

Tadeusz LAMBER

Jerzy OKRAJNI

OCENA PRZYDATNOŚCI WYBRANYCH GATUNKÓW STALI AUSTENITYCZNYCH DO PRACY
W WARUNKACH DZIAŁANIA CYKLICZNYCH ZMIAN PÓL TEMPERATURY NA PODSTAWIE
BADAŃ ZMĘCZENIOWYCH W ZAKRESIE MAŁEJ LICZBY CYKLI

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań zmęczeniowych w zakresie małej liczby cykli przeprowadzonych dla stali austenitycznych H18N9S, H23N18, 5H12G16J2, 5H17G17. Dokonano porównawczej charakterystyki własności zmęczeniowych tych stali pod kątem ich przydatności do pracy w warunkach zmęczenia cieplnego. Zwrócono uwagę na możliwość zastosowania badań zmęczeniowych w zakresie małej liczby cykli do oceny odporności stali austenitycznych na zmęczenie cieplne.

Wstęp

Perspektywy rozwoju wielu gałęzi przemysłu zdeterminowane są w znacznym stopniu w chwili obecnej postępem prac nad nowymi tworzywami. Ich niekiedy specyficzne własności sprawiają, że niezbędne jest równoczesne opracowanie dla nich wyczerpujących teoretyczno-doświadczalnych charakterystyk wytrzymałościowych. Z uwagi na warunki pracy maszyn i urządzeń w takich gałęziach gospodarki narodowej, jak hutnictwo czy przemysł chemiczny, nie można w tym przypadku ograniczyć się do badań podstawowych własności fizycznych i mechanicznych. Złożone warunki eksploatacji, jakie występują w nowoczesnych urządzeniach, implikują bowiem konieczność prowadzenia badań tworzyw niekonwencjonalnymi metodami oraz celowości prac w zakresie opracowania metod doboru materiałów dla danej konstrukcji. Zagadnieniem, któremu poświęca się ostatnio znaczną uwagę, jest zmęczenie wywoływane działaniem cyklicznych zmian temperatury, nazywane zmęczeniem cieplnym [1, 2, 3, 4].

Noszący tę nazwę mechanizm czy raczej mechanizmy niszczenia występują w urządzeniach poddanych działaniu cyklicznych zmian temperatury.

Można przyjąć, że jeżeli w zakresie poszczególnych cykli zmiany temperatury wywoływać będą w elemencie urządzenia odkształcenia plastyczne, co związane jest z przekraczaniem przez naprężenia termiczne granicy plastyczności, to po pewnej liczbie cykli nastąpi jego zniszczenie. Proces cyklicznego odkształcania odbywa się wówczas w warunkach uplastycznienia przeciwnego.

Minimalną wartość przyrostu temperatury, której przekroczenie w pewnych warunkach może spowodować uplastycznienie przeciwzrotne, określa się [3, 5] z zależności:

$$\Delta T_p = \frac{2 Re}{\beta E} \quad (1)$$

gdzie:

- ΔT_p - przyrost temperatury,
- Re - granica plastyczności,
- β - współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej,
- E - moduł sprężystości.

Kinetykę tego procesu odkształcania charakteryzuje przebieg pętli histerezy w układzie $\sigma(\epsilon)$ - naprężenie w funkcji odkształcenia. Wykresy takich zależności uzyskuje się badając próbki poprzez obciążenie ich zewnętrznym polem siłowym. Wpływ temperatury na własności materiału uwzględnić można w tym przypadku poprzez prowadzenie badań w podwyższonych temperaturach. Tego typu izotermiczne badania zmęczeniowe nazywane badaniami w zakresie małej liczby cykli prowadzi się stosując cykl odkształceń o stałej amplitudzie odkształcenia całkowitego lub plastycznego [2, 5]. Z uwagi na możliwość praktycznej realizacji najczęściej stosowaną metodą badań jest próba cyklicznego obciążania przy zachowaniu stałej amplitudy odkształcenia całkowitego.

W przedstawnym opracowaniu zaprezentowano sposób wykorzystania wyników badań uzyskanych tą metodą dla oceny przydatności określonych gatunków stali do pracy w warunkach oddziaływania cyklicznych zmian temperatury.

