

STANISŁAW MROZIŃSKI

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

WPLYW PARAMETRÓW PROGRAMU OBCIĄŻENIA NA PRZEBIEG STABILIZACJI METALI

W pracy przedstawiono wyniki badań zmęczeniowych oraz analizę wpływu parametrów programu obciążenia (sekwencja stopni w programie, wartość odkształcenia na stopniu, wartość maksymalna odkształcenia w programie oraz współczynnik wypełnienia widma) na przebieg stabilizacji metali.

Słowa kluczowe: własności cykliczne metali, obciążenia programowane

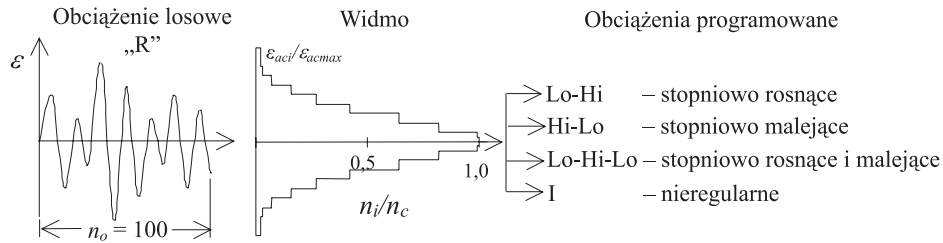
1. WSTĘP

Cykliczne odkształcenia plastyczne wywołują w materiale złożony splot zjawisk zależnych od stanu materiału, wartości obciążeń i liczby cykli obciążenia [3, 7]. Nazywamy je ogólnie zmianami zmęczeniowymi. Do ich opisu można przyjmować różne wielkości fizyczne, które podczas obciążenia cyklicznego podlegają pomiarom lub obliczeniom. Do najważniejszych można zaliczyć m.in. parametry pętli histerezy, takie jak ϵ_{ac} , ϵ_{ap} , ϵ_{ae} , σ_a , ΔW_{pl} [2]. Parametry te są traktowane jako wielkości kryterialne w opisach zmęczenia (odkształceniowy, naprężeniowy, energetyczny) [3]. Występujące w różnych okresach trwałości związki między wielkościami kryterialnymi a liczbą cykli obciążenia N nazywa się własnościami cyklicznymi. Na podstawie analizy wyników badań uzyskanych dla prostych programów obciążenia można stwierdzić, że nie zależą one od programu obciążenia [4, 5].

Celem podstawowym pracy jest ocena wpływu parametrów obciążenia programowanego o zróżnicowanej postaci na przebieg zmian własności cyklicznych metali. Celem dodatkowym jest ich analiza porównawcza w warunkach obciążenia stałoamplitudowego i programowanego.

2. OPIS BADAŃ

Próbki do badań zmęczeniowych wykonano z trzech metali, tj.: stali C45, stali stopowej 30HGSA i stopu AW-2024 zgodnie z normą ASTM [1]. Podczas badań stosowano obciążenia stałoamplitudowe i programowane. Podstawą opracowania obciążeń programowanych było widmo będące wynikiem schematyzacji przebiegu o nieregularnym następcie cykli „R” (rys. 1).



Rys. 1. Programy obciążenia

Obciążenia losowe i programowane charakteryzowano wartością maksymalnej amplitudy odkształcenia całkowitego ε_{acmax} w bloku programu oraz współczynnikiem wypełnienia widma ζ :

$$\zeta = \sum_{i=1}^{i=10} \frac{\varepsilon_{aci}}{\varepsilon_{acmax}} \frac{n_i}{n_o} \quad (1)$$

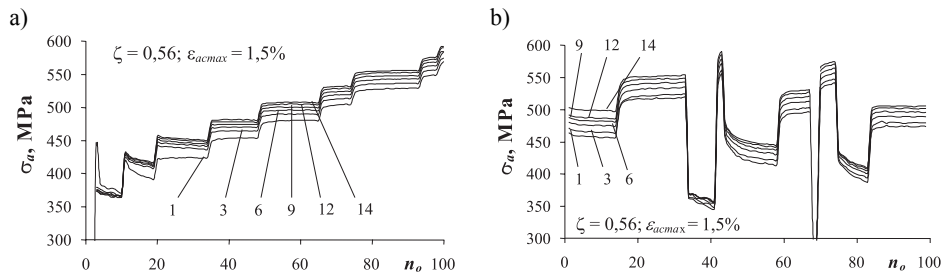
Podczas badań w warunkach obciążeń losowych i programowanych, podobnie jak w warunkach obciążeń stałoamplitudowych, parametrem sterującym próbą zmęczeniową było odkształcenie całkowite ε_{ac} części pomiarowej próbki. W trakcie prób rejestrowano chwilowe wartości siły obciążającej próbkę oraz jej odkształcenia dla wybranych pojedynczych cykli lub całych bloków obciążenia.

