

Stanisław MROZIŃSKI

O OSŁABIENIU STALI STOPOWEJ 30 HGSA PODCZAS OBCIĄŻENIA STAŁOAMPLITUDOWEGO I NIEREGULARNEGO

W pracy zamieszczono wyniki oraz analizę niskocyklowych badań zmęczenia stali 30HGSA w warunkach obciążeń stałoamplitudowych oraz programowanych blokowych (stopniowo narastających oraz nieregularnych). Wyniki badań analizowano w aspekcie wpływu typu programu obciążenia na przebieg procesu stabilizacji. Analiza porównawcza zmian wybranych parametrów pętli histerezy dla tych samych poziomów odkształcenia całkowitego uwidoczniła podobieństwo ilościowe oraz jakościowe przebiegu procesu stabilizacji podczas obciążeń stałoamplitudowych oraz programowanych.

Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy, Wydział Mechaniczny
al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

1. WPROWADZENIE

Jednym z podstawowych założeń metody obliczeń trwałości zmęczeniowej opartej na analizie lokalnych odkształceń i naprężeń jest niezmiennosc parametrów pętli histerezy podczas cyklicznego obciążenia. W pracach [1, 2] na podstawie badań stali 45 w warunkach występowania przeciążeń wykazano, że po każdej zmianie poziomu obciążenia występowało zjawisko umocnienia materiału. Porównanie pętli histerezy przed i po zmianie poziomu obciążenia wskazywało na zmiany własności cyklicznych materiału, a przede wszystkim utratę stanu stabilizacji uzyskanej na poprzednim poziomie obciążenia. Weryfikacja doświadczalna metod obliczeń trwałości zmęczeniowej uwidoczniła ich wyższą skuteczność w przypadku stosowania do obliczeń trwałości elementów konstrukcyjnych wykonanych z metali charakteryzujących się niewielkimi zmianami własności cyklicznych niż w przypadku zastosowania do elementów wykonanych z materiałów cyklicznie niestabilnych [3].

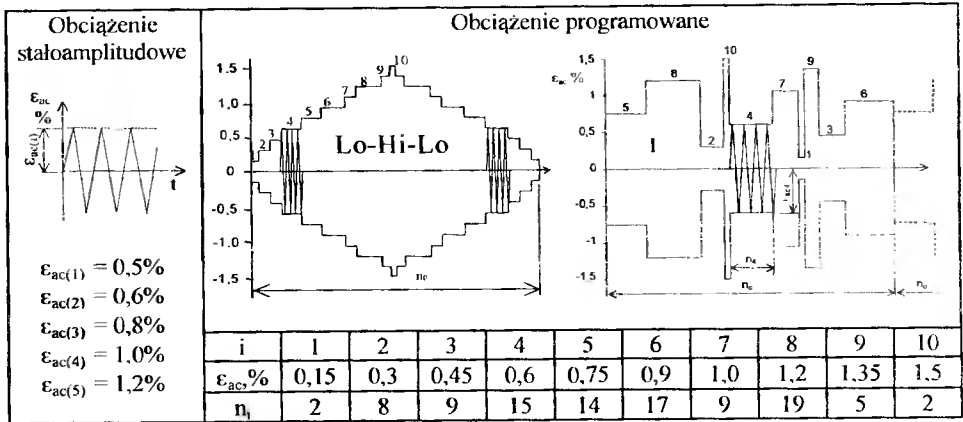
Problemem badawczym jest zarówno sam przebieg zmian własności cyklicznych podczas obciążenia nieregularnego, jak również możliwość przewidywania jego przebiegu. Przeprowadzone w Katedrze PKM badania procesu stabilizacji wskazują na możliwość opisu zmian własności cyklicznych stali 45 podczas obciążeń nieregularnych na podstawie danych uzyskanych z badań normatywnych. Stal 45 można zaliczyć do materiałów charakteryzujących się niewielkimi zmianami własności cyklicznych. W celu sformułowania wniosków o charakterze ogólnym niezbędne są badania materiałów cyklicznie niestabilnych. Takim materiałem jest np. stal stopowa 30HGSA, charakteryzująca się podczas obciążenia zmiennego cyklicznym osłabieniem.

Celem podstawowym pracy jest analiza porównawcza procesu stabilizacji stali stopowej 30HGSA podczas obciążenia stałoamplitudowego i nieregularnego.