Materiał do badań

Badania zmęczeniowe w zakresie małej liczby cykli zrealizowano dla czterech gatunków stali austenitycznych, których skład chemiczny podano w tablicy 1. Stale H18N9S i H23N18 reprezentują grupę stali chromowo-niklowych stosowanych w przemyśle chemicznym między innymi w urządzeniach do chemicznej przeróbki węgla. Dwie kolejne stale są nowymi materiałami, nad których wytwarzaniem w skali przemysłowej prowadzi się obecnie badania [6]. Są to stale chromowo-manganowe, których zastosowanie przewiduje się w zamian za droższe stale na bazie niklu i chromu.

Wszystkie stale, których skład chemiczny podano w tablicy 1, badano w stanie przesyconym. Materiałem wyjściowym były pręty walcowane o średnicy 15 i 20 mm. Z prętów tych wykonano próbki do badań zmęczeniowych.

Tablica 1

Skład chemiczny badanych stali

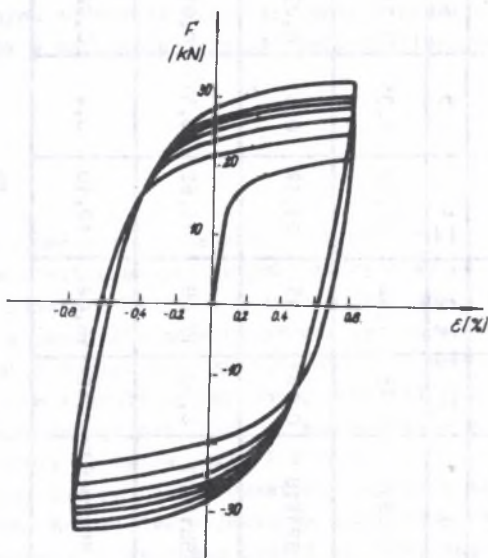
Gatunek stali	C	Mn	Cr	Si	P	S	Al	B	Ni	Cu	V	Mo
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
H18N9S	0,15	1,42	18,69	1,35	0,033	0,022			8,88	0,18		
H23N18	0,06	1,45	23,12	0,63	0,03	0,007			17,78	0,10		
5H17G17	0,50	17,08	16,62	0,57	0,035	0,014	0,072	0,014	0,2			
5H12G16J2	0,52	16,02	12,10	0,4	0,02	0,16	2,0				0,3	0,2

Warunki przeprowadzenia badań

W badaniach zmęczeniowych zastosowano system serwohydrauliczny firmy MTS wyposażony w urządzenia do indukcyjnego nagrzewania próbek.

Próbki o długości pomiarowej 25 mm i średnicy 10 mm mocowano w uchwytach gwintowanych. Pomiaru odkształceń dokonywano za pomocą czujnika tensometrycznego oporowego z końcówkami kwarcowymi stykającymi się bezpośrednio z próbką. Czujnik chłodzono sprężonym powietrzem. Zastosowano zakres pomiarowy odkształceń $-0,02 < \epsilon < +0,02$, co uzasadnione jest wielkością możliwych odkształceń cieplnych dla badanych stali w warunkach eksploatacji.

Ustaloną wartość zakresu odkształceń całkowitych $-\Delta\epsilon_p$ kontrolowano za pomocą miernika cyfrowego połączonego w układzie pomiarowym z ekstensometrem. W ten sam sposób dokonywano pomiarów maksymalnej i minimalnej siły w poszczególnych cyklach. Pętle histerezy (rys. 1), związane głównie z plastycznym odkształceniem przy cyklicznym obciążeniu, kreślono w układzie odkształcenie - siła za pomocą rejestratora XY. Za pomocą licznika cykli odczytywano ich liczbę do zniszczenia próbki. Do pomiaru temperatury użyto termopary Pt-Rh Pt zgrzewanej w środku długości pomiarowej próbki i połączonej z miernikiem cyfrowym. Wstępnie dokonano pomiarów rozkładu temperatur na długości pomiarowej trzech próbek wzorcowych i stwierdzono, że różnice temperatur na długości próbki nie przekraczają 20 K.