3. WYNIKI BADAŃ I ANALIZA WYNIKÓW

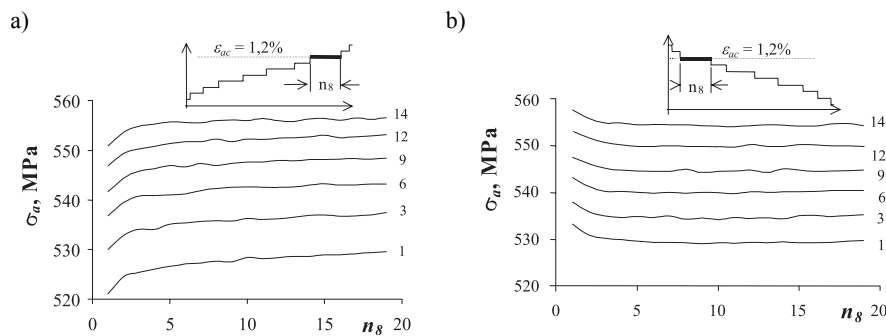
3.1. Wpływ sekwencji stopni w programie obciążenia

Dla zarejestrowanych podczas badań bloków obciążenia obliczono wartości podstawowych parametrów pętli histerezy dla kolejnych cykli bloku, tj.: amplitudę naprężenia σ_a , amplitudę odkształcenia plastycznego ε_{ap} oraz energię odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} . Na podstawie analizy przebiegów tych parametrów w kolejnych blokach obciążenia programowanego stwierdzono, że niezależnie od programu obciążenia badane metale zachowywały się bardzo podobnie. Cechą charakterystyczną tych przebiegów było występowanie cyklicznego umocnienia (próbki ze stali C45 i stopu AW-2024) i osłabienia (próbki ze stali 30HGSA). Przykładowe przebiegi zmian naprężenia σ_a ilustrujące te procesy w wybranych blokach obciążenia Lo-Hi oraz I próbek ze stali C45 przedstawiono w formie wykresów na rysunku 2.

Szczegółowa analiza przebiegów zmian parametrów pętli histerezy na poszczególnych stopniach realizowanych programów wykazała, że sekwencja stopni w programie wpływa w niewielkim stopniu na przebieg własności cyklicznych na danym stopniu. Wpływ ten jest widoczny jedynie zaraz po zmianie poziomów obciążenia. Powyższe wyjaśniono na rysunku 3 na podstawie przykładowych przebiegów zmian naprężenia σ_a w próbkach ze stali C45 na stopniu o amplitudzie $\varepsilon_{ac} = 1,2\%$ dla dwóch różnych sekwencji stopni w programie.

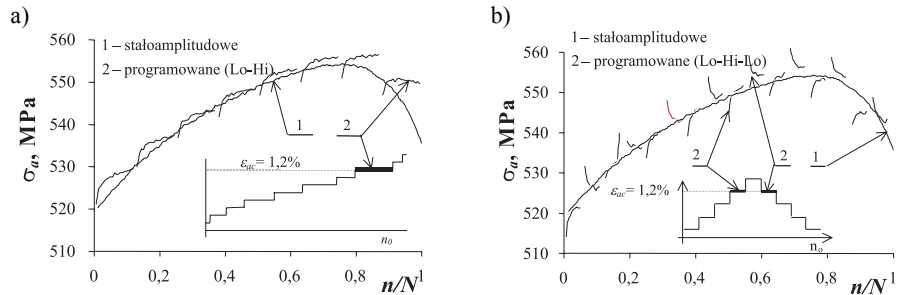


Rys. 2. σ_a w blokach programu obciążenia próbek ze stali C45: a) Lo-Hi, b) I



Rys. 3. Zmiany σ_a na stopniu o amplitudzie $\varepsilon_{ac} = 1,2\%$ w warunkach obciążeń programowanych próbek ze stali C45 ($\zeta = 0,56$, $\varepsilon_{acmax} = 1,5\%$): a) Lo-Hi, b) Hi-Lo

