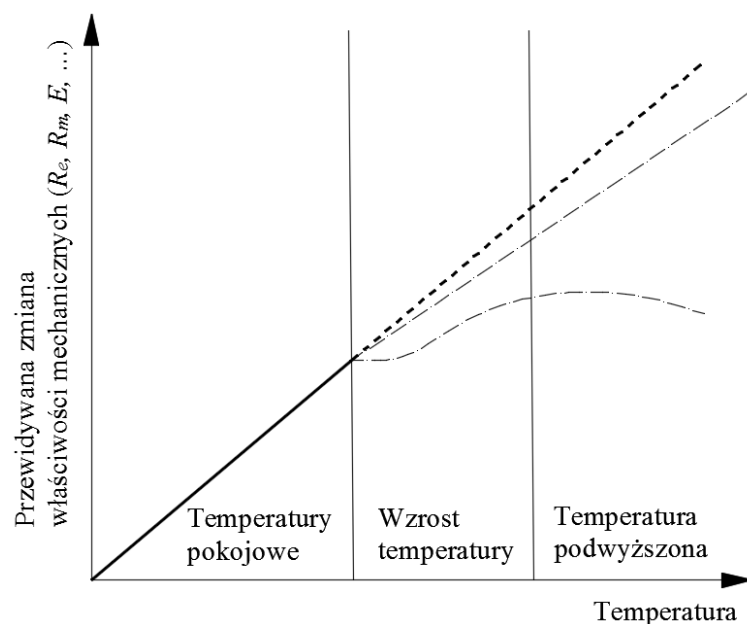
Etapem nierozłącznie związanym z procesem projektowania obiektów eksploatowanych w temperaturach podwyższonych są obliczenia trwałości zmęczeniowej. Warunkiem prowadzenia obliczeń jest znajomość wykresu zmęczeniowego opisanego np. równaniem (2.7), programu obciążenia oraz przyjęcie spośród bardzo wielu, jednej hipotezy sumowania uszkodzeń. Od początku XX w. zaproponowano ponad 50 różnych propozycji [38]. Obecnie najczęściej przyjmuje się do obliczeń trwałości najprostszą hipotezę Palmgrena-Minera [39, 40]. Hipoteza ta jest z powodzeniem stosowana do dziś, także przy obliczeniach komponentów eksploatowanych w wysokich temperaturach. Zgodnie z hipotezą PM, pęknięcie próbki następuje, gdy spełniona jest następująca zależność:

$$D_i = \lambda \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (2.8)$$

2.4. WPŁYW TEMPERATURY NA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE METALI I STOPÓW

Konieczność stosowania materiałów przeznaczonych do pracy w temperaturach podwyższonych zaczęła wzrastać z początkiem XX w., kiedy miał miejsce gwałtowny rozwój przemysłu energetycznego. W latach pięćdziesiątych zaczęto uważniej przyglądać się stosowanym materiałom i ich przydatności do pracy w już istniejących maszynach. Zwiększając temperaturę pracy maszyn i urządzeń uzyskiwano ich większą sprawność. Było to jednak związane z koniecznością uwzględniania zmieniających się na skutek temperatury właściwości materiałów, z których były wykonane maszyny i urządzenia [24, 41-44].

Cechą charakterystyczną każdego materiału wykorzystywanego na części maszyn pracujących w temperaturach podwyższonych jest temperatura maksymalna, w której może być on eksploatowany. Samo pojęcie podwyższonej temperatury może być różnorodnie zdefiniowane. W wielu pracach [43-47] przyjmuje się, że temperatura podwyższona stanowi około $2/3$ temperatury topnienia litego materiału. Temperaturę podwyższoną można również zdefiniować jako temperaturę, powyżej której ekstrapolacja właściwości materiałowych od temperatury pokojowej nie jest już możliwa. To znaczy, że właściwości te przy niewielkim wzroście temperatury zmieniają się w ustalony sposób (np. liniowo). Zmiana ta jest jednak przewidywalna tylko do pewnego momentu. Bowiem w dalszym ciągu podwyższając temperaturę, dochodzi się do takiego etapu, w którym nie jest już możliwa liniowa ekstrapolacja właściwości mechanicznych w zależności od temperatury. Interpretację temperatury podwyższonej pokazano w sposób schematyczny na rysunku 2.9.



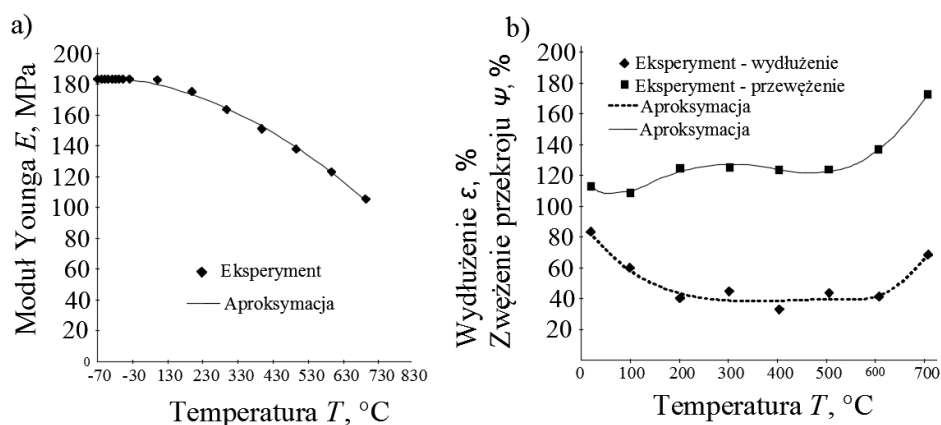
Rys. 2.9. Schematyczna interpretacja temperatury podwyższonej

Właściwości materiałowe, które w temperaturze pokojowej mogą być zaniebane, w podwyższonej muszą być już koniecznie uwzględniane. Występujące czasem ekstremalne warunki pracy (np. temperatury podwyższone) mogą mieć destrukcyjny wpływ na dany obiekt.

Parametrami, które pozwalają w sposób ilościowy określić przydatność materiału na elementy konstrukcyjne do pracy w temperaturze podwyższonej to podstawowe właściwości mechaniczne, które są wyznaczone w tych właśnie warunkach (podwyższona temperatura czy inne warunki środowiskowe, w których pracują części wykonane z tych materiałów). Wśród tych parametrów należy przede wszystkim wymienić wytrzymałość na rozciąganie, umowną granicę plastyczności i wytrzymałość na pełzanie.

2.4.1. Właściwości statyczne

Omówione wcześniej podejście identyfikacji temperatury podwyższonej znalazło potwierdzenie w pracy [48]. Na podstawie prób statycznego rozciągania próbek wykonanych ze stali AISI 314 Ti prowadzonych w zróżnicowanych temperaturach wyznaczono podstawowe parametry wytrzymałościowe. Wartości tych parametrów przedstawiono w funkcji temperatury (rys. 2.10).



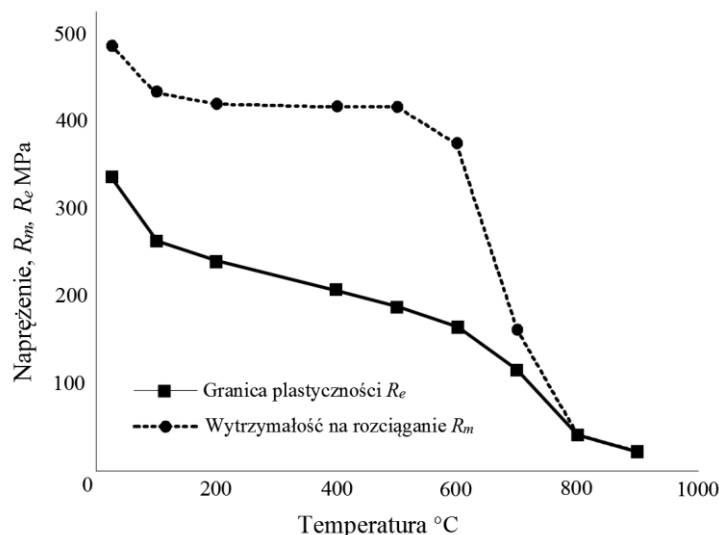
Rys. 2.10. Wpływ temperatury na parametry wytrzymałościowe: a) Moduł Younga E
b) Wydłużenie ϵ i przewężenie przekroju ψ [48]

Zgodnie z oczekiwaniami, wzrost temperatury powoduje obniżenie modułu Younga E . Specyfika stali AISI 314 Ti jest taka, że w zakresie temperatur 20-400°C przewężenie Z się zmniejsza, wydłużenie A wzrasta, natomiast w temperaturach powyżej 500°C obydwa parametry ulegają zwiększeniu. Analiza wykresów pozwala stwierdzić, że przekroczeniu temperatury około 500°C wpływ temperatury na te parametry staje się znacznie bardziej widoczny.

Wiedza na temat pożądaných właściwości materiału w temperaturze pokojowej i podwyższonej ma bardzo duże znaczenie na etapie projektowania, składowania i technologii produkcji materiału. Charakter zmian parametrów wytrzymałościowych jest inny dla każdego materiału. Przedstawiony na rysunku 2.10 świadczy o złożoności zjawiska. Wzrost lub spadek tych parametrów nie postępuje w sposób ciągły. Dla porównania, w pracy [49] przedstawiono przebieg zmian parametrów wytrzymałościowych stopu aluminium 2024-T3, w której badano wpływ kierunku walcowania blachy na właściwości mechaniczne. W pracy stwierdzono stopniowe obniżanie właściwości mechanicznych wraz ze wzrostem temperatury od 25 do 125°C.

W pracy [50] zbadano między innymi zachowanie się stali ferrytycznej zawierającej niob (Nb), w temperaturach 600°C oraz 800°C. Tego typu stale są stosowane w kolektorach gazów spalinowych, gdzie temperatury eksploatacyjne przekraczają 600°C. W przypadku tej stali wytrzymałość na rozciąganie w zakresie temperatur do 100-500°C ulega tylko nieznacznym zmianom (rys. 2.11). Wytrzymałość wyraźnie obniża się po przekroczeniu temperatury 500°C. Sytuacja odwrotna jest w przypadku granicy plastyczności, która wraz ze wzrostem temperatury ulega wyraźnemu obniżeniu. Można stwierdzić, że wraz ze wzrostem temperatury wyraźnie zwiększa się podatność

stali do odkształceń plastycznych. Skutkiem tego jest w przypadku tego materiału wyższa trwałość zmęczeniowa w temperaturze podwyższonej w stosunku do trwałości w temperaturze otoczenia. Zwiększona podatność na odkształcenia plastyczne w temperaturze podwyższonej odbywa się jednak bez wyraźnego obniżenia doraźnej wytrzymałości na rozciąganie. Taką właściwość tej stali należy uznać niewątpliwie za zaletę.



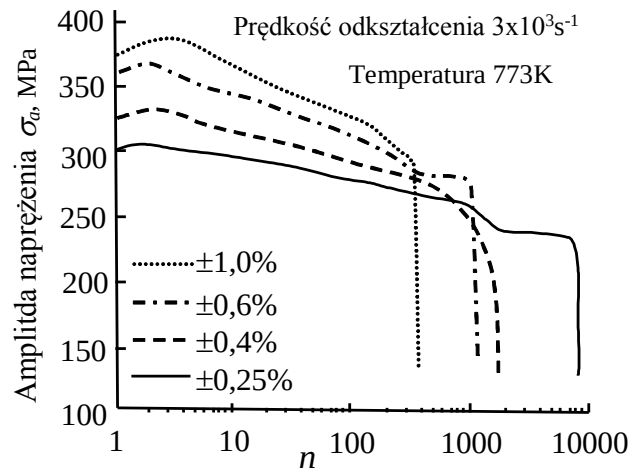
Rys. 2.11. Wpływ temperatury na wytrzymałość na rozciąganie oraz granicę plastyczności [50]

Maszyny i urządzenia a zarazem materiały, z których są wykonane i pracujące w podwyższonych temperaturach, poza samą temperaturą i obciążeniem, są zazwyczaj narażone na wiele różnych czynników takich jak środowisko korozyjne, czy uderzenia. Czynniki te w połączeniu z temperaturą wywołują szereg niekorzystnych skutków. Do najważniejszych skutków działania tych czynników można zaliczyć między innymi liczne pęknięcia lub trwałe odkształcenia, powstawanie krytycznych szczelin, zmiana właściwości materiałowych, ubytki materiału poprzez korozję. O użyteczności materiału w aplikacjach, w których wymienione zjawiska mogą występować decydują odporność materiału na pełzanie oraz podstawowe właściwości mechaniczne, które wyznacza się w trakcie badań w temperaturach podwyższonych [51].

2.4.2. Właściwości cykliczne

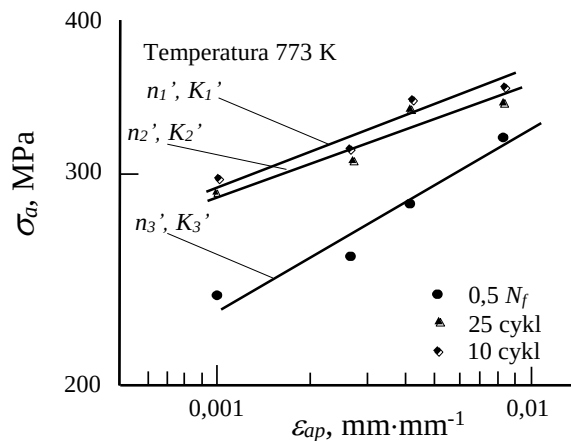
Opis właściwości cyklicznych metali lub ich stopów zaczyna sprawiać trudności, gdy przestaje zależeć jedynie od właściwości materiałowych czy programu obciążenia, a na jego przebieg zaczyna wpływać np. temperatura otoczenia. Występujące w materiale zmiany właściwości są wynikiem interakcji procesów charakterystycznych dla niskocyklowego zmęczenia mechanicznego oraz niskocyklowego zmęczenia cieplnego. W praktyce dla obydwu rodzajów zmęczenia przyjmuje się najczęściej te same modele obliczeniowe. Nie jest to jednak możliwe dla wszystkich metali. Wahania temperatury mogą bowiem wywoływać zarówno zmiany właściwości mechanicznych, jak również zmiany struktury materiału. Ponadto prędkość odkształceń na skutek impulsów cieplnych jest najczęściej mniejsza od prędkości odkształceń mechanicznych [27].

Na przebieg procesu niskocyklowego zmęczenia wpływ mają zarówno temperatury podwyższone jak również obniżone. Przebieg zmęczenia w takich temperaturach zależy od szeregu czynników omówionych wcześniej, a związanych między innymi z kształtem cyklu obciążenia, częstotliwością obciążenia, czy przebiegiem obciążenia. Temperatury podwyższone powodują najczęściej obniżenie trwałości, podczas gdy obniżone jej wzrost. W przypadku przebiegu procesu stabilizacji trudno jednoznacznie określić w sposób ilościowy wpływ temperatury na procesy cyklicznego osłabienia lub umocnienia. Na podstawie literatury dotyczącej problematyki wpływu temperatury można stwierdzić, że zarówno w temperaturach obniżonych jak również podwyższonych nie obserwuje się okresu stabilizacji [45, 46, 52, 53]. Powoduje to, że podobnie jak w temperaturach pokojowych, trudności sprawia opracowanie wyników, a na wyznaczone dane materiałowe wpływ ma okres trwałości przyjęty do ich określenia. Na rysunku 2.12 pokazano przykładowe wyniki badań stali normalizowanej w temperaturze 773K na czterech poziomach kontrolowanego poziomu amplitudy odkształcenia całkowitego $\varepsilon_{ac}=0,25; 0,4; 0,6; 1,0$ % [52].



Rys. 2.12. Zmiany amplitudy naprężenia stali w temperaturze 773K [52]

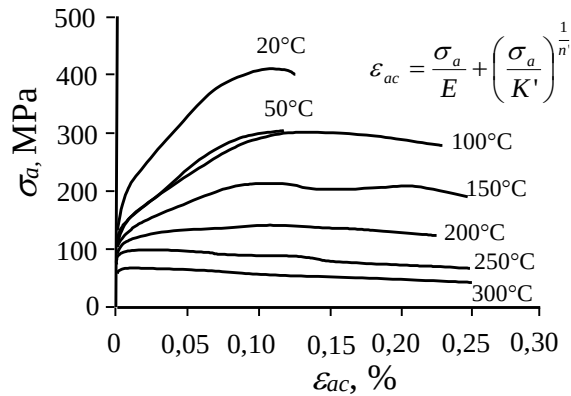
Ze względu na obserwowane zmiany właściwości cyklicznych w funkcji liczby cykli obciążenia właściwości cykliczne określono przy wykorzystaniu wykresów cyklicznego odkształcenia opisanych równaniem (2.3) w trzech różnych okresach trwałości odpowiadającym: 10. cyklowi obciążenia, 25. cyklowi obciążenia oraz w połowie trwałości zmęczeniowej ($n/N=0,5$) (rys. 2.13).



Rys. 2.13. Wykresy cyklicznego odkształcenia w różnych okresach trwałości [52]

Miarą wpływu temperatury na właściwości cykliczne mogą być zmiany kształtu i położenia wykresów cyklicznego odkształcenia uzyskanych w różnych temperaturach. W pracy [47] na podstawie szerokich badań stali konstrukcyjnej w warunkach wahadłowego rozciągania-ściskania stwierdzono występowanie procesów osłabienia i umocnienia, a wyniki badań przedstawiono między innymi w postaci pęku wykresów cyklicznego

odkształcenia w zależności od temperatury opisanego równaniem Ramberga-Osgooda o postaci pokazanej na rysunku (rys. 2.14).



Rys. 2.14. Wykresy odkształcania w zależności od temperatury [54]

Do oceny stopnia umocnienia badanej stali w różnych temperaturach przyjęto współczynnik umocnienia określony zależnością:

$$\Theta = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \right)_{\varepsilon, T} \quad (2.9)$$

W pracy stwierdzono zależność współczynnika umocnienia θ od znaku obciążenia. Stwierdzono inny przebieg zmian tego współczynnika podczas rozciągania i ściskania. Przypisano to asymetrii naprężenia podczas tych obciążeń.

Wpływ poziomu odkształcenia na przebieg zmian właściwości cyklicznych obserwuje się również w temperaturach podwyższonych [46, 52, 55-60]. W pracy [45] przedstawiono wyniki badań próbek wykonanych ze stali chromowo-niklowej w zakresie temperatur od 24 do 928°C dla sześciu poziomów odkształcenia. Dokonano oceny porównawczej wielkości umocnienia, proponując tzw. stopień umocnienia opisany za pomocą zależności:

$$\delta_{\sigma} = \frac{\sigma_a^p - \sigma_a^1}{\sigma_a^1} 100\% \quad (2.10)$$

gdzie:

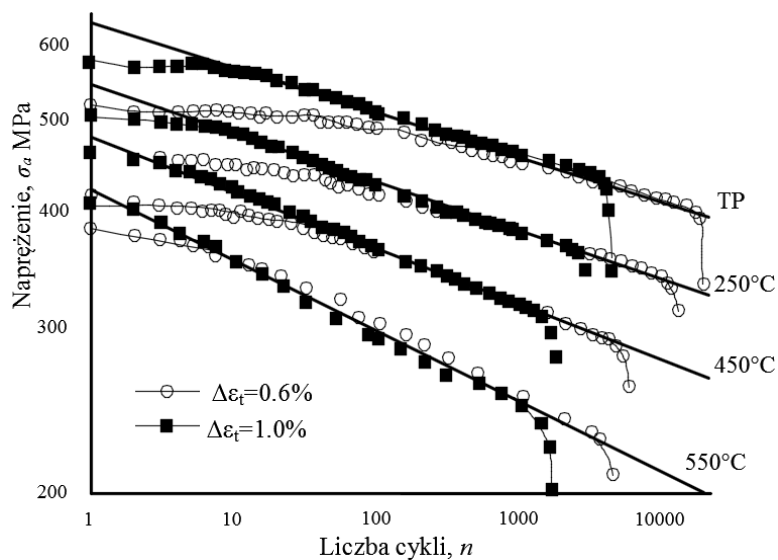
σ_a^p – maksymalna amplituda naprężenia na danym poziomie odkształcenia,

σ_a^1 – wartość amplitudy naprężenia w pierwszym cyklu obciążenia.

Analizując przebiegi zmian amplitudy naprężenia dla poszczególnych poziomów odkształcenia i dla różnych temperatur stwierdzono maksymalną wartość tego parametru dla temperatury około 761°C. Wraz z dalszym wzrostem temperatury zmiany właściwości cyklicznych są coraz mniejsze i w temperaturze 982°C efekt umocnienia materiału zanika. Ponadto w pracy zauważono, że istnieje możliwość wykorzystania równania (2.10) do opisu wyników badań zarówno w temperaturach pokojowych, jak i w podwyższonych.

W pracy [61] na podstawie prób niskocyklowego zmęczenia stali 55NiCrMoV8 w zakresie temperatur 200-550°C, stwierdzono, że stopień osłabienia tej stali zależy od poziomu odkształcenia i jest tym wyższy im większa jest amplituda realizowanego odkształcenia. Ponadto stwierdzono, że poziom amplitudy odkształcenia plastycznego w połowie trwałości zależy tylko od amplitudy odkształcenia całkowitego natomiast prędkość procesu osłabienia zależy od temperatury. Podwyższona temperatura istotnie wpływa na prędkość osłabienia i umocnienia, co również stwierdzono w pracy [62] na podstawie wyników badań stopu Zircu-4.

W pracy [63] badano zmęczeniowe zachowanie się modyfikowanej stali F82H oraz EUROFER 97. Stale te miały służyć do budowy reaktorów termojądrowych ze względu na ich odporność na napromieniowanie oraz wysoką wytrzymałość na pełzanie. W pracy zwrócono uwagę na przebieg zmian amplitudy naprężenia w funkcji liczby cykli w zależności od temperatury dla stali modyfikowanej F28H (rys. 2.15).



Rys. 2.15. Przebieg zmian amplitudy naprężenia w funkcji liczby cyklu w zależności od temperatury modyfikowanej stali F28H [63]

Na podstawie analizy rysunku 2.15 można zauważyć, że im wyższa temperatura, tym niższa amplituda naprężenia. Autorzy pracy podzielili przebieg zmian na 2 etapy, tj. pierwszy nieliniowy zajmujący około 3% całkowitej liczby cykli do zniszczenia oraz drugi przebiegający w sposób liniowy, po którym następuje pęknięcie. Etap ten może być opisany równaniem o postaci [63]:

$$\sigma = AN^{-s} \quad (2.11)$$

gdzie:

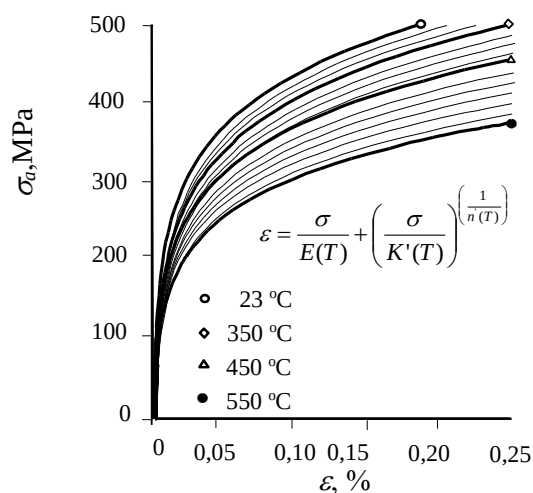
- σ – amplituda naprężenia,
- N – liczba cykli,
- s – współczynnik cyklicznego osłabienia,
- A – stała zależna od temperatury.

W przypadku stali EUROFER 97 wykresy wyglądały podobnie, różniąc się jednak nieznacznie ilością cykli obciążenia.

Potwierdzony wielokrotnie wpływ temperatury na trwałość zmęczeniową oraz przebieg procesu stabilizacji w podwyższonych temperaturach spowodował, że w literaturze znaleźć można praktyczne propozycje uwzględniania wpływu temperatury podczas obliczeń trwałości. W pracy [64] podjęto próby symulacji ustabilizowanych pętli cyklicznych dla różnych zakresów odkształcenia i temperatur, natomiast w pracach [65] i [66] zaproponowano metodykę obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów w ujęciu odkształceniowym i naprężeniowym. Podczas obliczeń trwałości elementów konstrukcyjnych zaproponowano, aby uwzględniać chwilową temperaturę występującą podczas eksploatacji. W modelu wykorzystuje się ustabilizowane pętle histerezy, których odpowiednie gałęzie opisywane są przy wykorzystaniu zależności Ramberga-Osgooda [67, 68] często stosowanego podczas analizy zmęczeniowej konstrukcji, uzyskanej dla różnych temperatur:

$$\varepsilon_{ac} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (2.12)$$

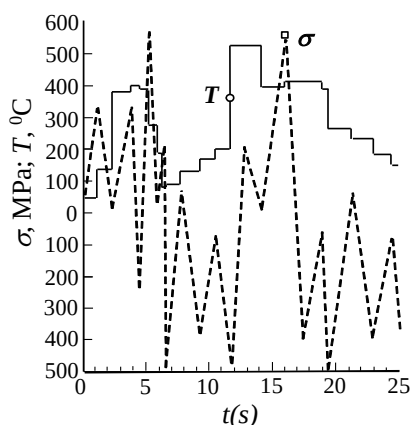
Przykładowe wykresy cyklicznego odkształcenia opisane powyższą zależnością dla zakresu temperatur 23÷550°C pokazano na rysunku 2.16.



Rys. 2.16. Wykresy cyklicznego odkształcenia uzyskane przy wykorzystaniu nowego modelu w zakresie różnych temperatur [65]

Podstawą wykorzystania zaproponowanej metodyki obliczeń trwałości zmęczeniowej jest znajomość przebiegu zmian temperatury i obciążenia w funkcji czasu (rys. 2.17). Pomimo, że model nie uwzględnia procesów pełzania, osłabienia i umocnienia zdaniem autorów propozycji pozwala lepiej szacować trwałość zmęczeniową od modelu, który nie uwzględnia zmian temperatury.

W pracy [66] stwierdzono, że szczególne zastosowanie omówiony wcześniej model wydaje się mieć do obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów z karbami. Jego weryfikacja przeprowadzona dla opisu odkształceniowego i naprężeniowego przebiegu zmęczenia wykazała niewielkie koszty dodatkowych badań w celu określenia niezbędnych do obliczeń trwałości danych.



Rys. 2.17. Przebiegi zmian naprężenia i temperatury w czasie [66]

Na przebieg zmian właściwości cyklicznych, oraz na trwałość zmęczeniową, wpływ mogą mieć także inne parametry obciążenia jak wartość średnia naprężeń [69, 70] oraz wartość średnia odkształcenia [71]. Wpływ obydwu parametrów na przebieg zmian właściwości cyklicznych może być różny oraz w dużej mierze zależy od warunków badań jak i samego materiału.

Odształcenia plastyczne i naprężenia

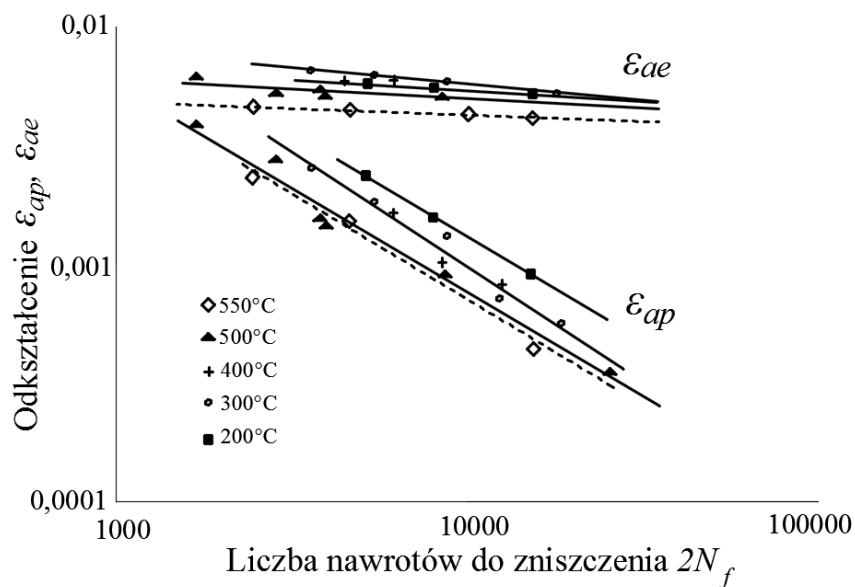
Na podstawie wyżej omówionych przykładów, można z całą pewnością stwierdzić, że temperatura istotnie wpływa na właściwości cykliczne materiałów. Przeglądając liczne pozycje literaturowe traktujące o zmęczeniu materiałów, łatwo natknąć się na takie, w których szczegółowo opisuje się przebieg zmian odkształceń plastycznych oraz naprężeń w funkcji liczby cykli. Uwzględnia się wówczas m.in. temperaturę, wartość parametru kontrolowanego (zazwyczaj amplitudy odkształcenia całkowitego ε_{ac}), skład chemiczny i stan poobrobkowy samego materiału.

Do narzędzi narażonych na znaczne wahania temperatury oraz obciążenia zalicza się m. in. matryce. Kolejne cykle obciążenia (kucia), czasu międzyoperacyjnego oraz czasu potrzebnego na smarowanie powodują, że matryca narażona jest na niskocyklowe oraz cieplne zmęczenie. Trwałość narzędzi tego typu może być zwiększona przez lepsze poznanie przebiegu zmęczenia matrycy w warunkach zmiennych temperatur i obciążeń a następnie wykorzystanie zdobytej wiedzy na etapie jego projektowania.

W przypadku matryc, podobnie jak innych elementów eksploatowanych w temperaturach podwyższonych, przyjmuje się założenie, że właściwości materiału matrycy w obszarach spiętrzeń naprężeń można modelować próbką gładką poddaną obciążeniu stałoaamplitudowemu [72] (rys. 2.5).

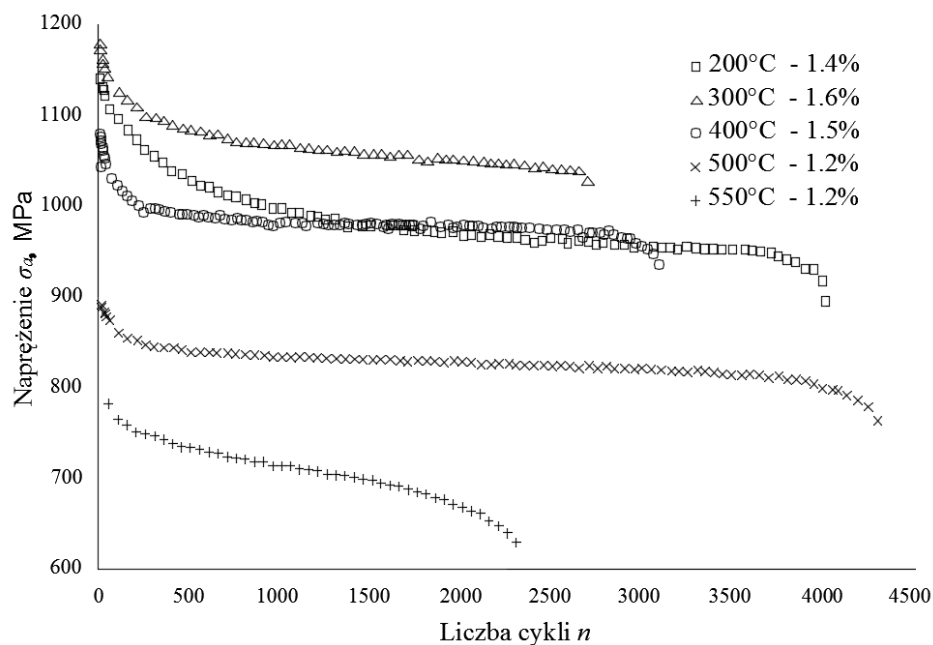
W pracy [73] badano przebieg niskocyklowych zmian zmęczeniowych w wysokiej temperaturze stali narzędziowej 55NiCrMoV8, która jest powszechnie używana w prasach mechanicznych i hydraulicznych przeznaczonych do procesów kucia matrycowego. Wyniki badań w postaci zależności pomiędzy parametrami pętli histerezy a trwałością opisywano przy wykorzystaniu równania Mansona-Coffina i Basquina opisanych według zależności (2.7). Badania prowadzono w warunkach kontrolowanego odkształcenia ($\varepsilon_{ac} = \text{const}$). Poziomy odkształceń stosowane podczas badań obejmowały zakres od 1 do 2%, natomiast zakres temperatur wynosił od 200 do 550°C. Jako kryterium końca próby przyjęto 10% obniżenie obciążenia w stosunku do okresu, w którym spadek obciążenia był równomierny. Dla wszystkich temperatur i odkształceń stwierdzono cykliczne osłabienie bez okresu stabilizacji. Wielkość osłabienia zależała od temperatury oraz amplitudy odkształcenia całkowitego. Zjawisko osłabienia uzasadniono zmniejszaniem się w trakcie obciążenia cyklicznego gęstości struktur dyslokacyjnych [74]. Ze względu na brak okresu stabilizacji wykresy zmęczeniowe Mansona-Coffina-Basquina zostały opracowane dla każdej temperatury na podstawie parametrów

pętli histerezy przyjętych dla połowy trwałości zmęczeniowej ($n/N=0,5$) (rys. 2.18).



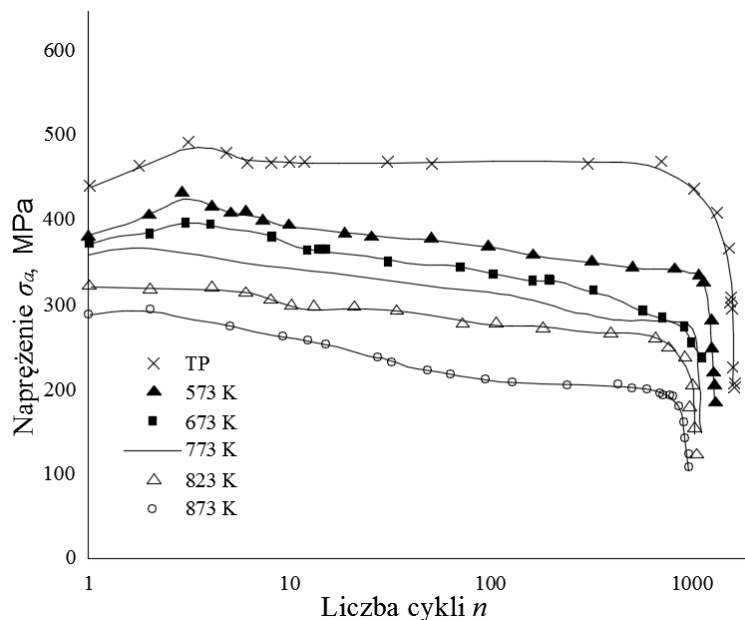
Rys. 2.18. Wykresy Mansona-Coffina i Basquina stali 55NiCrMoV8 w temperaturach podwyższonych [73]

Z przeprowadzonych badań wynika, że wraz ze wzrostem temperatury położenie wykresów odkształcenia plastycznego i sprężystego ulega obniżeniu. W pracy stwierdzono, że wzrost temperatury oprócz obniżenia trwałości wpływa również na intensywność występującego osłabienia. Powyższe obserwowano w postaci znacznie większego pochylenia wykresu zmian amplitudy naprężenia uzyskanego na poziomie $\epsilon_{ac}=1,2\%$ w temperaturze 550°C w stosunku do pochylenia analogicznego wykresu uzyskanego na tym samym poziomie odkształcenia ale w temperaturze 500°C (rys. 2.19).



Rys. 2.19. Przebieg zmian amplitudy napężenia w zależności od temperatury [73]

Obiekty eksploatowane w energetyce, takie jak turbiny parowe narażone są na bardzo duże obciążenia cieplne i mechaniczne. Materiały w tego typu urządzeniach poza oczywistą wytrzymałością mechaniczną muszą mieć ponadto odpowiednią przewodność oraz rozszerzalność cieplną. Właściwości takie posiada między innymi stal 9Cr-1Mo [52, 75 – 80]. W pracy [52] omówiono przebieg zmian właściwości cyklicznych tej stali w podwyższonych temperaturach. Stal podczas badań ulegała osłabieniu, co zazwyczaj ma miejsce w przypadku stali wysokowytrzymałych. Osłabienie dotyczyło wszystkich poziomów odkształcenia i poziomów temperatury. Nie zawsze jednak tak się dzieje, że materiał w całym zakresie trwałości posiada niezmiennie właściwości tj. osłabia się lub umacnia. Na rysunku 2.20 przedstawiono przebieg zmian amplitudy napężenia w funkcji liczby cykli w różnych temperaturach przy stałym poziomie odkształcenia $\varepsilon_{ac}=0,6\%$.

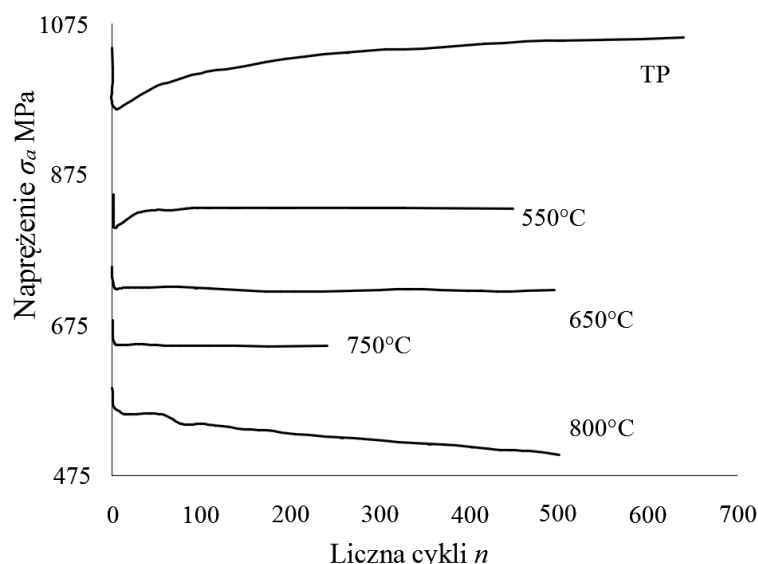


Rys. 2.20. Przebieg zmian amplitudy naprężenia w funkcji liczby cykli dla amplitudy odkształcenia całkowitego $\varepsilon_{ac}=0,6\%$ [52]

W temperaturach otoczenia, 573K i 673K w początkowym okresie próby zmęczeniowej obejmującej kilka początkowych cykli $n < 10$ osłabienie nie występowało i miało miejsce niewielkie umocnienie. Etap umocnienia nie występował w temperaturach 773, 823 oraz 873K, gdzie miało miejsce tylko osłabienie stali. Występujące w materiale osłabienie wyjaśniono kilkoma zjawiskami zachodzącymi w stali, które występowały jednocześnie lub pojedynczo. Były to między innymi obniżenie wytrzymałości przez powstawanie wytrąceń czy zamiana par pierwiastków typu Mo-C na grupy Mo-C-Mo i tym samym utrata oddziaływania umocnienia przez roztwór stały omówione m.in. w pracach [81-83]. Trwałość opisywanej stali wraz ze wzrostem temperatury ulegała obniżeniu. Wpływ temperatury na trwałość zależał od poziomu odkształcenia. Był największy na najniższych poziomach odkształcenia i zmniejszał się wraz ze wzrostem poziomu odkształcenia. Podobnie jak w pracy [73], wraz ze wzrostem temperatury obserwowano większe osłabienie badanej stali.

Wpływ temperatury na przebieg właściwości cyklicznych obserwowano podczas badań niskocyklowego zmęczenia stopu tytanu z glinem TNB-V2 [84]. Stop ten ze względu na dobre właściwości mechaniczne w temperaturach rzędu 850°C jest stosowany w motoryzacji, lotnictwie - w konstrukcjach silników, gdzie dodatkowo szczególny nacisk kładzie się na masę poszczególnych elementów. Badania prowadzono w warunkach kontrolowanego odkształcenia na kilku poziomach temperatury od 550 do 850°C. Na podstawie badań

stwierdzono, że właściwości cykliczne tego materiału zależą od temperatury. W celu zilustrowania uzyskanych wyników na rysunku 2.21 pokazano wykresy amplitudy naprężenia na jednym poziomie odkształcenia całkowitego ($\varepsilon_{ac}=0,7\%$) dla pięciu różnych temperatur.