Rys. 1. Pętle histerezy zarejestrowane w badaniach zmęczeniowych w zakresie małej liczby cykli $T = 673$ K; $\Delta\epsilon_c = 0,008$

Stosowano średnią szybkość odkształcenia w sinusoidalnym cyklu odkształceń w zakresie $1 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1} - 4 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Stałą temperaturę próbki utrzymywano stosując regulator temperatury w układzie sprzężenia zwrotnego z termoparą i nagrzewnicą indukcyjną.

Badania zmęczeniowe stali H18N9S, H23N18, 5H12G16J2 zrealizowano w temperaturach 293 K, 673 K i 873 K. Próbkę wykonaną ze stali 5H17G17 przebadano w temperaturze 293 K.

Sposób opracowania wyników badań zmęczeniowych w zakresie małej liczby cykli

Na podstawie zarejestrowanych pętli histerezy wyznaczano zakres odkształcenia plastycznego - $\Delta \epsilon_p$, sprężystego - $\Delta \epsilon_s$ oraz odpowiadający im zakres naprężenia - $\Delta \sigma$ dokonując pomiarów sił maksymalnych i minimalnych w poszczególnych cyklach. Wartości zakresu odkształceń plastycznych określone dla cyklu odpowiadającego 1/2 liczby cykli do zniszczenia ($\frac{1}{2} N_f$) posłużyły za podstawę do sporządzenia wykresów trwałości zmęczeniowej.

Wyznaczono również wykresy cyklicznego odkształcenia dysponując danymi do zakresu naprężeń - $\Delta \sigma$ odpowiadającego $\frac{1}{2} N_f$ (N_f - liczba cykli do zniszczenia próbki) oraz zakresu odkształceń całkowitych i plastycznych.

Określono równanie krzywej cyklicznego umocnienia:

$$\frac{\Delta \sigma}{2} = K' \left(-\frac{\Delta \epsilon_p}{2} \right)^{n'} \quad (2)$$

Zastosowano w tym przypadku metodę korelacji liniowej wyznaczając prostą regresji:

$$Y = n' X + m \quad (3)$$

gdzie:

$$Y = \log \left(\frac{\Delta \sigma}{2} \right); \quad X = \log \left(-\frac{\Delta \epsilon_p}{2} \right); \quad m = \log K'$$

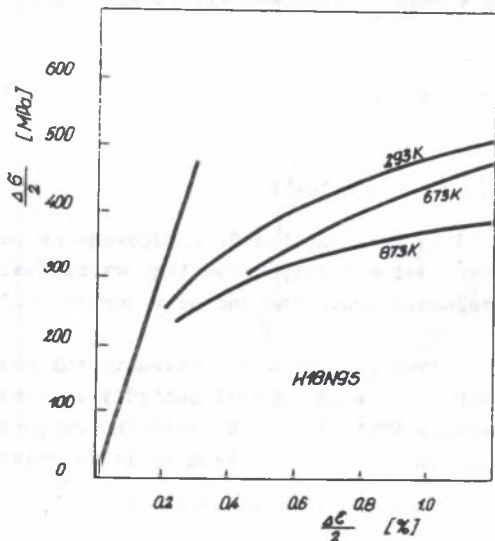
Wartości współczynników wzoru (2) zawiera tablica 2. Opracowane na podstawie wzoru (2), przy przyjęciu wartości współczynników tego wzoru (tablica 2), krzywe cyklicznego odkształcenia przedstawiono na rysunkach 2, 3, 4.

Przedmiotem oddzielnej części opracowania jest model matematyczny charakterystyk zmęczeniowych. Opracowano go dla zależności pomiędzy zakresem odkształcenia plastycznego, stanowiącym kryterium zniszczenia w przypadku działania cyklicznych zmian pól odkształceń [7], a liczbą cykli do zniszczenia i temperaturą.

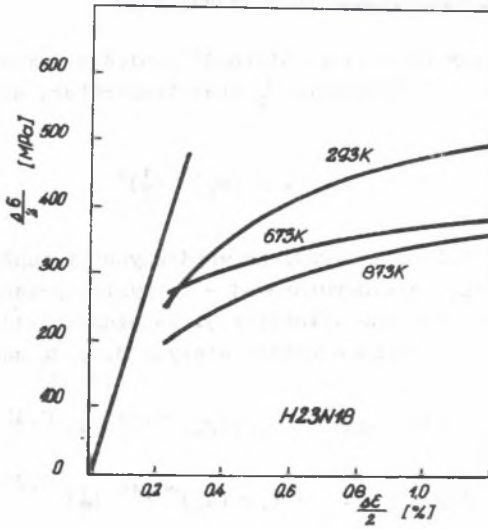
Tablica 2

Wartości współczynników wytrzymałości cyklicznej K' , wykładników cyklicznego umocnienia n' oraz współczynników korelacji wyznaczonych dla krzywych cyklicznego umocnienia