Zmiana poziomu odkształcenia z niższego na wyższy (programy Lo-Hi, Lo-Hi-Lo oraz I) prowadziła w przypadku stali C45 do umocnienia materiału i uzyskania nowego poziomu naprężenia stabilizacji σ_{as} na danym stopniu. Poziom ten był jednak wyższy od poziomu uzyskanego na danym stopniu w poprzednim bloku obciążenia. Z kolei zmiana amplitudy odkształcenia z większej na mniejszą (program Hi-Lo, Lo-Hi-Lo oraz I) prowadziła do chwilowego osłabienia materiału na kolejnym stopniu i uzyskania na nim nowego poziomu naprężenia stabilizacji σ_{as} . Naprężenie to jest jednak również wyższe od naprężenia uzyskanego na danym stopniu w poprzednim bloku. Na podstawie analizy zmian parametrów pętli histerezy na poszczególnych stopniach realizowanych programów stwierdzono, że ich wartości zależą od okresu trwałości, a charakter zmian jest zbliżony jakościowo i ilościowo do zmian obserwowanych na danych poziomach odkształcenia w warunkach obciążenia stałoamplitudowego. W celu zilustrowania wymienionego spostrzeżenia na rysunku 4 przedstawiono przykładowe przebiegi zmian σ_a na jednym poziomie odkształcenia ($\varepsilon_{ac} = 1,2\%$) realizowanym w warunkach obciążenia stałoamplitudowego i programowanego w funkcji trwałości względnej n/N , gdzie n – oznacza bieżącą liczbę cykli w warunkach obciążeń stałoamplitudowych lub programowanych a N – liczbę cykli do pęknięcia zmęczeniowego w warunkach obciążeń stałoamplitudowych lub programowanych.

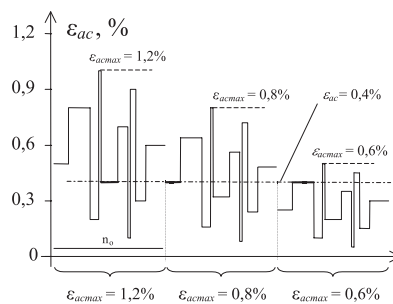


Rys. 4. Zmiany σ_a w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych i programowanych próbek ze stali C45 ($\zeta = 0,56$, $\epsilon_{acmax} = 1,5\%$): a) Lo-Hi, b) Lo-Hi-Lo

Naprężenia σ_a określające chwilowe własności materiału w warunkach obciążenia stałoaamplitudowego i programowanego mają w tych samych okresach trwałości zbliżony poziom. Z wykonanych wykresów ponadto wynika, że materiał pomimo zaburzenia procesu stabilizacji przez zmianę amplitudy odkształcenia na kolejnym stopniu wydaje się „pamiętać” charakterystyczny dla tego poziomu odkształcenia przebieg procesu stabilizacji. Na wykresach zmian σ_a podczas obciążeń programowanych widać bardzo wyraźny trend zmian własności cyklicznych. Trend ten jest bardzo podobny do przebiegu zmian własności cyklicznych mającego miejsce podczas obciążenia stałoaamplitudowego. Uzyskiwane w końcowych cyklach obciążenia kolejnych stopni naprężenia σ_a zmiernają do poziomu odpowiadającego naprężeniu σ_a dla obciążenia stałoaamplitudowego. Powyższe obserwowano dla wszystkich sekwencji programów obciążenia realizowanych podczas badań oraz trzech badanych metali.