2. OPIS BADAŃ

Próbki do badań zmęczeniowych wykonano ze stali stopowej 30HGSA zgodnie z normą ASTM [4]. Podczas badań stosowano obciążenia stałoamplitudowe oraz obciążenia programowane blokowe o różnej kolejności stopni w bloku, tj.: stopniowo rosnące a następnie malejące – oznaczone jako Lo-Hi-Lo oraz obciążenia nieregularne oznaczone jako I. Schematy programów obciążeń oraz ich parametry zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry programów obciążenia



Próby stałoamplitudowe przeprowadzono na pięciu poziomach odkształcenia całkowitego. Podczas obciążeń typu Lo-Hi-Lo próbki poddano zaprogramowanemu obciążeniu w taki sposób, że na każdym następnym stopniu obciążenia amplituda odkształcenia całkowitego stopniowo wzrastała $\epsilon_{ac1} < \epsilon_{ac2} < \epsilon_{ac3} < \epsilon_{ac4} < \dots < \epsilon_{aci}$, a po osiągnięciu pewnej granicznej wartości stopniowo malała $\epsilon_{aci} > \dots > \epsilon_{ac4} > \epsilon_{ac3} > \epsilon_{ac2} > \epsilon_{ac1}$. Blok obciążenia składał się z 10 stopni obciążenia narastającego oraz 10 stopni obciążenia malejącego. Przyjęte amplitudy odkształcenia na poszczególnych stopniach bloku obciążenia narastającego a potem malejącego były sobie równe.

Obciążenia programowane o nieregularnym następstwie stopni (typ I) uzyskano poprzez odpowiednie dobranie kolejności 10 stopni w bloku obciążenia. Parametrami stałymi dla dwóch typów programów obciążeń były: wartość amplitudy odkształcenia na poszczególnych stopniach programów oraz liczba cykli na poszczególnych stopniach. W celu porównania procesu stabilizacji podczas obciążeń stałoamplitudowych i programowanych przyjęto, że wartości odkształceń na wybranych stopniach obciążenia typu Lo-Hi-Lo oraz typu I są takie jak podczas badań stałoamplitudowych.

Próby stałoamplitudowe oraz obciążenia programowane przeprowadzono przy kontrolowanej amplitudzie odkształcenia całkowitego mierzonego ekstensometrem, będącym na wyposażeniu maszyny wytrzymałościowej Instron 8501. Podczas obciążeń stałoamplitudowych rejestrowano pojedyncze cykle obciążenia, a podczas prób programowanych całe bloki obciążenia (100 cykli). Prędkość przyrostu odkształcenia dla obydwu rodzajów obciążenia wynosiła 1%/s.

3. WYNIKI BADAŃ

3.1. Trwałość zmęczeniowa

Uzyskane dla poszczególnych typów programów obciążenia liczby powtórzeń bloku programu λ oraz uzyskane trwałości zestawiono w tabeli 2. Jako trwałość zmęczeniową przyjmowano całkowitą liczbę cykli do momentu, w którym na i -tym poziomie programu nastąpiło około 5% zmniejszenie obciążenia w stosunku do obciążenia maksymalnego na tym poziomie.

Tabela 2. Wyniki badań

| Numer próbki | Lo-Hi-Lo | | I | |
|-----------------|-----------|--------|-----------|--------|
| | λ | $2N_f$ | λ | $2N_f$ |
| 1 | 18,77 | 3654 | 14,15 | 2930 |
| 2 | 17,7 | 3540 | 15,1 | 3020 |
| 3 | 15,5 | 3100 | 15,8 | 3160 |
| Wartość średnia | 17,32 | 3465 | 15,02 | 3003 |

Jak należało oczekiwać, liczba bloków obciążenia λ zrealizowanych do chwili pęknięcia jest dla każdego typu obciążenia bardzo zbliżona. W pracy przeprowadzono analizę wariancji dla dwóch średnich trwałości uzyskanych dla poszczególnych rodzajów programów obciążenia. Przeprowadzona na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ analiza wykazała, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o równości średnich wartości trwałości zmęczeniowej dla poszczególnych programów obciążenia.