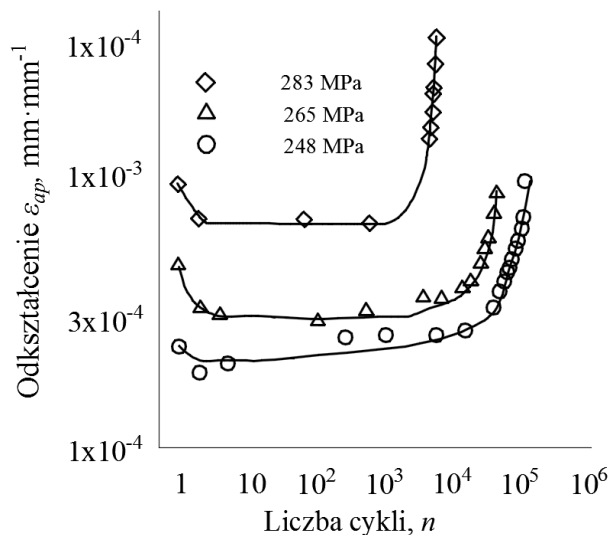


Rys. 2.21. Przebieg zmian amplitudy naprężenia w funkcji liczby cykli stopu TMB-V2 obciążonego niskocyklowo w temperaturach podwyższonych dla $\varepsilon_{ac}=0,7\%$ [84]

Na podstawie przeprowadzonych badań autorzy pracy stwierdzili, że na tym poziomie odkształcenia ($\varepsilon_{ac}=0,7\%$) i temperaturach najniższych stop ulega umocnieniu natomiast w temperaturach wysokich 750-800°C stop ulega osłabieniu. Brak okresu stabilizacji w temperaturach podwyższonych oraz wpływ temperatury na zmiany właściwości cyklicznych należy niewątpliwie zaliczyć do czynników utrudniających modelowanie zachowania się stopu podczas obciążenia w temperaturach podwyższonych. Na podstawie przeprowadzonych badań autorzy ponadto stwierdzili, że stop ten nie podlega modelowi Mansona-Coffina, gdyż faza inicjacji pęknięcia zmęczeniowego jest zbyt długa w stosunku do fazy propagacji pęknięcia. Występujące zróżnicowanie trwałości w temperaturach podwyższonych (rys. 2.21) wyjaśniono jako skutek niejednorodności struktury badanego stopu.

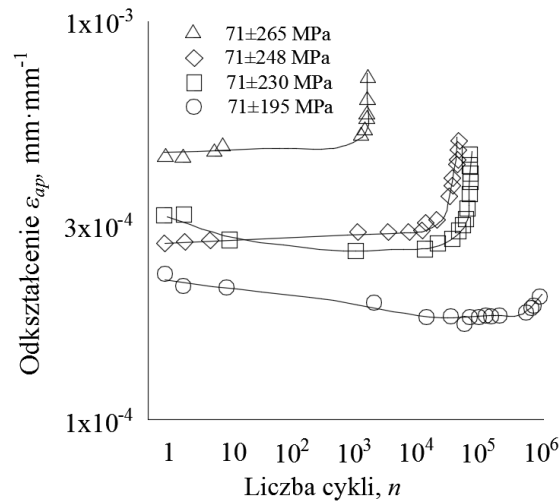
Na przebieg odkształceń jak również trwałość zmęczeniową w temperaturach podwyższonych wpływ ma również wartość średnia naprężenia. W pracy [85] przebadano stal P91 w temperaturze 600°C w warunkach obciążeń wahadłowych ($\sigma_m=0$) jak i przy wartości średniego naprężenia $\sigma_m=71$ MPa. Celem pracy było porównanie zachowania się stali w powyższych warunkach. Próby prowadzono przy kontrolowaniu naprężenia

($\sigma_a = \text{const}$). Przebieg zmian amplitudy odkształcenia plastycznego ε_{ap} dla trzech różnych poziomów naprężenia zmieniającego się wahadłowo przedstawiono na rysunku 2.22.



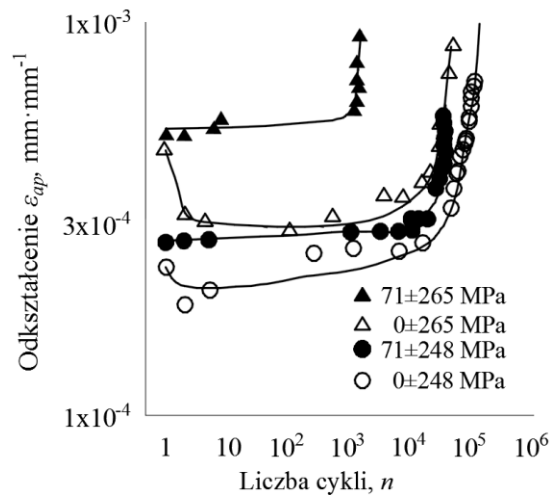
Rys. 2.22. Przebieg zmian amplitudy odkształcenia ε_{ap} dla 3 poziomów naprężenia przy kontrolowaniu naprężeń dla obciążeń wahadłowych [85]

Na każdym z poziomów naprężenia w początkowej fazie ma miejsce umocnienie, po czym następuje okres stabilizacji, następnie osłabienie aż do pęknięcia zmęczeniowego. Zmiany amplitudy odkształcenia plastycznego przy przebiegu niesymetrycznym ($\sigma_m = 71 \text{ MPa}$) różnią się nieznacznie w stosunku do obciążeń symetrycznych, tj. w początkowym okresie próby na początku brak jest okresu umocnienia (rys. 2.23). Podobnie jak w warunkach obciążeń wahadłowych, na końcu próby występuje osłabienie.



Rys. 2.23. Przebieg zmian amplitudy odkształcenia ε_{ap} dla różnego naprężenia średniego [85]

W celu porównania i oceny wpływu naprężenia średniego na trwałość na rysunku 2.24 zestawiono wyniki uzyskane na dwóch poziomach amplitudy naprężenia σ_a realizowanej w warunkach obciążenia symetrycznego i niesymetrycznego.

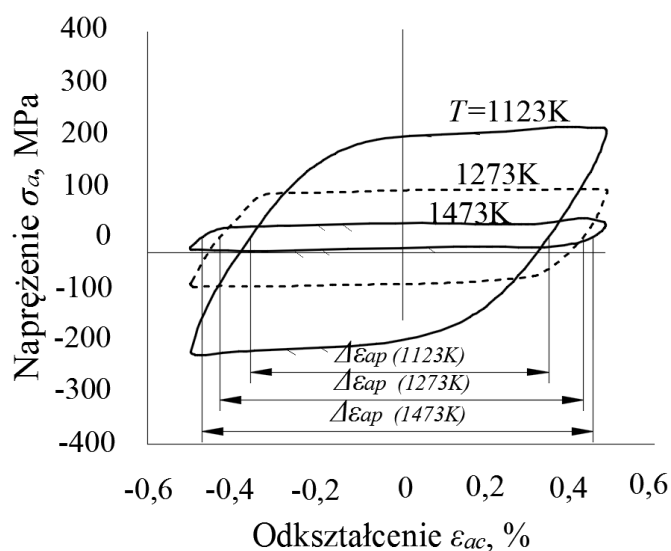


Rys. 2.24. Przebieg zmian amplitudy odkształcenia dla obciążeń wahadłowych oraz dla naprężenia średniego [85]

Przy obciążeniach niesymetrycznych uzyskano wyższe wartości amplitud odkształcenia plastycznego, a trwałość zmęczeniowa uległa nieznacznemu obniżeniu. Zjawisko to można tłumaczyć faktem, że struktura dyslokacji przy

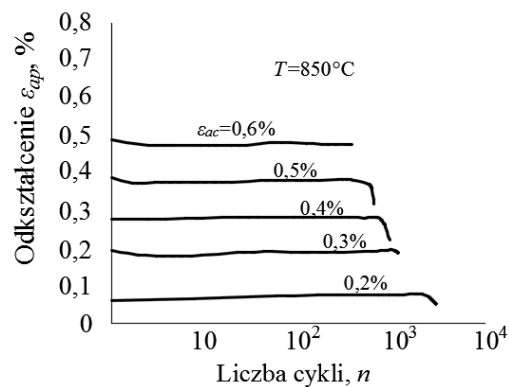
obciążeniach niesymetrycznych w pewnym stopniu przypomina stan wyjściowy materiału. Zgodnie z [85] struktura materiału po obciążeniach symetrycznych ma m. in. mniejszą gęstość dyslokacji w subziarnach.

Obiekty pracujące w bardziej ekstremalnych warunkach, tj. temperatury podwyższone, wysokie ciśnienia, muszą być zbudowane z materiałów o bardzo dobrych właściwościach mechanicznych. Takie właściwości posiada między innymi stop NiCr22Co2Mo9, który został zbadany w pracy [86] w warunkach izotermicznych i cieplno-mechanicznych. Stop ten jest często stosowany jako materiał na budowę komory spalania stacjonarnych turbin gazowych. Badania w warunkach izotermicznych przeprowadzono m.in. dla amplitudy odkształcenia całkowitego $\varepsilon_{ac}=0,5\%$ i temperatur 850, 1000 i 1200°C. Zgodnie z oczekiwaniami podwyższanie temperatury skutkowało obniżeniem amplitudy naprężenia σ_a (rys. 2.25). Na rysunku dodatkowo pokazano wzrost amplitudy odkształcenia plastycznego ε_{ap} wraz ze wzrostem temperatury.



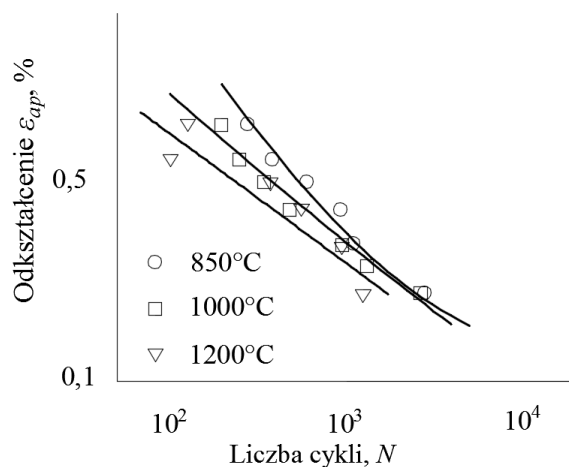
Rys. 2.25. Pętle histerezy w połowie trwałości zmęczeniowej dla różnych temperatur 850, 1000 i 1200°C przy amplitudzie odkształcenia $\varepsilon_{ac}=0,5\%$ [86]

W pracy ponadto wykazano, że w każdej temperaturze dla wszystkich badanych poziomów odkształcenia następuje stabilizacja właściwości cyklicznych. Na rysunku 2.26 przedstawiono wykres przebiegu zmian amplitudy odkształcenia plastycznego ε_{ap} dla temperatury 850°C.



Rys. 2.26. Zmiany amplitudy odkształcenia ε_{ap} dla różnych poziomów odkształcenia całkowitego w temperaturze 850°C [86]

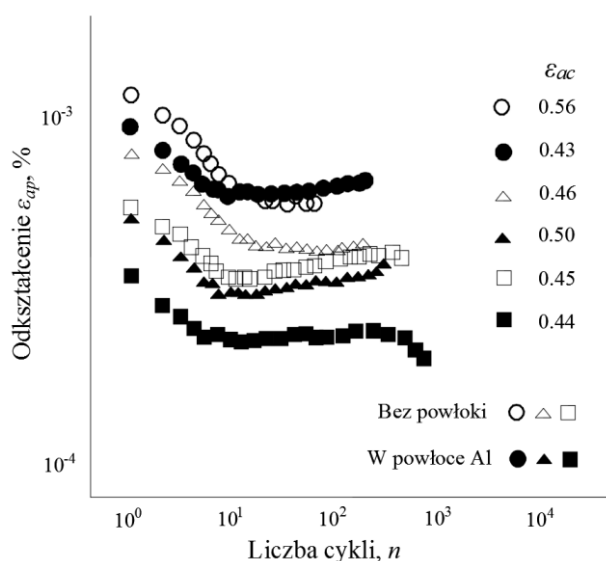
W temperaturze 850°C przy wzroście amplitudy odkształcenia całkowitego widoczny jest wzrost amplitudy odkształcenia plastycznego. W pracy wykreślono ponadto wykresy zmęczenia w układzie współrzędnych $\varepsilon_{ap} - N$ (rys. 2.27). W pracy stwierdzono odmienny niż na przykład w pracach [64, 87] wpływ temperatury na trwałość w obszarze małych i dużych odkształceń. Mianowicie większy wpływ temperatury na trwałość obserwowany w zakresie dużych odkształceń. potwierdzono większy wpływ temperatury na trwałość w zakresie dużych odkształceń.



Rys. 2.27. Wykresy zmęczenia w układzie odkształcenie – liczba cykli w zależności od temperatury [86]

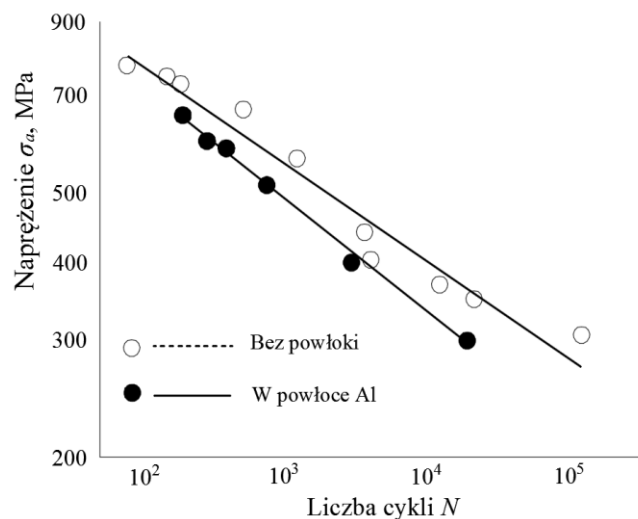
Materiał, który również wykorzystywany jest na obiekty pracujące w skrajnie ciężkich warunkach pracy jest stop Inconel 713LC. Stop ten wykorzystywany jest na części turbin gazowych (łopatki, wirniki), które to

elementy są narażone na powtarzalne odkształcenia elastyczno-plastyczne w środowisku agresywnym i w wysokiej temperaturze. Wyniki badań tego stopu w temperaturze 800°C przedstawiono w pracy [87]. Autorzy porównali między innymi wpływ powłoki aluminiowej na trwałość zmęczeniową próbek. Celem pokrycia łopatek aluminium jest zwiększenie trwałości elementu (jego części, gdzie występuje wysoka temperatura). Dodatkowo powłoka aluminium podnosi odporność na ciężkie warunki otoczenia oraz opóźnia powstawanie mikropęknięć. Parametrem sterującym podczas badań była amplituda odkształcenia ε_{ac} na poziomie $\varepsilon_{ac}=0,44\div0,56\%$. Na rysunku 2.28 przedstawiono przebieg zmian odkształcenia plastycznego ε_{ap} w zależności od liczby cykli.



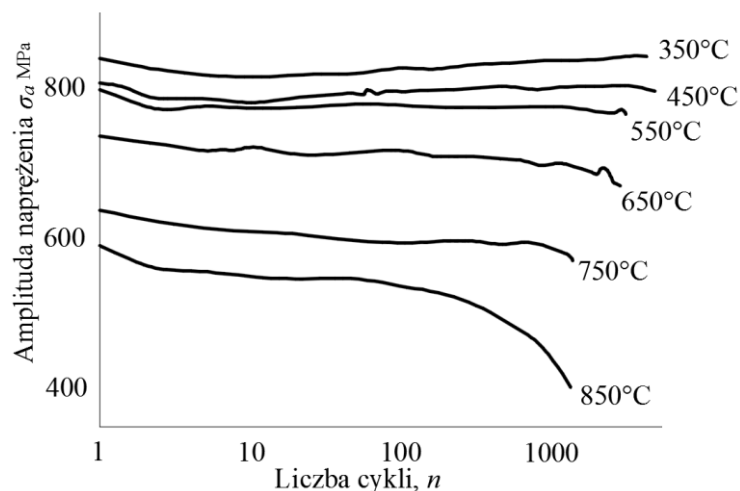
Rys. 2.28. Wykresy zmian odkształcenia plastycznego w zależności od liczby cykli w temperaturze 800°C [87]

Charakter zmian parametrów pętli histerezy jest podobny zarówno dla próbki z powłoką aluminiową jak i bez. Stwierdzono, że niezależnie od pokrycia próbka przechodzi z cyklicznego umocnienia do osłabienia. Stwierdzono obniżoną trwałość zmęczeniową w przypadku próbek powlekanych, co przedstawiono na rysunku 2.28. Powyższe uzasadniono faktem, że dla próbki powlekanej amplituda naprężenia jest wyższa, prowadząc do obniżenia trwałości zmęczeniowej. Należy zwrócić uwagę, że przy wyższych poziomach odkształcenia całkowitego większe są różnice w trwałości zmęczeniowej pomiędzy próbką z i bez powłoki w porównaniu do niższych poziomów odkształcenia, co zilustrowano na rysunku 2.29.



Rys. 2.29. Krzywe Wöhlera dla próbek stopu Inonel 713LC powlekanych (Al coating) oraz niepowlekanych (uncoated) [87]

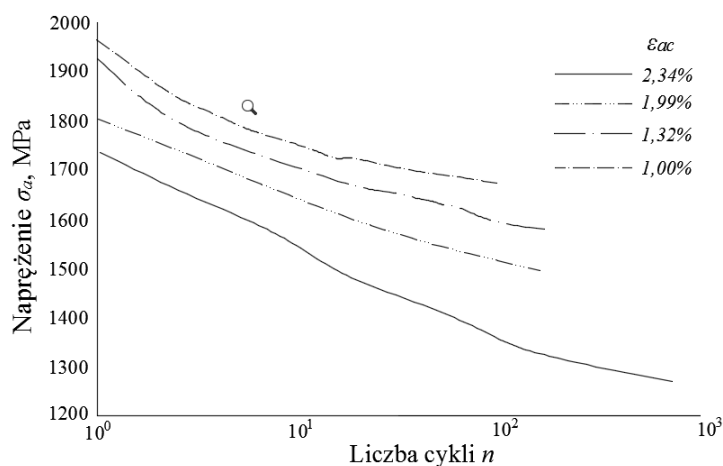
Kolejnym materiałem, który jest stosowany na części obiektów pracujących w bardzo ciężkich warunkach jest stop aluminium TNB-V2 trzeciej generacji. Stop ten jest używany jako materiał do produkcji łopatek wirników silników odrzutowych. Opis właściwości zmęczeniowych tego materiału został przedstawiony w pracy [88]. Próby zmęczeniowe przeprowadzono przy kontrolowanym odkształceniu ε_{ac} w zakresie $0,4 \div 0,6\%$ w warunkach izotermicznych w temperaturach od 350 do 850°C. Zaobserwowano, że materiał w temperaturze 350°C przy odkształceniu 0,6% umacnia się aż do zniszczenia, natomiast osłabienie zaobserwowano w temperaturach powyżej 550°C oraz 550°C (rys. 2.30). Stwierdzono, że w temperaturach 750 i 850°C przebieg zniszczenia jest wynikiem interakcji między środowiskiem a wysokim poziomem wprowadzonych odkształceń.

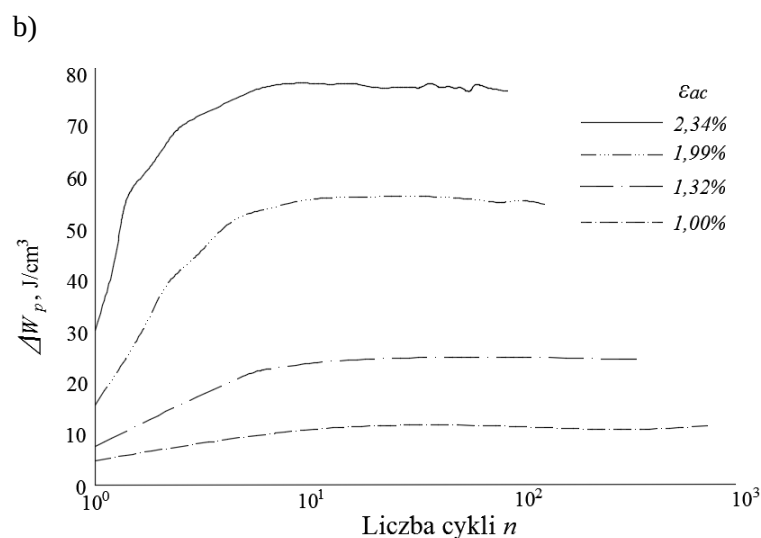


Rys. 2.30. Zachowanie się stopu TNB-V2 w zależności od temperatury przy $\varepsilon_{ac}=0,6\%$ [88]

W przedstawionych wcześniej pracach przebieg zmian właściwości cyklicznych analizowano w ujęciu naprężeniowym oraz odkształceniowym. Jak wynika z przedstawionych prac obciążeniu nie towarzyszy jednak okres stabilizacji, a zakres zmian właściwości cyklicznych jest relatywnie duży. W temperaturach podwyższonych jest on jeszcze większy. W pracy [89] zaprezentowano analizę właściwości cyklicznych stali sprężynowej wysokiej wytrzymałości w ujęciu energetycznym. Stwierdzono bowiem, że zakres zmian przy takim opisie jest znacznie mniejszy niż w przypadku naprężeniowego i odkształceniowego, co przedstawiono na rysunku 2.31.

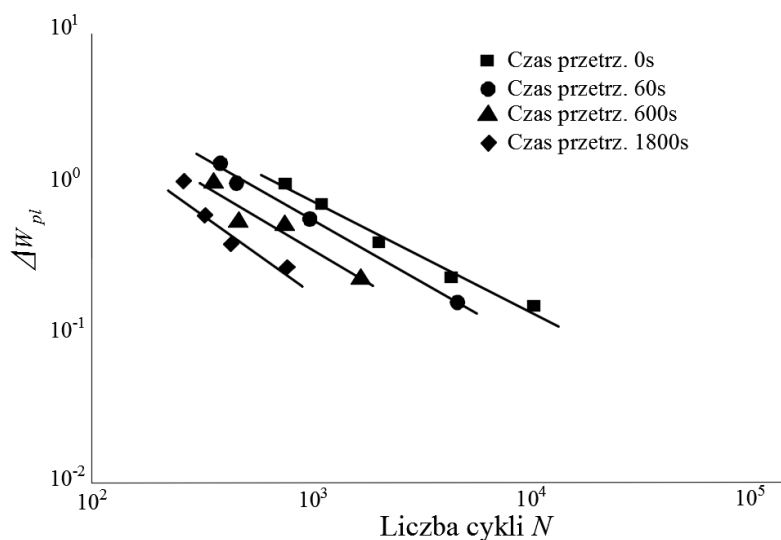
a)





Rys. 2.31. Zmiany a) naprężenia σ_a , b) energii ΔW_{pl} w funkcji liczby cykli [89]

Mniejszy zakres zmian parametru energii ΔW_{pl} może być korzystny przy analizie przebiegu zmian właściwości cyklicznych w temperaturach podwyższonych. Zróżnicowanie parametrów σ_a , czy ε_{ap} w temperaturach pokojowych i podwyższonych jest znaczące. Parametr ΔW_{pl} może wydawać się w tym przypadku interesujący z racji mniejszej czułości na wpływ temperatury, co zostało wykorzystane m. in. w pracy [90], w której autorzy wykorzystali ten parametr podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej. Materiałem badawczym była stal 13CrMo44 stosowana m.in. na kolektory wydechowe elektrowni opalanych paliwami kopalnymi. Chcąc zasymulować rzeczywiste warunki pracy tej stali badania przeprowadzono w temperaturze 515°C oraz zastosowano różne czasy przetrzymania pod obciążeniem (rys. 2.32).



Rys. 2.32. Energia ΔW_{pl} (półcykle rozciągania) w funkcji liczby cykli do zniszczenia w zależności od czasu przetrzymania [90]

Autorzy stwierdzili zgodność wyników badań trwałości zmęczeniowej z przedstawionym w pracy [91] analitycznym opisem zjawiska:

$$\Delta\sigma\Delta\varepsilon_{ap}N_f^\beta = C \quad (2.13)$$

gdzie:

β , C - stałe materiałowe.

Powyższy fakt ogólnie ilustruje energetyczny opis właściwości cyklicznych jako interesujący do stosowania w podwyższonych temperaturach.

2.4.3. Wpływ programu obciążenia

Gdy na materiał dodatkowo wpływa historia obciążenia, poza wcześniej opisywanymi czynnikami, analiza przebiegu zmian właściwości cyklicznych staje się jeszcze bardziej skomplikowana. Poniższe przykłady krótko ilustrują jak istotny jest wpływ historii obciążenia na właściwości cykliczne oraz od czego jest uzależniony.

W pracach [92, 93] autorzy przedstawili wyniki prac badawczych stali do pracy na gorąco 55NiCrMoV7 dostarczonej w 4 stanach poobrobocznych, różniących się m.in. twardością. Materiał ten jest szeroko stosowany na narzędzia do kucia na gorąco, walcowania na gorąco, do wyciskania, czyli tam gdzie narzędzie poddane jest cyklicznym obciążeniom termicznym i mechanicznym. Badania prowadzono w kilku temperaturach od pokojowej do 600°C przy kontrolowanej amplitudzie odkształcenia całkowitego w zakresie

$\varepsilon_{ac}=0,6\div0,9\%$. Badania prowadzono w warunkach obciążeń stałoamplitudowych oraz programowanych. Wyniki badań przedstawiono w postaci wykresów w układzie współrzędnych względne naprężenia σ_{wzgl} - skumulowane odkształcenia plastyczne $\Sigma\Delta\varepsilon_{ap}$. Względne naprężenia zdefiniowano zależnością o postaci:

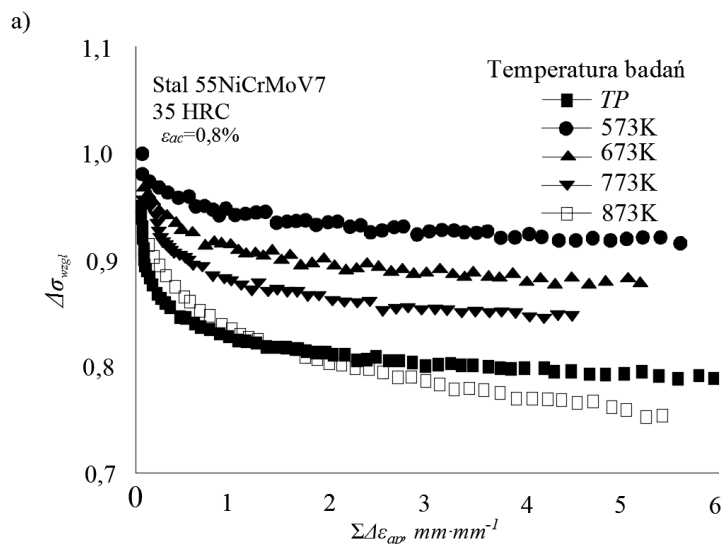
$$\Delta\sigma_{wzgl} = \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_1} \quad (2.14)$$

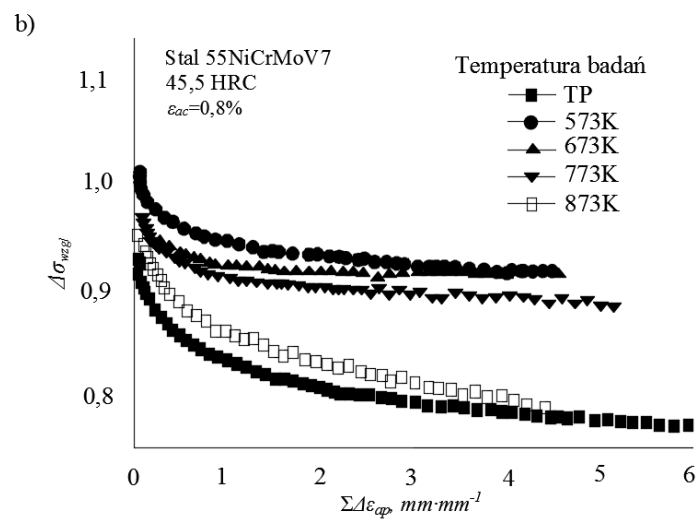
gdzie:

$\Delta\sigma_i$ – zakres naprężenia w i tym cyklu obciążenia,

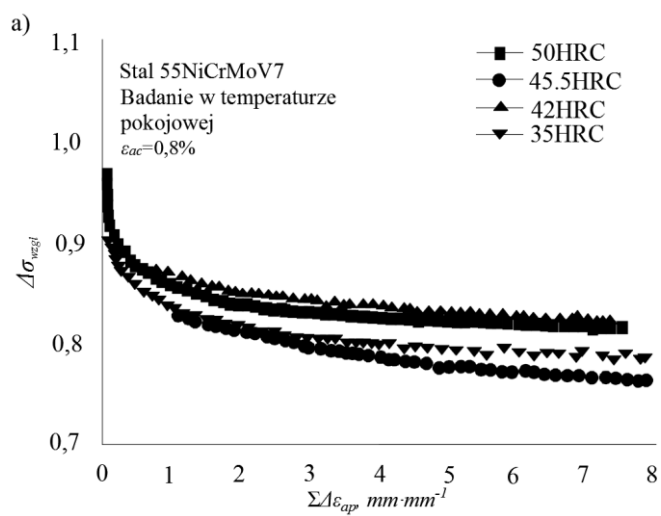
$\Delta\sigma_1$ – zakres naprężenia w pierwszym cyklu obciążenia.

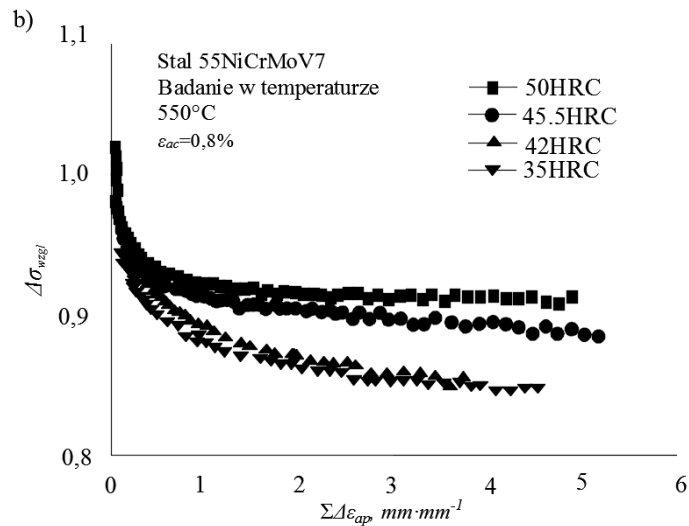
Przy małej twardości stali i w temperaturze pokojowej badań stal charakteryzuje się cyklicznym osłabieniem ($\Delta\sigma_{wzgl}=\sigma_i/\sigma_1$ ulega obniżeniu), co zilustrowano na rysunkach 2.33 i 2.34.





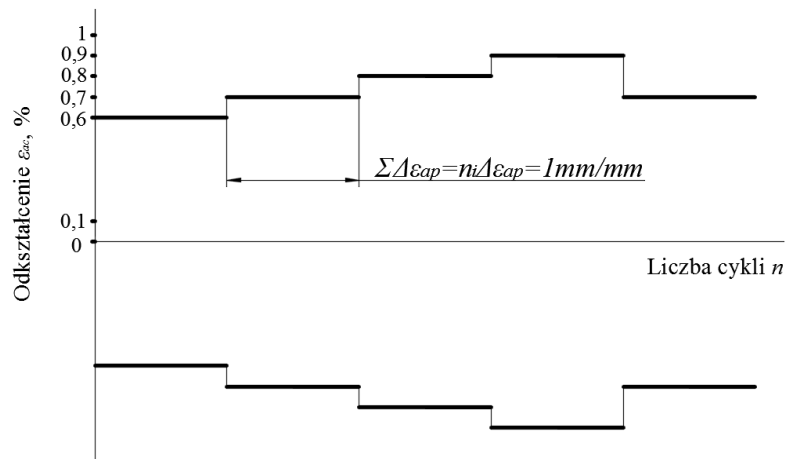
Rys. 2.33. Zmiany przebiegu cyklicznego względnego osłabienia stali 55NiCrMoV7 w różnych temperaturach a) przy 35HRC, b) przy 45,5HRC [92].



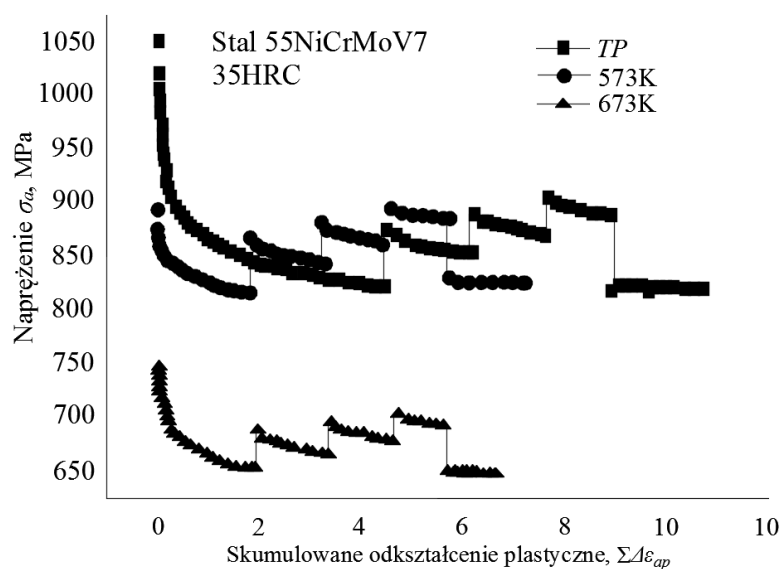


Rys. 2.34. Zmiany przebiegu cyklicznego względnego osłabienia stali 55NiCrMoV7 w zależności od twardości a) w temperaturze pokojowej, b) w temperaturze 550°C [92]

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że proces cyklicznego osłabienia można podzielić na dwie fazy, tj. szybkiego i wolnego osłabiania, bez okresu stabilizacji, co jest zilustrowane na rysunkach 2.33 oraz 2.34. Autorzy uzasadnili szybkie osłabienie gwałtowną zmianą w gęstości oraz w strukturze dyslokacji. Autorzy ponadto stwierdzili, że na przebieg zmian wpływ będzie miała również historia obciążenia. Przeprowadzono zatem próby w warunkach programowanych. Podczas badań programowanych zastosowali następującą sekwencję zmian amplitudy odkształcenia całkowitego: $\varepsilon_{ac} = \pm 0,6\%$, $\pm 0,7\%$, $\pm 0,8\%$, $\pm 0,9\%$, oraz $\pm 0,7\%$, zgodnie ze schematem na rysunku 2.35. Przyjęto, że każda sekwencja obciążenia trwała do momentu, gdy skumulowane odkształcenie plastyczne $\Sigma\Delta\varepsilon_{ap}$ osiągnęło wartość 1 mm/mm (rys. 2.36).

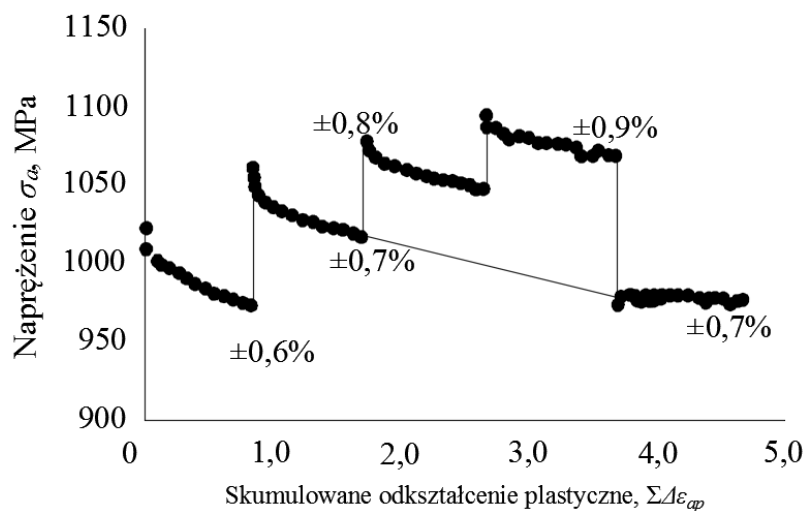


Rys. 2.35. Schemat obciążenia próbki wykonanej ze stali 55NiCrMoV7



Rys. 2.36. Wpływ historii obciążenia na przebieg zmian amplitudy naprężenia stali 55NiCrMoV7 o twardości 35HRC w zależności od temperatury [92]

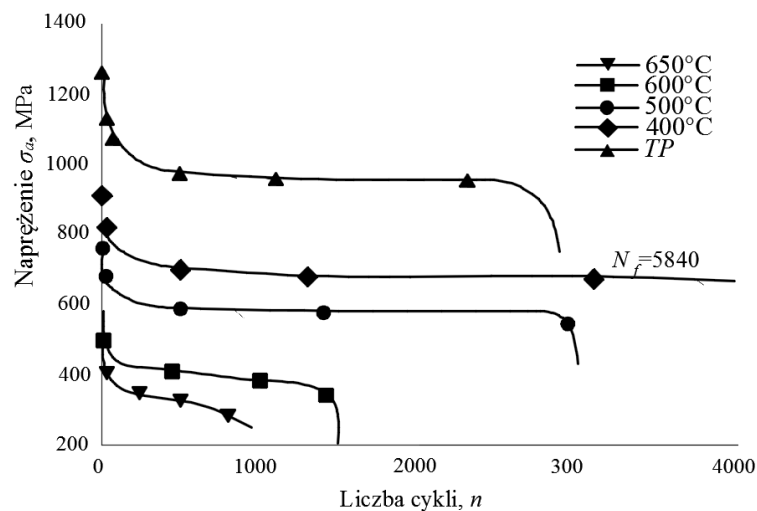
Przy wzroście odkształcenia od 0,6 do 0,9%, uzyskiwano na kolejnych poziomach wykres nieliniowego osłabiania; natomiast w przypadku przejścia z poziomu 0,9 na 0,7% przebieg stanowił kontynuację wcześniej zaaplikowanej sekwencji 0,7%. W pracy dokonano porównania wartości tego parametru z jego wartością uzyskaną podczas obciążenia stałoodkształtowego (rys. 2.37).



Rys. 2.37. Przebieg zmian amplitudy naprężenia w sekwencji Lo-Hi-Lo [92]

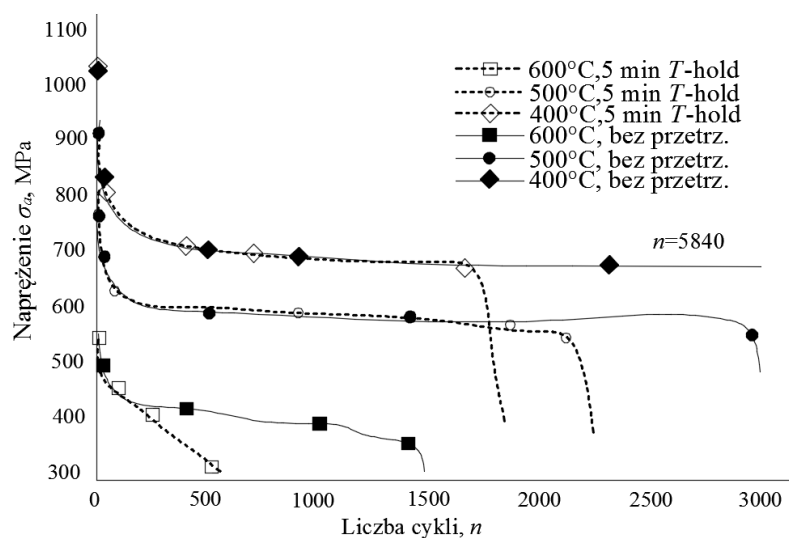
Z przeprowadzonego porównania wynika, że wartości naprężenia względnego uzyskanego w zróżnicowanych warunkach obciążenia dla tych samych poziomów odkształcenia skumulowanego są bardzo zbliżone. Można stwierdzić, że właściwości cykliczne zależą od historii obciążenia. Model konstytutywny zjawiska został szczegółowo opisany w pracy [93].

W pracy [94] podjęto próbę scharakteryzowania właściwości cyklicznych stali 8Cr-2WVTa w podwyższonych temperaturach. Materiał ten miał służyć do budowy reaktora termojądrowego do celów demonstracyjnych [95]. Badania przeprowadzono dla kontrolowanej wartości amplitudy odkształcenia całkowitego $\epsilon_{ac} = 1,5\%$. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem temperatury badań amplituda naprężenia σ_a uległa obniżeniu (rys. 2.38).



Rys. 2.36. Przebieg amplitudy naprężenia dla odkształcenia $\varepsilon_{ac}=1,5\%$ w zależności od temperatury badań [94]

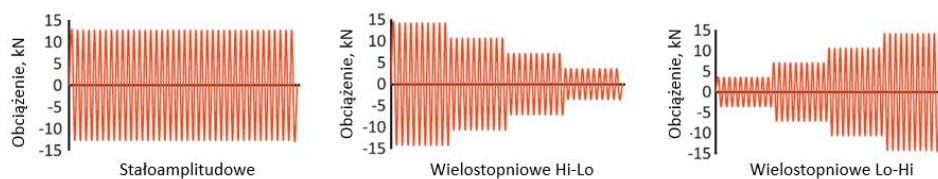
Widoczne na wykresie cykliczne osłabienie materiału tłumaczone jest stopniowym zanikiem wtrąceń, granic ziarn na rzecz dyslokacji. Ponadto zauważono (rys. 2.38), że nie ma okresu stabilizacji w temperaturach 600 oraz 650°C – autorzy stwierdzili, że przyczyną w tych temperaturach może być występująca ciągła zmiana struktury materiału. W pracy ponadto zbadano wpływ pięciominutowego przetrzymania w półcyklu rozciągania na trwałość zmęczeniową. Dopiero w temperaturze 650°C wpływ ten okazał się największy (rys. 2.39).