3.2. Wpływ odkształcenia maksymalnego ϵ_{acmax} w programie

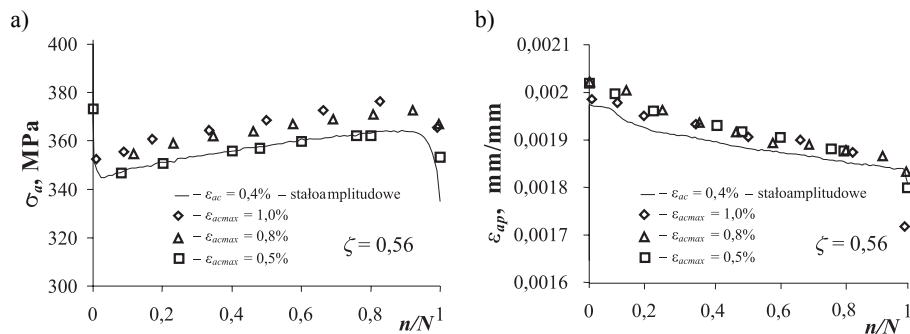
Oceny wpływu wielkości odkształcenia maksymalnego ϵ_{acmax} w programie na zmiany własności cyklicznych dokonano, porównując zmiany wybranych parametrów pętli histerezy na tym samym poziomie odkształcenia ($\epsilon_{ac} = 0,4\%$) realizowanym w programach o różnej wartości maksymalnej odkształcenia ϵ_{acmax} (rys. 5).



Rys. 5. Położenie stopnia o amplitudzie $\epsilon_{ac} = 0,4\%$ w zależności od ϵ_{acmax}

Na podstawie przeprowadzonej analizy parametrów pętli histerezy uzyskanej w ostatnim cyklu stopnia o amplitudzie $\epsilon_{ac} = 0,4\%$ stwierdzono, że niezależnie od po-

ziomu odkształcenia maksymalnego ε_{acmax} , przebieg zmian własności cyklicznych na nim jest zawsze bardzo podobny i zbliżony do przebiegów uzyskanych w warunkach obciążenia stałoaamplitudowych. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe przebiegi zmian parametrów pętli histerezy uzyskanych podczas badań próbek ze stali C45 podczas realizacji programu o nieregularnym następnym stopni i zróżnicowanej wartości ε_{acmax} na poziomie $\varepsilon_{ac} = 0,4\%$ w zależności od okresu trwałości względnej n/N .



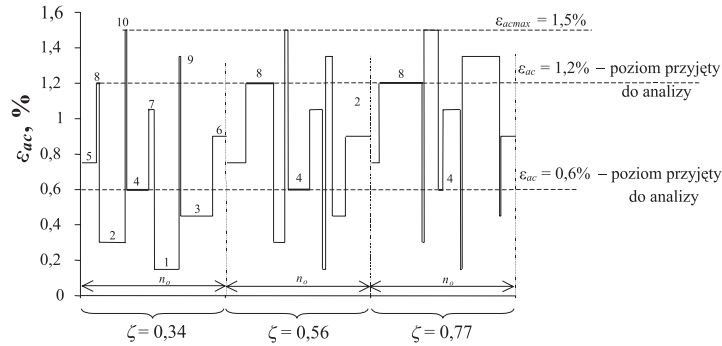
Rys. 6. Parametry pętli histerezy na poziomie $\varepsilon_{ac} = 0,4\%$ w warunkach obciążenia stałoaamplitudowych i programowanych (I) próbek ze stali C45: a) σ_{as} , b) ε_{ap}

Uzyskane dla zróżnicowanych wartości ε_{acmax} przebiegi charakteryzuje występowanie tych samych zjawisk (osłabienie na początku, a następnie umocnienie), które obserwowano na tym samym poziomie odkształcenia w warunkach obciążenia stałoaamplitudowego. Przyjęty do analizy poziom odkształcenia był największym w programie o wartości maksymalnej odkształcenia $\varepsilon_{acmax} = 0,4\%$ i jednym z najmniejszych w programie o wartości maksymalnej odkształcenia $\varepsilon_{acmax} = 1,5\%$.