3.2. Własności cykliczne

3.2.1. Obciążenia stałoamplitudowe

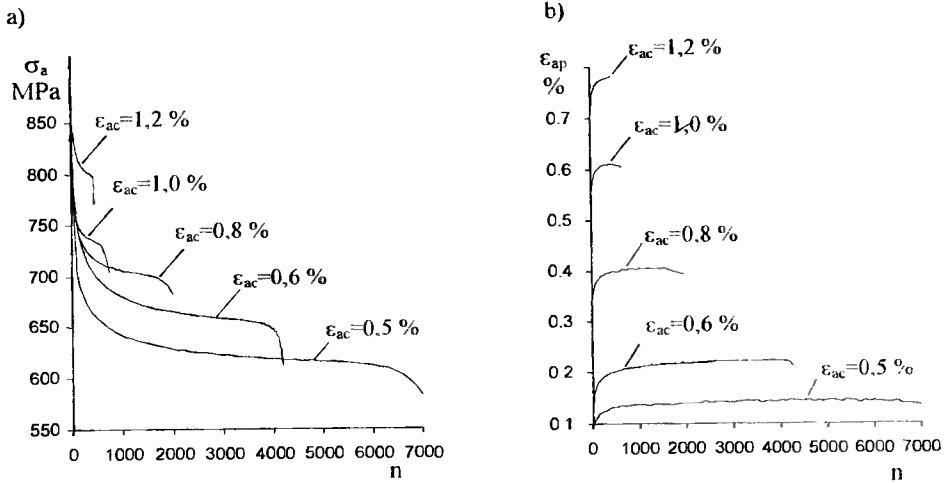
Zarejestrowane podczas badań stałoamplitudowych pętle histerezy w różnych okresach trwałości poddano analizie. Na rysunku 1 pokazano przebiegi zmian podstawowych parametrów pętli histerezy, tj. amplitudy naprężenia σ_a (rys. 1a) oraz amplitudy odkształcenia plastycznego ϵ_{ap} (rys. 1b) w funkcji liczby cykli obciążenia.

Zgodnie z oczekiwaniami badany materiał podlega cyklicznemu osłabieniu. Potwierdzeniem tego jest stopniowe obniżanie się amplitudy naprężenia σ_a oraz wzrost amplitudy odkształcenia plastycznego przy stałym poziomie amplitudy odkształcenia całkowitego ϵ_{ac} . Proces ten dotyczy wszystkich badanych poziomów odkształcenia.

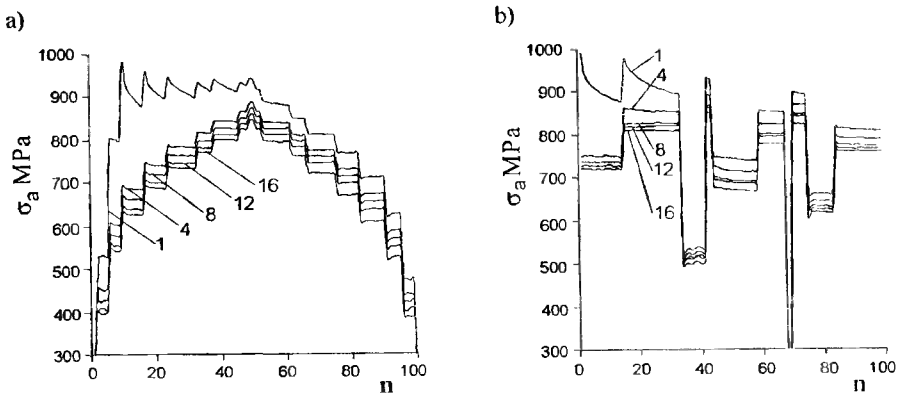
3.2.2. Obciążenie nieregularne

Dla zarejestrowanych podczas badań kolejnych bloków obciążenia określono wartości podstawowych parametrów pętli histerezy, tj. amplitudę naprężenia σ_a oraz amplitudę odkształcenia plastycznego ϵ_{ap} . Przebiegi zmian naprężenia σ_a w poszczególnych blokach obciążenia typu Lo-Hi-Lo oraz typu I pokazano w formie wykresów na rysunku 2.

Na podstawie analizy przebiegów σ_a w kolejnych blokach obciążenia można stwierdzić, że niezależnie od programu obciążenia materiał ulega cyklicznemu osłabieniu. Świadczy o tym obniżanie naprężenia σ_a na tych samych stopniach w kolejnych blokach programu obciążenia. Proces osłabienia dotyczy wszystkich stopni programów.