Rys. 2.39. Wpływ przetrzymania obciążenia na przebieg zmian amplitudy napężenia przy amplitudzie odkształcenia całkowitego $\varepsilon_{ac}=1,5\%$ [94]

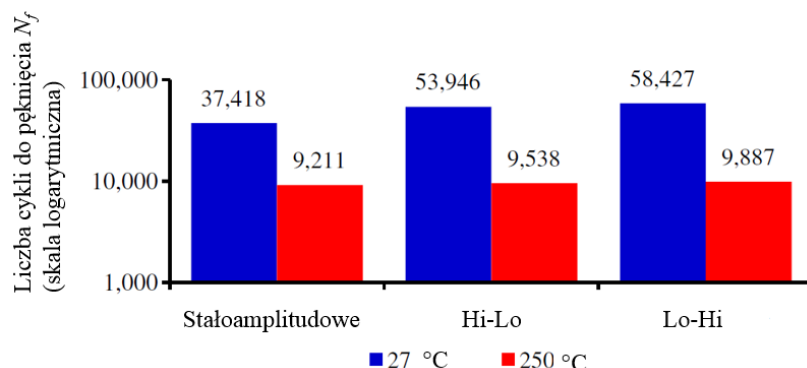
Trwałość zmęczeniowa próbek, które przetrzymano w trakcie cyklu rozciągania znacząco zmalała. Jak stwierdzono w pracy, na zmniejszenie trwałości wpływ miała między innymi koagulacja węglików $M_{23}C_6$.

Wpływ sekwencji programu obciążenia na trwałość zmęczeniową przedstawiono w pracy [95]. Próbkę do badań wykonano ze stopu aluminium AA6061-T6, który jest stosowany między innymi na elementy przy silnikach spalinowych. Z racji obszaru warunków pracy tego materiału, przyjęto temperaturę badań w zakresie 27-250°C. Próbkę poddano obciążeniom stałoamplitudowym oraz wielostopniowym Hi-Lo i Lo-Hi (rys. 2.40).



Rys. 2.40. Schemat obciążenia wielostopniowego stopu aluminium AA6061-T6 [95]

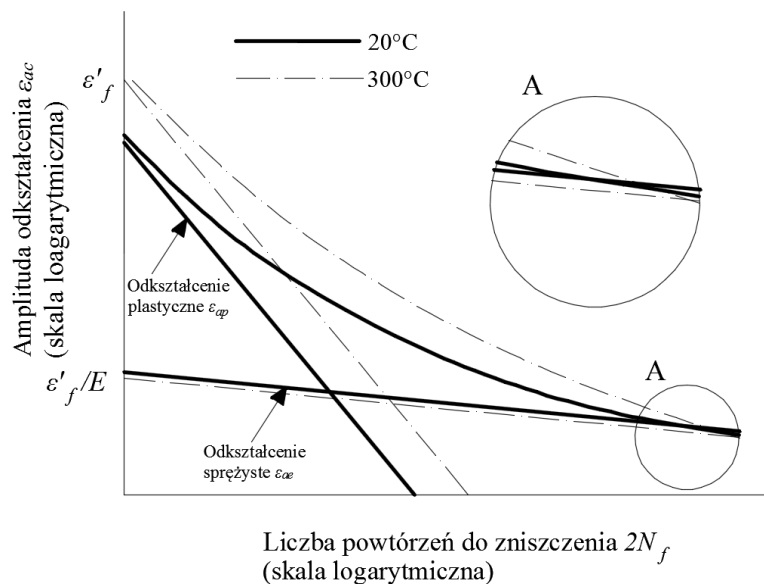
W pracy stwierdzono obniżenie trwałości zmęczeniowej wraz z podniesieniem temperatury. W temperaturze podwyższonej wpływ sekwencji obciążenia stał się mniej dostrzegalny (rys. 2.41).



Rys. 2.41. Porównanie trwałości zmęczeniowej w zależności od sekwencji obciążenia oraz temperatury [95]

2.4.4. Trwałość zmęczeniowa

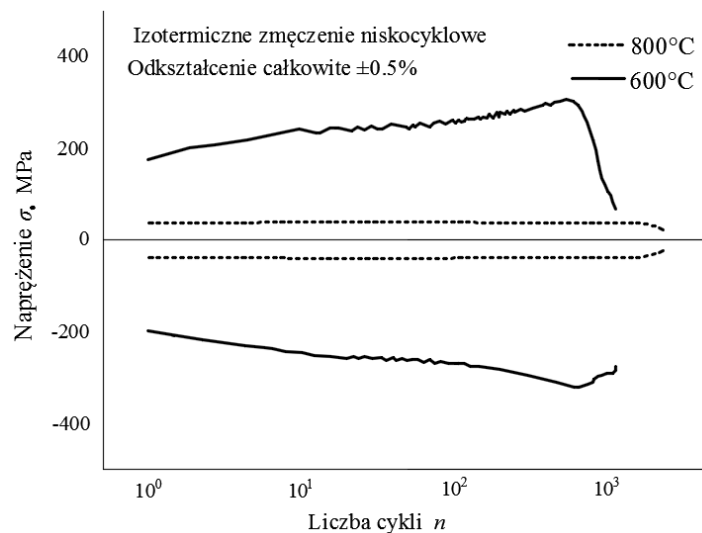
Złożoność procesu zmęczenia sprawia, że charakter zmian w materiale pod wpływem obciążeń zmęczeniowych jest często nieprzewidywalny. Większość stali i stopów zachowuje się w taki sposób, że w podwyższonych temperaturach ich trwałość zmęczeniowa maleje. Materiałem, którego trwałość zmęczeniowa rośnie w pewnym zakresie temperatur podwyższonych jest np. żeliwo szare stosowane m.in. do armatury wodociągowej, na włazy kanałowe, czy części silnikowe. Pod kątem trwałości zmęczeniowej wyniki badań tego materiału zamieszczono w pracy [97]. Badania próbek żeliwa prowadzono w trzech temperaturach 20, 150, 300 i 450°C w warunkach kontrolowanego odkształcenia, przy asymetrii cyklu $R=0,1$. Wyniki pracy przedstawiono w postaci wykresów zmęczeniowych w układzie współrzędnych $\varepsilon-2N_f$. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że trwałość żeliwa wcale nie ulega obniżeniu wraz ze wzrostem temperatury. W przeprowadzonych badaniach była największa w temperaturze 300°C. W pozostałych temperaturach trwałość była na podobnym poziomie. Na rysunku 2.42, który jedynie jakościowo odzwierciedla zjawisko, przedstawiono na szczególnie A przejście, w którym widoczne jest zwiększenie trwałości w temperaturze 300°C.



Rys. 2.42. Wykresy trwałości zmęczeniowej w zależności od temperatury [90]

W pracy stwierdzono, że przy dużej liczbie cykli wpływ na taką zmianę trwałości w podwyższonych temperaturach mają właściwości wytrzymałościowe jak i sprężyste.

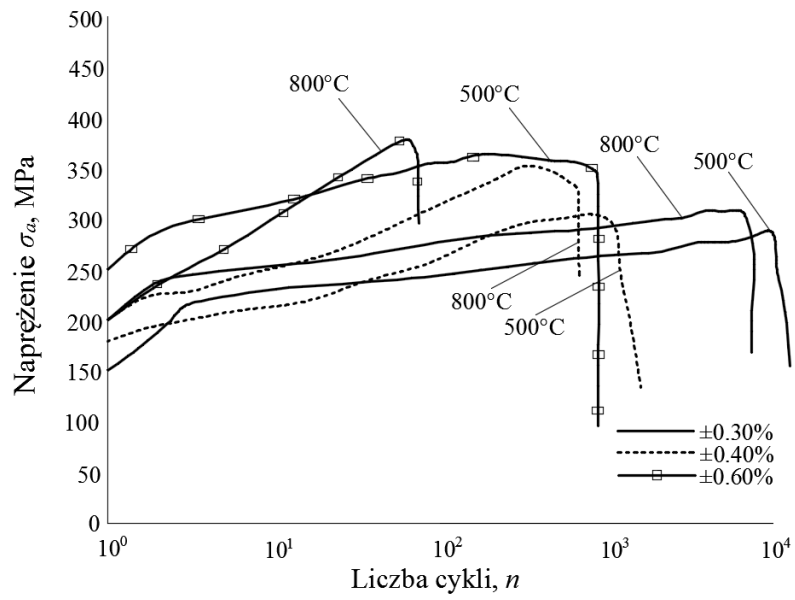
Podobny związek pomiędzy temperaturą i trwałością zaobserwowano podczas badań stali żarowytrzymałej, opisanych w pracy [50]. Na podstawie prób stałoodkształdowych realizowanych w dwóch temperaturach (600°C i 800°C) na jednym poziomie odkształcenia $\varepsilon_{ac}=0,5\%$ stwierdzono, że wzrost temperatury powoduje nieznaczne zwiększenie trwałości zmęczeniowej. Powyższe uzasadniono odmiennym przebiegiem procesu stabilizacji właściwości cyklicznych (rys. 2.43).



Rys. 2.43. Trwałość zmęczeniowa stali przy kontrolowanym $\varepsilon_{ac}=0,5\%$ w temperaturze 600°C oraz 800°C [50]

Podczas badań w temperaturze 600°C materiał podlegał ciągłemu silnemu umocnieniu natomiast w temperaturze 800°C zmiany właściwości cyklicznych były niewielkie. Obserwowano bardzo niewielkie osłabienie stali.

W pracy [98] badaniom niskocyklowym poddano staliwo austenityczne HH50. Staliwo to stosuje się w aplikacjach, gdzie występują powtarzające się obciążenia termiczne w podwyższonych temperaturach. Materiał ten ze względu na bardzo dobre właściwości mechaniczne, tj. wytrzymałość na rozciąganie, wysoką wytrzymałość zmęczeniową oraz odpornością na pitting i korozję szczelinową jest stosowany zarówno w silnikach samochodowych jak i w blokach energetycznych elektrowni atomowych. Materiał został zbadany w temperaturach 500, 650 oraz 800°C. Na rysunku 2.44 przedstawiono wpływ temperatury na przebieg amplitudy naprężenia. Stwierdzono, że niezależnie od temperatury, zawsze występuje cykliczne umacnianie do chwili pęknięcia, a wraz ze wzrostem temperatury trwałość zmęczeniowa uległa obniżeniu.



Rys. 2.44. Przebieg zmian amplitudy naprężenia dla temperatury 500 oraz 800°C [98].

2.5. KRYTYCZNA OCENA STANU WIEDZY I WYTYCZNE DO BADAŃ

Do obliczeń trwałości zmęczeniowej komponentów maszyn pracujących w temperaturach podwyższonych najczęściej stosuje się modele analityczne wykorzystywane przy obliczeniach trwałości elementów eksploatowanych w temperaturach pokojowych.

Na podstawie literatury można stwierdzić, że w warunkach temperatur podwyższonych podczas badań stałoamplitudowych nie występuje okres stabilizacji. Występujące umocnienie lub osłabienie jest uzależnione od wielu czynników związanych z materiałem i warunkami badań. Zauważono, że okres trwałości przyjęty do określenia danych materiałowych wpływa na wartości wyznaczonych danych.

Na przebieg zmian właściwości cyklicznych istotnie wpływają odkształcenia wstępne, przetrzymania oraz przeciążenia. Właściwości cykliczne przyjmuje się z połowy okresu trwałości. Charakter zmian właściwości cyklicznych w temperaturach pokojowych jest zazwyczaj łagodniejszy niż w temperaturach podwyższonych. Powoduje to trudności w znalezieniu konkretnej metody postępowania dla danych grup materiałów i warunków obciążania. Przyjmuje się warunki badań, w których główne parametry są następujące: stała temperatura badań lub stała temperatura i jeden poziom odkształcenia, lub stała temperatura i różne poziomy odkształcenia. Tak zdefiniowane warunki są podstawą do zaproponowania modyfikacji istniejących modeli obliczeniowych, które opisują właściwości cykliczne.

Przebieg zmian właściwości cyklicznych może być opisany za pomocą modelu naprężeniowego lub odkształceniowego. Obecna aparatura badawcza wraz z poprawą rozdzielczości pozwala mierzyć bardzo małe odkształcenia i umożliwiła częstsze stosowanie opisu odkształceniowego. Do budowy wykresu zmęczeniowego, jako wartość kryterialną, wykorzystuje się odkształcenie określane podczas pomiarów bezpośrednich przeprowadzanych w trakcie samych badań.

Interakcję między naprężeniem a odkształceniem uwzględnia opis energetyczny zmęczenia [99, 100, 101], który jako wielkość kryterialną daje dalsze możliwości w opisie zmęczenia. Energia odkształcenia całkowitego ΔW_c oraz jej składowe (energia odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} , sprężystego ΔW_s) mogą być wielkościami kryterialnymi w opisie energetycznym. Jednak w tym opisie należy wcześniej wyznaczyć podstawowe dane materiałowe w trakcie obciążenia stałoamplitudowego i obliczyć iteracyjnie daną wielkość kryterialną w czasie sumowania uszkodzeń zmęczeniowych. Zatem np. samo pole pętli histerezy i dokładność wyznaczenia, które może być odwzorowaniem danego parametru energii, może wpłynąć na skuteczność obliczeń trwałości.

Zależność pomiędzy naprężeniem σ_a a odkształceniem ε_{ap} według równania (2.4) jest podstawową charakterystyką, która opisuje właściwości

cykliczne metali przy niskocyklowym zmęczeniu w temperaturze podwyższonej. Ponieważ poziom odkształcenia istotnie wpływa na umocnienie lub osłabienie, pojawiają się trudności w opisie wspomnianej zależności całego obszaru niskocyklowego zmęczenia. Dla opisu właściwości cyklicznych w stanach ustalonych najczęściej stosuje się model Ramberga-Osgooda [102]. Zgodność tego modelu z wynikami badań, nawet w przypadku braku okresu stabilizacji można uznać za zadowalającą. Ponadto zauważalny jest wpływ temperatury na wyniki.

Poprawa zgodności wyników trwałości, które zostały uzyskane z badań i obliczeń jest jednym z głównych celów badaczy procesu zmęczenia. Ulepszane i rozwijane są znane hipotezy kumulacji uszkodzeń trwałości oraz tworzone całkowicie nowe. Widoczne jest także stosowanie hipotez z obszaru zmęczenia wysokocyklowego w obszarze niskocyklowym. Tutaj najczęściej stosuje się hipotezę Palmgrena-Minera.

Analiza danych literaturowych wykazała, że badania w zakresie zmęczenia niskocyklowego wciąż są rozwijane. Różne opracowania wyników badań wskazują na ciągle niepełną wiedzę na temat tego zjawiska. W każdym przypadku, gdzie uwzględniano temperaturę badań stwierdzono jej istotny wpływ na uzyskiwane wyniki.

2.6. WYTYCZNE DO BADAŃ WŁASNYCH

Znajomość przebiegu zmian właściwości cyklicznych w podwyższonych temperaturach jest podstawą do wyznaczania danych materiałowych przyjmowanych do późniejszych obliczeń.

Realizacja celu pracy wymaga użycia do badań materiału przeznaczonego na obiekty eksploatowane w podwyższonych temperaturach. Niezbędne są badania zmęczeniowe w warunkach izotermicznego obciążenia stałoamplitudowego oraz programowanego.

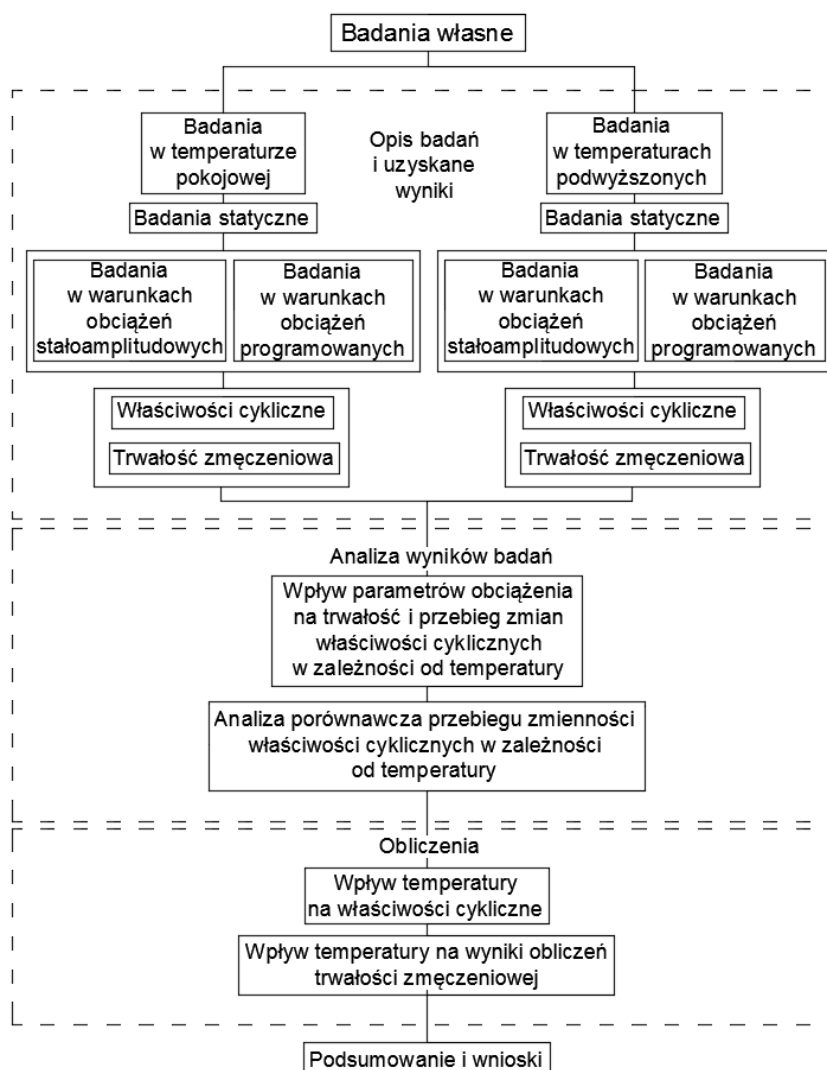
Uzyskane wyniki pozwolą określić wpływ temperatury oraz sekwencji obciążenia na przebieg zmian właściwości cyklicznych. Do sformułowania ogólnych wniosków posłużą poszczególne parametry pętli histerezy.

3. OPIS BADAŃ

3.1. CEL I ZAKRES BADAŃ WŁASNYCH

Celem badań własnych było określenie wpływu temperatury podwyższonej na trwałość zmęczeniową oraz właściwości cykliczne stali P91 w obszarze niskocyklowego zmęczenia.

Próby zmęczeniowe zrealizowano w warunkach obciążeń stałoamplitudowych oraz programowanych przy użyciu próbek wykonanych ze stali P91. Zakres prowadzonych badań przedstawiono schematycznie na rysunku 3.1.



Rys. 3.1. Zakres badań własnych

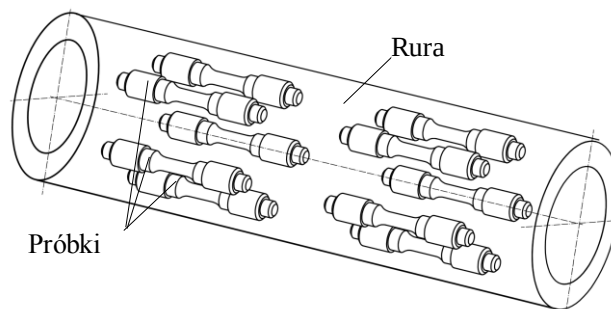
3.2. MATERIAŁ NA PRÓBKİ, SKŁAD CHEMICZNY, WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE

Próbki do badań wykonano ze stali P91 stosowanej w przemyśle energetycznym. Jest to jeden z nowszych materiałów stosowanych w energetyce [103]. Ze względu na dobre właściwości wytrzymałościowe stal tę stosuje się na rurociągi oraz elementy urządzeń energetycznych konwencjonalnych kotłów. Stal należy do grupy stali 9-12% Cr, których pożądane właściwości mechaniczne kształtuje się przez wprowadzenie odpowiednich dodatków stopowych jak: wanadu, wolframu, niklu, miedzi i kobaltu, mikrododatków: azotu, boru i niobu, przy równoczesnym znaczącym obniżeniu zawartości węgla oraz molibdenu. Prace rozwojowe nad grupą tych stali doprowadziły do ustalenia optymalnego składu chemicznego. Stale te zapewniają wysoką spawalność, właściwości wytrzymałościowe przy jednocześnie zadowalających właściwościach plastycznych oraz wysokiej żaroodporności w temperaturze dochodzącej do 620°C. Badania składu chemicznego próbek przeprowadzono zgodnie z normą PN-H-04045:1997 metodą spektrometrii emisyjnej na spektrometrze emisyjnym firmy Foundry-MASTER. Zebrane dane przedstawiono w tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Zawartość procentowa pierwiastków w stali P91

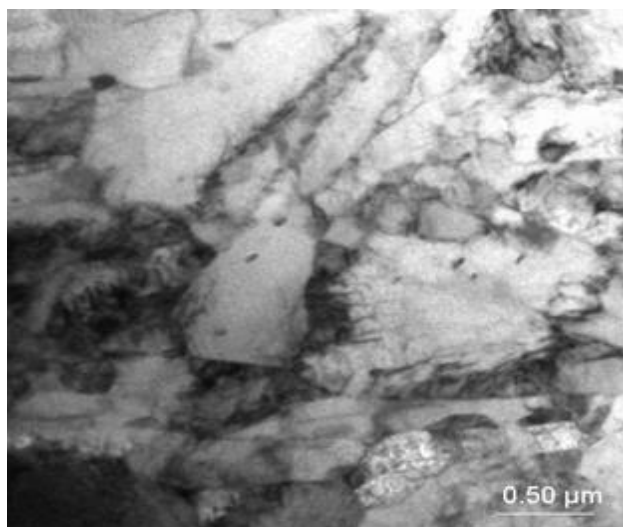
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Nb	V
0,15	0,51	0,49	0,01	0,01	8,84	1,00	0,21	0,1	0,03	0,06	0,21

Materiał wyjściowy z którego wykonano próbki miał postać rury stosowanej na rurociągi o średnicy zewnętrznej 200 mm i grubości ścianki 20 mm. Położenie próbek w rurze z której pobierano próbki pokazano na rysunku 3.1.



Rys. 3.1. Położenie próbek do badań w rurze

Przykładową mikrostrukturę stali P91 po wycięciu z rury przedstawiono na rysunku 3.2. Przyjęta do badań stal charakteryzowała się typową mikrostrukturą dla tej grupy stali zawierających 9÷12% Cr - mikrostrukturą martenzytu wysokoodpuszczonego z licznymi wydzieleniami węglików i azotków.

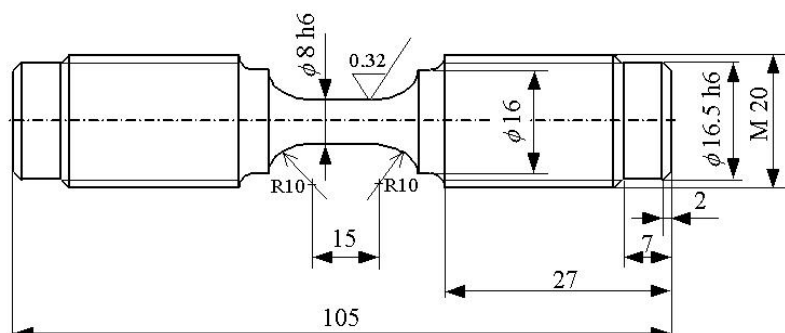


Rys. 3.2. Mikrostruktura stali P91 [82]

Jak opisano w pracy [103], typowe wydzielenia węglików to $M_{23}C_6$ (stabilizujące listwową strukturę martenzytu), które są bogate w wanad i niob, poza tym drobne węgliko-azotki, głównie wanadu. Węgliko-azotki istotnie wpływają na zwiększenie odporności na pełzanie. Zredukowana zawartość węgla do 0,1% polepszyła spawalność. Efekt umocnienia uzyskano przez azotki, węglikoazotki lub węglkoborki i fazy międzymetaliczne (np. Fe_2W), które występują w formie dyspersyjnej na granicach oraz wewnątrz ziarn ferrytu. Utwardzenie wydzieleniowe jest rezultatem obecności licznych drobnych wydzieleni węgliko-azotków. Twardość materiałów o strukturze opisanej powyżej waha się między 210 a 250 HV. Temperatura i czas odpuszczania istotnie wpływa na poziom twardości oraz innych właściwości wytrzymałościowych.

Próbki do badań wykonano zgodnie z zaleceniami zamieszczonymi w normach badawczych dotyczących prowadzenia badań niskocyklowych stali w podwyższonych temperaturach [15, 16]. Przyjęty kształt próbek pozwalał mocować je w uchwytach cięgieł mocujących będących na wyposażeniu maszyny wytrzymałościowej. Kształt i wymiary próbek wykorzystywanych podczas badań pokazano na rysunku 3.3.

a)



b)



Rys. 3.3. Próbkki do badań: a) wymiary, b) widok

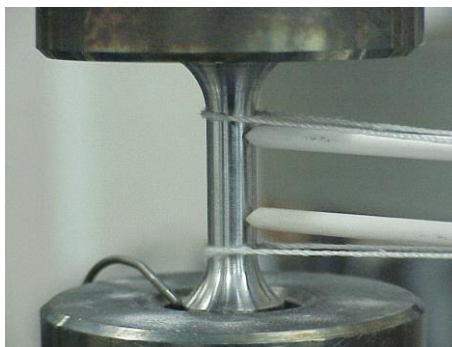
3.3. WARUNKI BADAŃ

3.3.1. Próby statycznego rozciągania

W celu określenia poziomów odkształcenia zmiennego próby zmęczeniowe zostały poprzedzone próbami statycznego rozciągania, które wykonano w trzech różnych temperaturach ($T_1=20^{\circ}\text{C}$, $T_2=400^{\circ}\text{C}$ oraz $T_3=600^{\circ}\text{C}$). Podczas prób statycznych wykorzystano próbki do badań zmęczeniowych. W trakcie prób statycznego rozciągania próbki poddawano obciążeniu narastającemu z prędkością przesuwu tłoka maszyny wynoszącą $0,1\text{ mm/s}$. Wydłużenie próbki mierzono przy wykorzystaniu ekstensometru o bazie $12,5\text{ mm}$ i zakresie pomiarowym $4,75\text{ mm}$ mocowanego na próbce. Próby prowadzono do chwili trwałego rozdzielenia próbki w obszarze części pomiarowej. W trakcie próby statycznego rozciągania rejestrowano chwilowe wartości siły obciążającej próbkę oraz jej wydłużenie.

3.3.2. Próby zmęczeniowe stałoamplitudowe (próby izotermiczne)

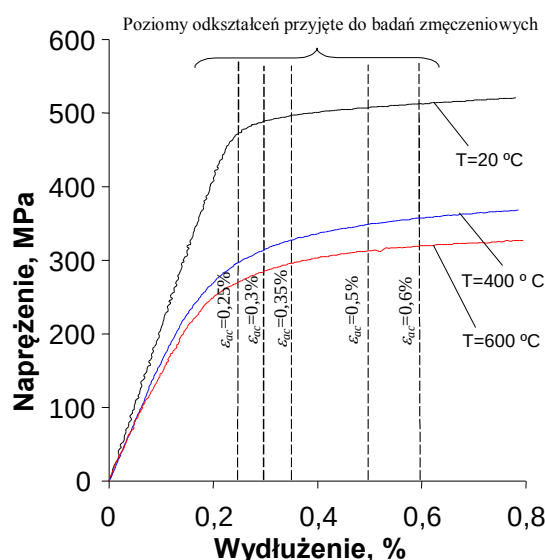
Badania niskocyklowe prowadzono w warunkach kontrolowanego odkształcenia całkowitego ($\varepsilon_{ac}=\text{const}$). Badania polegały na poddawaniu próbek obciążeniu zmiennemu do chwili powstania pęknięcia zmęczeniowego. Podczas badań odkształcenia próbki mierzono przy wykorzystaniu ekstensometru o bazie $12,5\text{ mm}$ i zakresie pomiarowym $\pm 15\%$ mocowanego na części pomiarowej próbki. Na rysunku 3.4 pokazano widok próbki (wraz z ekstensometrem) zamocowanej w uchwytach maszyny wytrzymałościowej.



Rys. 3.4. Widok próbki zamocowanej w uchwytach maszyny wytrzymałościowej

Wyniki prób statycznego rozciągania poddano szczegółowej analizie na podstawie której określono poziomy odkształcenia przyjęte do badań zmęczeniowych. Ostatecznie badania zmęczeniowe przeprowadzono na pięciu poziomach amplitudy odkształcenia całkowitego $\varepsilon_{ac}=0,25; 0,30; 0,35; 0,50; 0,60\%$. Na rysunku 3.5 pokazano fragment wykresów rozciągania uzyskanych

w trzech temperaturach ograniczone do wydłużenia 0,8%. Na wykresie tym naniesiono poziomy odkształcenia przyjęte do badań zmęczeniowych.



Rys. 3.5. Wykresy rozciągania stali P91 oraz poziomy odkształcenia przyjęte do badań zmęczeniowych

Badania zmęczeniowe stałoamplitudowe przeprowadzono w trzech niezmiennych temperaturach (próby izotermiczne $T=\text{const}$): $T_1=20^\circ\text{C}$, $T_2=400^\circ\text{C}$, $T_3=600^\circ\text{C}$. Temperaturę mierzono za pomocą termopary TP-203. Podczas prób zmęczeniowych rejestrowano chwilowe wartości siły obciążającej oraz odkształcenia próbki dla wybranych cykli obciążenia. Badania prowadzono przy częstotliwości obciążenia $f=0,2$ Hz oraz przy $R=-1$ ($R=\varepsilon_{\min}/\varepsilon_{\max}$). Przyjęta podczas badań częstość próbkowania sygnału siły obciążającej i odkształcenia pozwalała opisywać rejestrowane cykle obciążenia 200 punktami. Szczegółowe parametry obciążeń stałoamplitudowych izotermicznych zestawiono w tabeli 3.2.

Tabela 3.2. Parametry obciążeń stałoamplitudowych izotermicznych

Schemat programu	ε_{ac} , %	T , °C	R
	0,25%	20 400 600	-1
	0,30%		
	0,35%		
	0,50%		
	0,50%		
	0,60%		

3.3.3. Badania w warunkach obciążenia programowanego i stałej temperatury

Badania programowane izotermiczne ($T=\text{const}$) realizowano, podobnie jak obciążenia stałoamplitudowe w warunkach kontrolowanego odkształcenia ($\varepsilon_{ac}=\text{const}$). Poziomy odkształcenia przyjęte na poszczególne stopnie obciążeń programowanych odpowiadały poziomom stosowanym podczas badań stałoamplitudowych. Podczas badań w warunkach obciążeń izotermicznych ($T=\text{const}$) stosowano dwa rodzaje obciążeń programowanych różniące się liczbą stopni w programie. Były to:

- obciążenia dwustopniowe (w przebiegu były tylko dwa stopnie odkształcenia),
- obciążenia wielostopniowe (w przebiegu było pięć stopni odkształcenia).

Obciążenia dwustopniowe

Celem głównym badań warunkach obciążeń dwustopniowych była ocena wpływu kolejności stopni w programie na przebieg stabilizacji oraz trwałość w temperaturze otoczenia i w temperaturze podwyższonej. Badania realizowano, podobnie jak obciążenia stałoamplitudowe, w warunkach kontrolowanego odkształcenia ($\varepsilon_{ac}=\text{const}$) w dwóch temperaturach ($T_1=20^\circ\text{C}$, $T_2=600^\circ\text{C}$). Poziomy odkształcenia przyjęte na poszczególne stopnie obciążeń programowanych odpowiadały poziomom stosowanym podczas badań stałoamplitudowych. Zmiany poziomów odkształcenia w programie dokonywano według dwóch sekwencji:

- a) odkształcenia małe-odkształcenia duże - sekwencja oznaczana jako Lo-Hi,
- b) odkształcenia duże-odkształcenie małe - sekwencja oznaczana jako Hi-Lo.

Poziomy odkształcenia w programie obciążenia dwustopniowego przyjęto po analizie wyników badań w warunkach obciążeń stałoamplitudowych. Przyjęte poziomy to: $\varepsilon_{ac(1)}=0,30\%$ oraz $\varepsilon_{ac(2)}=0,60\%$. Zmiany poziomu odkształcenia z $\varepsilon_{ac(1)}$ na $\varepsilon_{ac(2)}$ lub odwrotnie z $\varepsilon_{ac(2)}$ na $\varepsilon_{ac(1)}$ dokonywano przy różnych stopniach uszkodzenia D próbki na pierwszym stopniu programu obciążenia. Stopień uszkodzenia D definiowano przy wykorzystaniu trwałości względnej opisanej zależnością:

$$D=n_i/N_i \quad (3.1)$$

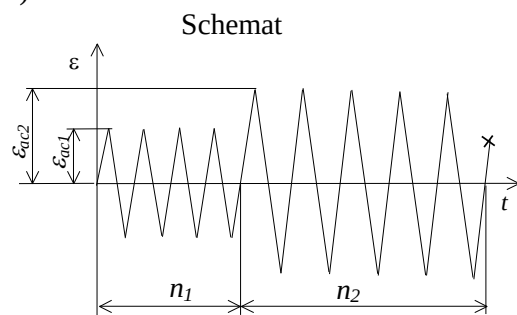
gdzie:

n_i - bieżąca liczba cykli obciążenia stałoamplitudowego na poziomie ε_{aci} i temperaturze T_i przy której dokonywano zmiany odkształcenia z $\varepsilon_{ac(1)}$ na $\varepsilon_{ac(2)}$ lub z $\varepsilon_{ac(2)}$ na $\varepsilon_{ac(1)}$,

N_i - liczba cykli obciążenia stałoamplitudowego na pierwszym stopniu programu obciążenia ε_{aci} i temperaturze próbki T_i do chwili pęknięcia próbki.

Na rysunku 3.6 pokazano schematy programu obciążenia Lo-Hi i Hi Lo oraz podano ich parametry

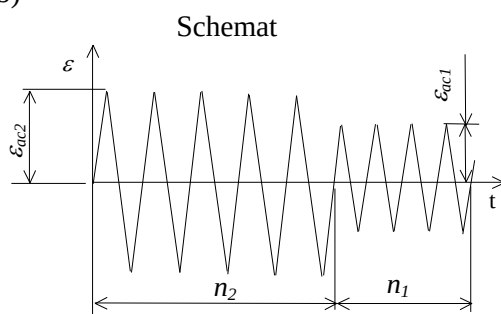
a)



Parametry

$\varepsilon_{ac(1)}=0,30\%$, $\varepsilon_{ac(2)}=0,60\%$
 $T_1=20^\circ\text{C}$, $N_1=20361$
 (z badań)
 $T_2=600^\circ\text{C}$, $N_1=3241$
 (z badań)
 $n_1=0,25N_1$
 $n_1=0,50N_1$
 $n_1=0,75N_1$

b)



Parametry

$\varepsilon_{ac(1)}=0,60\%$, $\varepsilon_{ac(2)}=0,30\%$
 $T_1=20^\circ\text{C}$, $N_2=1296$
 (z badań)
 $T_2=600^\circ\text{C}$, $N_2=597$
 (z badań)
 $n_2=0,25N_2$
 $n_2=0,50N_2$
 $n_2=0,75N_2$

Rys. 3.6. Obciążenie dwustopniowe a) Lo-Hi, b) Hi-Lo

Obciążenia wielostopniowe

Program obciążenia wielostopniowego przygotowano w postaci bloku o pojemności $n_0=100$ cykli. W celu uproszczenia analizy wyników na każdym z 5 stopni realizowano taką samą liczbę cykli obciążenia (20 cykli). Wszystkie programy obciążeń wielostopniowych charakteryzowały się taką samą wartością maksymalnej amplitudy odkształcenia całkowitego ε_{acmax} w bloku obciążenia oraz tym samym współczynnikiem wypełnienia widma ζ odniesionym do amplitudy odkształcenia całkowitego według zależności:

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

gdzie:

k - liczba stopni w programie (5 stopni),

n_j - liczba cykli na j -tym stopniu programu (20 cykli na stopień).

Przyjęta maksymalna wartość odkształcenia w programach to $\varepsilon_{acmax}=0,6\%$. Próby przeprowadzono w temperaturach 20 i 600°C.

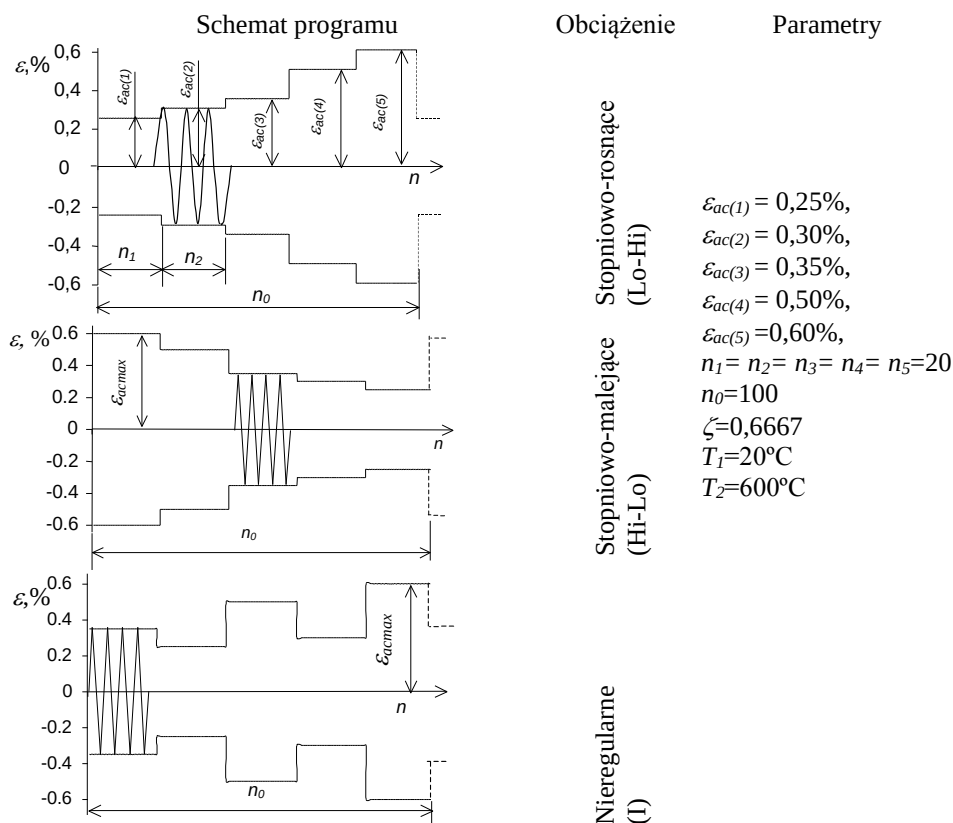
Badania w warunkach obciążenia wielostopniowego zrealizowano dla trzech sekwencji stopni w programie. Było to: obciążenie stopniowo narastające, obciążenie stopniowo malejące oraz obciążenie o nieregularnym następstwie stopni. Schematy programów obciążenia oraz ich oznaczenia pokazano na rysunku 3.7.

Ze względu na obserwowany podczas prób stałoamplitudowych wpływ poziomu odkształcenia na obniżenie trwałości zmęczeniowej w pracy zrealizowano dodatkowo badania programowane, w których zmianie podlegała wartość odkształcenia maksymalnego w programie. Dodatkowe próby wykonano tylko dla jednej sekwencji wielostopniowego obciążenia programowanego i dwóch wartości odkształcenia maksymalnego w programie ($\varepsilon_{acmax}=0,35\%$ oraz $\varepsilon_{acmax}=1,2\%$). Parametrem niezmiennym była wartość współczynnika wypełnienia widma $\zeta=0,67$.

Wartości poziomów odkształcenia występujące w programach obciążenia zestawiono w tabeli 3.3.