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

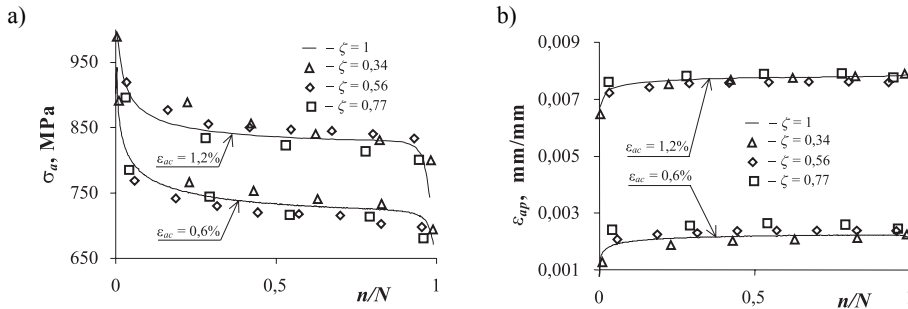
3.3. Wpływ współczynnika wypełnienia widma ζ

Zróżnicowane poziomy współczynnika wypełnienia widma ζ w programach obciążenia uzyskano za pomocą zmiany liczby cykli obciążenia na poszczególnych stopniach programu nie zmieniając pojemności bloku programu. Oceny wpływu współczynnika ζ na zmiany własności cyklicznych dokonano porównując wartości parametrów pętli histerezy na tych samych stopniach w programach o zróżnicowanej wartości współczynnika wypełnienia widma ζ . Sposób postępowania wyjaśniono schematycznie na rysunku 7.



Rys. 7. Metoda oceny wpływu współczynnika wypełnienia widma na własności cykliczne

Z przeprowadzonych badań wynika, że nie stwierdzono zauważalnego wpływu współczynnika ζ na wartości parametrów pętli histerezy. Parametry pętli histerezy niezależnie od wartości współczynnika wypełnienia widma ζ były w tych samych okresach trwałości statystycznie takie same. Na rysunku 8 pokazano przykładowe przebiegi zmian parametrów pętli histerezy na dwóch poziomach odkształcenia ($\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ i $1,2\%$) próbek ze stali 30HGSA w programie o nieregularnym następstwie stopni (program I) i zróżnicowanym współczynniku ζ w funkcji trwałości względnej n/N .



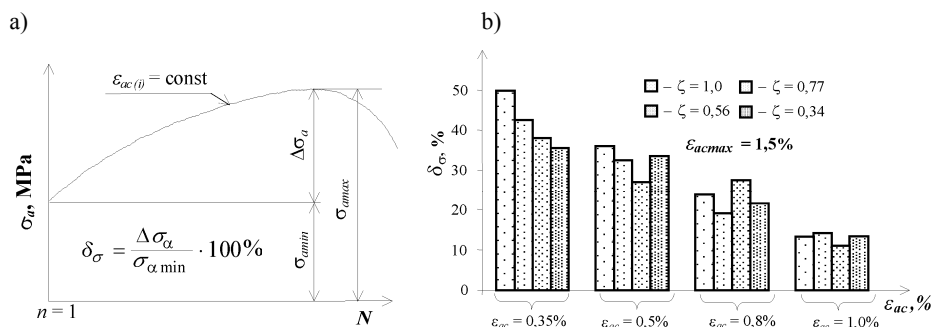
Rys. 8. Parametry σ_a i ε_{ap} na dwóch poziomach odkształcenia w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych i programowanych próbek ze stali 30 HGSA: a) σ_a , b) ε_{ap}

Na podstawie analizy porównawczej wykonanych wykresów parametrów pętli histerezy uzyskanych na zróżnicowanych poziomach trzech badanych metali w warunkach obciążeń programowanych i stałoaamplitudowych stwierdzono, że przebieg ich nie zależy od wartości współczynnika wypełnienia widma.

3.4. Wpływ poziomu amplitudy odkształcenia na stopniu programu

Analiza porównawcza własności cyklicznych na różnych poziomach odkształcenia wykazała, że na wielkość zmian własności cyklicznych wpływa poziom odkształcenia ε_{ac} . Największe zmiany parametrów pętli histerezy w funkcji liczby cykli obciążenia stałoaamplitudowego i programowanego obserwowano w przypadku stopu AW-2024. W celu oceny wpływu poziomu odkształcenia na wielkość zmian własności cyklicznych wprowadzono współczynniki zmian własności cyklicznych: δ_σ dla opisu naprężeniowego, δ_ε – dla

opisu odkształceniowego oraz δ_W – dla opisu energetycznego. Na rysunku 9 pokazano interpretację graficzną współczynnika δ_σ oraz przykładowe wyniki obliczeń δ_σ dla czterech poziomów odkształcenia próbek ze stopu AW-2024 realizowanych w warunkach obciążeń programowanych (I) o zróżnicowanej wartości współczynnika ζ . W celu porównania, na rysunku 9b naniesiono również wartości δ_σ uzyskane na tych samych poziomach odkształcenia realizowanego w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych ($\zeta = 1$).