Rys. 1. Zmiany σ_a (a) i ϵ_{ap} (b) podczas obciążenia stałoamplitudowego

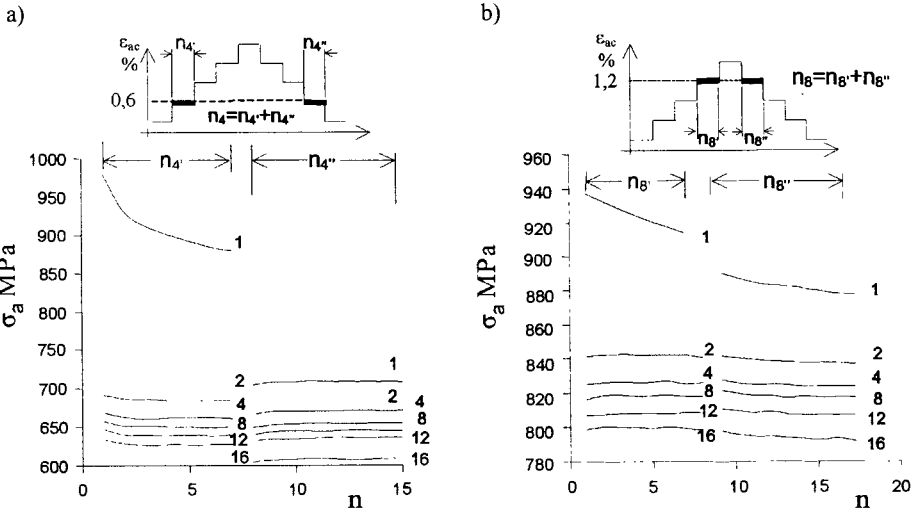


Rys. 2. Zmiany σ_a w bloku dla programu obciążenia: a) Lo-Hi-Lo. b) I

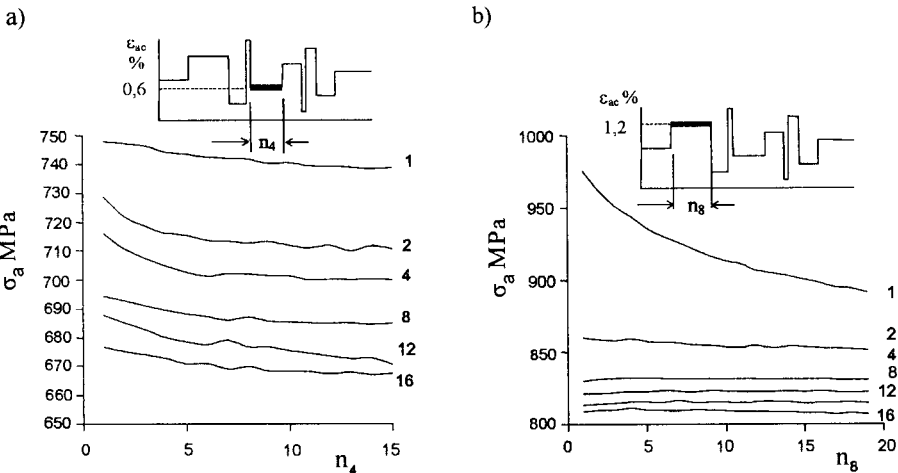
W pracy poddano szczegółowej analizie przebiegi zmian naprężenia σ_a i ϵ_{ap} na poszczególnych stopniach realizowanych programów. Ze względu na ograniczoną objętość poniższej pracy analizę przeprowadzono dla zmian amplitudy naprężenia σ_a i dwóch stopni programów obciążenia o amplitudach $\epsilon_{ac} = 0,6\%$ i $1,2\%$. Na rysunku 3 pokazano zmiany σ_a na wymienionych stopniach podczas obciążenia typu Lo-Hi-Lo, natomiast na rysunku 4 podczas obciążenia typu I.

Analiza wykresów pokazanych na rysunkach 3-4 wskazuje, że zmiany σ_a na stopniach zależą od programu obciążenia. Zmiana amplitudy odkształcenia z mniejszej na większą prowadzi w zależności od poziomu amplitudy odkształcenia do chwilowego osłabienia materiału na kolejnym stopniu i uzyskania na nim nowego poziomu naprężenia stabilizacji σ_{as} . Naprężenie to jest niższe od naprężenia stabilizacji uzyskanego na danym stopniu w poprzednim bloku. Z kolei przejście na niższy poziom odkształcenia prowadzi najczęściej do procesu niewielkiego umocnienia materiału na stopniu i uzyskania nowego naprężenia stabilizacji σ_{as} . Pomimo umocnienia naprężenie to jest niższe

od naprężenia stabilizacji dla tego samego stopnia obciążenia zrealizowanego w poprzednim bloku.