Tabela 3.3. Przyjęte poziomy odkształceń w programach wielostopniowych

ε_{acmax}	Poziomy odkształceń ε_{aci}					ζ
	1	2	3	4	5	
0,35%	0,15%	0,18%	0,2%	0,29%	0,35%	0,67
0,6%	0,25%	0,3%	0,35%	0,5%	0,6%	0,67
1,2%	0,5%	0,6%	0,7%	1%	1,2%	0,67

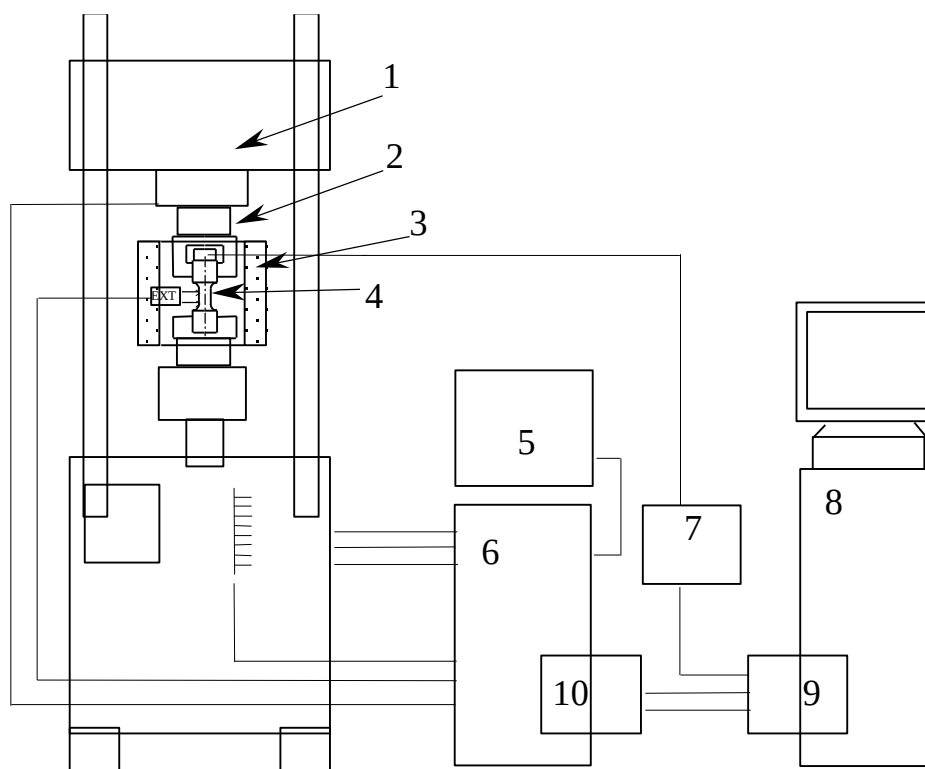


Rys. 3.7. Obciążenia wielostopniowe wraz z parametrami kontrolowanymi

Badania zmęczeniowe w warunkach obciążeń programowanych wielostopniowych przeprowadzono na dwóch poziomach temperatury ($T_1=20^\circ\text{C}$, $T_2=600^\circ\text{C}$). Wyniki badań w warunkach obciążeń programowanych analizowano w kontekście wpływu parametrów programu i jego postaci na zmiany podstawowych parametrów pętli histerezy oraz trwałość. Ponadto analizowano zmiany podstawowych parametrów pętli histerezy przed i po zmianie stopnia programu.

Aparatura badawcza

Badania w warunkach obciążenia stałoamplitudowego izotermicznego jak również programowanego przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8502. W celu realizacji obciążeń programowanych opracowano oprogramowanie umożliwiające sterowanie oraz zapis wyników z maszyny wytrzymałościowej z poziomu zewnętrznego komputera komunikującego się z maszyną poprzez standardowy interfejs GPIB. Schemat sterowania maszyną oraz wykorzystanie posiadanego oprogramowania przedstawiono na rysunku 3.8.



Rys. 3.8. Schemat sterowania maszyną wytrzymałościową oraz temperaturą komory grzewczej: 1) Maszyna wytrzymałościowa, 2) Siłomierz, 3) Komora grzewcza, 4) Badana próbka, 5) Panel sterujący, 6) Komputer maszyny, 7) Sterownik komory cieplnej, 8) Komputer sterujący rejestracją danych z poszczególnych kanałów, 9) Karty sprzęgające system kontroli i sterowania, 10) Wyjścia danych z kanału siłomierza, przemieszczenia i odkształcenia

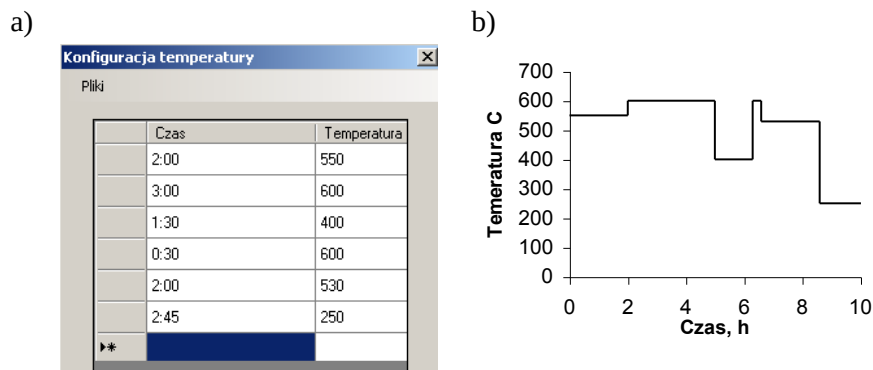
Opracowane i zainstalowane na maszynie wytrzymałościowej oprogramowanie pozwoliło na zadawanie obciążenia programowanego o różnicowanej sekwencji stopni w programie. Wprowadzanymi danymi

wejściowymi były podane w pliku tekstowym punkty programu obciążenia. Oprogramowanie umożliwiło automatyczną lub sterowaną rejestrację danych jak również graficzną prezentację wyników. Podczas testów stałoamplitudowych, jak i programowanych parametrem kontrolowanym było odkształcenie całkowite części pomiarowej próbki mierzone przy wykorzystaniu ekstensometru. Podczas prób stałoamplitudowych rejestrowano pierwsze trzy cykle obciążenia, a następnie te, które charakteryzowały się cyklicznym osłabieniem lub umocnieniem właściwości cyklicznych. Natomiast podczas obciążenia programowanego rejestracji podlegały całe wybrane bloki obciążenia ($n_0=100$ cykli).

Podczas prowadzenia badań zmęczeniowych w podwyższonej temperaturze niezwykle istotne było utrzymanie żądanej, zadanej temperatury w czasie prowadzenia badań. W standardowej komorze montowanej na hydraulicznej maszynie do badań wytrzymałościowych temperatura kontrolowana jest na ścianach komory grzewczej (rys. 3.8). Taki pomiar nie odzwierciedla jednak temperatury badanej próbki. W celu pomiaru rzeczywistej temperatury próbki zastosowano dodatkowy, niezależny przetwornik temperatury mocowany bezpośrednio na próbce. Zasadniczą wadą takiego rozwiązania jest brak automatycznej regulacji temperatury próbki. Podczas prowadzenia badań niskocyklowych istniała potrzeba regulacji zarówno obciążenia próbki, ale również temperatury próbki. Aby monitorować oraz regulować zmiany temperatury w czasie zaprojektowano oraz wykonano system, który składa się ze standardowej komory Instron SLF oraz przetwornika temperatury firmy Czaki model EMT 200 z termoparą TP-203. Całością steruje program komputerowy Komora v.1.0. Program Komora v.1.0 steruje komorą w taki sposób aby na próbce była utrzymana zadana temperatura. W menu wyświetlane są następujące temperatury:

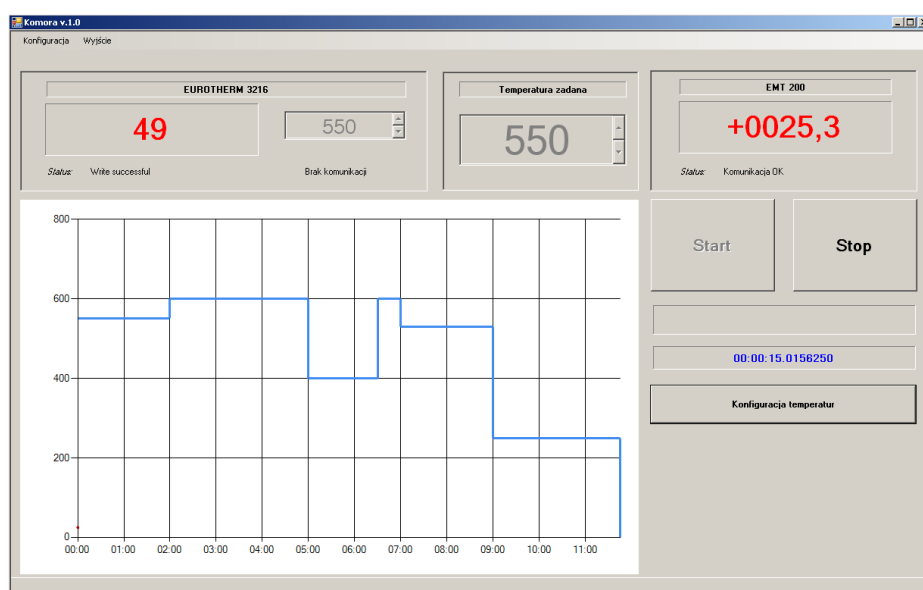
- temperatura ścian komory – aktualna temperatura ścian komory grzewczej,
- temperatura zadana komory – zadana temperatura dla układu grzewczego komory,
- temperatura zadana na próbce – temperatura próbki jakiej wymagamy,
- temperatura próbki – aktualna temperatura próbki.

W oknie wykresu wyświetlane są dwa wykresy, pierwszy z zaprogramowaną temperaturą w czasie, a drugi z aktualną temperaturą próbki. Menu konfiguracyjne zawiera ustawienia parametrów komunikacji portów RS232 przez które program zarządza komorą termiczną i czujnikiem temperatury. Przycisk: „Konfiguracja temperatur” służy do ustawienia temperatury i czasu wygrzewania próbki. Na rysunku 3.9 przedstawiono przykładową tabelę programu zmian temperatury oraz odpowiadający jej teoretyczny przebieg.



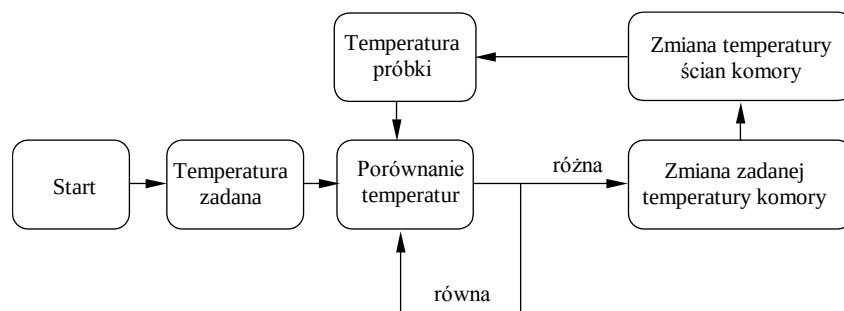
Rys. 3.9. Program zmian temperatury: a) menu konfiguracyjne, b) wykres

Dane z tabeli można zapisać do pliku i wczytać ponownie. Wczytanie lub wpisanie w tabeli zmian temperatury powoduje wyświetlenie w oknie wykresu przebiegu zmian temperatury w zaprogramowanym czasie (rys. 3.10).



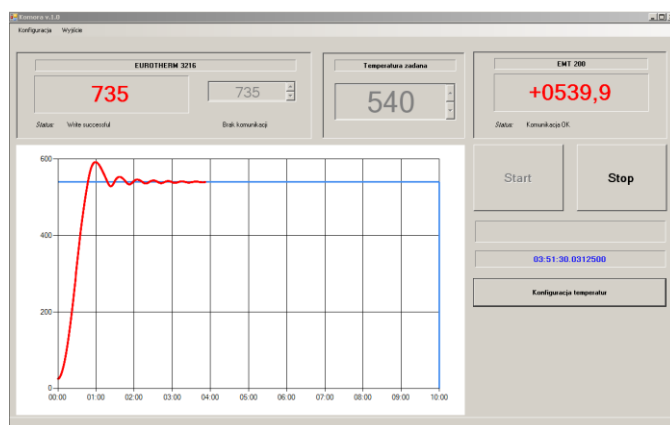
Rys. 3.10. Wykres zmian temperatury

Wciśnięcie przycisku start powoduje uruchomienie kontroli temperatury na próbce według schematu na przedstawionego na rysunku 3.11. Wielkościami wejściowymi są: temperatura zadana i temperatura rzeczywista próbki.



Rys. 3.11. Schemat regulacji temperatury próbki

Zatrzymanie programu następuje po upływie zadanego czasu wygrzewania lub po naciśnięciu przycisku stop. Zatrzymanie programu Komora v.1.0 powoduje przejście sterownika komory Instron SLF do wcześniej zaprogramowanej temperatury. Z uwagi na znaczną bezwładność cieplną układu próbka – uchwyt – komora, niemożliwe jest wprowadzenie skokowych zmian temperatury na próbce. Rzeczywiste zmiany temperatury próbki podczas nagrzewania próbki do temperatury $T=500^{\circ}\text{C}$ przedstawiono na rysunku 3.12.



Rys. 3.12. Zmiany temperatury próbki podczas nagrzewania

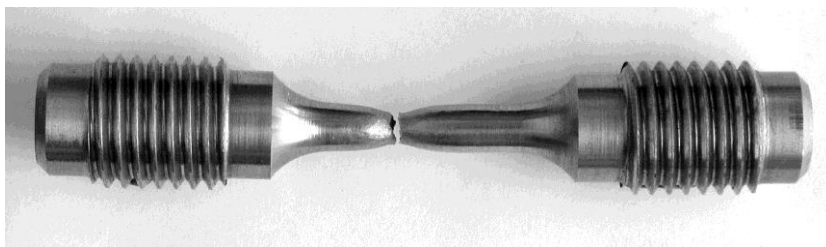
Ustabilizowanie temperatury na wcześniej zaplanowanym poziomie następowało najczęściej po ok. 15 minutach od momentu rozpoczęcia grzania próbki od temperatury pokojowej. Planując próby zmęczeniowe, niezbędne było uwzględnienie czasu na ustabilizowanie temperatury przed rozpoczęciem obciążenia próbki. Ponieważ próby zmęczeniowe trwały zwykle od kilku do kilkudziesięciu godzin kontrolowanie temperatury próbki, mimo bezwładności układu, znakomicie spełniło swoje zadanie. Można stwierdzić, że przeprowadzone badania były realizowane w niezmienniej temperaturze.

4. WYNIKI BADAŃ

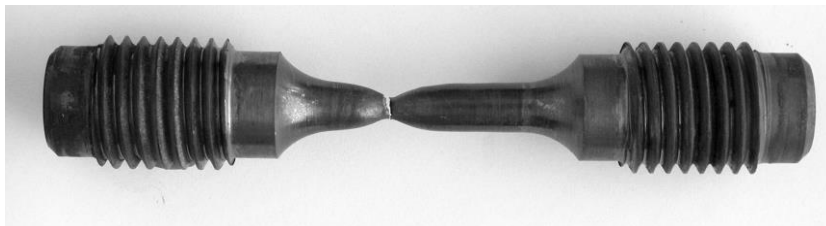
4.1. PRÓBY STATYCZNE

Wszystkie próbki podczas próby statycznego rozciągania uległy pęknięciu w obszarze bazy pomiarowej ekstensometru. Na rysunku 4.1 pokazano przykłady złomów uzyskanych podczas próby statycznego rozciągania w trzech różnych temperaturach.

a)



b)



c)

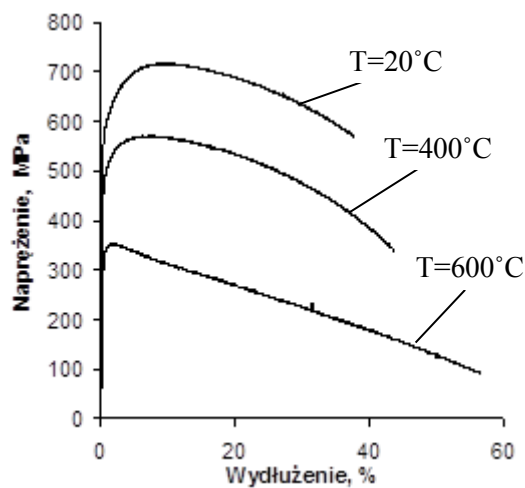


Rys. 4.1. Przykłady uszkodzenia próbek podczas prób statycznego rozciągania:

a) $T=20^{\circ}\text{C}$, b) $T=400^{\circ}\text{C}$, c) $T=600^{\circ}\text{C}$

Wyniki prób statycznego rozciągania przedstawiono na rysunku 4.2 w formie wykresów rozciągania w układzie współrzędnych wydłużenie próbki ε - naprężenie σ . Naprężenia w próbce poddanej obciążeniu rozciągającemu obliczano dzieląc zarejestrowane podczas próby chwilowe wartości siły obciążającej przez pole przekroju początkowego próbki. Na podstawie wykonanych wykresów rozciągania określono najważniejsze parametry wytrzymałościowe stali P91 (R_m , R_e , $A_{12,5}$, E , Z). Najważniejsze wyniki opracowania prób statycznego rozciągania w postaci parametrów

wytrzymałościowych zestawiono w tabeli 4.1.



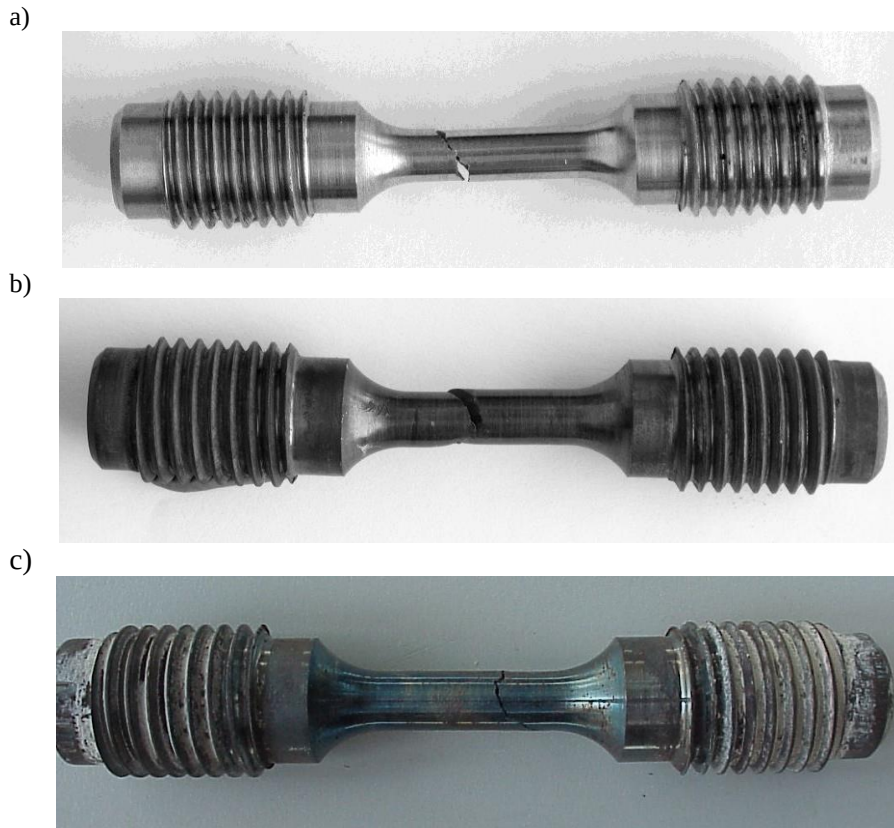
Rys. 4.2. Wykresy statycznego rozciągania

Tabela 4. 1. Właściwości mechaniczne stali P91

$T, ^\circ\text{C}$	$R_{p0,2}, \text{MPa}$	R_m, MPa	$Z, \%$	$A_{12,5}, \%$	E, MPa
20	564	716	62	35	209 850
400	463	571	69	44	183 220
600	317	353	72	56	132 890

4.2. PRÓBY STAŁOAMPLITUDOWE W WARUNKACH NIEZMIENNEJ TEMPERATURY ($T=\text{CONST}$)

Wszystkie badane próbki niezależnie od temperatury i poziomu odkształcenia uległy pęknięciu w obszarze bazy pomiarowej ekstensometru. Na rysunku 4.3 pokazano przykładową postać uszkodzenia badanych próbek uzyskane w trzech temperaturach na poziomie odkształcenia $\varepsilon_{ac}=0,25\%$.

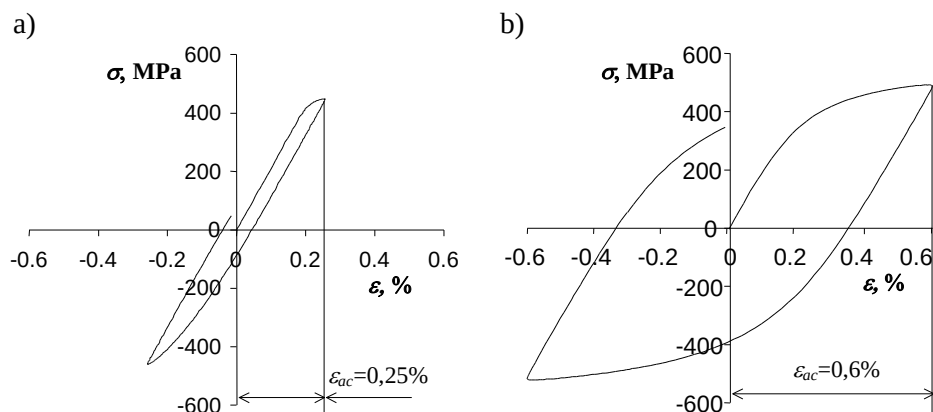


Rys. 4.3. Przykładowa postać uszkodzenia próbek podczas badań zmęczeniowych na poziomie odkształcenia $\varepsilon_{ac}=0,25\%$: a) $T=20^{\circ}\text{C}$, b) $T=400^{\circ}\text{C}$, c) $T=600^{\circ}\text{C}$

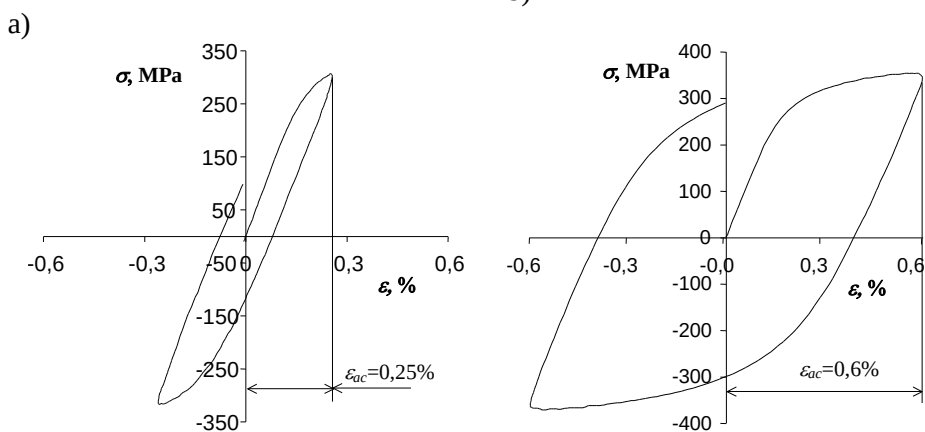
Wyniki badań zmęczeniowych próbek ze stali P91 przedstawiono zgodnie z wymaganiami obowiązującymi podczas opracowywania wyników niskocyklowych badań zmęczeniowych zamieszczonymi w [16]. Wykorzystano najważniejsze wielkości fizyczne (parametry pętli histerezy) mające bezpośredni wpływ na końcowe wyniki opracowania. Zaliczono do nich takie parametry jak: ε_{ap} lub $\Delta\varepsilon_{ap}$ oraz σ_a lub $\Delta\sigma_a$ oraz ΔW_{pl} . Interpretację graficzną parametrów pętli histerezy przyjętych do analizy pokazano na rysunku 2.2.

Wartości wymienionych parametrów pętli określono na podstawie zarejestrowanych podczas prób zmęczeniowych chwilowych wartości siły obciążającej próbkę i jej odkształceń. Wartości naprężeń chwilowych σ w próbce określano dzieląc wartość chwilową siły obciążającej przez pole przekroju początkowego.

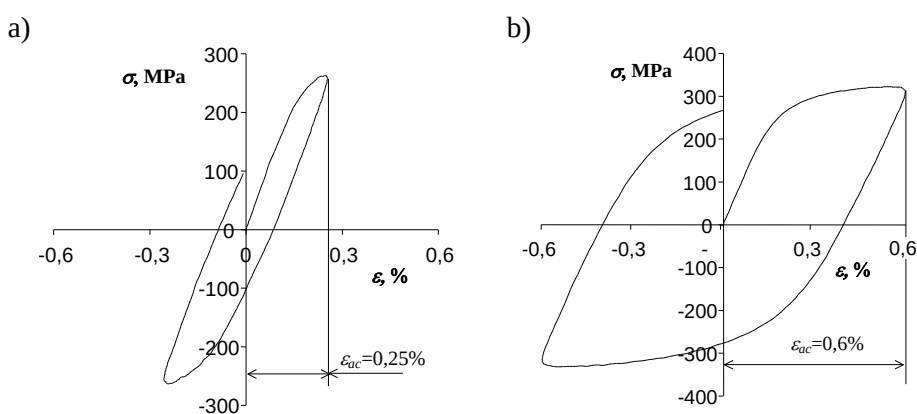
Na rysunkach 4.4 - 4.6 pokazano pierwsze zarejestrowane cykle obciążenia próbki ze stali P91 na najniższym poziomie odkształcenia ($\varepsilon_{ac}=0,25\%$) oraz najwyższym ($\varepsilon_{ac}=0,6\%$) w trzech temperaturach: $T=20^{\circ}\text{C}$, 400°C oraz 600°C .



Rys. 4.4. Pierwszy cykl obciążenia w $T=20^\circ\text{C}$: a) $\epsilon_{ac}=0.25\%$, b) $\epsilon_{ac}=0.6\%$



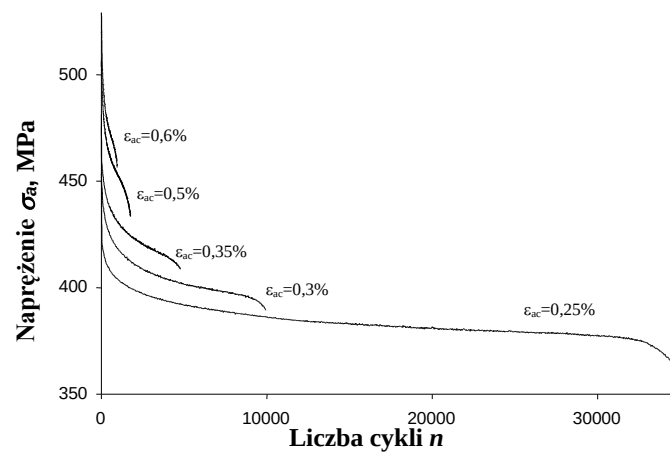
Rys. 4.5. Pierwszy cykl obciążenia w $T=400^\circ\text{C}$: a) $\epsilon_{ac}=0.25\%$, b) $\epsilon_{ac}=0.6\%$



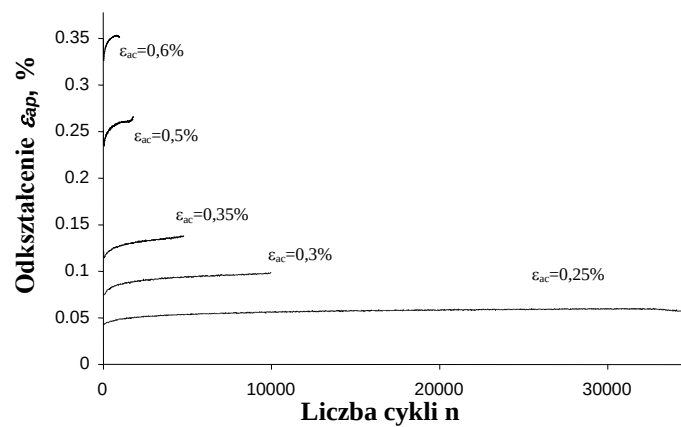
Rys. 4.6. Pierwszy cykl obciążenia w $T=600^\circ\text{C}$: a) $\epsilon_{ac}=0.25\%$, b) $\epsilon_{ac}=0.6\%$

Uzyskane wyniki niskocyklowych badań zmęzeniowych analizowano w kontekście zmian podstawowych parametrów pętli histerezy tj. amplitudy naprężenia σ_a , amplitudy odkształcenia plastycznego ε_{ap} oraz energii odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} w funkcji liczby cykli obciążenia. Na rysunku 4.7 pokazano przykładowe przebiegi zmian tych parametrów w temperaturze $T=20^\circ\text{C}$. Na rysunku 4.8 zamieszczono zmiany naprężenia σ_a w temperaturze 400 i 600°C .

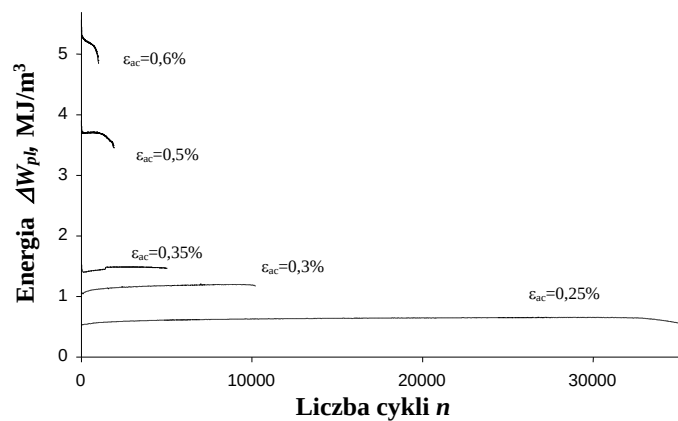
a)



b)

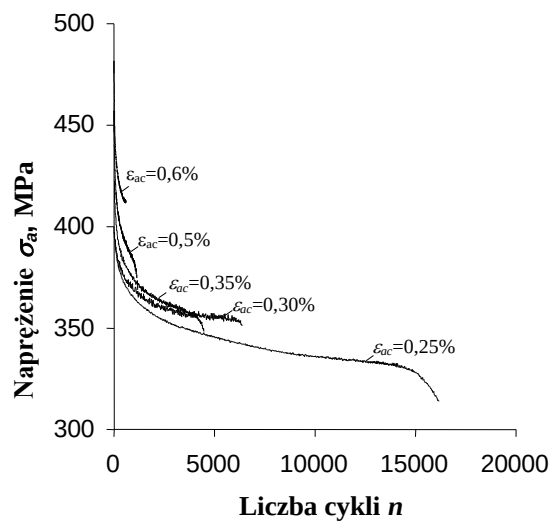


c)

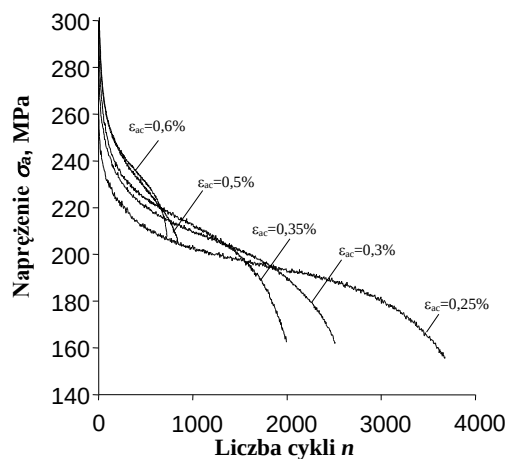


Rys. 4.7. Parametry pętli histerezy w temperaturze $T=20^\circ\text{C}$ w funkcji liczby cykli obciążenia: a) σ_a , b) ϵ_{ap} , c) ΔW_{pl}

a)



b)



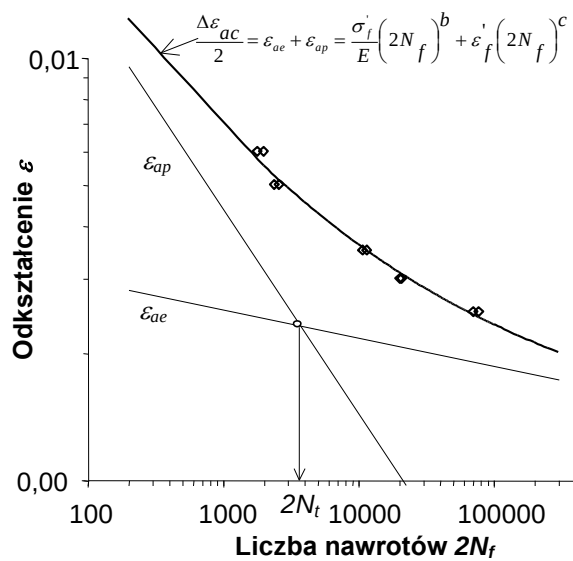
Rys. 4.8. Naprężenie σ_a w funkcji liczby cykli: a) $T=400^\circ\text{C}$, b) $T=600^\circ\text{C}$

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że stal P91 niezależnie od temperatury ulega cyklicznemu osłabieniu. Ze względu na brak stabilizacji właściwości cyklicznych niezbędne dane do wykonania podstawowych charakterystyk zmęczeniowych przyjęto z okresu odpowiadającego połowie trwałości zmęczeniowej. Na rysunku 4.9 zestawiono dla przykładu charakterystyki zmęczeniowe uzyskane dla stali P91 w dwóch temperaturach ($T=20^\circ\text{C}$, oraz $T=600^\circ\text{C}$).

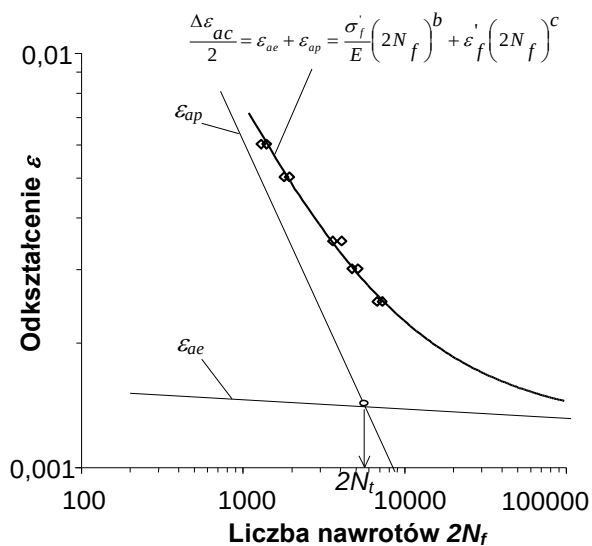
a)

Temperatura	b	c	σ_f' , MPa	ε_f'	E , MPa
$T=20^\circ\text{C}$	-0,0633	-0,5426	825,5	0,2525	205339
$T=600^\circ\text{C}$	-0,0319	-0,5964	260,1	0,2918	145870

b)



c)



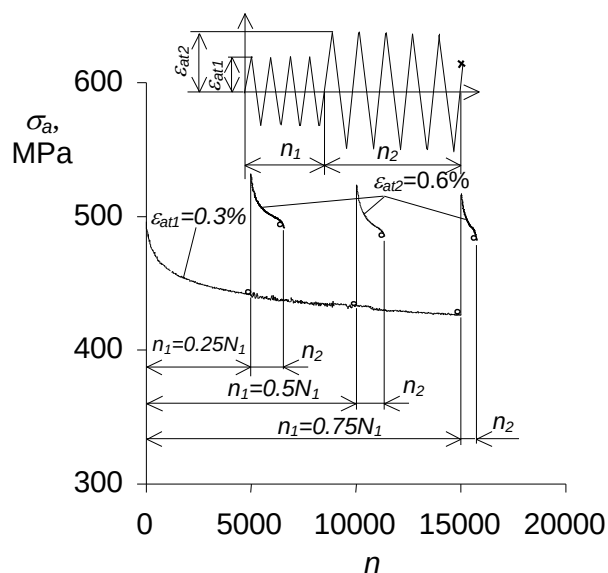
Rys. 4.9. Charakterystyki zmęczeniowe stali P91: a) parametry równania wykresu zmęczeniowego, b) wykres, $T=20^\circ\text{C}$, c) wykres, $T=600^\circ\text{C}$,

4.3. PRÓBY PROGRAMOWANE

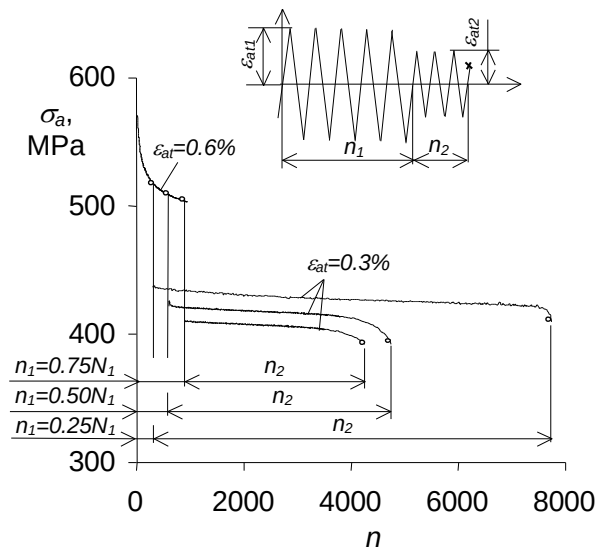
4.3.1. Programy dwustopniowe

Podobnie jak podczas badań stałoamplitudowych w warunkach obciążeń programowanych dwustopniowych obserwowano zmiany podstawowych parametrów pętli histerezy oraz brak wyraźnego okresu stabilizacji. Widoczne było to w postaci zmian podstawowych parametrów pętli na pierwszym stopniu programu obciążenia oraz po zmianie poziomu obciążenia. Dla zilustrowania powyższego na rysunkach 4.10 i 4.11 pokazano przykładowe przebiegi zmian amplitudy naprężenia w funkcji liczby cykli obciążenia podczas realizacji programu obciążenia Lo-Hi oraz Hi-Lo w temperaturze otoczenia oraz w temperaturze 600°C.

a)

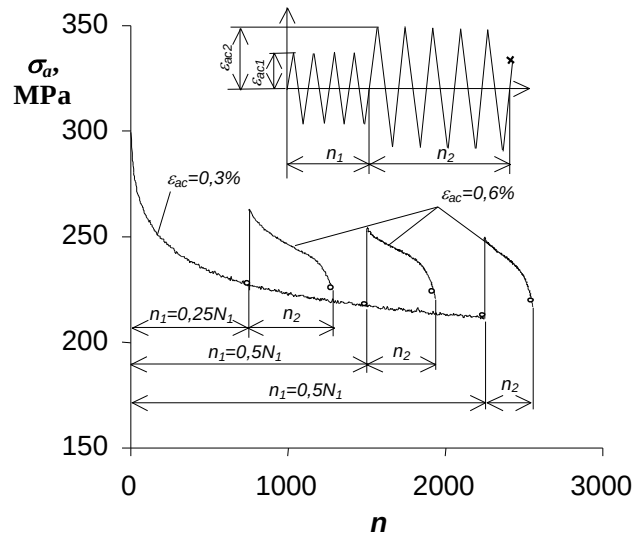


b)

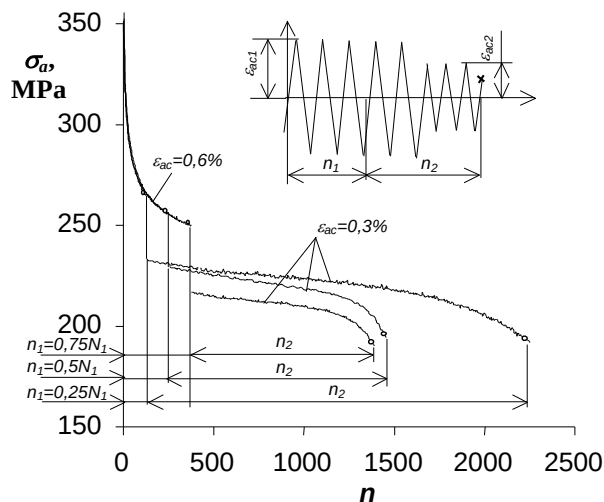


Rys. 4.10. Zmiany σ_a w warunkach obciążenia programowanego ($T=20^\circ\text{C}$): a) Lo-Hi, b) Hi-Lo

a)



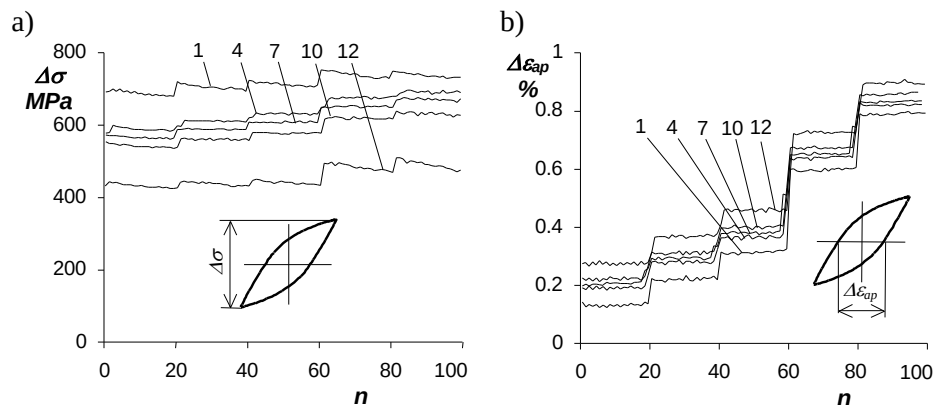
b)



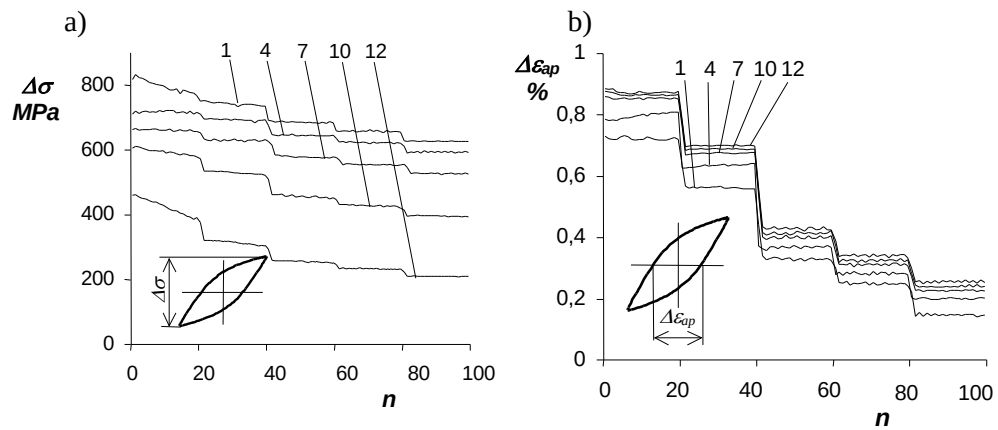
Rys. 4.11. Zmiany σ_a w warunkach obciążenia programowanego ($T=600^\circ\text{C}$): a) Lo-Hi, b) Hi-Lo

4.3.2. Programy wielostopniowe

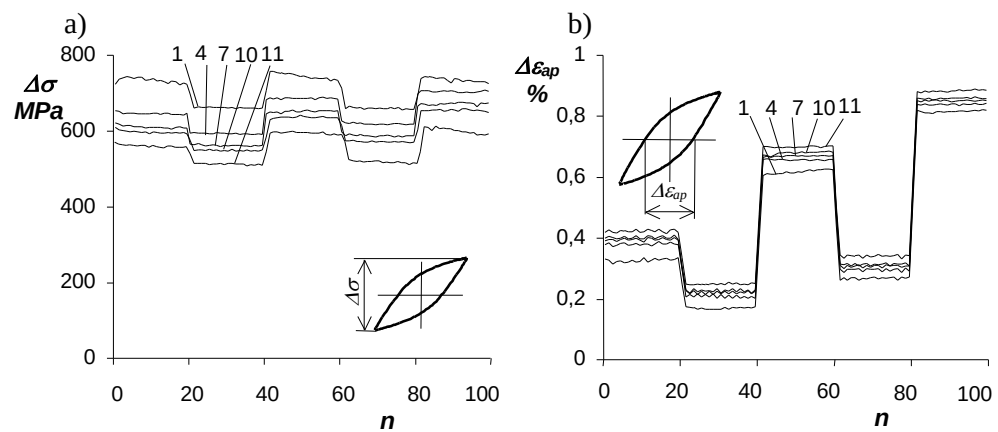
Podobnie jak w przypadku obciążeń stałoamplitudowych i programów dwustopniowych dla zarejestrowanych kolejnych bloków obciążenia zostały określone wartości podstawowych parametrów pętli histerezy tj. naprężenie $\Delta\sigma$ oraz odkształcenie $\Delta\epsilon_{ap}$. Przykładowe wykresy zmian tych parametrów w wybranych blokach obciążenia realizowanych w różnych okresach trwałości w temperaturze 600°C przedstawiono na rysunkach 4.12-4.14. Na rysunkach zaznaczono numery bloków obciążenia.