Rys. 9. Zmiany własności cyklicznych próbek ze stopu AW-2024 w zróżnicowanych warunkach obciążenia: a) interpretacja współczynnika δ_σ , b) wyniki obliczeń δ_σ

Analiza wykresów współczynników δ_σ uzyskanych dla zróżnicowanych parametrów i postaci programów obciążenia pozwala stwierdzić, że skala zmian własności cyklicznych na poszczególnych poziomach odkształcenia wydaje się być również bardzo zbliżona. Największe zmiany własności cyklicznych dotyczą najmniejszych poziomów odkształcenia i ulegają obniżeniu wraz ze wzrostem odkształcenia ϵ_{ac} . Podobne zależności pomiędzy poziomem odkształcenia i wielkością zmian własności cyklicznych obserwowano podczas analizy zmian współczynników δ_ϵ i δ_W .

4. PODSUMOWANIE

Analiza porównawcza parametrów pętli histerezy na wybranych poziomach obciążenia i różnych okresach trwałości pozwala stwierdzić, że przebieg zmian własności cyklicznych na danym poziomie odkształcenia jest cechą charakterystyczną danego materiału. Sam przebieg zmian własności cyklicznych nie zależy od postaci i parametrów programu obciążenia.

Na wielkość występujących zmian własności cyklicznych na danym poziomie odkształcenia wpływa przede wszystkim wielkość odkształcenia. Skala zmian własności cyklicznych obserwowanych podczas badań trzech metali wzrasta wraz z obniżaniem poziomu odkształcenia.

Jakościowo oraz ilościowo zbliżony przebieg zmian własności cyklicznych na tych samych poziomach odkształcenia realizowanego w warunkach obciążenia stałoaamplitudowego i programowanego pozwala w konsekwencji prowadzić obliczenia trwałości zmęczeniowej uwzględniając występujące zmiany własności cyklicznych materiału. Takie podejście do problemu obliczeń trwałości zmęczeniowej może mieć szczególne znaczenie w przypadku materiałów charakteryzujących się brakiem okresu stabilizacji, np. stopów aluminium czy miedzi. Powyższe potwierdzone zostało między innymi w pracy [6].

LITERATURA

- [1] ASTM E606-92, Standard Practice for Strain – Controlled Fatigue Testing.
- [2] Kaleta J., 1999. Doświadczalne podstawy formułowania energetycznych hipotez zmęczeniowych. Wyd. Politechniki Wrocławskiej.
- [3] Kocańda S., Kocańda A., 1989. Niskocyklowa wytrzymałość zmęczeniowa metali. PWN Warszawa.
- [4] Mroziński S., 2003. Influence of loading program sequence on the course of the 45 steel stabilization process. The Archive of Mechanical Engineering, Vol. L(4).
- [5] Mroziński S., 2006. Comparative analysis of cyclic properties of 30 HGSA steel under constant-amplitude and incremental step loading. The Archive of Mechanical Engineering, Vol. LIII(2).
- [6] Mroziński S., 2008. Stabilizacja własności cyklicznych metali i jej wpływ na trwałość zmęczeniową. Rozprawy 128. Wyd. UTP w Bydgoszczy.
- [7] Szala J., Mroziński S., 1993. An analysis of the influence of overloads on the fatigue life of 45 – steel within the range of low – cycle fatigue. Journal of Theoretical and Applied Mechanics 4(31).

Praca została wykonana w latach 2006-2009 w ramach grantu finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr N501 040 31/2563.

INFLUENCE OF THE LOADING PROGRAM PARAMETERS ON THE METALS STABILIZATION PATTERN

Summary

The paper presents the fatigue test results and the analysis of the influence of the loading program parameters (sequence of the steps in the programme, deformation value at the step, maximum deformation value in the programme and the coefficient of spectrum filling) on the metals stabilization pattern.

Keywords: cyclic properties of metals, programmed loading