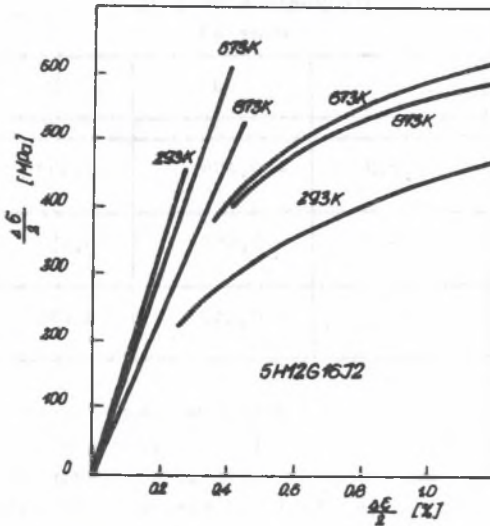
Gatunek stali	Temperatura	K' [MPa]	n	r
1	2	3	4	5
H18N9S	297 K	1118	0,274	0,980
	673 K	1294	0,318	0,974
	873 K	669	0,229	0,978
H23N18	297 K	1025	0,261	0,979
	673 K	439	0,151	0,970
	873 K	820	0,276	0,987
5H17G17	293 K	683	0,192	0,972
5H12G16J2	293 K	1591	0,352	0,977
	673 K	1090	0,227	0,988
	873 K	938	0,206	0,898



Rys. 2. Krzywe cyklicznego odkształcenia. Stal H18N9S



Rys. 3. Krzywe cyklicznego odkształcenia. Stal H23N18



Rys. 4. Krzywe cyklicznego odkształcenia. Stal 5H12G16J2

Model matematyczny charakterystyk zmeczeniowych

Model matematyczny opisujący zależność pomiędzy zakresem odkształceń $\Delta \varepsilon_p$, liczbą cykli do zniszczenia N_f oraz temperaturą można przedstawić w postaci równania:

$$\Delta \varepsilon_p = C (N_f)^d \left(\frac{1}{T}\right)^k \quad (4)$$

Dla powyższej zależności określono współczynniki funkcji regresji oraz współczynnik korelacji wielowymiarowej - r. Wyniki przeprowadzonych obliczeń numerycznych zestawiono w tabelicy 3. Zależności (4) dla badanych gatunków stali po podstawieniu wartości stałych C, d, k są następujące:

$$H18N9S - \Delta \varepsilon_p = 3,21(N_f)^{-0,48} \left(\frac{1}{T}\right)^{0,42} \quad (5)$$

$$H23N18 - \Delta \varepsilon_p = 1,09(N_f)^{-0,46} \left(\frac{1}{T}\right)^{0,25} \quad (6)$$

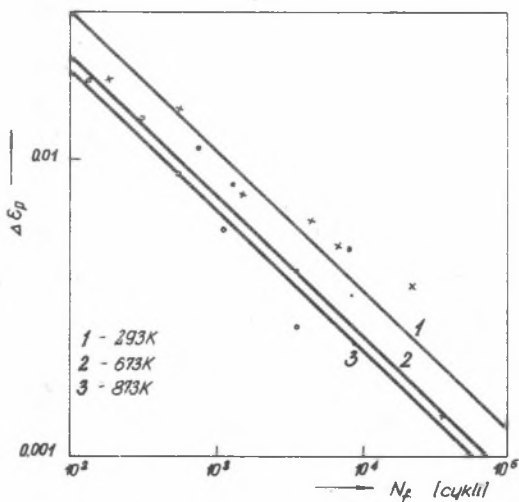
$$5H12G16J2 - \Delta \varepsilon_p = 159,09(N_f)^{-0,41} \left(\frac{1}{T}\right)^{1,14} \quad (7)$$