Rys. 4.12. Parametry pętli w bloku obciążenia Lo-Hi: a) $\Delta\sigma$, b) $\Delta\epsilon_{ap}$



Rys. 4.13. Parametry pętli w bloku obciążenia Hi-Lo: a) $\Delta\sigma$, b) $\Delta\epsilon_{ap}$,

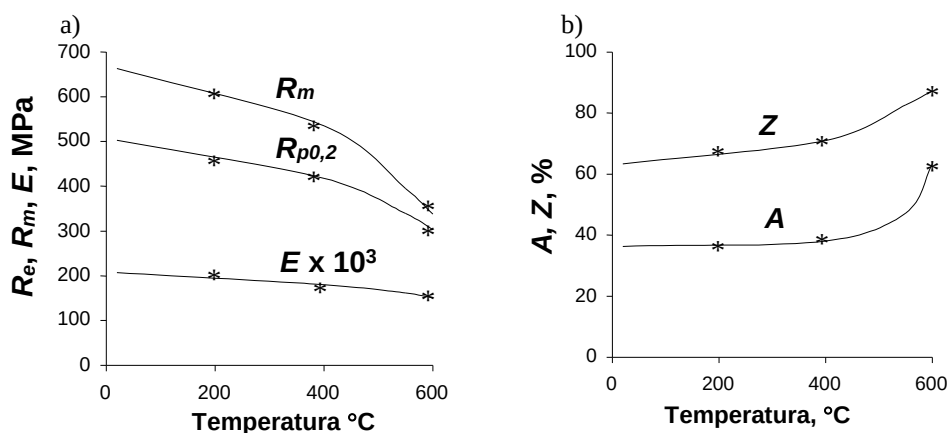


Rys. 4.14. Parametry pętli w bloku obciążenia nieregularnego: a) $\Delta\sigma$, b) $\Delta\epsilon_{ap}$

5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

5.1. WPŁYW TEMPERATURY NA WŁAŚCIWOŚCI STATYCZNE

Parametry wytrzymałościowe stali P91 analizowano w kontekście wpływu temperatury badań na podstawowe parametry mechaniczne wyznaczone w próbie statycznego rozciągania. Na podstawie analizy wykresów rozciągania (rys. 4.2) oraz wartości parametrów wytrzymałościowych zestawionych w tabeli 4.1 można stwierdzić, że wzrost temperatury badania prowadzi do obniżenia granicy plastyczności (R_e). Podobną zależność obserwowano dla wytrzymałości na rozciąganie (R_m) oraz modułu Younga (E) gdzie widoczny był również spadek tego parametru. Obniżeniu właściwości wytrzymałościowych na skutek wzrostu temperatury towarzyszył wzrost wydłużenia ($A_{12,5}$) i przewężenia (Z). Dla zilustrowania powyższych stwierdzeń na rysunku 5.1 pokazano zmiany analizowanych parametrów w zależności od temperatury.



Rys. 5.1. Wpływ temperatury na podstawowe parametry wytrzymałościowe stali P91 wyznaczone w próbie statycznego rozciągania: a) $R_{p0,2}$, R_m , E , b) $A_{12,5}$, Z

Obserwowany podczas prób statycznych wpływ temperatury na właściwości mechaniczne potwierdzają wyniki badań opisywane między innymi w pracach [54, 104-107].

Uzyskane w warunkach obciążeń stałoamplitudowych wyniki wykorzystano do weryfikacji warunków wystąpienia osłabienia lub umocnienia określonych zależnościami (2.1) i (2.2). Wyniki weryfikacji warunków dla trzech temperatur przedstawiono poniżej:

$$\frac{R_{m_20^\circ\text{C}}}{R_{e_20^\circ\text{C}}} = 1,28 \quad (5.1)$$

$$\frac{R_{m_400^{\circ}C}}{R_{e_400^{\circ}C}} = 0,81 \quad (5.2)$$

$$\frac{R_{m_600^{\circ}C}}{R_{e_600^{\circ}C}} = 0,90 \quad (5.3)$$

Uzyskane wyniki wskazują, że nie jest spełniony warunek występowania umocnienia stali P91 obserwowanego w temperaturze 20°C. Natomiast uzyskane wartości relacji pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie R_m a granicą plastyczności R_e w temperaturze 400 i 600°C w pełni potwierdzają obserwowane podczas niskocyklowych badań zmęzeniowych wyraźne osłabienie stali w tych temperaturach. Wskazuje to zatem za zasadne wykorzystywanie tego kryterium do wstępnej oceny właściwości cyklicznych stali P91 w temperaturach podwyższonych.

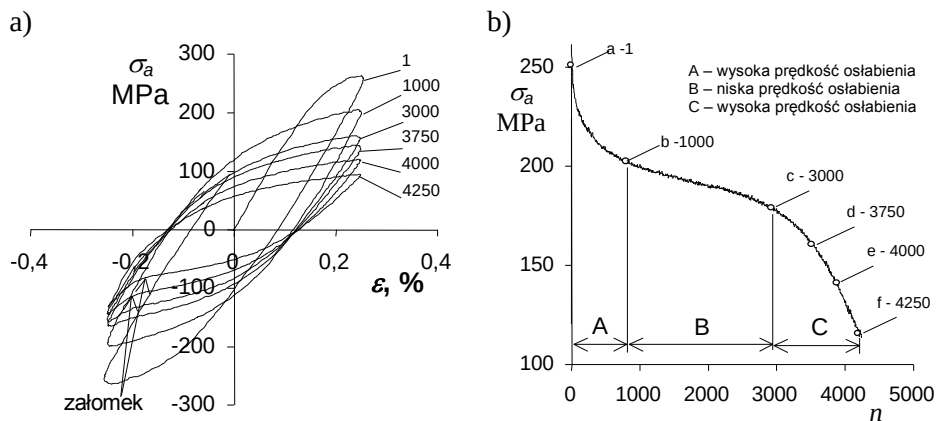
5.2. PRÓBY ZMĘCZENIOWE STAŁOAMPLITUDOWE

5.2.1. Kryterium końca prób zmęczeniowych

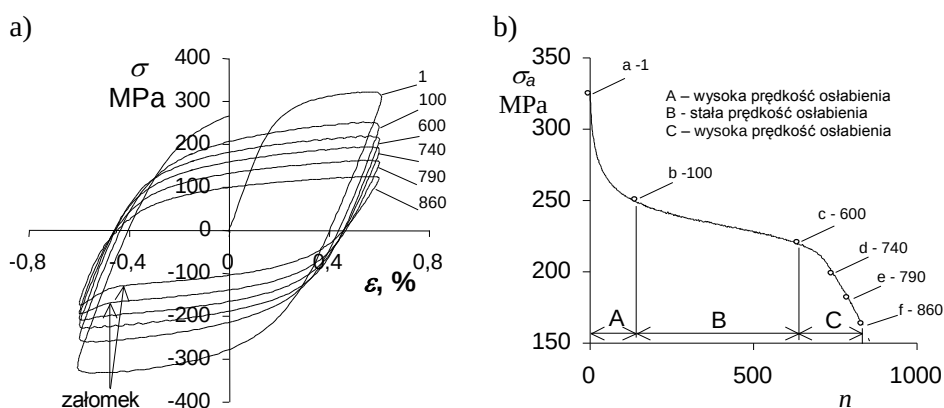
Przeprowadzone w temperaturze otoczenia oraz w temperaturze podwyższonej testy zmęczeniowe stali P91 pozwalają stwierdzić, że występującym podczas badań odkształceniom plastycznym towarzyszą charakterystyczne zjawiska cyklicznego osłabienia stali. Proces cyklicznego osłabienia w sposób szczególny dotyczy testów zmęczeniowych w podwyższonej temperaturze, podczas których dodatkowo ograniczony jest dostęp do części pomiarowej próbki. Brak możliwości wizualnego monitorowania stanu próbki oraz bardzo duże zmiany właściwości cyklicznych (np. obserwowane osłabienie stali) powodują, że proponowane w normach (m. in. w [108]) kryteria końca próby nie pozwalają w sposób jednoznaczny określić momentu inicjacji pęknięcia próbki podczas próby niskocyklowej.

Powoduje to, że wyniki badań w postaci charakterystyk zmęczeniowych w dużej mierze zależą od indywidualnej interpretacji opracowującego wyniki próby zmęczeniowej. Skutkiem tego może być np. zróżnicowanie wyników niskocyklowych badań zmęczeniowych realizowanych przez różne ośrodki badawcze. Zostało to potwierdzone podczas badań międzylaboratoryjnych, w których uczestniczyło Instytutowe Laboratorium Badań Materiałów i Konstrukcji (akredytacja nr AB-372). Z tego też względu zagadnieniem o znaczeniu podstawowym, które należało rozwiązać podczas opracowywania wyników badań to jednoznaczne zdefiniowanie kryterium końca realizowanych prób zmęczeniowych.

Problem znacznych zmian właściwości cyklicznych dotyczył badań zmęczeniowych realizowanych zarówno podwyższonej temperaturze jak i temperaturze otoczenia. Propozycja kryterium inicjacji pęknięcia a tym samym końca próby zawarta w normie w postaci występowania tzw. załomka pętli histerezy na wykresie pętli (rys. 5.2a i 5.3a) nie pozwala w sposób jednoznaczny określić końca próby zmęczeniowej. W celu zilustrowania podjętego problemu na rysunkach 5.2 i 5.3 pokazano dla przykładu zarejestrowane w różnych okresach trwałości pętle histerezy oraz przebieg wykresu jednego z analizowanych parametrów pętli histerezy tj. naprężenia σ_a na poziomach odkształcenia $\varepsilon_{ac}=0,25\%$ i $\varepsilon_{ac}=0,6\%$ w temperaturze 600°C. Na wykresach naprężenia (rys. 5.2b i 5.3b) punktami zaznaczono trwałości, z których zaczerpnięto pętle histerezy pokazane na rysunkach 5.2a i 5.3a.



Rys. 5.2. Zmiany właściwości cyklicznych stali P91 ($T=600^\circ\text{C}$, $\epsilon_{ac}=0,25\%$): a) pętle histerezy, b) zmiany σ_a w funkcji liczby cykli obciążenia

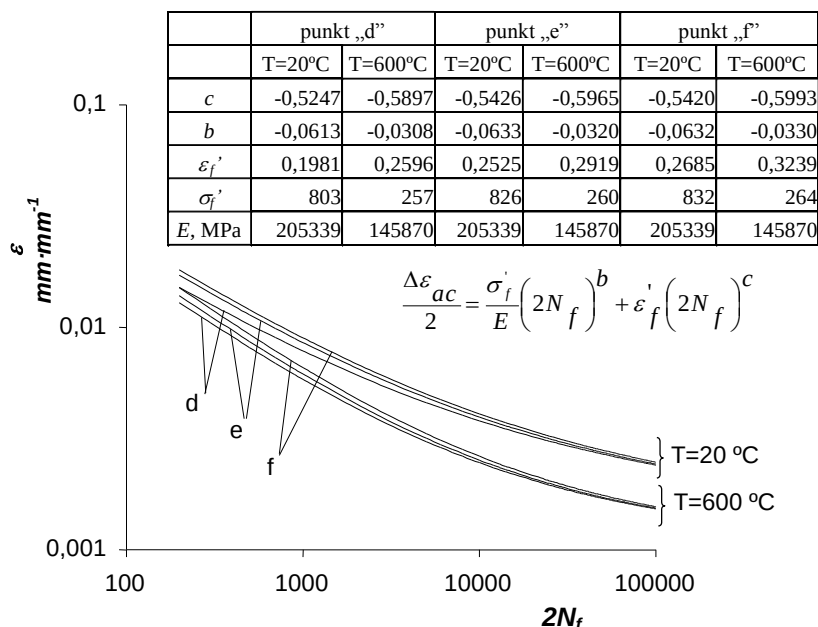


Rys. 5.3. Zmiany właściwości cyklicznych stali P91 ($T=600^\circ\text{C}$, $\epsilon_{ac}=0,6\%$): a) pętle histerezy, b) zmiany σ_a w funkcji liczby cykli

Na podstawie wykresów pokazanych na rysunkach 5.2b i 5.3b, jak również na rysunkach 4.7 i 4.8 można stwierdzić, że na każdym z badanych poziomów odkształcenia ϵ_{ac} można wyróżnić trzy charakterystyczne etapy (A, B, C) o różnej prędkości osłabienia. W etapie „A” prędkość osłabienia jest wysoka i maleje wraz z kolejnymi cyklami obciążenia. W etapie „B” prędkość osłabienia jest zdecydowanie mniejsza i się nie zmienia. W przypadku stali P91 etap ten występował zawsze niezależnie od poziomu odkształcenia i temperatury i był zdecydowanie najdłuższy. W ostatnim etapie „C” prędkość osłabienia ponownie wzrasta. Podczas tego etapu zostaje zainicjowane pęknięcie, które wraz z kolejnymi cyklami obciążenia rozwija się aż do powstania pęknięcia zmęczeniowego. Należy zaznaczyć, że wymienione

etapy najlepiej widoczne są dla wykresów naprężenia σ_a (rys. 4.8). W opisie odkształceniowym (ε_{ap}) jak i energetycznym (ΔW_{pl}) są mniej wyraźne.

Brak jednoznacznego kryterium końca próby zmęczeniowej w postaci np. zdefiniowanej wielkości „załomka” pętli histerezy powoduje, że na etapie opracowywania wyników badań może dochodzić do występowania zróżnicowania końcowych wyników. W zależności od interpretacji opracowującego wyniki możliwe jest przyjęcie jako końca próby zmęczeniowej trwałości odpowiadającym dowolnym punktom znajdującym się w ostatnim etapie osłabienia stali (etap C). Mogą to być przykładowo punkty c, d, e, czy f (rys. 5.2b i 5.3b). Każdy z nich odpowiada jednak innej trwałości zmęczeniowej N . W celu zilustrowania wpływu dokonanego wyboru końca próby na ostateczne wyniki na rysunku 5.4 pokazano charakterystyki uzyskane na podstawie przeprowadzonych badań.



Rys. 5.4. Wpływ końca próby zmęczeniowej na wykres zmęczeniowy

Do analitycznego opisu wykresu zmęczeniowego wykorzystano równanie Mansona-Coffina-Basquina opisane zależnością (2.7). Występujące w równaniu parametry pętli histerezy przyjęto z okresu odpowiadającego połowie trwałości zmęczeniowej $N/2$. Analizując te wykresy można stwierdzić, że przyjęty ostatecznie koniec próby zmęczeniowej ma wpływ na uzyskane charakterystyki zmęczeniowe. Dotyczy to zarówno testów wykonywanych w temperaturze otoczenia ($T_1=20^\circ\text{C}$), jak również w temperaturze podwyższonej ($T_2=600^\circ\text{C}$). Pomimo, że zróżnicowanie wyznaczonych wykresów jest niewielkie to należy

mieć na uwadze fakt, że obliczenia trwałości zmęczeniowej związane są z sumowaniem uszkodzeń, co wiąże się z koniecznością wielokrotnego korzystania z charakterystyki zmęczeniowej. Z tego względu nawet niewielkie błędy wynikające z interpretacji wyników badań są wielokrotnie sumowane (podczas obciążenia wielostopniowego), co może w rezultacie prowadzić do znacznego zróżnicowania wyników obliczeń i badań.

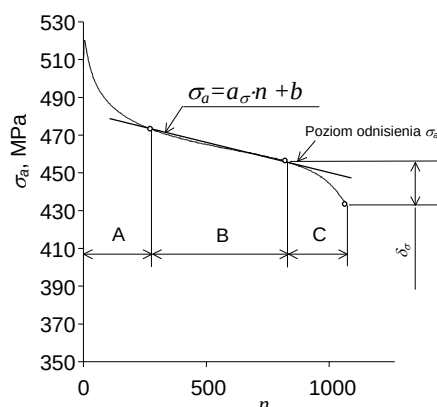
Ze względu na stwierdzony wpływ przyjętego końca próby zmęczeniowej na uzyskane charakterystyki podjęto prace mające na celu jednoznaczne zdefiniowanie kryterium końca próby. W ramach prowadzonych prac stwierdzono między innymi, że w drugim etapie zmian właściwości cyklicznych (etap B) istnieje możliwość analitycznego opisu zależności pomiędzy parametrami pętli histerezy a liczbą cykli obciążenia. Dla przykładu zależność pomiędzy wartością naprężenia σ_a a liczbą cykli n opisano zależnością o postaci:

$$\sigma_a = a_\sigma \cdot n + k \quad (5.4)$$

gdzie:

a_σ - współczynnik kierunkowy prostej regresji,
 k - wyraz wolny w równaniu prostej regresji.

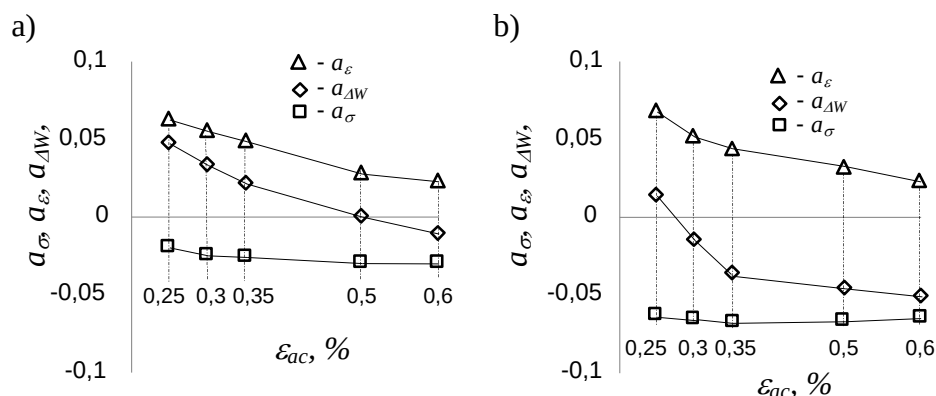
Na rysunku 5.5 wyjaśniono powyższe zagadnienie na przykładowym wykresie zmian naprężenia σ_a na jednym poziomie odkształcenia.



Rys. 5.5. Interpretacja kryterium końca próby niskocyklowej

Analizowano również możliwości aproksymowania liniami prostymi pozostałych parametrów pętli histerezy równaniem (5.4). Na rysunku 5.6 zestawiono wartości współczynników kierunkowych prostych regresji a_σ , a_ε , a_{AW} uzyskane dla pozostałych parametrów pętli histerezy pokazanych

m.in. na rysunkach 4.7 i 4.8 w zależności od poziomu odkształcenia całkowitego ε_{ac} dla temperatur ($T=20^{\circ}\text{C}$ i $T=600^{\circ}\text{C}$).



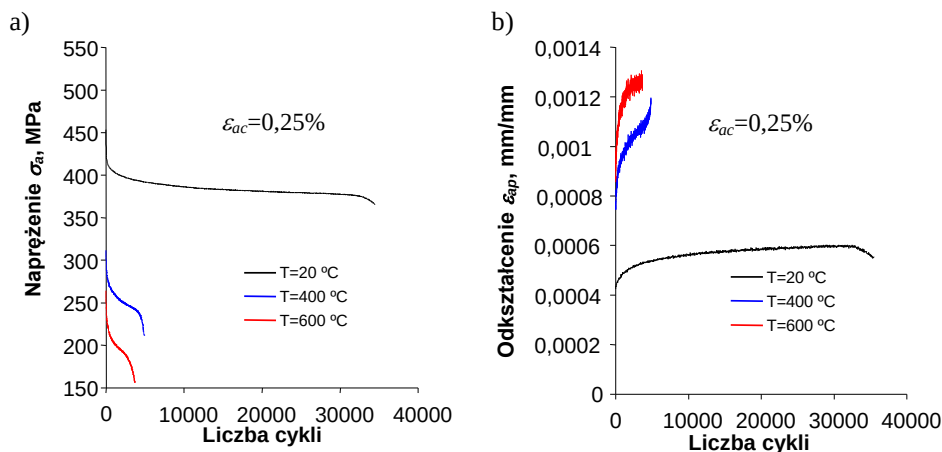
Rys. 5.6. Współczynniki kierunkowe prostych regresji opisujących zmiany parametrów pętli histerezy: a) $T=20^{\circ}\text{C}$ b) $T=600^{\circ}\text{C}$

Na podstawie analizy tych współczynników stwierdzono, że na przebieg zmian badanych właściwości cyklicznych tj. amplitudy naprężenia σ_a , amplitudy odkształcenia plastycznego ε_{ap} oraz energii odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} znacząco wpływa poziom odkształcenia całkowitego ε_{ac} oraz temperatura. Zwiększenie prędkości osłabienia pod wpływem temperatury jest szczególnie widoczne w opisie naprężeniowym. Uzyskane wyniki badań dotyczące większych zmian właściwości cyklicznych w podwyższonych temperaturach stanowią potwierdzenie wyników uzyskanych przez innych autorów [20, 21, 109].

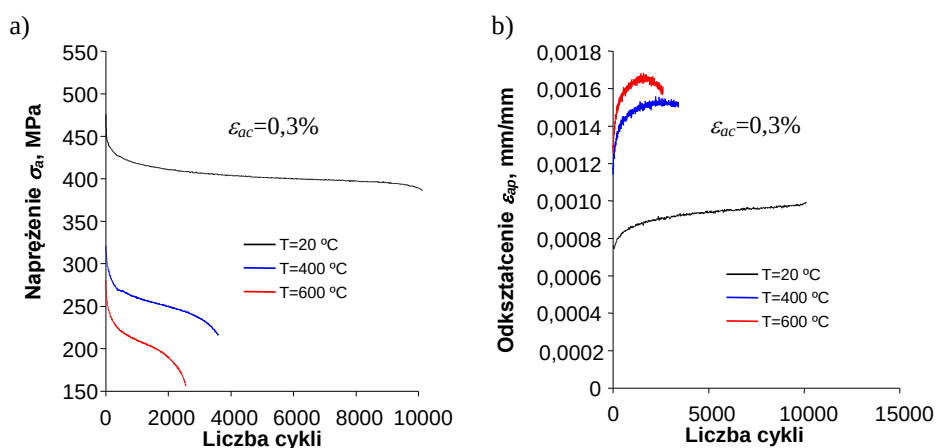
Wykorzystując możliwość analitycznego opisu wykresów parametrów pętli histerezy autorzy prac [110, 111] zaproponowali kryterium końca próby zmęczeniowej prowadzonej w temperaturze podwyższonej w obszarze niskocyklowego zmęczenia. Warunkiem wykorzystania propozycji jest określenie wartości kryterialnej parametru δ_{σ} (rys. 5.6). Można go przyjąć zgodnie z propozycją podaną np. w normie [15]. Wartość δ_{σ} może wynosić do kilku procent wartości parametru pętli histerezy σ_a z okresu określonego na poziomie odniesienia (punkt styczności prostej regresji i wykresu zmian naprężenia σ_a). Wartość δ_{σ} zależy zarówno od poziomu odkształcenia ε_{ac} jak i temperatury badań. Dla przykładu obniżenie amplitudy naprężenia σ_a o 5 % odpowiada wartości parametru $\delta_{\sigma}=19\div24$ MPa w temperaturze otoczenia oraz $\delta_{\sigma}=10\div12$ MPa w temperaturze podwyższonej. Sformułowane kryterium może być zastosowane dla przypadków, gdy podczas obciążenia zmiennego badany materiał podlega jedynie procesowi osłabienia lub umocnienia. Kryterium końca próby zmęczeniowej zostało szczegółowo omówione w pracach [110, 111].

5.3. WPŁYW TEMPERATURY NA ZMIANY WŁAŚCIWOŚCI CYKLICZNYCH

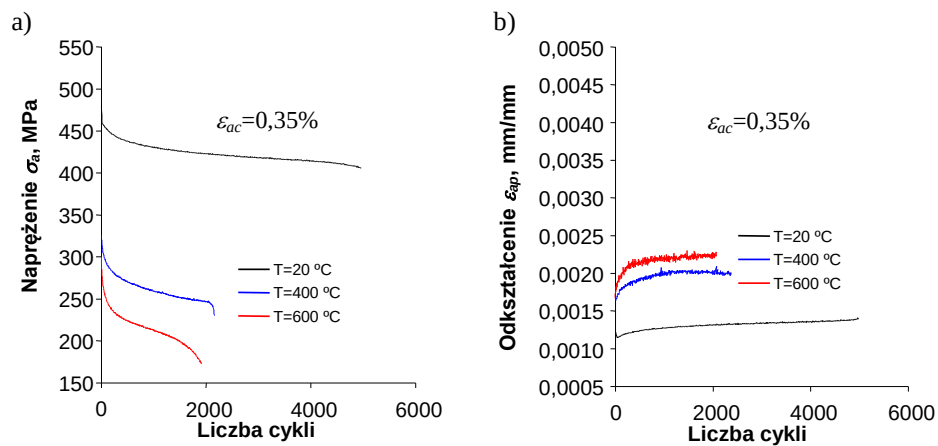
Podczas niskocyklowych badań zmęczeniowych opisywanych w niniejszej pracy obserwowano zmiany podstawowych parametrów pętli histerezy w funkcji liczby cykli obciążenia. Szczegółowo zmiany parametrów pętli omówiono w artykułach naukowych opracowanych na bazie uzyskanych wyników [112-122]. W celu określenia wpływu temperatury na właściwości cykliczne na rysunkach 5.7-5.11 zestawiono przebiegi zmian amplitudy naprężenia σ_a oraz amplitudy odkształcenia plastycznego ε_{ap} w funkcji liczby cykli obciążenia uzyskane podczas badań na pięciu poziomach odkształcenia całkowitego ε_{ac} .



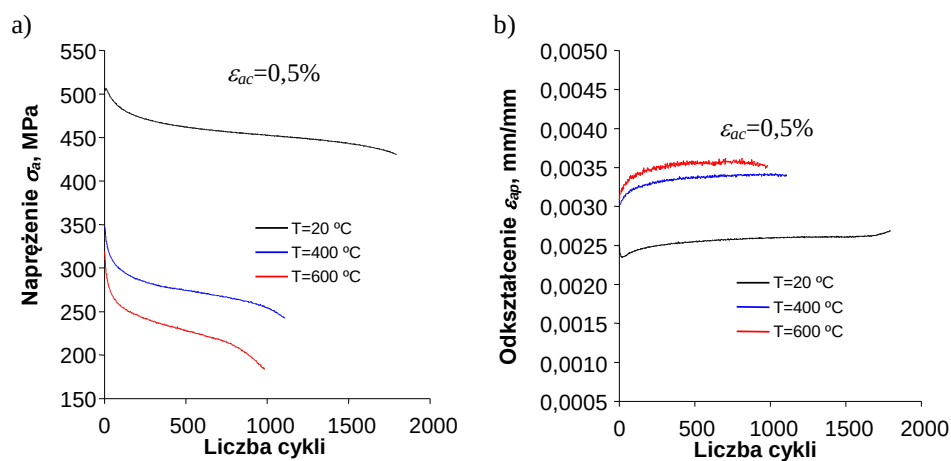
Rys. 5.7. Zmiany parametrów pętli na poziomie $\varepsilon_{ac}=0,25\%$: a) $\sigma_a=f(n)$, b) $\varepsilon_{ap}=f(n)$



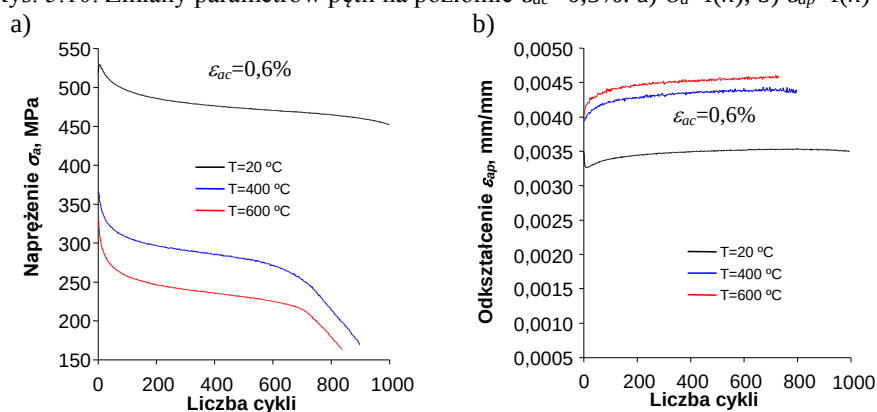
Rys. 5.8. Zmiany parametrów pętli na poziomie $\varepsilon_{ac}=0,3\%$: a) $\sigma_a=f(n)$, b) $\varepsilon_{ap}=f(n)$



Rys. 5.9 Zmiany parametrów pętli na poziomie $\varepsilon_{ac}=0,35\%$: a) $\sigma_a=f(n)$, b) $\varepsilon_{ap}=f(n)$



Rys. 5.10. Zmiany parametrów pętli na poziomie $\varepsilon_{ac}=0,5\%$: a) $\sigma_a=f(n)$, b) $\varepsilon_{ap}=f(n)$



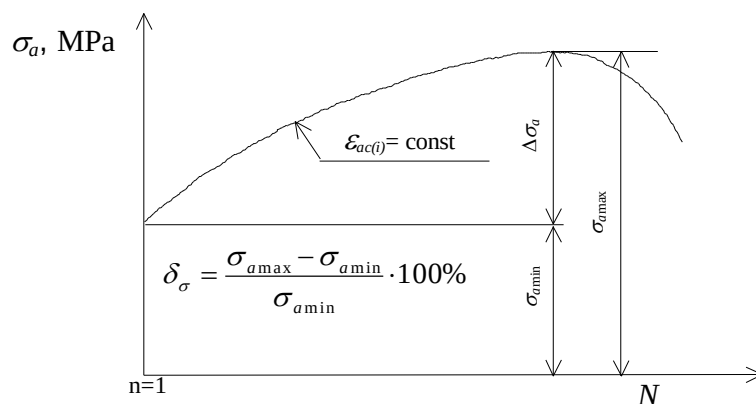
Rys. 5.11. Zmiany parametrów pętli na poziomie $\varepsilon_{ac}=0,6\%$: a) $\sigma_a=f(n)$, b) $\varepsilon_{ap}=f(n)$

Na podstawie analizy uzyskanych wyników można stwierdzić, że chwilowe właściwości cykliczne zależą od stopnia uszkodzenia zmęczeniowego (liczby cykli) oraz temperatury. Natomiast wielkość zmian właściwości cyklicznych zależy od poziomu odkształcenia całkowitego ε_{ac} . Etapy ilustrujące występowanie charakterystycznych zmian właściwości cyklicznych można prowadzić wykorzystując zarówno wykresy zmian naprężenia $\sigma_a = f(n)$ jak również wykresy zmian odkształcenia plastycznego $\varepsilon_{ac} = f(n)$. Szczegółową analizę wymienionych etapów zmian właściwości cyklicznych w trzech różnych temperaturach przeprowadzono w artykułach naukowych [113-122].

W celu oceny czułości parametrów pętli histerezy (σ_a , ε_{ap} , ΔW_{pl}) wprowadzono współczynniki zmian właściwości cyklicznych. δ_σ – dla opisu naprężeniowego, δ_ε – dla opisu odkształceniowego oraz δ_W – dla opisu energetycznego. Dla przykładu, wartości współczynnika zmian właściwości cyklicznych dla opisu naprężeniowego δ_σ wyrażono zależnością:

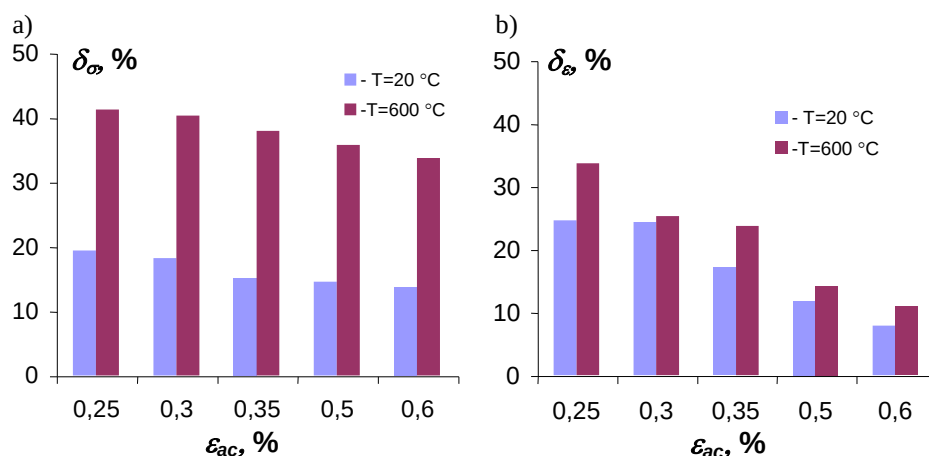
$$\delta_\sigma = \left(\frac{\sigma_{a \max} - \sigma_{a \min}}{\sigma_{a \min}} \right) \cdot 100\% \quad (5.5)$$

Interpretację graficzną współczynnika δ_σ przedstawiono schematycznie na rysunku 5.12.



Rys. 5.12. Graficzna interpretacja współczynnika δ_σ

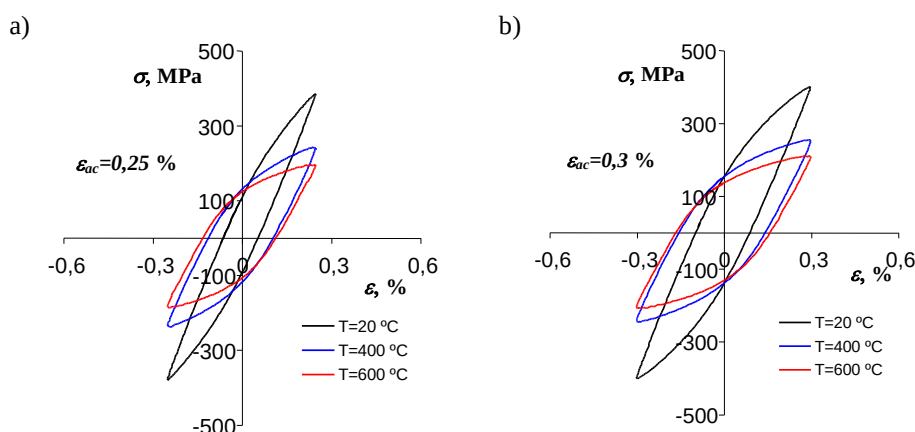
Na rysunku 5.13 pokazano wartości współczynnika czułości opisu w zależności od poziomu odkształcenia. Analizując wykonane wykresy można stwierdzić, że najbardziej czułym na zmiany właściwości cyklicznych jest opis naprężeniowy. Podczas próby zmęczeniowej na jednym poziomie odkształcenia zmiany tego parametru pętli histerezy są największe. Najmniejsze zmiany na wszystkich poziomach odkształcenia dotyczą energii odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} oraz odkształcenia plastycznego ε_{ap} .

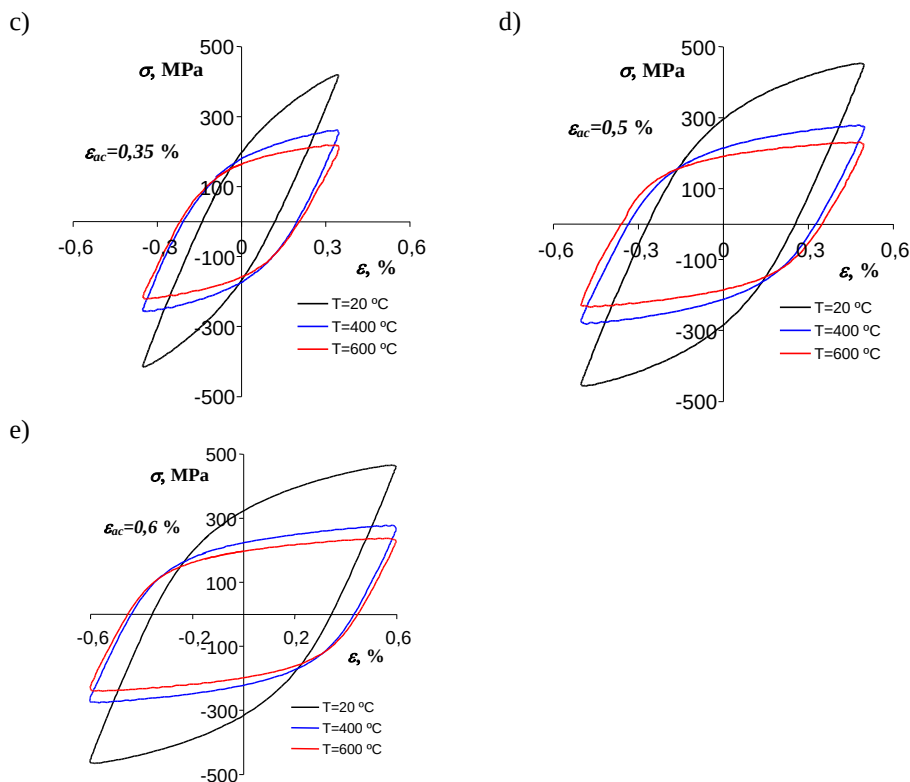


Rys. 5.13. Współczynnik δ w zależności od poziomu odkształcenia: a) δ_{σ} , b) δ_{ϵ}

Na podstawie wykresów pokazanych na rysunkach 5.7-5.11 stwierdzono, że na każdym z poziomów odkształcenia ϵ_{ac} można wyróżnić etapy o różnej prędkości osłabienia. Ich opis jest zgodny z rys. 5.2a oraz 5.3a.