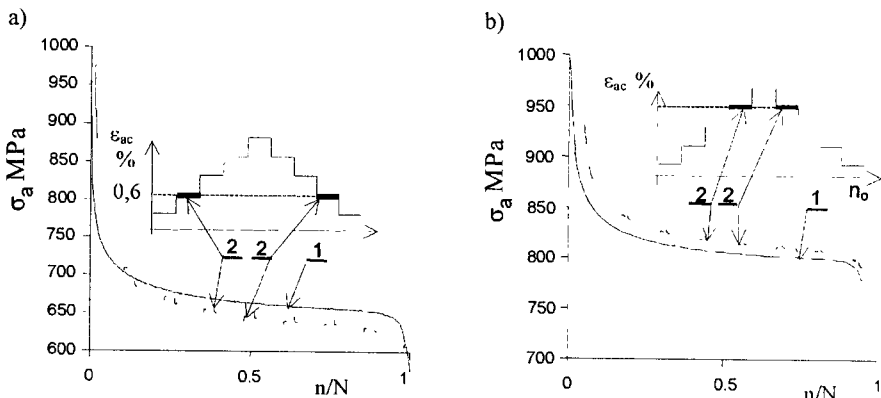


Rys. 3. Zmiany σ_a podczas obciążenia Lo-Hi-Lo: (a) $\epsilon_{ac} = 0,6\%$, (b) $\epsilon_{ac} = 1,2\%$

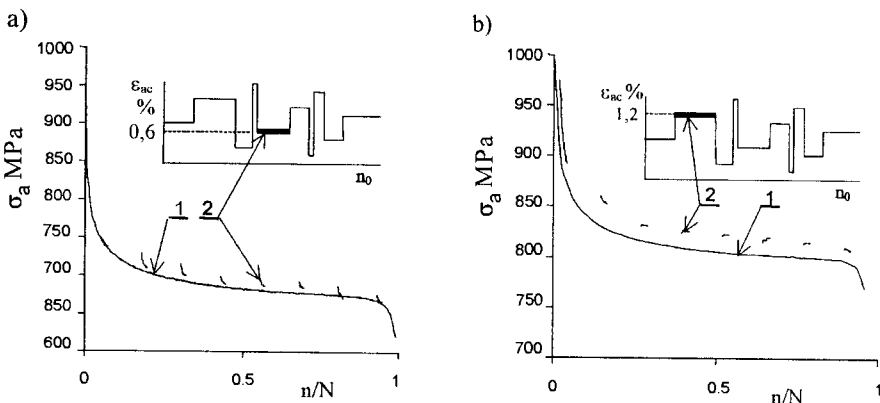


Rys. 4. Zmiany σ_a podczas obciążenia typu I: (a) $\epsilon_{ac} = 0,6\%$, (b) $\epsilon_{ac} = 1,2\%$

W celu bezpośredniego porównania przebiegu procesu osłabienia zachodzącego podczas obciążenia stałoaamplitudowego i programowanego, na rysunkach 5 i 6 pokazano przebiegi σ_a w funkcji trwałości względnej n/N , gdzie: n oznacza bieżący numer cyklu obciążenia stałoaamplitudowego lub programowanego, natomiast N liczbę cykli do pęknięcia podczas obciążenia stałoaamplitudowego lub programowanego.



Rys. 5. Zmiany σ_a podczas obciążenia stałoaamplitudowego i obciążenia Lo-Hi-Lo na poziomie odkształcenia $\epsilon_{ac} = 0,6\%$ (a) i $\epsilon_{ac} = 1,2\%$ (b)



Rys. 6. Zmiany σ_a (a) i ϵ_{ap} (b) podczas obciążenia stałoaamplitudowego (1) i obciążenia typu I (2) na poziomie odkształcenia $\epsilon_{ac} = 1,2\%$