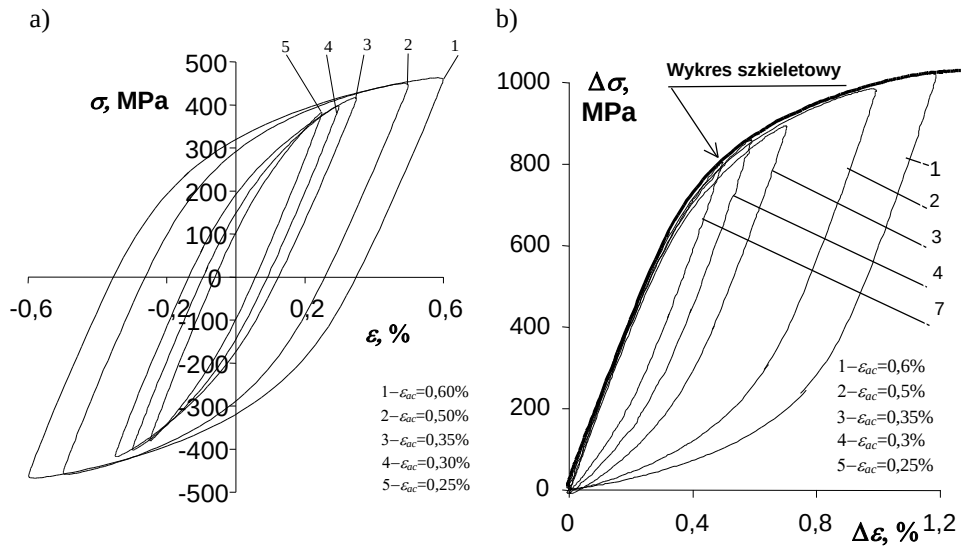
Brak okresu stabilizacji właściwości cyklicznych utrudnia w istotny sposób analityczny opis wyników badań. Ze względu na obserwowane zmiany parametrów pętli histerezy w funkcji liczby cykli obciążenia wartości parametrów pętli histerezy niezbędne do analitycznych opisów właściwości cyklicznych przyjęto określić z okresu odpowiadającego połowie trwałości zmęczeniowej ($n/N=0,5$). W celu zilustrowania wpływu temperatury na kształt pętli na rysunku 5.14 pokazano przykładowe pętle histerezy uzyskane w połowie trwałości zmęczeniowej na pięciu poziomach odkształcenia i w trzech temperaturach.



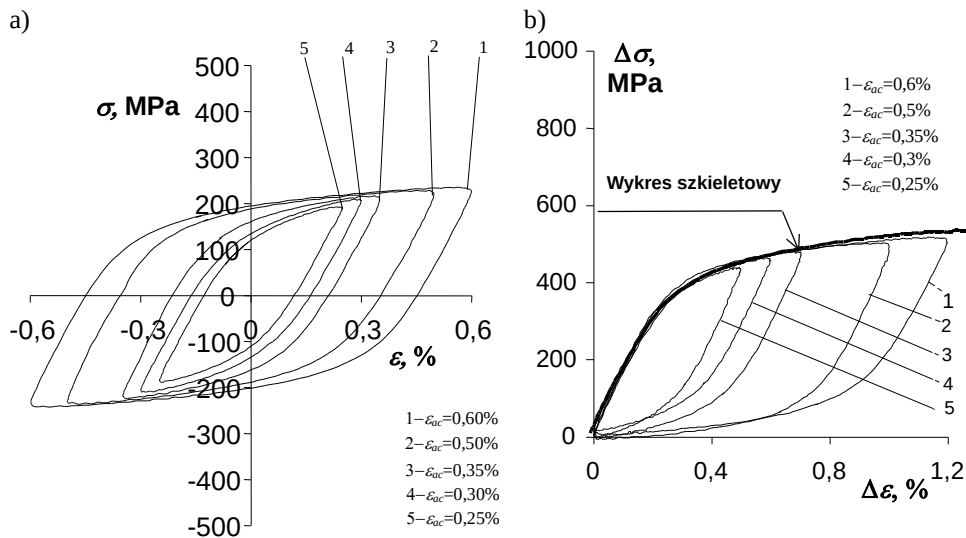


Rys. 5.14. Pętle histerezy na pięciu poziomach odkształcenia i w różnych temperaturach: a) $\epsilon_{ac}=0,25\%$, b) $\epsilon_{ac}=0,3\%$, c) $\epsilon_{ac}=0,35\%$, d) $\epsilon_{ac}=0,5\%$, e) $\epsilon_{ac}=0,6\%$

Dla porównania pętli uzyskanych na różnych poziomach odkształcenia na rysunkach 5.15 i 5.16 pokazano przykładowe pętle histerezy uzyskane w dwóch temperaturach na pięciu realizowanych poziomach odkształcenia ϵ_{ac} . W celu zilustrowania jednej z bardzo ważnych i jednocześnie charakterystycznych właściwości stali P91 pętle pokazano w dwóch układach współrzędnych $\sigma-\epsilon$, $\Delta\sigma-\Delta\epsilon$ oraz dwóch temperaturach.



Rys. 5.15. Pętle histerezy w $T=20^{\circ}\text{C}$ ($n/N=0,5$) w układzie współrzędnych:
a) $\sigma-\varepsilon$, b) $\Delta\sigma-\Delta\varepsilon$



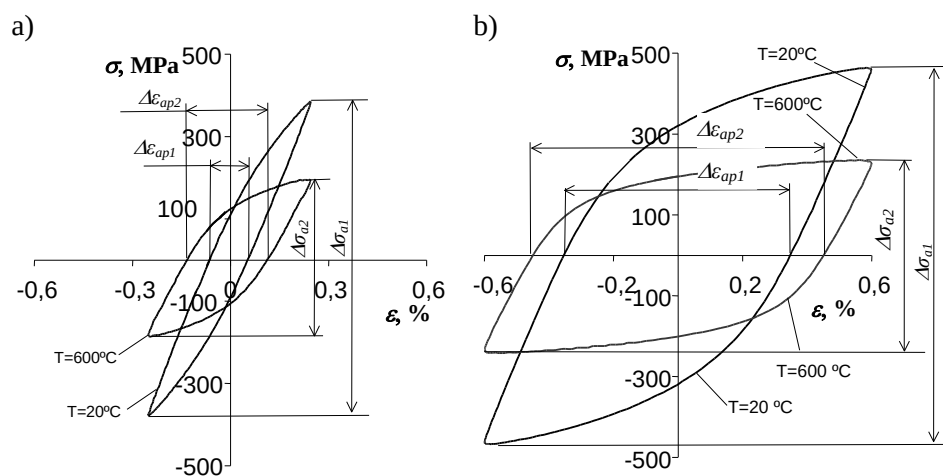
Rys. 5.16. Pętle histerezy w $T=600^{\circ}\text{C}$ ($n/N=0,5$) w układzie: a) $\sigma-\varepsilon$, b) $\Delta\sigma-\Delta\varepsilon$

Na podstawie położenia pętli histerezy na rysunku 5.15b i 5.16b można stwierdzić, że stal P91 podlega zasadzie Masinga. Dla materiałów spełniających tę zasadę górne gałęzie pętli histerezy można opisać jednym równaniem tzw. wykresem szkieletowym, który powstaje poprzez transformację układu współrzędnych do dolnego wierzchołka pętli histerezy (rys. 5.16b i 5.17b).

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta \sigma}{E} + 2 \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (5.6)$$

Tej właściwości stali P91 nie zmienia temperatura badań. Jest to bardzo duża zaleta tego materiału. Możliwość opisu jednym równaniem gałęzi pętli histerezy uzyskanej na dowolnym poziomie odkształcenia pozwala wykorzystywać podczas obliczeń proste analityczne opisy pętli histerezy. Na podstawie badań prowadzonych przez liczne ośrodki badawcze wynika, że temperatura badań może wpływać na omawianą właściwość i ją zmieniać.

Na podstawie analizy porównawczej pętli pokazanych na rysunku 5.14 można zauważyć, że zgodnie z oczekiwaniami wraz ze wzrostem temperatury zmianie ulegają podstawowe parametry pętli histerezy tj. zakres zmian odkształcenia plastycznego $\Delta \varepsilon_{ap}$ oraz zakres naprężenia $\Delta \sigma$. W pracy dokonano analizy porównawczej pętli histerezy uzyskanych na tych samych poziomach odkształcenia w różnych temperaturach. Ze względu na występujące ciągłe zmiany właściwości cyklicznych w obydwu temperaturach i brak okresu stabilizacji do porównania przyjęto pętle histerezy z okresu odpowiadającego połowie trwałości zmęczeniowej ($n/N=0,5$). Na rysunku 5.17 przedstawiono przykładowe pętle uzyskane w temperaturach 20 i 600°C na dwóch poziomach odkształcenia ($\varepsilon_{ac}=0,25\%$, $\varepsilon_{ac}=0,6\%$).

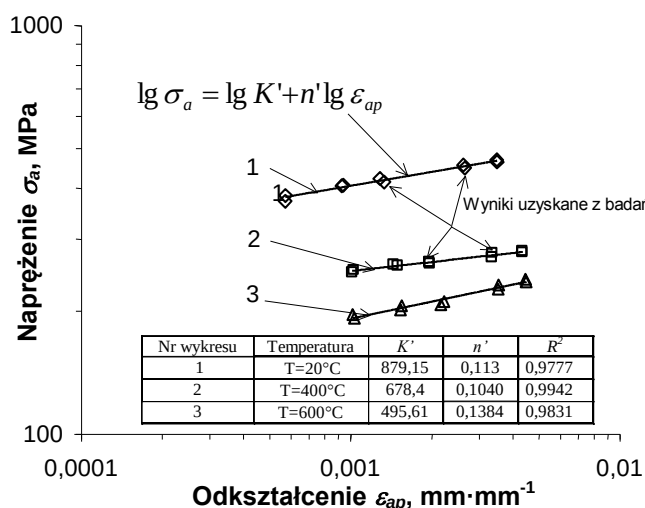


Rys. 5.17. Pętle histerezy w połowie trwałości zmęczeniowej dla temperatur 20 i 600°C: a) $\varepsilon_{ac}=0,25\%$, b) $\varepsilon_{ac}=0,6\%$

Zgodnie z oczekiwaniami, zakres naprężenia $\Delta \sigma_2$ dla pętli uzyskanej w temperaturze podwyższonej jest zdecydowanie mniejszy od zakresu $\Delta \sigma_1$ pętli uzyskanej w temperaturze pokojowej. W przypadku zakresu odkształcenia plastycznego $\Delta \varepsilon_{ap}$ sytuacja jest odwrotna. W temperaturze podwyższonej zakres

$\Delta\epsilon_{ap}$ jest zdecydowanie większy od analogicznego odkształcenia w temperaturze otoczenia. W celu porównania parametrów pętli na wszystkich poziomach odkształcenia i sformułowania wniosków ogólnych dokonano ich analitycznego opisu. Do opisu zależności pomiędzy naprężeniami σ_a a odkształceniami ϵ_{ap} na pięciu poziomach przyjęto równanie (2.3).

Uzyskane wartości parametrów pętli σ_a i ϵ_{ap} z okresu odpowiadającego połowie trwałości zmęczeniowej ($n/N=0,5$) opracowano metodą najmniejszych kwadratów wyznaczając współczynniki i wykładniki prostej regresji opisywanej równaniem (2.3). Wykres odkształcenia uzyskany w wyniku aproksymacji parametrów pętli (σ_a i ϵ_{ap}) z okresów odpowiadających połowie trwałości zmęczeniowej pokazano na rysunku 5.19. Na rysunku zamieszczono również równanie wykorzystane podczas aproksymacji wyników badań.



Rys. 5.19. Wykresy odkształcenia stali P91

Na podstawie wykonanych wykresów można stwierdzić, że wpływ temperatury na zakres odkształcenia plastycznego $\Delta\epsilon_{ap}$ jest widoczny na wszystkich poziomach odkształcenia i wzrasta wraz z ich obniżaniem. W celu określenia wpływu temperatury na zakres zmian odkształcenia plastycznego wprowadzono współczynnik wzrostu zakresu odkształceń plastycznych liczony z zależności:

$$\delta_{\Delta\epsilon} = \frac{\Delta\epsilon_{ap(600)} - \Delta\epsilon_{ap(20)}}{\Delta\epsilon_{ap(20)}} \cdot 100\% \quad (5.7)$$

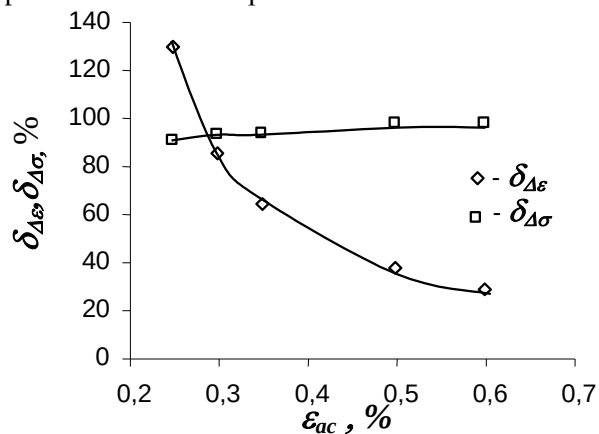
gdzie:

$\Delta\epsilon_{ap(600)}$ - zakres odkształcenia plastycznego w temperaturze $T_2=600^\circ\text{C}$, ($n/N=0,5$),

$\Delta\epsilon_{ap(20)}$ - zakres odkształcenia plastycznego w temperaturze $T_1=20^\circ\text{C}$, ($n/N=0,5$).

Wzrost zakresu naprężeń $\delta_{\Delta\sigma}$ obliczano z analogicznej zależności, w której uwzględniono zakresy naprężeń $\Delta\sigma_a$. Na rysunku 5.20 pokazano procentowe

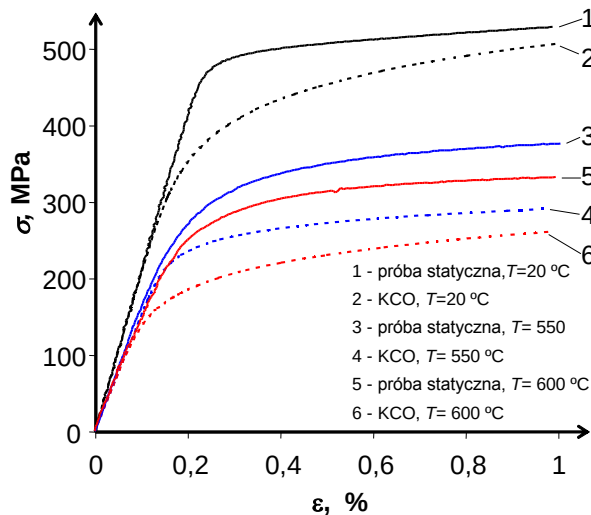
zwiększenie zakresu odkształceń plastycznych $\Delta\varepsilon_p$ oraz zakresu naprężeń $\Delta\sigma_a$ na poszczególnych poziomach odkształcenia całkowitego ε_{ac} na skutek zmiany temperatury z poziomu $T=20^\circ\text{C}$ na poziom $T=600^\circ\text{C}$.



Rys. 5.20. Wpływ poziomu odkształcenia oraz temperatury na zmiany zakresu odkształceń plastycznych

Największy wzrost zakresu odkształceń plastycznych w temperaturze 600°C występuje na poziomie $\varepsilon_{ac}=0,25\%$ i wynosi prawie 130%. Najmniejszy wpływ temperatury na wzrost odkształceń plastycznych występuje na poziomie odkształcenia $\varepsilon_{ac}=0,6\%$. ($\delta_{\Delta\varepsilon}=30\%$). Na wszystkich poziomach odkształcenia w temperaturze $T=600^\circ\text{C}$ zakres naprężenia $\Delta\sigma_a$ uległ obniżeniu o około 90% w stosunku do zakresu naprężenia obserwowanego na tych samych poziomach odkształcenia w temperaturze otoczenia.

Cykliczne osłabienie próbek obserwowane podczas badań stałoamplitudowych potwierdza również wzajemne położenie wykresów cyklicznego oraz statycznego odkształcenia. Przykładowe wykresy statycznego oraz cyklicznego odkształcenia uzyskane podczas badań pokazano na rysunku 5.21. Wykresy cyklicznego odkształcenia aproksymowano równaniem (2.12). Ze względu na brak okresu stabilizacji niezbędne parametry równania określono z okresu odpowiadającego połowie trwałości zmęczeniowej natomiast moduł Younga E wyznaczono podczas próby statycznej.

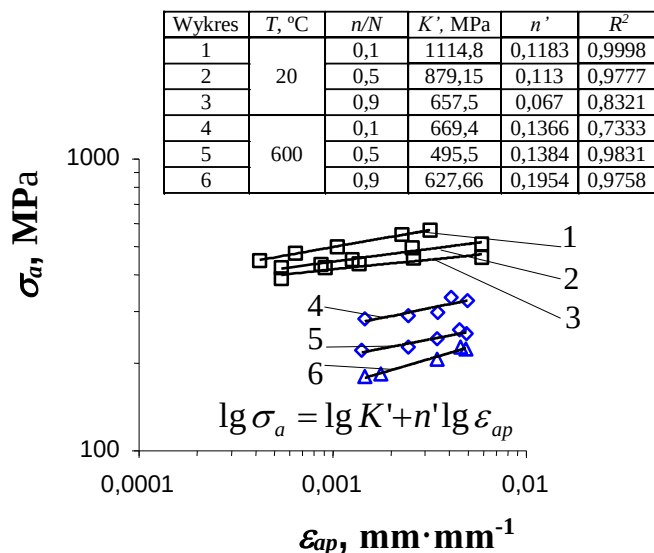


Rys. 5.21. Wzajemne położenie wykresów statycznego oraz cyklicznego odkształcenia

Na podstawie wykonanych wykresów można stwierdzić, że niezależnie od temperatury badań, wykresy cyklicznego odkształcenia są zawsze położone poniżej wykresów statycznego odkształcenia. Powyższe stanowi potwierdzenie obserwowanego wcześniej cyklicznego osłabienia badanej stali.

Jak już wspomniano wcześniej, przedstawione na rysunku 5.19 analityczne opisy właściwości cyklicznych dotyczą połowy trwałości zmęczeniowej ($n/N=0,5$). Ze względu na występujące zmiany parametrów pętli w funkcji liczby cykli i brak okresu stabilizacji okres ten przyjęto jako reprezentatywny dla opisu właściwości cyklicznych. Na podstawie wykresów parametrów pętli pokazanych na rysunkach 5.7 – 5.11 można stwierdzić, że opisy te zależą od okresu trwałości z jakiego zostały zaczerpnięte parametry pętli histerezy w nich wykorzystywane (σ_a i ε_{ap}). Na podstawie przedstawionych wyników badań (rys. 5.20) można stwierdzić, że problem ten dotyczy przede wszystkim badań zrealizowanych w temperaturze podwyższonej (400 i 600°C). Jest to spowodowane faktem, że w temperaturach podwyższonych zmiany parametrów pętli w funkcji liczby cykli obciążenia są zdecydowanie większe.

W celu zilustrowania wpływu okresu trwałości na opisy analityczne na rysunku 5.22 pokazano wykresy cyklicznego odkształcenia opisanego równaniem (2.3) uzyskane dla trzech różnych okresów trwałości ($n_i/N=0,1; 0,5; 0,9$).



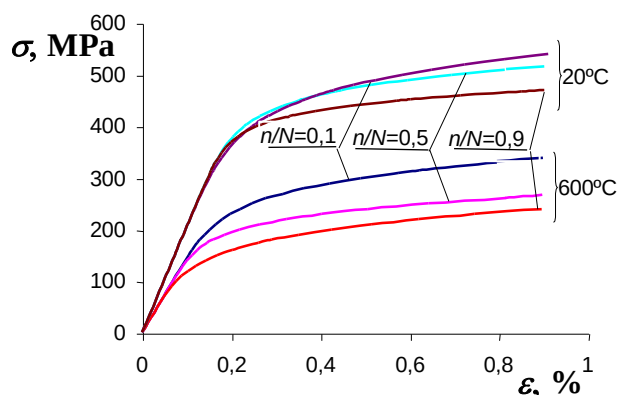
Rys. 5.22. Wykresy cyklicznego odkształcenia uzyskane w różnych okresach trwałości

Położenie wykresów pokazanych na rysunku stanowi potwierdzenie większych zmian parametrów pętli histerezy w funkcji liczby cykli w temperaturach podwyższonych (400 i 600°C) w stosunku do zmian tych parametrów w temperaturach otoczenia $T=20^\circ\text{C}$.

Współczynniki i wykładniki równania (2.3) (n' i K') są wykorzystywane między innymi podczas modelowania odkształceń i naprężeń. Do analitycznego opisu wykresu odkształcenia służy między innymi równanie (2.12).

Poprzez transformację skali bardzo łatwo przekształcić równanie wykresu cyklicznego w równanie opisujące odpowiednie gałęzie pętli histerezy [55]. Powyższe zagadnienie przedstawiono na rysunkach 5.15 i 5.16.

Analityczny opis gałęzi pętli pozwala prowadzić np. obliczenia pola pętli a tym samym analizę kumulacji energii czy odkształceń. Z przedstawionych na rysunku 5.22 wykresów wynika, że wyniki trwałości elementów konstrukcyjnych uzyskane z obliczeń i badań w przypadku temperatur podwyższonych mogą charakteryzować się pewnym zróżnicowaniem. Na rysunku 5.23 pokazano skutki zmian parametrów pętli histerezy oraz ich wpływ na położenie wykresu cyklicznego odkształcenia opisanego równaniem (2.3) w przypadku temperatur otoczenia oraz temperatury podwyższonej $T=600^\circ\text{C}$.

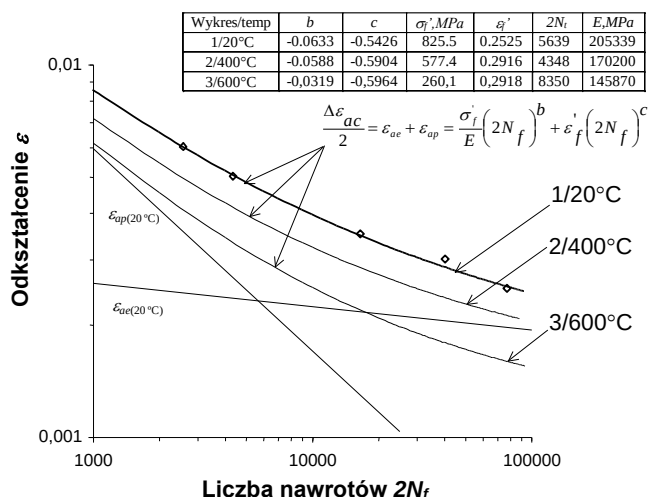


Rys. 5.23. Wykresy cyklicznego odkształcenia w zależności od okresu trwałości

Jak należało oczekiwać, w temperaturze podwyższonej okres trwałości przyjęty do określenia danych materiałowych ma zdecydowanie większy wpływ na uzyskane wykresy. Zróżnicowanie położenia wykresów jest zdecydowanie większe w przypadku badań zrealizowanych w temperaturze podwyższonej ($T=600^{\circ}\text{C}$).

5.4. WPŁYW TEMPERATURY NA TRWAŁOŚĆ

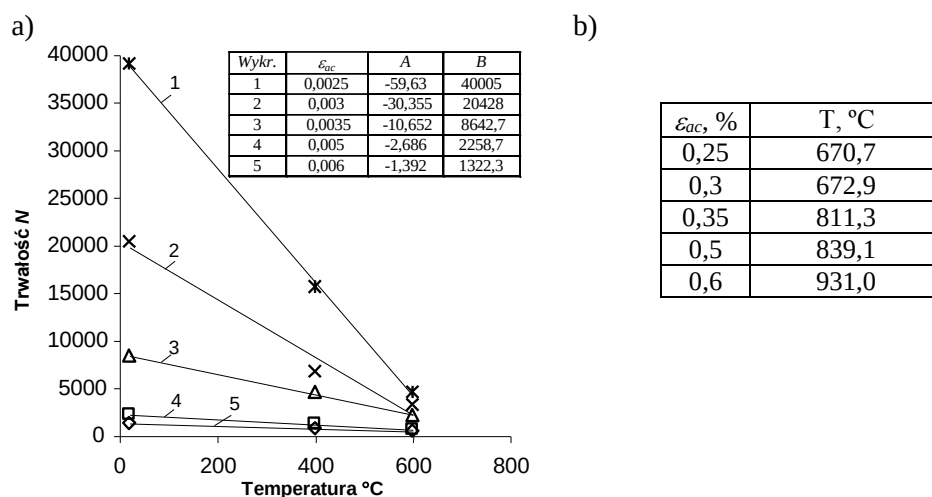
Zgodnie z normą [15] wykresy zmęczenia w układzie bilogarytmicznym aproksymowano równaniem (2.7). Uzyskane na poszczególnych poziomach odkształcenia wyniki trwałości zmęczeniowej ($2N_f$) oraz parametry pętli (σ_a , ε_{ap} , ε_{ae}) przyjęto z okresu odpowiadającego połowie trwałości. Wykresy zmęczeniowe uzyskane w wyniku aproksymacji wyników badań prowadzonych w trzech temperaturach pokazano na rysunku 5.24.



Rys. 5.24. Wykresy porównawcze trwałości zmęczeniowej stali P91

Na podstawie przedstawionych wykresów można stwierdzić, że temperatura w sposób istotny wpływa na trwałość zmęczeniową. Jej wpływ zależy od poziomu amplitudy odkształcenia. Jest największy w obszarze najmniejszych realizowanych odkształceń i ulega obniżeniu w miarę wzrostu poziomu odkształcenia.

W pracy doktorskiej dokonano doświadczalnej weryfikacji metody przedstawiania wyników trwałości zmęczeniowej w zależności od temperatury. Propozycję przedstawiono w pracy [123]. Na rysunku 5.25 przedstawiono zestawienie wyników trwałości zmęczeniowej stali P91 w zależności od temperatury oraz poziomu amplitudy odkształcenia całkowitego.



Rys. 5.25. Trwałość zmęczeniowa w zależności od temperatury i poziomu odkształcenia: a) wykresy, b) parametry równania 5.5

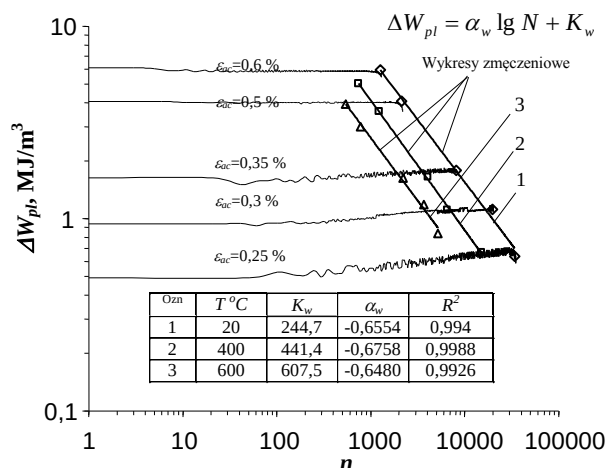
Punkty ilustrujące te same poziomy odkształcenia całkowitego (linie 1-5) w różnych temperaturach opisano prostymi regresji według zależności:

$$N(T) = AT + B \quad (5.8)$$

Na podstawie wykonanych wykresów można stwierdzić, że linie proste, którymi aproksymowano wyniki trwałości zmęczeniowej charakteryzują się zbieżnością do jednego punktu definiowanego temperaturą. W pracy [123] autorzy identyfikują ten punkt jako temperaturę rekrytalizacji. Na podstawie uzyskanych wyników badań określono wartości odciętej dla tego punktu dla wyników badań uzyskanych w ramach poniższej pracy. Wyniki zestawiono w tabeli na rysunku 5.25.

Uzyskane trwałości zmęczeniowe N i obliczone energie odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} pozwoliły na przedstawienie wyników badań w postaci

wykresów zmęzeniowych w układzie współrzędnych podwójnie logarytmicznych liczba cykli do zniszczenia n – energia ΔW_{pl} (rys. 5.26). Wyniki badań uzyskane w temperaturze pokojowej oraz temperaturze podwyższonej aproksymowano prostymi regresji opisanymi równaniem (2.4). Ponadto na rysunku 5.26. w tabeli zestawiono wartości współczynnika kierunkowego α_w oraz wyrazu wolnego K_w równania regresji. Na podstawie analizy uzyskanych wykresów można stwierdzić, że trwałość zmęzeniowa badanej stali w zakresie niskocyklowego obciążenia silnie zależy od wartości odkształcenia ε_{ac} i temperatury badania. Wpływ temperatury jest szczególnie istotny w obszarze niewielkich odkształceń i ulega obniżeniu w miarę wzrostu poziomu odkształcenia. Wzrost odkształcenia zmiennego ε_{ac} powoduje niezależnie od temperatury badania uzyskanie wyższej wartości energii jednostkowej ΔW_{pl} .



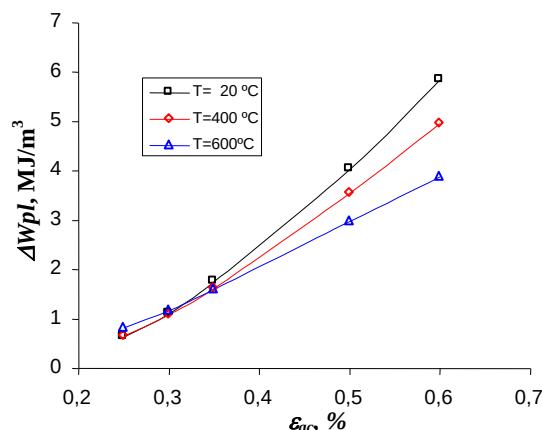
Rys. 5.26. Wykresy zmęzeniowe w ujęciu energetycznym

5.5. WPŁYW TEMPERATURY NA PRZEBIEG KUMULACJI USZKODZEŃ

5.5.1. Próby stałoamplitudowe

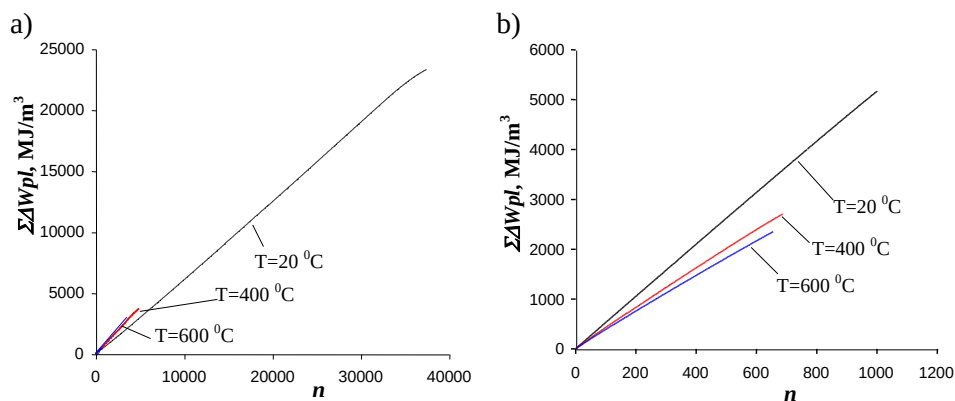
W pracy analizowano zmiany energii jednostkowej ΔW_{pl} w funkcji liczby cykli obciążenia dla trzech różnych temperatur. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że wpływ temperatury na energię odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} zależy od poziomu obciążenia. Na rysunku 5.27 przedstawiono wartości energii jednostkowej ΔW_{pl} zarejestrowane na poszczególnych poziomach odkształcenia i trzech temperaturach. Wartości energii jednostkowej przedstawione na rysunku 5.27 odpowiadają cyklom

obciążenia zarejestrowanym w połowie trwałości zmęczeniowej ($n/N=0,5$). Na podstawie analizy rysunku 5.27 można stwierdzić, że temperatura badania wpływa na wartość jednostkową energii odkształcenia ΔW_{pl} . Wpływ ten jest niewielki w obszarze najmniejszych odkształceń i wzrasta w miarę zwiększania poziomu odkształceń zmiennych.



Rys. 5.27. Wpływ temperatury na energię jednostkową ΔW_{pl}

Znajomość energii jednostkowej ΔW_{pl} w kolejnych cyklach obciążenia wykorzystano do opisu kumulacji energii w próbach zmęczeniowych stali P91. Na rysunku 5.28 pokazano przebieg kumulacji energii na dwóch poziomach odkształcenia i dwóch temperaturach.

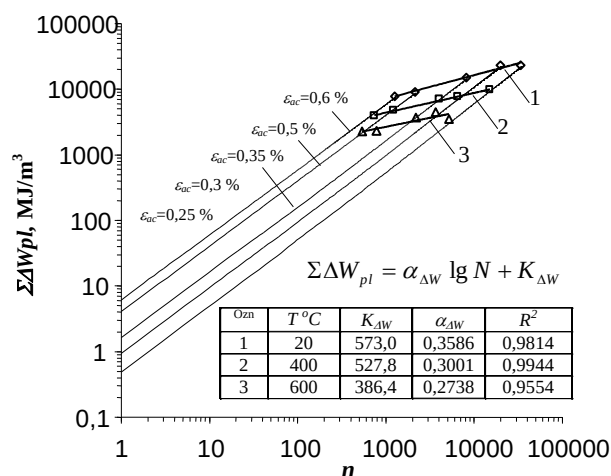


Rys. 5.28. Kumulacja energii na dwóch poziomach ϵ_{ac} : a) $\epsilon_{ac}=0,25\%$, b) $\epsilon_{ac}=0,6\%$

Przebieg kumulacji energii jak również wartość skumulowanej energii $\Sigma \Delta W_{pl}$ jest pewną konsekwencją wartości energii jednostkowej na tych samych poziomach odkształcenia w różnych temperaturach (rys. 5.27). O wzajemnym

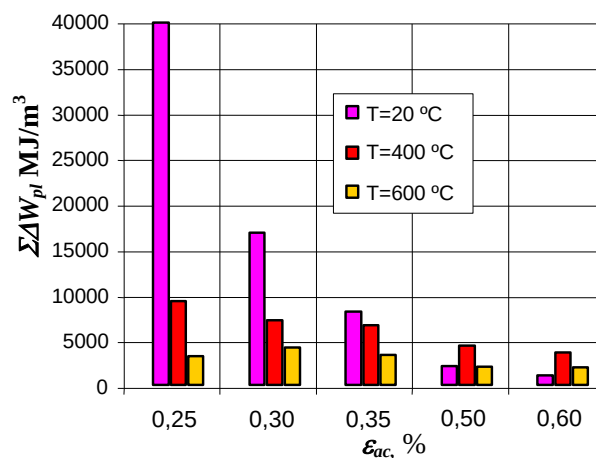
położeniu względem siebie decyduje przede wszystkim poziom odkształcenia a o wartości energii skumulowanej temperatura badań. Niewielkie zmiany energii ΔW_{pl} w funkcji liczby cykli obciążenia obserwowane na rysunku 5.28 spowodowały, że ich przebieg ma zawsze charakter liniowy. Ponadto z przebiegu wykresu kumulacji wynika, że energia skumulowana do chwili pęknięcia $\Sigma \Delta W_{pl}$ zależy zarówno od poziomu odkształcenia, jak i temperatury. Pomiędzy energią skumulowaną $\Sigma \Delta W_{pl}$ na poszczególnych poziomach odkształcenia a trwałością zmęczeniową występuje zależność liniowa. Dla zilustrowania tego na rysunku 5.29 pokazano przykładowe wykresy kumulacji energii na pięciu poziomach odkształcenia ε_{ac} w temperaturze pokojowej. Na rysunku naniesiono również punkty opisujące wartości energii skumulowanej $\Sigma \Delta W_{pl}$ w próbkach na pięciu poziomach odkształcenia całkowitego i trzech temperaturach. Do opisu energii skumulowanej dla różnych poziomów odkształcenia wykorzystano zależność:

$$\Sigma \Delta W_{pl} = \alpha_{\Delta W} \lg N + K_{\Delta W} \quad (5.9)$$



Rys. 5.29. Kumulacja energii ΔW_{pl} podczas badań zmęczeniowych stałoamplitudowych

Energia skumulowana w badanych próbkach do momentu pęknięcia zależy zarówno od temperatury badań oraz poziomu odkształcenia (rys. 5.30).



Rys. 5.30. Energia skumulowana w próbkach do pęknięcia $\Sigma\Delta W_{pl}$

Wpływ temperatury na wielkość energii skumulowanej jest niewielki w obszarze dużych odkształceń ($\epsilon_{ac}=0,6\%$) i wzrasta w miarę obniżania poziomu odkształcenia. Ponadto można stwierdzić, że w temperaturze pokojowej i temperaturze podwyższonej $T=600^{\circ}\text{C}$ energia skumulowana zależy od odkształcenia i wzrasta w miarę jego obniżania. Wraz ze wzrostem temperatury wpływ odkształcenia na poziom energii skumulowanej ulega obniżeniu. W przypadku temperatury badania $T=600^{\circ}\text{C}$ energia skumulowana w badanym materiale aż do chwili pęknięcia w niewielkim stopniu zależy od poziomu odkształcenia całkowitego ϵ_{ac} .

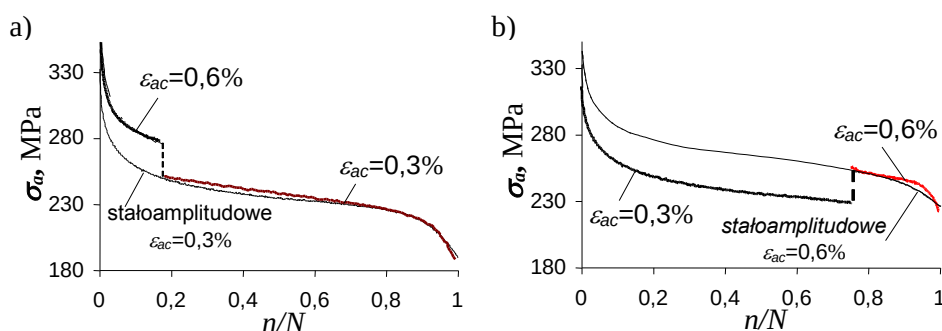
Na podstawie analizy przebiegów energii odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} w funkcji liczby cykli obciążenia (rys. 4.7) można stwierdzić, że w ujęciu energetycznym stal P91 cechują zmiany właściwości cyklicznych. Występują one zarówno w temperaturze pokojowej, jak również w temperaturze podwyższonej – 400 i 600°C . Na podstawie zmian energii odkształcenia trudno w sposób jednoznaczny określić właściwości cyklicznych badanej stali.

Na wartość energii skumulowanej do pęknięcia $\Sigma\Delta W_{pl}$ wpływ ma temperatura badania. W temperaturze pokojowej wartości energii skumulowanej zależy od poziomu odkształcenia i wzrasta wraz z obniżaniem poziomu odkształcenia (podobnie jak w przypadku energii jednostkowej). Wpływ poziomu odkształcenia na poziom energii skumulowanej $\Sigma\Delta W_{pl}$ zanika w podwyższonych temperaturach. W temperaturze 600°C nie stwierdzono wyraźnego wpływu poziomu odkształcenia na wielkość energii skumulowanej.

Wysokie współczynniki korelacji R^2 dla prostych regresji (rys. 5.29) opisujących zależność pomiędzy energią ΔW_{pl} oraz energią skumulowaną $\Sigma\Delta W_{pl}$ i trwałością potwierdzają zasadność stosowania funkcji potęgowych do określania związku pomiędzy nimi.

5.5.2. Obciążenia programowane dwustopniowe

Zmiany właściwości cyklicznych stali P91 w każdej próbie programowanej można oceniać do chwili zmiany poziomu odkształcenia oraz po zmianie odkształcenia. W pracy dokonano analizy porównawczej parametrów pętli histerezy uzyskanej podczas obciążeń stałoamplitudowych i programowanych. Na podstawie rysunku 5.31 można stwierdzić, że po zmianie poziomu odkształcenia wartości parametrów pętli histerezy są zbliżone do parametrów pętli jakie obserwowano na tym samym poziomie odkształcenia podczas obciążeń stałoamplitudowych.

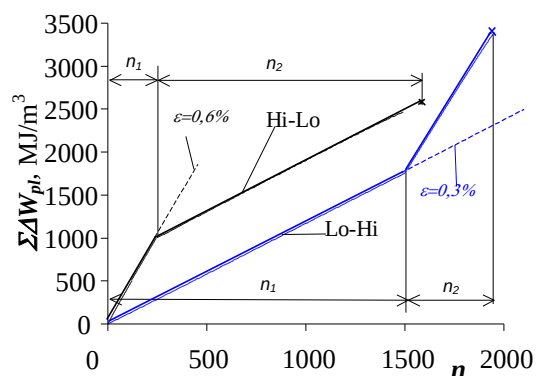


Rys. 5.31. Naprężenie $\sigma_a = n/N$ w temperaturze $T_2 = 600^\circ\text{C}$: a) Hi-Lo, b) Lo- Hi

Zmiana poziomu odkształcenia następowała zawsze w drugim etapie zmian właściwości cyklicznych (etap B – rozdział 5.2a).

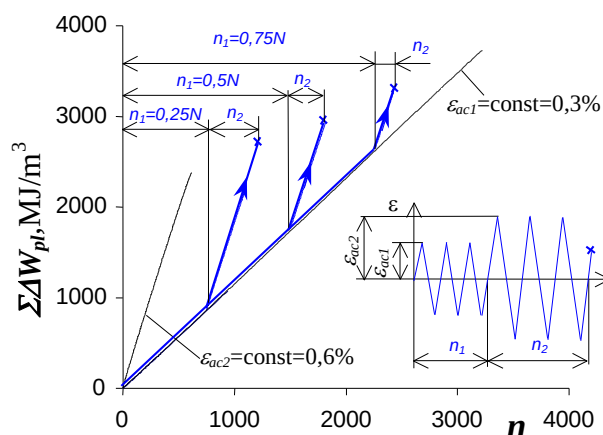
Na rysunkach 4.10 oraz 4.11 pokazano przykładowe wykresy zmian naprężenia σ_a dla sekwencji programu obciążenia Lo-Hi w temperaturze 20°C i 600°C . Na podstawie przedstawionych wykresów można stwierdzić, że właściwości cykliczne po zmianie poziomu zależą od liczby cykli obciążenia zrealizowanych na pierwszym stopniu programu. W przypadku analizowanego parametru pętli histerezy wraz ze wzrostem liczby cykli n_1 na pierwszym stopniu ulega obniżeniu amplituda naprężenia σ_a po zmianie poziomu odkształcenia. Po zmianie poziomu odkształcenia stal ulega dalszemu osłabieniu. Dotyczy to zarówno temperatury $T=20^\circ\text{C}$ jak również $T=600^\circ\text{C}$. Jak należało oczekiwać, wraz ze wzrostem liczby cykli n_1 na pierwszym stopniu obniżeniu ulega liczba cykli zrealizowanych na drugim stopniu.

W pracy przeprowadzono analizę przebiegu kumulacji energii w próbce dla różnych sekwencji programu obciążenia. Na rysunku 5.32 pokazano przykładowy przebieg kumulacji energii podczas realizacji programu Lo-Hi oraz Hi-Lo w temperaturze $T=600^\circ\text{C}$. W obydwu przypadkach zmiany poziomu odkształcenia dokonywano po zrealizowaniu 75% wszystkich cykli do pęknięcia na pierwszym stopniu ($n/N=0,75$).



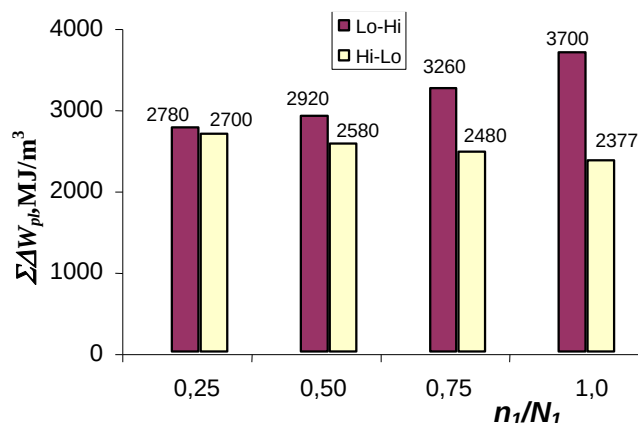
Rys. 5.32. Kumulacja energii podczas obciążeń programowanych Lo-Hi i Hi-Lo

W celach porównawczych na rysunku 5.32 naniesiono również wykresy kumulacji energii na poziomach odkształcenia $\varepsilon_{ac}=0,3\%$ i $0,6\%$ w warunkach obciążenia stałoaamplitudowego (bez zmiany poziomu odkształcenia ($n_1/N_1=1$)). Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że podobnie jak w przypadku trwałości, na wartość energii skumulowanej $\Sigma\Delta W_{pl}$ wpływ ma sekwencja programu obciążenia. Niezależnie od temperatury podczas realizacji programu Lo-Hi wartość skumulowana energii była wyższa od energii skumulowanej podczas realizacji programu Hi-Lo. Podczas badań stwierdzono również, że na wartość energii skumulowanej w próbce do momentu wystąpienia pęknięcia wpływ ma liczba cykli n_1 zrealizowana na pierwszym stopniu programu oraz typ programu obciążenia. Na rysunku 5.33 pokazano w sposób schematyczny przebieg kumulacji energii dla różnych sekwencji programu Lo-Hi.



Rys. 5.33. Kumulacja energii w trakcie programu Lo-Hi ($T=600^{\circ}\text{C}$)

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że niezależnie jednak od liczby cykli n_I na pierwszym stopniu wyższe wartości energii skumulowanej obserwowano zawsze w warunkach realizacji programu Lo-Hi. W celu zilustrowania na rysunku 5.34 pokazano zestawienie energii skumulowanej dla różnych sekwencji programów dwustopniowych ($T=600^\circ\text{C}$).



Rys. 5.34. Energia skumulowana podczas obciążenia programowanego

Podczas badań w warunkach obciążeń dwustopniowych obserwowano wyraźny wpływ sekwencji programu oraz temperatury na trwałość zmęczeniową obciążenia. Zgodnie z oczekiwaniami spośród dwóch sekwencji programów wyższe trwałości obserwowano dla sekwencji Lo-Hi. Wyniki trwałości zmęczeniowej próbek ze stali P91 w warunkach obciążeń dwustopniowych oraz stałej temperatury zestawiono w tabelach 5.1 i 5.2.

Tabela 5.1. Wyniki trwałości zmęczeniowej z badań oraz obliczeń w warunkach obciążeń programowanych i stałej temperatury próbki ($T=20^\circ\text{C}$)

Program	Nr próbki	$T=20^\circ\text{C}$					
		$n_I=0,25N_I$		$n_I=0,5N_I$		$n_I=0,75N_I$	
		N_{eksp}	N_{obl}	N_{eksp}	N_{obl}	N_{eksp}	N_{obl}
Lo-Hi	1	7354	6069	12584	10716	14654	15362
	2	6587		10874		15654	
	3	5046		10641		18292	
	średnia	6329		11366		16200	
Hi-Lo	1	11254	16180	9724	12238	7254	8296
	2	14359		9854		7174	
	3	14587		9872		7222	
	średnia	13400		9817		7217	

Tabela 5.2. Wyniki trwałości zmęczeniowej z badań oraz obliczeń w warunkach obciążeń programowanych i stałej temperatury próbki ($T=600\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Pro-gram	Nr próbki	$T=600^{\circ}\text{C}$					
		$n_1=0,25N_1$		$n_1=0,5N_1$		$n_1=0,75N_1$	
		Eks.	Obl.	Eks.	Obl.	Eks.	Obl.
Lo-Hi	1	1358	1146	1758	1760	2254	2374
	2	1124		2054		3101	
	3	1239		2161		2400	
	śr	1240		1991		2585	
Hi-Lo	1	1645	2371	1354	1806	1058	1240
	2	1542		1395		1050	
	3	1661		1309		1095	
	śr	1616		1353		1068	

*) N_{obl} -wynik obliczeń trwałości uzyskany przy wykorzystaniu opisu odkształceniowego

**) N_{obl} -wynik obliczeń trwałości uzyskany przy wykorzystaniu opisu energetycznego

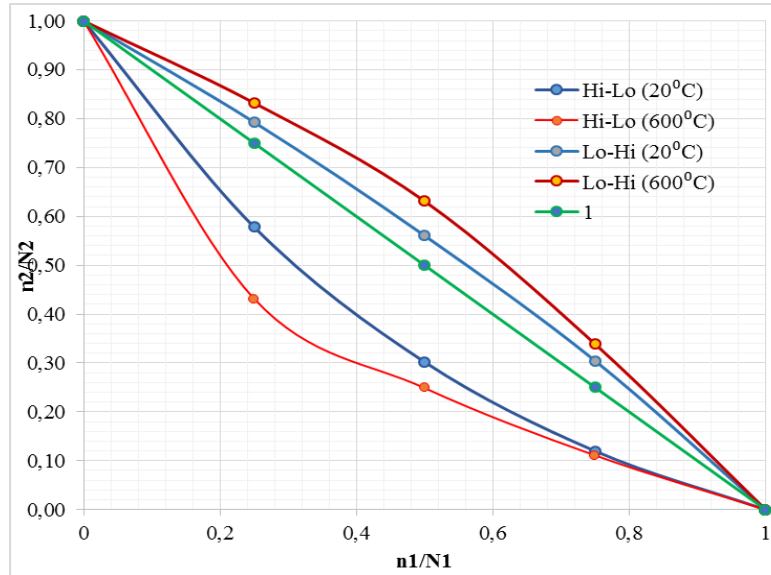
W pracy przeprowadzono również doświadczalną weryfikację hipotezy Palmgren-Minera (PM). Zgodnie z tą hipotezą pęknięcie próbki powinno nastąpić w przypadku gdy:

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = 1 \quad (5.10)$$

gdzie: N_1 -liczba cykli do pęknięcia dla obciążenia stałoamplitudowego na poziomie ε_{ac1}

N_2 -liczba cykli do pęknięcia dla obciążenia stałoamplitudowego na poziomie ε_{ac2}

Wyniki weryfikacji przedstawiono w tabelach 5.1 i 5.2 oraz w sposób graficzny na rysunku 5.35.

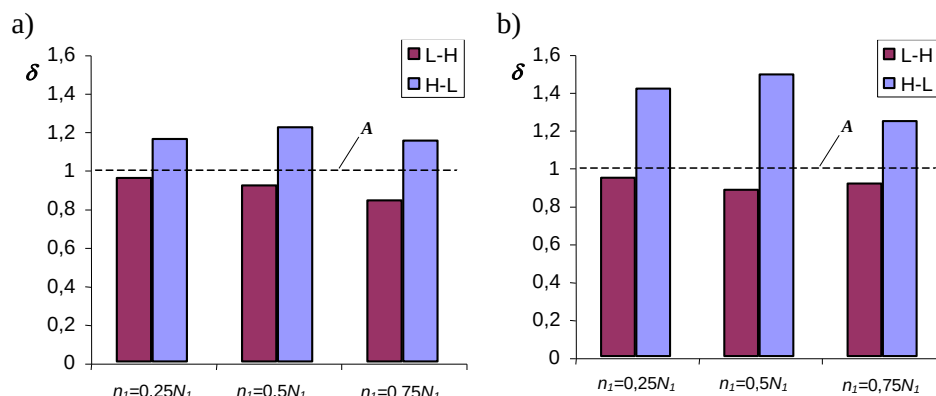


Rys. 5.35. Wyniki weryfikacji hipotezy sumowania uszkodzeń PM

Położenie wyników badań na przekątnej 3 wykresu odpowiada sumie uszkodzeń $\sum n_i/N_i=1$ i oznacza, że wyniki obliczeń są równe wynikom badań. Oznacza to jednocześnie brak wpływu sekwencji programu obciążenia na trwałość. Uzyskanie dla obydwu sekwencji programów obciążenia sumy uszkodzeń $\sum n_i/N_i \neq 1$ świadczy o wpływie historii obciążenia na wyniki obliczeń trwałości. Na podstawie analizy uzyskanych wyników trwałości (rys. 5.34) stwierdzono, że dla wszystkich sekwencji Lo-Hi trwałość zmęczeniowa uzyskana podczas obliczeń jest mniejsza od trwałości uzyskanej z badań ($N_{obl} < N_{eksp}$). Natomiast dla wszystkich sekwencji programów Hi-Lo trwałość z obliczeń jest większa od trwałości uzyskanej z badań ($N_{obl} > N_{eksp}$). W celu ilościowej oceny uzyskanych wyników trwałości z obliczeń (N_{obl}) i badań (N_{eksp}) wprowadzono współczynnik δ jako:

$$\delta = \frac{N_{obl}}{N_{eksp}} \quad (5.11)$$

W celu porównania wartości współczynnika δ określono dla wyników trwałości uzyskanych z obliczeń z wykorzystaniem charakterystyk zmęczeniowych w ujęciu odkształceniowym oraz energetycznym. Wyniki obliczeń przedstawiono w postaci wykresów na rysunku 5.36.



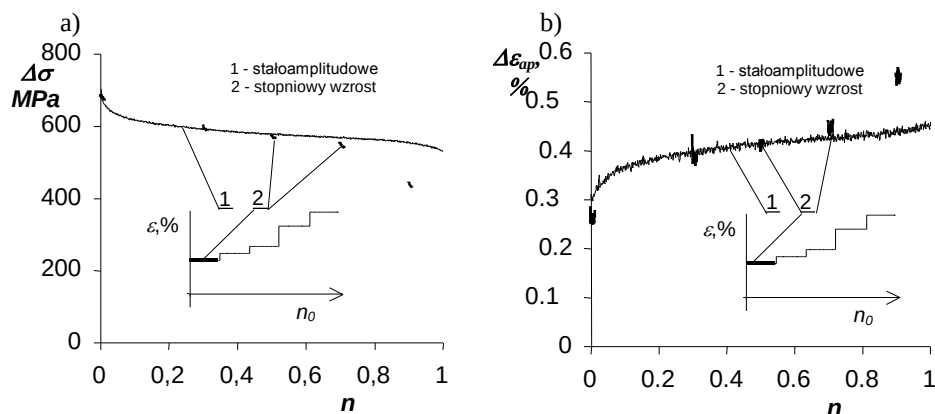
Rys. 5.36. Wartości współczynnika δ dla opisu odkształceniowego dla różnych programów: a) $T=20^{\circ}\text{C}$, b) $T=600^{\circ}\text{C}$

Wartości współczynnika δ równe jedności (linia A) oznaczają, że suma uszkodzeń obliczona z zależności (5.6) jest również równa jedności i odpowiada pełnej zgodności wyników obliczeń i badań. Uzyskanie dla obydwu sekwencji programów obciążenia Lo-Hi i Hi-Lo sumy uszkodzeń $\Sigma n_i/N_i \neq 1$ świadczy o wpływie historii obciążenia na wyniki obliczeń trwałości. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono również, że wpływ historii obciążenia na wyniki obliczeń ulega zwiększeniu w temperaturze 600°C .

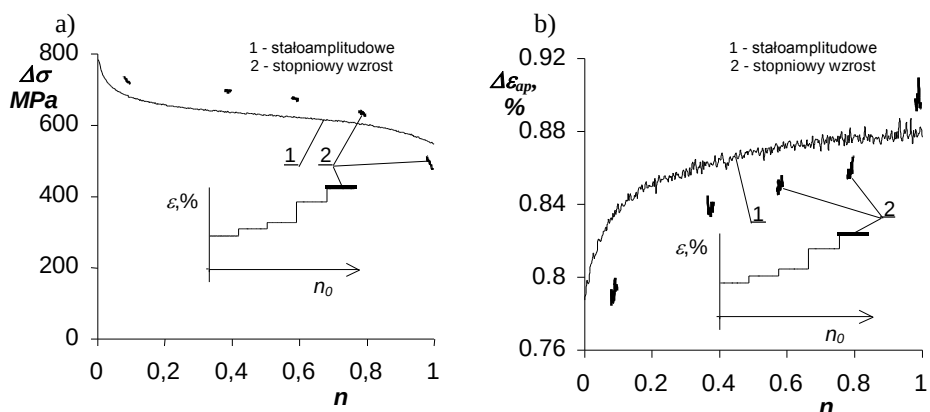
5.5.3. Obciążenia programowane wielostopniowe

Na podstawie analizy przebiegów naprężenia $\Delta\sigma$ oraz $\Delta\epsilon_{ap}$ (rys. 4.12 - 4.14) w kolejnych blokach obciążenia stwierdzić można, że niezależnie od poziomu odkształcenia stal ulega cyklicznemu osłabieniu. Świadczy o tym obniżanie naprężenia $\Delta\sigma$ oraz wzrost odkształcenia $\Delta\epsilon_{ap}$ dla tych samych stopni w kolejnych powtórzeniach bloku programu obciążenia. Zmiana amplitudy odkształcenia z mniejszej na większą prowadzi, niezależnie od poziomu amplitudy odkształcenia, do chwilowego osłabienia materiału na kolejnym stopniu i uzyskania na nim nowego poziomu chwilowego naprężenia stabilizacji $\Delta\sigma_s$. Naprężenie to jest niższe od naprężenia stabilizacji, które zostało uzyskane na danym stopniu w poprzednim bloku programu obciążenia. Przeprowadzona została analiza porównawcza zmian podstawowych parametrów pętli histerezy w warunkach obciążenia stałoamplitudowego i programowanego. Analizę parametrów pętli prowadzono w funkcji trwałości względnej n/N . Analiza dotyczyła wszystkich poziomów odkształcenia stosowanych podczas badań stałoamplitudowych oraz programowanych. Ze względu na ograniczoną objętość niniejszej pracy przedstawiono w niej jednak jedynie wybrane wyniki analizy porównawczej przeprowadzonej dla dwóch poziomów odkształcenia: $\epsilon_{ac}=0,25$ i $0,6$ %. Wykresy parametrów pętli histerezy podczas obciążenia

stałoamplitudowego oraz programowanego w funkcji n/N pokazano na rysunkach 5.37 i 5.38.



Rys. 5.37. Zmiany parametrów pętli histerezy podczas próby stałoamplitudowej oraz obciążenia Lo-Hi w $T=600^{\circ}\text{C}$ przy $\varepsilon_{ac}=0,25\%$: a) $\Delta\sigma$, b) $\Delta\varepsilon_{ap}$

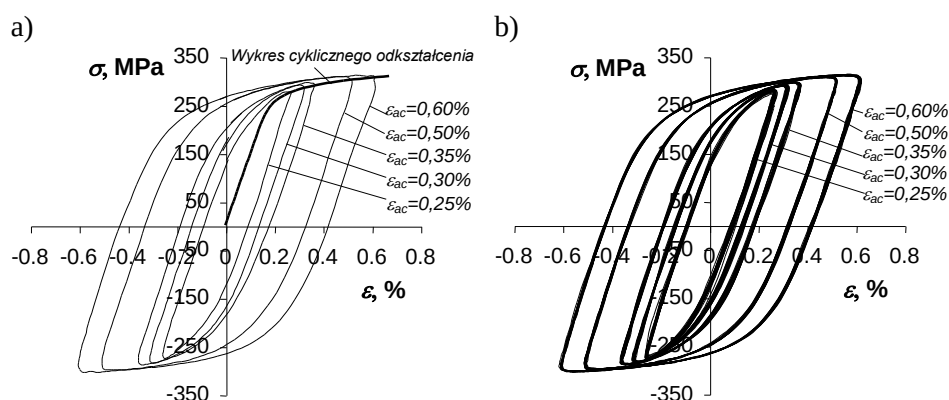


Rys. 5.38. Zmiany parametrów pętli histerezy podczas próby stałoamplitudowej oraz obciążenia Lo-Hi $T=600^{\circ}\text{C}$ przy $\varepsilon_{ac}=0,6\%$: a) $\Delta\sigma$, b) $\Delta\varepsilon_{ap}$

Analiza wykresów wskazuje, że zmiany $\Delta\sigma$ na poszczególnych stopniach w niewielkim stopniu zależą od rodzaju obciążenia, można zauważyć podobieństwo jakościowe oraz ilościowe w przebiegu zmian właściwości cyklicznych podczas próby stałoamplitudowej oraz stopniowego wzrostu. Chwilowe parametry pętli histerezy ($\Delta\sigma$, $\Delta\varepsilon_{ap}$) uzyskane na wszystkich poziomach odkształcenia w warunkach próby stałoamplitudowej oraz stopniowego wzrostu mają dla tych samych stopni uszkodzenia zmęczeniowego podobne wartości. Na wykresach zmian parametrów pętli histerezy podczas próby stopniowego wzrostu widać bardzo wyraźnie trend zmian właściwości cyklicznych. Jest on zbliżony do przebiegu zmian właściwości mających

miejsce podczas obciążenia stałoaamplitudowego. Podobny przebieg obserwowano dla wszystkich stopni programu obciążenia realizowanego podczas badań.

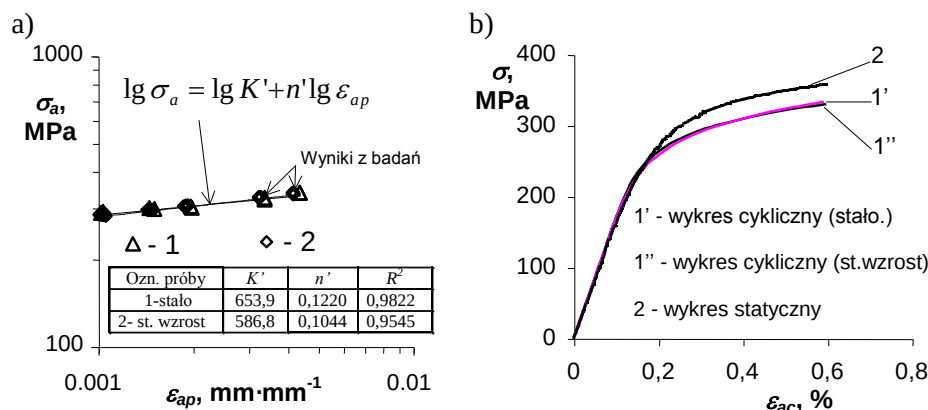
Na podstawie analizy przebiegów dwóch parametrów pętli histerezy w funkcji liczby cykli obciążenia można stwierdzić, że brak w nich okresu stabilizacji właściwości cyklicznych. Utrudnia to w istotny sposób analityczny opis wyników badań. Ze względu na obserwowane zmiany parametrów pętli histerezy w funkcji liczby cykli obciążenia wartości parametrów pętli histerezy niezbędne do analitycznych opisów właściwości przyjęto z okresu odpowiadającego połowie trwałości zmęczeniowej. Przyjęta połowa trwałości zmęczeniowej w przypadku obciążenia stałoaamplitudowego odpowiadała konkretnemu cyklowi obciążenia natomiast w przypadku obciążenia stopniowanego blokowi obciążenia. Przykładowe pętle histerezy z tego okresu trwałości dla obciążenia stałoaamplitudowego oraz stopniowego wzrostu pokazano na rysunku 5.39.



Rys. 5.39. Wyniki badań w postaci pętli histerezy: a) metoda klasyczna (na wielu próbkach), b) metoda uproszczona (na jednej próbce)

Do opisu analitycznej zależności pomiędzy naprężeniem σ_a a odkształceniem ϵ_{ap} przyjęto równanie (2.3).

Wartości parametrów pętli σ_a i ϵ_{ap} opracowano metodą najmniejszych kwadratów wyznaczając współczynniki i wykładniki prostej regresji opisywanej równaniem (5.5). Wykres odkształcenia uzyskany w wyniku aproksymacji parametrów pętli (σ_a i ϵ_{ap}) z okresów odpowiadających połowie trwałości zmęczeniowej pokazano na rysunku 5.40a. Na rysunku zamieszczono również równanie wykorzystane podczas aproksymacji wyników badań.



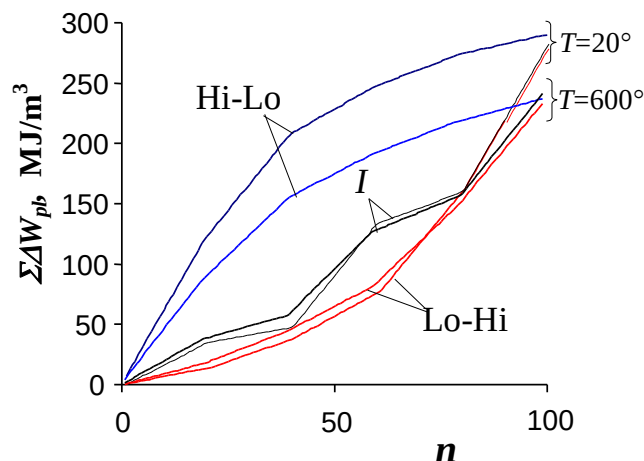
Rys. 5.40. Wyniki badań stałoaamplitudowych oraz stopniowego wzrostu: a) wykresy cykliczne, b) wykresy statycznego oraz cyklicznego odkształcenia

Cykliczne osłabienie próbek obserwowane podczas badań stałoaamplitudowych potwierdza również wzajemne położenie wykresów cyklicznego oraz statycznego odkształcenia. Przykładowe wykresy statycznego oraz cyklicznego odkształcenia uzyskane podczas badań pokazano na rysunku 5.40b. Wykres cyklicznego odkształcenia (1' i 1'' na rysunku 5.40b) aproksymowano równaniem zaproponowanym przez Ramberga-Osgooda (2.12).

Na podstawie przeprowadzonej analizy dwóch metod wyznaczania danych materiałowych można stwierdzić, że obydwie prowadzą do zbliżonych wyników. Uzyskane w wyniku ich wykorzystania dane materiałowe cechuje podobieństwo ilościowe w zakresie wartości wyznaczanych danych materiałowych.

Występujące niewielkie zróżnicowanie ilościowe parametrów wyznaczonych metodą uproszczoną (próba stopniowego wzrostu) oraz metodą klasyczną pozwalają stosować uproszczone metody badań do określania właściwości cyklicznych. Dotyczy to szczególnie przypadków, w których brak jest wystarczającej liczby próbek do przeprowadzenia pełnych badań. Ponadto prostota metody uproszczonej wydaje się wskazywać na możliwość jej stosowania do szybkiego wyznaczenia danych materiałowych na etapie doboru cech konstrukcyjnych i wstępnych obliczeń trwałości, kiedy nie są znane pełne charakterystyki zmęczeniowe. Możliwe jest również wykorzystanie metody uproszczonej do oceny stopnia uszkodzenia zmęczeniowego próbki pobranej z obiektu będącego w trakcie eksploatacji (np. badania na mikropróbkach). Przedstawione na rysunkach 5.37 i 5.38 wyniki analizy porównawczej parametrów pętli histerezy dotyczyły obciążenia stałoaamplitudowego i programowanego, w którym obciążenie wzrastało stopniowo. Podobne rezultaty uzyskano dla obciążeń malejących czy zmieniających się nieregularnie.

Brak wpływu rodzaju obciążenia na wartości poszczególnych parametrów pętli histerezy potwierdzają w pewnym stopniu wartości energii skumulowanej podczas realizacji obciążeń programowanych. W celu zilustrowania powyższego stwierdzenia na rysunku 5.41 pokazano przykładowy przebieg kumulacji energii podczas realizacji jednego bloku programu obciążenia o różnej sekwencji.



Rys. 5.41. Kumulacja energii w jednym bloku programu

Jak należało oczekiwać, energia skumulowana $\Sigma\Delta W_{pl}$ podczas realizacji programu w temperaturze 600°C jest niższa od energii skumulowanej podczas realizacji analogicznego bloku programu w temperaturze 20°C. Jest to konsekwencją obserwowanych podczas badań stałoamplitudowych relacji pomiędzy energią jednostkową a temperaturą (rys. 5.27).

Na podstawie przedstawionych wykresów można stwierdzić, że pomimo różnych przebiegów kumulacji wartość energii skumulowanej w danej temperaturze i jednym bloku pozostaje taka sama dla różnych sekwencji programu obciążenia.

W przeciwieństwie do badań w warunkach obciążeń programowanych dwustopniowych w warunkach obciążeń wielostopniowych nie stwierdzono wpływu programu obciążenia na trwałość. Brak wpływu programu na trwałość potwierdzają w pewien sposób zbliżone wartości energii skumulowanej zarówno w jednym bloku programu jak również w całej próbie próbie zmęczeniowej.

Uzyskane wyniki trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń programowanych wielostopniowych pozwoliły przeprowadzić doświadczalną weryfikację hipotezy kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych Palmgrena Minera. Weryfikację hipotezy przeprowadzono dla opisu odkształceniowego. W przypadku realizacji obciążeń programowanych wielostopniowych i stałej temperatury pęknięcie powinno nastąpić, gdy:

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \frac{n_4}{N_4} + \frac{n_5}{N_5} = 1 \quad (5.12)$$

gdzie:

$n_{1,2,3,4,5}$ - liczby cykli obciążenia na kolejnych stopniach programu obciążenia,
 $N_{1,2,3,4,5}$ - liczby cykli do pęknięcia dla obciążenia stałoamplitudowego
na kolejnych stopniach programu obciążenia $\varepsilon_{ac1}, \varepsilon_{ac2}, \dots, \varepsilon_{ac5}$.

Liczby cykli do pęknięcia na danym poziomie odkształcenia w temperaturze T_1 i T_2 obliczano z równań opisujących wykresy zmęczenia w ujęciu odkształceniowym.

Wyniki weryfikacji hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych próbek w warunkach obciążeń programowanych i stałej temperatury zestawiono w tabeli 5.4.

Tabela 5.4. Trwałość zmęczeniowa w warunkach obciążeń programowanych i stałej temperatury ($\varepsilon_{acmax}=0,6\%$)

Program obciążenia	Nr próbki	Trwałość, N_{eksp}		Trwałość, N_{obl}	
		$T=20^\circ\text{C}$	$T=600^\circ\text{C}$	$T=20^\circ\text{C}$	$T=600^\circ\text{C}$
				Opis $2N_f - \varepsilon$	Opis $2N_f - \varepsilon$
Lo-Hi	1	2100	1100	3389	1208
	2	2200	1200		
	3	2100	1100		
Hi-Lo	1	1900	1300	3389	1208
	2	2000	1100		
	3	2200	1000		
I	1	2300	1100	3389	1208
	2	2200	1150		
	3	2000	1000		

Na podstawie wyników badań uzyskanych w zróżnicowanych warunkach obciążenia trudno w sposób jednoznaczny stwierdzić wpływ którejkolwiek postaci programu obciążenia na trwałość. Uzyskane w ramach kolejnych programów obciążenia trwałości charakteryzują się niewielkim zróżnicowaniem. Przeprowadzona analiza porównawcza uzyskanych trwałości w warunkach programowanych obciążeń o zróżnicowanej kolejności stopni pozwala stwierdzić, że cechuje je podobieństwo ilościowe. Powyższe dotyczy zarówno trwałości uzyskanych w temperaturze otoczenia jak i temperatury podwyższonej. Brak wpływu sekwencji stopni w programie obciążenia na trwałość stanowi potwierdzenie obserwowanych podczas badań programowanych zbliżonych do siebie zmian właściwości cyklicznych.

Wyniki przeprowadzonych badań odnośnie braku wpływu sekwencji programu obciążenia na trwałość potwierdzają w tym zakresie dane z literatury

opracowane na podstawie badań wysokocyklowych. Praktyczne znaczenie ma wykazany w pracy brak wpływu postaci oraz kształtu programu obciążenia na przebieg zmian właściwości cyklicznych badanych materiałów. Umożliwia on bowiem przewidywanie zmian właściwości cyklicznych materiału w czasie obciążenia eksploatacyjnego na podstawie znajomości tego zjawiska w warunkach obciążeń stałoamplitudowych.

Analiza porównawcza trwałości zmęczeniowych uzyskanych z obliczeń i badań dla zróżnicowanych sekwencji programu i wartości $\varepsilon_{acmax} = 0,6\%$ (tabela 5.4) pozwala zauważyć, że na ich zgodność wpływa temperatura badań. Wyniki obliczeń prowadzonych dla wszystkich wariantów programów obciążenia w temperaturze otoczenia ($T=20^{\circ}\text{C}$) są nieznacznie większe od wyników badań. W przypadku wyników obliczeń prowadzonych dla wszystkich sekwencji obciążenia prowadzonych w temperaturze podwyższonej ($T=600^{\circ}\text{C}$), są one zawsze większe od wyników badań.

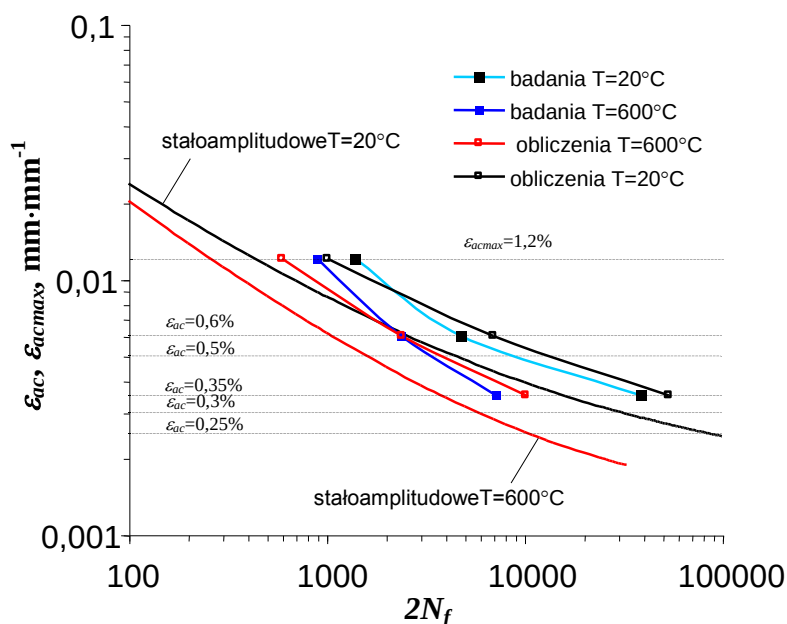
Nieco inaczej wygląda zróżnicowanie wyników trwałości z obliczeń i badań dla różnych wartości ε_{acmax} . W celu ich omówienia wyniki trwałości uzyskane z badań dla jednej sekwencji wielostopniowego obciążenia programowanego i trzech wartości odkształcenia maksymalnego w programie ($\varepsilon_{acmax}=0,35\%$; $0,6\%$; $1,2\%$) zestawiono wraz z wynikami obliczeń w tabeli 5.5. Dla oceny skuteczności wyników obliczono wartości współczynnika zróżnicowania wyników obliczeń trwałości z badań i obliczeń ze wzoru:

$$\delta_N = \frac{N_{eksp}}{N_{obl}} \quad (5.13)$$

Tabela 5.5. Trwałość zmęczeniowa w warunkach obciążeń programowanych dla różnych poziomów ε_{acmax}

$\varepsilon_{acmax}, \%$ ($\zeta=0,67$)	Trwałość zmęczeniowa N_{eksp} i N_{obl}					
	$T=20^{\circ}\text{C}$			$T=600^{\circ}\text{C}$		
	Badania N_{eksp}	Obliczenia N_{obl}	δ_N	Badania N_{eksp}	Obliczenia N_{obl}	δ_N
0,35	19500	26929	0,72	3600	5114	0,70
0,6	2100	3490	0,60	1100	1203	0,91
1,2	600	506	1,38	540	298	1,51

W celu porównania wyniki zamieszczone w tabeli zestawiono również w postaci wykresów zmęczeniowych na rysunku 5.42.



Rys. 5.42. Wykresy trwałości zmęczeniowej uzyskanej w wyniku badań i obliczeń

Na podstawie analizy wyników zamieszczonych w tabeli 5.5 oraz rysunku 5.42 można stwierdzić, że podobnie jak podczas obciążeń stałoamplitudowych, tak również w warunkach obciążeń programowanych wpływ temperatury na trwałość zależy od poziomu obciążenia. Jest on większy w obszarze małych poziomów odkształcenia ($\varepsilon_{acmax}=0,35\%$) i ulega wyraźnemu obniżeniu wraz ze wzrostem odkształcenia.

Analiza porównawcza trwałości zmęczeniowej uzyskanej z obliczeń i badań pozwala również zauważyć, że zróżnicowanie wyników obliczeń i badań zmienia się w zależności od poziomu odkształcenia. Dla przykładu dla programów obciążenia o najmniejszych wartościach odkształceń maksymalnych w programie ($\varepsilon_{acmax}=0,35\%$) w temperaturze otoczenia trwałość uzyskana z obliczeń jest o około 28% większa od wyników badań eksperymentalnych. Natomiast w temperaturze podwyższonej prawie 30% większa od wyników badań. Zróżnicowanie wyników obliczeń i badań na najwyższych poziomach odkształcenia ($\varepsilon_{acmax}=1,2\%$), jest zdecydowanie mniejsze. W przypadku trwałości uzyskanej z obliczeń w obydwu temperaturach jest ona mniejsza od wyników trwałości uzyskanej z badań. W temperaturze 20°C jest to około 18% a w przypadku temperatury 600°C jest to około 21%.

Należy zwrócić uwagę, że na najniższych poziomach odkształcenia oprócz większego zróżnicowania wyników trwałości z badań i obliczeń uzyskane wyniki obliczeń znajdują się w obszarze niebezpiecznym trwałości ($N_{obl} > N_{eksp}$).

Sytuacja jest odwrotna w przypadku wyników trwałości uzyskanych z obliczeń na najwyższych poziomach odkształcenia maksymalnego ($\varepsilon_{acmax}=1,2\%$).

Jedną z przyczyn większego zróżnicowania wyników trwałości z obliczeń i badań w temperaturze otoczenia jak i w temperaturze podwyższonej na najniższych poziomach odkształcenia może być fakt, że właśnie na tych poziomach w warunkach obciążeń stałoamplitudowych obserwowano zdecydowanie większe zmiany parametrów pętli histerezy w funkcji liczby cykli obciążenia (rys. 5.13). Natomiast do obliczeń trwałości zostały przyjęte parametry pętli na tych poziomach z okresu odpowiadającego połowie trwałości zmęczeniowej.

Drugą przyczyną większego zróżnicowania wyników obliczeń i badań na najniższych poziomach może być sama metoda obliczeń trwałości, która polega na wielokrotnym powtarzaniu pętli obliczeń (sumowaniu uszkodzeń). Liczba kolejnych iteracji podczas sumowania uszkodzeń (przy pojemności bloku obciążenia równym 100 cykli) jest zdecydowanie większa podczas obliczeń trwałości dla programu zawierającego stopnie z niewielkimi poziomami $\varepsilon_{acmax}=0,35\%$ w stosunku do liczby powtórzeń bloku zawierającego odkształcenie $\varepsilon_{acmax}=1,2\%$. Większa liczba powtórzeń podczas sumowania uszkodzeń oraz zastosowane uproszczenie podczas opracowywania wyników polegające na przyjęciu parametrów pętli z połowy trwałości zmęczeniowej spowodowało większe różnice pomiędzy wynikami trwałości uzyskanymi z obliczeń i badań.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W ramach badań własnych wykonanych w pracy doktorskiej zrealizowany został szeroki program niskocyklowych badań zmęzeniowych w zróżnicowanych temperaturach charakteryzujących się dużym poziomem trudności w zakresie samej realizacji oraz znaczną czasochłonnością i kosztochłonnością. Podczas badań była wykorzystywana nowoczesna aparatura badawcza znajdująca się na wyposażeniu Laboratorium Badań Materiałów i Konstrukcji pozwalająca na prowadzenie niskocyklowych badań zmęzeniowych w warunkach izotermicznych.

W ramach pracy przeprowadzono kilkaset testów w warunkach obciążeń monotonicznych, stałoamplitudowych izotermicznych oraz programowanych. Z tego też względu prezentowane w poniższej pracy niektóre wyniki przedstawiono jedynie w formie informacji o podjętych zgodnie z planem jak również dodatkowo problemach badawczych. Z oczywistych względów uzyskane wyniki i bardzo bogata baza zarejestrowanych na nośnikach CD wyników długotrwałych prób zmęzeniowych będzie podstawą dalszych opracowań i analiz celem przygotowania kolejnych artykułów naukowych na etapie dalszego rozwoju naukowego autora pracy jak również zespołu zaangażowanego podczas badań eksperymentalnych.

Na podstawie analizy wyników niskocyklowych badań zmęzeniowych w zróżnicowanych warunkach obciążenia można stwierdzić, że obecnie wśród parametrów pętli histerezy wykorzystywanych podczas obliczeń trwałości elementów konstrukcyjnych eksploatowanych w temperaturach podwyższonych brak parametrów pętli histerezy niewrażliwych na zmiany właściwości cyklicznych materiałów z których wykonywane są te elementy. Wielkość zmian właściwości cyklicznych obserwowanych podczas badań zmęzeniowych zależy zarówno od samych parametrów pętli histerezy przyjętych do oceny tych zmian, jak również warunków badań identyfikowanych na przykład poziomem odkształcenia czy temperaturą. Na podstawie przeprowadzonych badań trudno w sposób jednoznaczny wskazać parametr pętli, który charakteryzuje się najmniejszą wrażliwością na zmiany właściwości cyklicznych.