Na podstawie analizy wykresów pokazanych na rysunkach 5-6 można zauważyć podobieństwo jakościowe oraz ilościowe w przebiegu procesu stabilizacji podczas obciążenia stałoaamplitudowego i programowanego. Naprężenia σ_a , określające chwilowe własności podczas obciążenia stałoaamplitudowego i blokowego, mają w tych samych okresach trwałości podobną wartość. Z wykresów wynika, że materiał pomimo zaburzenia procesu stabilizacji przez zmianę amplitudy odkształcenia na kolejnym stopniu wydaje się „pamiętać” przebieg procesu stabilizacji obserwowany podczas obciążenia stałoaamplitudowego. Na wykresach zmian σ_a podczas obciążeń programowanych widać bardzo wyraźny trend zmian własności cyklicznych. Jest on zbliżony do przebiegu zmian własności cyklicznych, mających miejsce podczas obciążenia stałoaamplitudowego. Widoczne jest to dla wszystkich programów obciążenia realizowanych podczas badań. Naprężenia σ_a uzyskiwane w końcowych cyklach stopni o amplitudzie $\epsilon_{ac} = 0,6\%$ i $\epsilon_{ac} = 1,2\%$ osiągają wartość uzyskiwaną podczas obciążenia stałoaamplitudowego.

Powyższe spostrzeżenie może mieć duże znaczenie praktyczne. Wskazuje bowiem na możliwość przewidywania przebiegu procesu stabilizacji materiału podczas obciążenia eksploatacyjnego na podstawie znajomości przebiegu tego procesu podczas obciążenia

żenia stałoaamplitudowego. Takie podejście do problemu obliczeń trwałości zmęczeniowej może mieć szczególne znaczenie w przypadku obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych wykonanych z materiałów charakteryzujących się brakiem okresu stabilizacji (stopów aluminium lub stopów miedzi). Jedyną trudnością takiego podejścia jest konieczność określenia danych materiałowych n' i K' dla różnych okresów żywotności. Propozycję metody określania danych materiałowych w różnych okresach żywotności zaproponowano w pracy [5].

4. WNIOSKI

Przeprowadzona analiza wyników badań pozwala sformułować następujące wnioski:

1. Kolejność stopni programu obciążenia blokowego nie wpływa na trwałość zmęczeniową stali stopowej 30HGSA.
2. Podczas obciążenia programowanego blokowego, podobnie jak podczas obciążenia stałoaamplitudowego próbek ze stali stopowej nie występuje okres stabilizacji własności cyklicznych. Z tego względu wątpliwości budzą metody obliczeń trwałości zmęczeniowej bazujące na niezmiennych danych materiałowych określonych podczas prób stałoaamplitudowych.
3. Na przebieg procesu stabilizacji własności cyklicznych stali stopowej 30HGSA na poszczególnych stopniach programu obciążenia blokowego wpływa kolejność stopni programu obciążenia. Zachodzące w materiale zmiany własności cyklicznych, tj. chwilowe osłabienie lub umocnienie zależą od amplitudy odkształcenia stopni poprzedzających.
4. Przebieg procesu cyklicznego osłabienia, zachodzący podczas obciążenia stałoaamplitudowego i programowanego, analizowany przy wykorzystaniu amplitudy naprężenia σ_a wykazuje podobieństwo jakościowe, dotyczące charakteru zmian własności cyklicznych oraz ilościowe, dotyczące wartości chwilowych tego parametru w tych samych okresach żywotności.
5. Podobieństwo ilościowe oraz jakościowe przebiegu procesu stabilizacji podczas obciążenia programowanego i stałoaamplitudowego pozwala sformułować tezę o możliwości przewidywania chwilowych własności cyklicznych materiału elementu konstrukcyjnego podczas obciążeń eksploatacyjnych na podstawie danych uzyskanych z badań normatywnych.

LITERATURA

- [1] Szala J., Mroziński S.: 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, 93, Warszawa, 745-761.
- [2] Szala J., Mroziński S.: Plane bending low – cycle fatigue investigations of 45-steel. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 1, 33, 95, Warszawa, 99-113.
- [3] Mroziński S.: Doświadczalna ocena procesu stabilizacji własności cyklicznych materiałów konstrukcyjnych podczas obciążenia stałoaamplitudowego i nieregularnego. XVIII Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego, Jachranka 1998.
- [4] ASTM E606-92: Standard Practice for Strain – Controlled Fatigue Testing.
- [5] Mroziński S.: O zmienności danych materiałowych przyjmowanych do obliczeń trwałości zmęczeniowej. II Sympozjum Mechanika Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji, Augustów 2003.