Zmienność parametrów pętli histerezy w funkcji liczby cykli obciążenia powoduje, że wartości danych materiałowych wykorzystywanych podczas obliczeń trwałości zmęzeniowej zależą od okresu trwałości, w którym je określono. Nieuwzględnianie podczas obliczeń trwałości zmian właściwości cyklicznych i jednocześnie danych materiałowych powoduje w przypadku takich materiałów jak stal P91, w temperaturach otoczenia jak również w temperaturach podwyższonych zróżnicowanie wyników trwałości uzyskanych z obliczeń i badań. Na zróżnicowanie wyników trwałości uzyskanych z obliczeń i badań wpływ ma między innymi temperatura.

Przeprowadzone badania umożliwiły sformułowanie szeregu szczegółowych wniosków dotyczących przebiegu zmęczenia stali P91

w temperaturze podwyższonej w warunkach obciążeń stałoamplitudowych i programowanych.

Wnioski z badań

Analiza uzyskanych wyników w rozdziale 5. pozwala sformułować następujące wnioski:

1. W warunkach obciążeń stałoamplitudowych oraz programowanych stali P91 mają miejsce zmiany właściwości cyklicznych, które utrudniają jednoznaczne określenie tzw. okresu stabilizacji na poszczególnych poziomach odkształcenia. Powoduje to tym samym komplikacje w wyznaczeniu niezbędnych danych materiałowych podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej. Wartości danych materiałowych zależą od okresu trwałości zmęczeniowej przyjętego do ich wyznaczenia. Przyjęcie ich z okresu odpowiadającego połowie trwałości zmęczeniowej ($n/N=0,5$) powoduje, że odzwierciedlają one jedynie chwilowe właściwości cykliczne tych materiałów z tego okresu trwałości. Powyższe powoduje, że wpływ na wyniki obliczeń trwałości ma zarówno sam przebieg zmian właściwości cyklicznych, jak również okres trwałości przyjęty do określenia niezbędnych danych materiałowych.
2. Brak okresu stabilizacji właściwości cyklicznych podczas obciążenia stałoamplitudowego jak również programowanego stali P91 w zróżnicowanych temperaturach powoduje, że wątpliwości budzą wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej, które bazują na niezmiennych danych materiałowych określonych podczas badań w warunkach obciążeń stałoamplitudowych izotermicznych.
3. Temperatura podwyższona powoduje obniżenie trwałości zmęczeniowej próbek ze stali P91. Wpływ temperatury na obniżenie trwałości zmęczeniowej zależy od poziomu odkształcenia. Jest on niewielki w obszarze bardzo dużych poziomów odkształcenia i wzrasta wraz z ich obniżeniem.
4. Przebieg cyklicznego osłabienia stali P91 jest jej cechą, która nie zależy od poziomu odkształcenia (ε_{ac}) oraz temperatury. Niezależnie od poziomu odkształcenia i temperatury w przebiegu osłabienia próbek można wyróżnić trzy charakterystyczne etapy różniące się prędkością cyklicznego osłabienia. Największa prędkość osłabienia ma miejsce na początku próby zmęczeniowej oraz na jej końcu. Wzrost temperatury powoduje jednocześnie wzrost prędkości oraz wielkości zmian właściwości cyklicznych w tych etapach. Największe zmiany właściwości cyklicznych obserwowano w temperaturze 600°C na najniższych poziomach odkształcenia. Etapy o największej prędkości osłabienia są jednocześnie etapami najkrótszymi obejmującymi łącznie 25% wszystkich cykli do pęknięcia. Etapem

najdłuższym bo obejmującym około 75% trwałości zmęczeniowej jest etap drugi o stałej (najmniejszej) prędkości osłabienia.

5. Następstwem zmian parametrów pętli histerezy wykorzystywanych podczas analizy zmęczenia niskocyklowego są zmiany danych materiałowych wykorzystywanych podczas obliczeń trwałości, które z kolei określane są w warunkach obciążeń stałoamplitudowych izotermicznych. Dane materiałowe (n' i K') zależą w sposób istotny od okresu trwałości, dla którego zostają określone. Większy zakres zmian parametrów pętli w temperaturze 600°C powoduje, że zakres zmian danych materiałowych w podwyższonej temperaturze jest również większy niż w temperaturze otoczenia.
6. Historia obciążenia podczas obciążeń dwustopniowych ma wpływ na trwałość zmęczeniową stali P91. Doświadczalna weryfikacja hipotezy Palmgren-Minera wykazała, że na jej skuteczność wpływ ma historia obciążenia oraz temperatura badań. Wraz ze wzrostem temperatury różnicowanie wyników trwałości z obliczeń i badań wzrasta.
7. Analizowany przebieg cyklicznego osłabienia zachodzący podczas obciążenia stałoamplitudowego i programowanego stali P91 w temperaturach podwyższonych przy wykorzystaniu parametrów pętli histerezy takich jak $\Delta\sigma$, $\Delta\epsilon_{ap}$, ΔW_{pl} wykazuje podobieństwo jakościowe w zakresie charakteru zmian właściwości cyklicznych oraz ilościowe dotyczące chwilowych wartości tych parametrów przy tych samych stopniach uszkodzenia zmęczeniowego.
8. Ilościowe oraz jakościowe podobieństwo przebiegu zmian właściwości cyklicznych badanych materiałów w warunkach obciążenia stałoamplitudowego i programowanego o różnej sekwencji zmian temperatury i obciążenia na podstawie wyników badań normatywnych (stałoamplitudowych izotermicznych) pozwala sformułować tezę o możliwości przewidywania chwilowych właściwości cyklicznych materiału elementu konstrukcyjnego podczas obciążeń eksploatacyjnych
9. Program obciążenia wielostopniowego (postać i jego parametry) mają niewielki wpływ na przebieg zmian właściwości cyklicznych badanych materiałów. Dla wszystkich postaci programów obciążenia na tych samych poziomach odkształcenia w takich samych temperaturach obserwuje się podobne zmiany parametrów pętli histerezy. Ich cechą charakterystyczną jest to, że w warunkach obciążenia programowanego o różnej postaci programu obciążenia i temperatury nie występuje, podobnie jak w warunkach obciążenia stałoamplitudowego izotermicznego, stan nasycenia (stabilizacji). Analiza przebiegów podstawowych parametrów pętli histerezy, niezależnie od temperatury, wskazuje na występowanie zawsze zależnego od poziomu odkształcenia ϵ_{ac} osłabienia stali P91.

10. Ilościowo oraz jakościowo podobny przebieg zmian właściwości cyklicznych podczas obciążenia stałoamplitudowego i programowanego uzasadnia korzystanie wyłącznie z wykresów zmęzeniowych wyznaczonych podczas obciążenia stałoamplitudowego, jak również z danych materiałowych określanych w różnych okresach trwałości w warunkach obciążenia stałoamplitudowego podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń eksploatacyjnych.
11. Występujące podobieństwo jakościowe i ilościowe zmian właściwości cyklicznych dla różnych postaci i parametrów programów obciążenia wydają się potwierdzać nieistotne różnice trwałości uzyskane dla różnych postaci i kształtu programu obciążenia (obciążenia wielostopniowe). Analiza porównawcza trwałości zmęczeniowej uzyskanej dla zróżnicowanych postaci i kształtów programów obciążenia nie wykazała zauważalnego wpływu którejkolwiek postaci programu na trwałość. Fakt ten ma bardzo ważne znaczenie praktyczne, ponieważ potwierdza, jako zasadne, stosowanie metody programowanych obciążeń w badaniach i obliczeniach trwałości zmęczeniowej elementów maszyn.
12. Uzyskane w różnych okresach trwałości zmęczeniowej dane materiałowe (n' oraz K') umożliwiają konstruktorowi oszacować zakres możliwych zmian właściwości cyklicznych. Pozwala to w przypadku odpowiedzialnych elementów konstrukcyjnych na przeprowadzenie obliczeń sprawdzających dla skrajnych wartości tych parametrów.
13. Doświadczalna weryfikacja modeli analitycznych wykorzystywanych do opisu właściwości cyklicznych stali konstrukcyjnych w temperaturach otoczenia pozwala stwierdzić ich przydatność do opisu właściwości niskocyklowych także w temperaturach podwyższonych. Skuteczność odwzorowania właściwości cyklicznych, np. odkształcenia czy naprężenia oraz jednostkowej energii odkształcenia plastycznego, zależy od danych materiałowych zastosowanych w opisach, jak również od poziomu odkształcenia.

Wytyczne do dalszych badań

Przeprowadzona analiza wyników badań wykazała kilka zagadnień, które wymagają dalszych badań eksperymentalnych. Najważniejsze wymieniono poniżej:

1. Przebieg zmęczenia cieplno - mechanicznego stali P91 stosowanej np. w energetyce oceniano w pracy na podstawie badań w warunkach obciążeń stałoamplitudowych oraz prostych obciążeń programowanych realizowanych w warunkach izotermicznych. W celu uproszczenia analizy podczas stosowanych obciążeń stosowano wyłącznie cykle wahadłowe w warunkach kontrolowanego odkształcenia całkowitego ε_{ac} ($\varepsilon_{ac} = \text{const}$). Występujący

w warunkach eksploatacji obiektów energetycznych najczęściej siłowy sposób wymuszania obciążeń oraz wpływ wartości średniej obciążenia na trwałość zmęczeniową (szczególnie w podwyższonych temperaturach) powoduje, że w celu sformułowania wniosków o charakterze ogólnym niezbędna jest również realizacja badań zmęczeniowych o podobnym zakresie, ale w warunkach obciążeń o wartości średniej różnej od zera ($R \neq -1$) i przy kontrolowanej wartości siły obciążającej ($\sigma_a = \text{const}$).

2. Dane materiałowe wyznaczone w obszarze niskocyklowego zmęczenia wykorzystuje się najczęściej do modelowania zachowania się materiału elementów konstrukcyjnych w obszarach nieciągłości geometrycznych i strukturalnych. W pracy doktorskiej analizę kumulacji uszkodzeń próbek ze stali P91 w warunkach obciążeń stałoamplitudowych i programowanych oraz doświadczalną weryfikację metody obliczeń trwałości zmęczeniowej 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 karbów konstrukcyjnych.
3. W pracy podczas sumowania uszkodzeń zmęczeniowych wykorzystywano niemającą uzasadnienia fizycznego hipotezę liniową Palmgrena-Minera. Niezbędne wydaje się przeprowadzenie doświadczalnej weryfikacji innych, udoskonalonych i mających fizyczne uzasadnienie hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych, np. opartych na liniach stałych uszkodzeń zmęczeniowych. Wymaga to jednak sformułowania założeń do obliczeń trwałości przy wykorzystaniu tych hipotez oraz ich doświadczalnej weryfikacji.
4. W pracy doktorskiej podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej próbek ze stali P91 w warunkach obciążeń programowanych bazowano na wykresach trwałości zmęczeniowej w ujęciu odkształceniowym w którym wielkością kryterialną było odkształcenie całkowite. Ze względów praktycznych interesująca wydaje się również jej doświadczalna weryfikacja przy wykorzystaniu innych parametrów pętli histerezy np. naprężenia σ_a czy energii odkształcenia ΔW_{pl} oraz wykresów zmęczeniowych w ujęciu naprężeniowym czy energetycznym.

Literatura

- [1] Perrin I. J., Fishburn, J. D., 2005. A perspective on the Design of High Temperature Boiler Components. DEStech Publications, Inc., Lancaster, Pennsylvania 17601 USA.
- [2] Dobrzański J., Zieliński A., Hernas A., 2009. Struktura i własności nowych stali żarowytrzymałych o podstawie ferrytycznej, [w:] Materiały i technologie do budowy kotłów nadkrytycznych i spalarni odpadów, praca zbiorowa pod redakcją Hernasa A. SITPH Katowice. 47-101.
- [3] Gabryś H. L., 2011. Elektryczność w Polsce - 2011. Wybrane wyniki i wyzwania powstałe w 2010 roku ze szczególnym uwzględnieniem problemów wynikających z pakietu klimatycznego Unii Europejskiej. Energetyka. 271-274.
- [4] Dobosiewicz J., Trzecznyński J., 2008. Problem przedłużania eksploatacji urządzeń ciepłno-mechanicznych elektrowni. Biuletyn Pronovum nr 2/2008. 833-836.
- [5] Trzecznyński J., 2011. Możliwość i warunki przedłużania czasu eksploatacji zrewitalizowanych elementów stalowych turbin parowych. Biuletyn Pronovum nr 1/2011. 340-342.
- [6] Trzecznyński J., 2011. Przedłużanie eksploatacji majątku produkcyjnego - realistyczna strategia elektrowni w Polsce. Przegląd Energetyczny. nr 1 (61).
- [7] Trzecznyński J., 2009. Wydłużanie czasu pracy urządzeń energetycznych - strategia bez alternatywy. Nowa Energia. nr 3.
- [8] Ekalt Z., Lorens T., Ptak D., Rusznik K., Sawa J., 2009. Przegląd kierunków modernizacji i typowych zakresów napraw długoeksploatowanych wymienników ciepła. Biuletyn Pronovum nr 2/2009. 813-820.
- [9] Badyda K., Lewandowski J., 2010. Perspektywy eksploatacji zasobów polskiej energetyki w uwarunkowaniach emisyjnych wynikających z regulacji unijnych. Biuletyn Pronovum nr 2/2010. 833-837.
- [10] Okrajni J., 2011. Zmęczenie ciepłno-mechaniczne oraz wytrzymałość i trwałość instalacji energetycznych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [11] Okrajni J., Junak G., 2002. Fatigue damage description of steels at elevated temperatures. Proceedings of ECF 14 Conference "Fracture Mechanics Beyond 2000" Kraków. p. 369-376.
- [12] Okrajni J., Marek A., Junak G., 2008. Modeling of deformation process under thermo-mechanical fatigue. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. vol. 21, issue 2, 2007, p. 15-24.
- [13] Okrajni J., Marek A., Junak G., Zmęczenie ciepłno-mechaniczne stali stosowanych w energetyce. XXI Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego, Jachranka. s. 355-360.

- [14] Okrajni J., Junak G., Marek A., 2008. Modelling of the deformation process under thermo-mechanical fatigue conditions. *International Journal of Fatigue*. 30 s. 324–329.
- [15] 1992. ASTM E606-92: Standard Practice for Strain – Controlled Fatigue Testing.
- [16] 1984. PN-84/H-04334: Badania niskocyklowego zmęczenia metali.
- [17] Meetham G. W., Van de Voorde M. H., 2000. *Materials for High Temperature Engineering Applications*. Springer.
- [18] Szala J., 1998. Hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych. *Wyd. Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz*.
- [19] Caligiana G., Curioni S., 1992. Testing Rig Low Cycle Fatigue Tests in Combined Bending and Torsion. *Fatigue Design*, Helsinki, Finland. Vol. 2, 211-226.
- [20] 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*. Warszawa. 42, 269-283.
- [21] Boroński D., Cieszyński T., Topoliński T., Araszkiewicz M., 2006. Badania zmęczeniowe przy kontrolowanym poziomie energii dyssypacji. Koncepcja badań i wyniki wstępne. XXI Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania, Pieczyska k. Bydgoszczy. 59-66.
- [22] 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.
- [23] Duyi Y., Zhenlin W., 2001. Change characteristics of static mechanical property parameters and dislocation structures of 45C medium carbon structural steel during fa-tigue failure process. *Materials Science & Engineering*. A297, 54-61.
- [24] Kowalewski Z. L., 2011. Zmęczenie materiałów - podstawy, kierunki badań, ocena stanu uszkodzenia. Siedemnaste Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów. Zakopane.
- [25] Jakowluk A., 1993. Procesy pełzania i zmęczenia w materiałach. WNT Warszawa.
- [26] Mroziński S., 2015. True and nominal stress during low cycle fatigue tests of metals.
- [27] Kocańda S., 1985. Zmęczeniowe pękanie metali. WNT Warszawa.
- [28] Schijve J., 2009. *Fatigue of Structures and Materials*. Springer.
- [29] 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.
- [30] Kocańda S., Szala J., 1997. *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*. PWN Warszawa.

- [31] Endo T., Morrow J., 1969. Cyclic Stress-Strain and Fatigue Behavior of Representative Aircraft. *J. Mater.* Vol. 4, No.1, March, 159-175.
- [32] Graham (Ed.) J. A., 1968. *Fatigue Design Handbook*. SAE.
- [33] Hastie J. W., 1990. *Materials Chemistry at High Temperatures*. Springer. Vol. 1.
- [34] Okrajni J., Marek A., Junak G., 2004. Zmęczenie cieplnomechaniczne stali stosowanych w energetyce. XXI Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego. Jachranka. 355-360.
- [35] Hähner P. et al., 2008. Research and development into a European code-of-practice for strain-controlled thermo-mechanical fatigue testing. *International Journal of Fatigue*. 30 (2), 372-381.
- [36] Brnic J, Canadija M., Turkalj G., Lanc D., Behaviour of S 355JO steel subjected to uniaxial stress at lowered and elevated temperatures and creep.
- [37] Collins J. A., 1993. *Failure of materials in mechanical design*. New York: John Wiley & Sons.
- [38] 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*. Vol. 20, No. 1, s. 9-34.
- [39] Palmgren A., 1924 Die Lebensdauer von Kugellagem. *Verfahrenstechnik*. 68. s. 339-341.
- [40] Miner M.A. 1945 Cumulative Damage in Fatigue. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. Journal of Applied Mechanics* 67. 67. s. 159-164
- [41] Lai G. Y., 2007. *High-Temperature Corrosion and Materials Applications*. ASM International.
- [42] Junak G., Cieśla M., 2011. Low-Cycle fatigue of P91 and P92 steels used in the power engineering industry. *Archives of Material Science Engineering*. 48/19-24.
- [43] Bar-Cohen Y., 2014. *High temperature materials and mechanisms*. CRC Press.
- [44] Zhang J., 2010. *High temperature deformation and fracture of materials*. Woodhead Publishing.
- [45] Chen D. L., Weiss B., Stickler R., 1997. Cyclic plasticity of recrystallized Mo at low temperatures. *Materials Science & Engineering*. A234-236, 766-769.
- [46] 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.
- [47] Mathis K., Trojanova Z., Lukac P., 2002. Hardening and softening in deformed magnesium alloys. *Materials Science & Engineering*. A324, 141-144.

- [48] Brnic J., Turkalk G., Canadija M., Lanc D., 2011. AISI 316Ti (1.4571) steel - Mechanical, creep and fracture properties versus temperature. *Journal of Constructional Steel Research*. 67, 1948-1952.
- [49] Lipski A., Mroziński S., Wpływ temperatury na właściwości wytrzymałościowe stopu aluminium 2024 T3. *Acta Mechanica & Automatica Wydawnictwo Politechniki Białostockiej*. VOL 6 no 3(21) 2012.
- [50] Yong-Jun Oha, Won-Jon Yang, Jae-Gyu Jung, Won-Doo Choi, 2012. Thermomechanical fatigue behavior and lifetime prediction of niobium-bearing ferritic stainless steels. *International Journal of Fatigue*.
- [51] Hernas A., 1999. Żarowytrzymałość stali i stopów. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [52] Nagesha A., Valsan M., Kannan R., Bhanu Sankara Rao K., Mannan K., 2002. Influence of temperature on the low cycle fatigue behaviour of a modified 9Cr–1Mo ferritic steel. *International Journal of Fatigue*. 24, 1285–1293.
- [53] Gueler S., Schymura M., Fischer A., 2015. Austenitic high interstitial steels vs. CoCrMo – Comparison of fatigue behavior. *International Journal of Fatigue*. 75 145–152.
- [54] Qiang X., Bijlaard F.S.K., Kolstein H., 2013. Elevated-temperature mechanical properties of high strength structural steel S460N: Experimental study and recommendations for fire-resistance design. *Fire Safety Journal*. 55, 15-21.
- [55] 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.
- [56] Mathis K., Trojanova Z., Lukac P., 2002. Hardening and softening in deformed magnesium alloys. *Materials Science & Engineering*. A324, 141-144.
- [57] Neuber H., 1961. Theory of stress concentration for shear strained prismatical bodies with arbitrary nonlinear stress-strain law. *Journal of Applied Mech*. 28(4), 544-550.
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] Schlachter W., Gessinger G.H., 1990. High temp. materials for power engineering. Kluwer Academic Pub. The Netherlands.
- [61] Stephens R.I, Fatemi A., Stephens R. R., Fuchs H. O., 2001. Metal fatigue in engineering. New York: John Wiley & Sons.
- [62] 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 & Engineering*. A234-236, 834-837.
- [63] Armas A.F., Petersen C., Schmitt R., Avalos M., Alvarez-Armas I., 2002. Mechanical and microstructural behaviour of isothermally and thermally fatigued ferritic/martensitic steels. *Journal of Nuclear Materials*. 307–311, 509–513.
 - [64] 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.
 - [65] Nagode M., Hack M., 2004. An online algorithm for temperature influenced fatigue life estimation: stress-life approach. *International Journal of Fatigue*. 26, 163-171.
 - [66] Nagode M., Zingsheim M., 2004. An online algorithm for temperature influenced fatigue life estimation: strain-life approach. *International Journal of Fatigue*. 26, 155-161.
 - [67] 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.
 - [68] Ramberg W., Osgood W.R., 1943. Description of stress-strain curves by three parameters. NACA, Tech. Note 402.
 - [69] Hai N, Zhirui W., 2001. Effect of pre-strain and mean stress on cyclic plastic deformation response of iron - based alloys. *Materials Science & Engineering*. A314, 12-23.
 - [70] 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.
 - [71] 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.
 - [72] 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.
 - [73] Bernhart G., Moulinier G., Brucelle O., Delagnes D., 1999. High temperature low cycle fatigue behaviour of a martensitic forging tool steel. *International Journal of Fatigue*. 21, 179-186.
 - [74] Chai H., Fan Q., 1993. Proceedings of the 5th International Conference on Fatigue and Fatigue Thresholds.
 - [75] Wakai T., Sukekawa M., Datec S., Asayamaa T., Aotod K., Kuboe S., 2007. Development of high-chromium steel for the sodium-cooled fast reactor in Japan and creep–fatigue assessment of the steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 85 352–359.
 - [76] Jones W. B., 1981. The effects of mechanical cycling on the substructure of modified 9Cr 1Mo ferritic steel. *Metals Park (OH): ASM*. 221–35.

- [77] Gieseke B. G., Brinkman C. R., Maziasz P. J., 1993. The influence of thermal ageing on the microstructure and mechanical properties of modified 9Cr 1Mo steel. The Minerals, Metals and Materials Society. 197–205.
- [78] Asada Y., Dozaki K., Ueta M., Ichimiya M., Mori K., Taguchi K., 1993. Exploratory research on creep and fatigue properties of 9Cr steels for the steam generator of an FBR. Nucl Engng Design. 139-269.
- [79] Aoto K., Komine R., Ueno F., Kawasaki H., Wada Y., 1994. Creep - fatigue evaluation of normalized and tempered modified 9Cr 1Mo. Nucl Eng Design. 153-197.
- [80] Ebi G., McEvily A. J., 1984. Effect of processing on the high temperature low cycle fatigue properties of modified 9Cr 1Mo ferritic steel. Fatigue Fract Engng Mater Struct. 17, 299–314.
- [81] Jones W. B., 1981. The effects of mechanical cycling on the substructure of modified 9Cr 1Mo ferritic steel. Warren, PA, Metals Park (OH). 221–35.
- [82] Jones W. B., Van Den Avyle J. A., 1980. Substructure and strengthening mechanisms in 2.25Cr–1Mo steel at elevated temperatures. Metall Trans. 11A, 1275.
- [83] Fournier B. , Salvi M., Dalle F., De Carlan Y., Caës C., Sauzay M., Pineau A., 2010. Lifetime prediction of 9–12%Cr martensitic steels subjected to creep–fatigue at high temperature. International Journal of Fatigue. 32, 971–978.
- [84] Heckel T.K., Christ H. J., 2009. Thermomechanical Fatigue of the TiAl Intermetallic Alloy TNB-V2. Experimental Mechanics.
- [85] Kunz L., Lukas P., 2002. High temperature fatigue and cyclic creep of P91 steel. Elsevier Science Ltd. and ESIS. 37-44.
- [86] Moalla M., Lang K.-H. , Lohe D., 2002. Cyclic deformation and life time behaviour of NiCr22C012M09 at isothermal and thermal-mechanical fatigue. Elsevier Science Ltd. and ESIS. 85-94.
- [87] Obrtlík K., Pospíšilová S., Juliš M., Podrábský T., Polák J., 2012. Fatigue behavior of coated and uncoated cast Inconel 713LC at 800⁰C. International Journal of Fatigue.
- [88] El-Chaikh A., Appel F., Christ H.–J., 2013. Low cycle fatigue behaviour of the gamma titanium aluminide alloy tnb-v2. DVM, Seventh International Conference on Low Cycle Fatigue. 127-132.
- [89] 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. Vol. 19, s. 607-612
- [90] Geewook, Song, Jungseob, Hyun, Jeongsoo, Ha, 2002 Creep-fatigue prediction of aged 13CrMo44 steel using the tensile plastic strain energy. European Structural Integrity Society.
- [91] Ostergren W. J., 1976. Journal of Testing and Evaluation. 4. 327

- [92] Zhanpinga Z., Delagnes D., Bernhart G., 2011. Cyclic behaviour and plastic strain memory effect of 55NiCrMoV7 steel under low cycle fatigue. *Rare Metals*. Vol. 30, 443.
- [93] Zhang Z., Delagnes D., and Bernhart G., 2008. Cyclic behavior constitutive modeling of a tempered martensitic steel including ageing effect. *International Journal of Fatigue*. 30 (4): 706-716.
- [94] Ishii T., Fukaya K., Nishiyama Y., Suzuki M., Eto M., 1998. Low cycle fatigue properties of 8Cr±2WVTa ferritic steel at elevated temperatures. *Journal of Nuclear Materials*.
- [95] Zakaria K.A., Abdullah S., Ghazali M.J., Azhari C.H., 2013. Influence of spectrum loading sequences on fatigue life in a high-temperature environment. *Engineering Failure Analysis* 30. s. 111-123
- [96] Bradło D., Żelazny S., Żukowski W., 2012. Koncepcja elektrowni termojądrowej. *Czasopismo techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej*. 1-Ś, Zeszyt 4 109.
- [97] Costa N., Silva F.S., 2011. On a new temperature factor to predict the fatigue limit at different temperatures. *International Journal of Fatigue*. 33, 624–631.
- [98] Yoon-Jun Kim, Ho Jang, 2010. High temperature fatigue resistance of an ACI HH50-type cast austenitic stainless steel. *Materials Science and Engineering*. 527, 5415–5420.
- [99] Ellyin F., Kujawski D., 1984. Plastic strain energy in fatigue failure. *Journal Pressure Vessel Technology, Trans. ASME*. 106, 342-347.
- [100] Gołoś K., 1988. Energetic formulation o fatigue strength criterion. *Archiwum Budowy Maszyn XXXV*. (1/2), 5-16.
- [101] Kujawski D., Ellyin F., A cumulative damage theory of fatigue crack initiation and propaga-tion. *International Journal of Fatigue*. 6, 83-88.
- [102] Ramberg W., Osgood W.R., 1943. Description of stress-strain curves by three parameters. *NACA. Tech Note* 402.
- [103] Dobrzański J., 2011. Nowej generacji martenzytyczne stale 9-12%Cr do pracy w warunkach pełzania na elementy krytyczne części ciśnieniowej kotłów energetycznych o nadkrytycznych parametrach pracy. *Prace IMŻ* 4.
- [104] Heidarpour A., Niall S., Korayem H., Xiao-Ling Zhao, Hutchinson C. R., 2014. Mechanical properties of very high strength steel at elevated temperatures. *Fire Safety Journal*. 64, 27-35.
- [105] Chen, J., Young, B., and Uy, B., 2006. Behavior of high strength structural steel at elevated temperatures. *Journal of Structural Engineering*. Volume 132, Issue 32.
- [106] Qiang X., Bijlaard F.S.K., Kolstein H., 2012. Deterioration of mechanical properties of high strength structural steel S460N under steady state fire condition. *Materials and Design*. 36, 438-442.

- [107] Kankanamge N. D., Mahendran M., 2011. Mechanical properties of cold-formed steels at elevated temperatures. *Thin-Walled Structures*. 49, 26-44.
- [108] 2006. BS7270:2006 Metallic materials - Constant amplitude strain controlled axial fatigue - Method of test.
- [109] Boroński D., 2005. Doświadczalna analiza rozkładów odkształceń w strefach zmęczeniowego pękania. *Zesz. Nauk. ATR w Bydgoszczy. Rozprawy* 115.
- [110] Mroziński S., 2013. O kryterium końca prób zmęczeniowych w podwyższonych temperaturach. XIV Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania Kielce - Cedzyna. ss. 275-282.
- [111] Mroziński S., Piotrowski M., 2014. About fatigue tests end criterion in elevated temperatures. *Key Engineering Materials*. Vol. 598, ss. 153-159.
- [112] Bai-Mao Lei, Van-Xuan Tran, Saïd Taheri, Jean-Christophe le Roux, François Curtit, Mi Hef, Li Wanb, Yu Zhou, 2015. Toward consistent fatigue crack initiation criteria for 304L austenitic stainless steel under multi-axial loads. *International Journal of Fatigue*. 75, 57-68.
- [113] Mroziński S., Skocki R., 2012. Influence of temperature on the cyclic properties of martensitic cast steel. *Materials Science Forum*. 726, 150-155.
- [114] Mroziński S., Skocki R., The influence of temperature on the course of fatigue damage cumulation of P91 steel. "Seventh International Conference on Low Cycle Fatigue." 57-63.
- [115] Mroziński S., Skocki R., 2011. Softening of martensitic cast steel. *Journal of polish CIMAC*. Vol. 6 No.3, 173-180.
- [116] Mroziński S., Skocki R., 2012. Wpływ temperatury badań na parametry pętli histerezy. XXIV Sympozjum Zmęczenia i Mechaniki Pękania, Bydgoszcz –Pieczyska. s. 105-106.
- [117] Mroziński S., Skocki R., Golański G., Werner K., 2012. Wpływ temperatury na dane materiałowe określone na podstawie niskocyklowych badań zmęczeniowych. XXIV Sympozjum Zmęczenia i Mechaniki Pękania, Bydgoszcz –Pieczyska. s.107-108.
- [118] Mroziński S., Skocki R., 2012. Influence of temperature and total strain on the fatigue damage of cast steel. *Journal of polish CIMAC*. Vol.7 No 1.
- [119] Mroziński S., Skocki R., Lis Z., 2012. Influence of temperature on material data determined on the base of low cycle fatigue tests. *Journal of polish CIMAC*. Vol. 7 No 3.
- [120] Mroziński S., Skocki R., 2013. Influence of temperature on the course of fatigue damage cumulation of cast steel. Seventh International Conference on Low Cycle Fatigue. s. 57-62.
- [121] Skocki R. Mroziński S., 2014. Badanie wpływu temperatur podwyższonych na właściwości cykliczne stali P91. *Postępy*

- w Inżynierii Mechanicznej 4(2) 2014. Czasopismo Naukowo-Techniczne Wydziału Inżynierii Mechanicznej UTP w Bydgoszczy. s. 33-44.
- [122] Mroziński S., Skocki R., 2015. Wpływ temperatury na wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej. Postępy w Inżynierii Mechanicznej 6(3) 2015. Czasopismo Naukowo-Techniczne Wydziału Inżynierii Mechanicznej UTP w Bydgoszczy. s. 43-55.
- [123] Depreński Ł., Falkowska A., Seweryn A., Szusta J., 2013. Badania doświadczalne i modelowanie procesów kumulacji uszkodzeń i pęknięcia elementów konstrukcyjnych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej; Rozprawy naukowe nr 240, Biblioteka Mech

BADANIA WPŁYWU TEMPERATURY PODWYŻSZONEJ NA WŁAŚCIWOŚCI CYKLICZNE STALI P91

Streszczenie

Praca doktorska dotyczy problematyki obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych eksploatowanych w temperaturach podwyższonych metodą, która bazuje na analizie lokalnych odkształceń i naprężeń. Podczas obliczeń trwałości wspomnianą metodą wykorzystuje się między innymi dane materiałowe określone podczas niskocyklowych badań zmęczeniowych prowadzonych w temperaturach podwyższonych z tzw. okresu stabilizacji właściwości cyklicznych. Jej celem głównym jest określenie wpływu temperatur podwyższonych na trwałość zmęczeniową oraz właściwości cykliczne stali konstrukcyjnej stosowanej na elementy maszyn poddanych eksploatacji w temperaturach podwyższonych.

W pracy dokonano analizy dotychczasowego stanu wiedzy obejmującego opis właściwości cyklicznych, stosowanych modeli oraz ich wykorzystywanie podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów poddanych obciążeniu zmiennemu w temperaturach podwyższonych. Dokonano również analizy wpływu czynników związanych z obciążeniem i warunkami badań na właściwości zmęczeniowe a przede wszystkim na przebieg zmian właściwości cyklicznych materiałów stosowanych na te elementy w trakcie obciążenia zmiennego. Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że podobnie jak w przypadku temperatur otoczenia tak również w temperaturach podwyższonych istnienie okresu stabilizacji stali i jej stopów jest pojęciem czysto umownym ze względu, że stan ten praktycznie nie występuje wcale.

W ramach badań przeprowadzono testy próbek wykonanych ze stali P91 w warunkach obciążeń monotonicznych, stałoamplitudowych i programowanych. Próby prowadzono w warunkach izotermicznych w trzech różnych temperaturach (20°C, 400°C, 600°C). Do analizy przebiegu zmian właściwości cyklicznych stali P91 wykorzystywano wartości podstawowych parametrów pętli histerezy rejestrowanych w różnych okresach trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążenia stałoamplitudowego i programowanego. Wyniki badań zmęczeniowych przedstawiono w formie wykresów przyjętych parametrów pętli histerezy w funkcji liczby cykli obciążenia oraz w postaci wykresów zmęczeniowych w ujęciu odkształceniowym i energetycznym.

Analizę wyników badań prowadzono w aspekcie wpływu wielkości odkształcenia, postaci programu obciążenia i temperatury na przebieg zmian właściwości cyklicznych oraz na trwałość zmęczeniową. W pracy doktorskiej dokonano również oceny ilościowej wpływu przebiegu zmian właściwości cyklicznych na wykorzystywane podczas obliczeń dane materiałowe. Na

podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że wartości parametrów pętli histerezy jak również danych materiałowych wykorzystywanych podczas obliczeń trwałości zależą od okresu trwałości zmęczeniowej, w którym zostały określone. Ponadto przebieg zmian parametrów pętli histerezy na tych samych poziomach odkształcenia realizowanego w warunkach obciążenia stałoamplitudowego i programowanego w zróżnicowanych temperaturach charakteryzuje podobieństwo jakościowe, co do jego przebiegu oraz ilościowe dotyczące wartości parametrów pętli.

Zarówno podczas badań zmęczeniowych stałoamplitudowych jak również programowanych realizowanych w trzech temperaturach obserwowano wyraźne osłabienie próbek ze stali P91. Widoczne ono było w postaci charakterystycznych zmian podstawowych parametrów pętli histerezy w funkcji liczby cykli obciążenia. W pracy wykazano, że na wielkość osłabienia wpływ ma zarówno temperatura jak również poziom odkształcenia. W temperaturach podwyższonych wielkość zmian podstawowych parametrów pętli histerezy jest zdecydowanie większa niż w temperaturach otoczenia.

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano wyraźny wpływ temperatury na trwałość zmęczeniową. Wraz ze wzrostem temperatury trwałość zmęczeniowa ulega obniżeniu. Wpływ temperatury na obniżenie trwałości zależy od poziomu odkształcenia. Jest on niewielki w obszarze bardzo dużych odkształceń i wzrasta wraz z ich obniżaniem.

Przeprowadzona w pracy doświadczalna weryfikacja hipotezy Palmgrena Minera (PM) wykazała, że na jej skuteczność wpływ ma temperatura. Wraz ze wzrostem temperatury skuteczność hipotezy PM ulega obniżeniu. Ponadto wpływ na zróżnicowanie wyników trwałości uzyskanych z obliczeń i badań ma zarówno postać programu obciążenia oraz jego parametry. Większe zróżnicowanie wyników obliczeń i badań obserwowano dla mniejszych wartości odkształcenia maksymalnego (ε_{acmax}) w programie obciążenia. Większe zróżnicowanie wyników trwałości uzyskanych z obliczeń i badań w temperaturach podwyższonych uzasadniono faktem zdecydowanie większych zmian właściwości cyklicznych (parametrów pętli histerezy) w temperaturach podwyższonych w stosunku do temperatur otoczenia. Ze względu na obserwowane znaczne zmiany właściwości cyklicznych stali P91 w temperaturach podwyższonych, jak również charakter ich zmian (najczęściej osłabienie) istnieje potrzeba zwrócenia szczególnej uwagi i uwzględnienia tego faktu podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych poddanych eksploatacji w temperaturze podwyższonej. W pracy wykazano, że można to zrealizować np w przypadku odpowiedzialnych elementów konstrukcyjnych poprzez przeprowadzenie obliczeń sprawdzających trwałości zmęczeniowej dla skrajnych wartości parametrów opisujących właściwości cykliczne.

RESEARCH OF ELEVATED TEMPERATURE INFLUENCE ON CYCLIC PROPERTIES OF P91 STEEL

Summary

The dissertation deals with the issue of fatigue life calculation of structure parts which operate at elevated temperatures. There was used a method which bases on the local deformation and stress analysis. Material data taken into consideration are determined during low cycle fatigue tests carried out at elevated temperatures and derived from, so called, stabilization period of cyclic properties. The goal of this method is to determine the influence of elevated temperatures on fatigue life and cyclic properties of constructional steel which is applied in parts in machines operated at elevated temperatures.

State of the art knowledge was analyzed and involved description of cyclic properties, current calculation models which were used for fatigue life calculations of components working under alternative loads and at elevated temperatures. There was carried out an analysis of influence of numerous factors connected to the load and test conditions on fatigue properties, particularly influence on the course of changes of cyclic properties in materials used for elements operating under alternative loads. Basing on this analysis it was stated that, similarly to the room temperatures, at elevated temperatures stabilization period existence of steel and alloys is only conventional notion because this state actually does not exist at all.

Specimens made of P91 steel were tested in monotonic, constant amplitude and programmed loads conditions. Tests were carried out in isothermal conditions at three different temperatures (20°C, 400°C, 600°C). In order to analyze the course of change of cyclic properties of P91 steel basic parameters of hysteresis loop were recorded for different period of fatigue life in conditions of constant amplitude and programmed loads conditions. Results were presented in form of diagrams for given hysteresis loop parameters in the function of number of loading cycles and in form of fatigue diagrams in plastic and energetic approach.

Test results were analyzed in the aspect of plastic strain, loading program type and temperature influence on the course of change of cyclic properties and on fatigue life. In this dissertation was also performed a quantitative evaluation of course of cyclic properties changes influence on material data used during fatigue calculations. Basing on the tests it was stated that hysteresis loop parameters, material data for the calculations depend on fatigue life period in which they were determined. Besides, course of changes of hysteresis loop parameters on the same level of total strain under constant amplitude loads and programmed loads at the range of temperatures is characterized by qualitative similarity in its course and quantitative similarity in hysteresis loop parameters values.

Both during constant amplitude and programmed fatigue tests at three temperatures there was observed a clear softening of specimens made of P91 steel. It was apparent in form characteristic changes of basic hysteresis loop parameters in the function of number of loading cycles. In this work it was proved that effect of softening is influenced by temperature and level of total strain. At elevated temperatures volume of changes of basic hysteresis loop parameters is considerably greater than at room temperature.

Basing on the tests clear temperature influence on fatigue life was proved. With increasing the temperature fatigue life decreases. Temperature influence on fatigue life decreasing depends on level of total strain. The influence is low in the area with high strains and increases with lowering the strains.

Experimental studies on Palmgren-Miner (PM) hypothesis proved that temperature has influence on its effectiveness. With increasing the temperature PM effectiveness decreases. Furthermore, differentiation of fatigue life results obtained from calculation and tests is influenced by program type and its parameters. Larger differentiation of calculation and test results was observed for lower levels of total strain (ε_{acmax}) in loading program. Greater differentiation of fatigue life results from calculation and tests was explained by definitely larger changes of cyclic properties (hysteresis loop parameters) at elevated temperatures comparing to room temperatures. With regards to significant changes of P91 cyclic properties at elevated temperatures as well as their behavior (most frequently softening) there is need to pay particular attention and consider this fact during fatigue life calculation of structure elements operating at elevated temperatures. It was stated that it can be realized, for example, for reliable structure parts by checking calculations for fatigue life for limit values of parameters describing cyclic properties.