Tabela 3

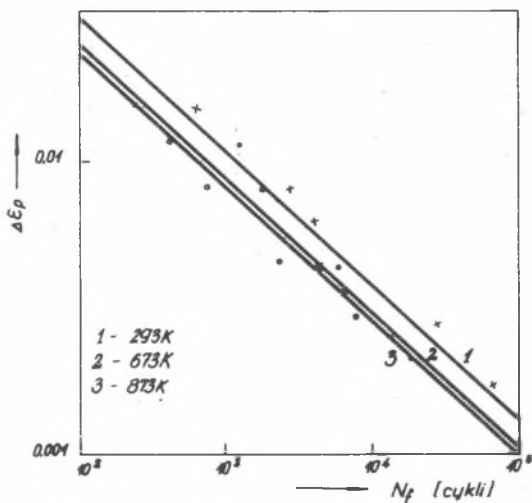
Wyznaczone wartości stałych wzoru oraz
współczynnik korelacji r
(wzór 4)

Gatunek stali	C	d	k	r
1	2	3	4	5
H18N9S	3,212	- 0,475	0,421	0,954
H23N18	1,090	- 0,458	0,257	0,963
5H12G16J2	159,09	- 0,412	1,139	0,968

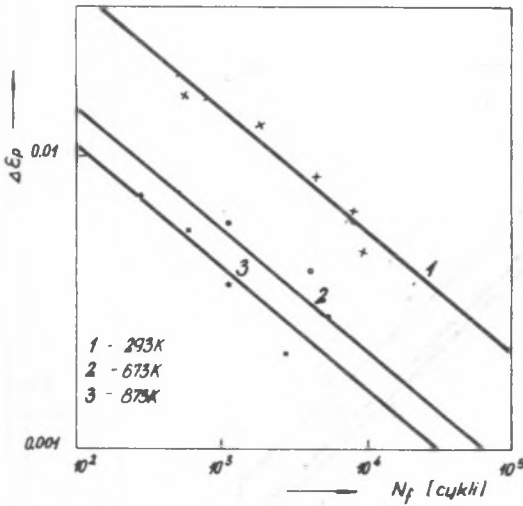
Kolejne rysunki 5, 6, 7 przedstawiają wykresy uzyskane poprzez opis wyników doświadczeń wzorami (5), (6), (7). Przyjęta zależność (4) wykazuje dostateczną zgodność z danymi uzyskanymi doświadczalnie. Obliczone wartości współczynnika korelacji (tabl. 3) stwarzają przesłanki do przypuszczenia, iż przyjęty model zostanie potwierdzony w sposób ścisły poprzez przeprowadzenie większej liczby eksperymentów.



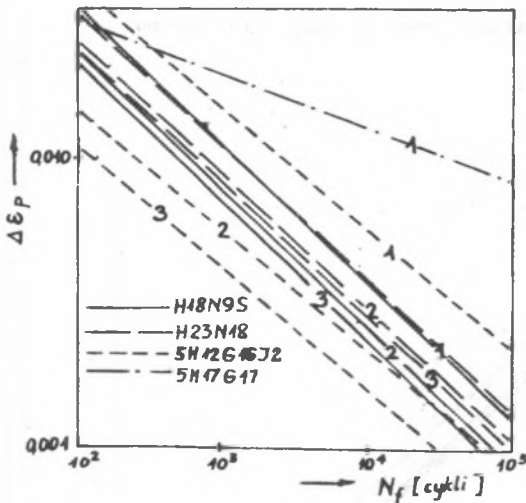
Rys. 5. Wykresy trwałości zmęczeniowej stali H18N9S



Rys. 6. Wykresy trwałości zmęczeniowej stali H23N18



Rys. 7. Wykresy trwałości zmęczeniowej stali 5H12G16J2



Rys. 8. Bestawienie wykresów trwałości zmęczeniowej 1 - $T = 293$ K; 2 - $T = 673$ K; 3 - $T = 873$ K

temperaturach podwyższonych. Najmniejszą wartość wykładnika k oraz związanej z nim zakresu trwałości - $N_f(T = 293$ K) - $N_f(T = 873$ K) - (rys. 5, 6, 7, 8) posiada stal H23N18, która w związku z tym powinna być najmniej podatna na oddziaływanie wysokich temperatur.

Podsumowanie i wnioski

Porównując ze sobą przebieg wykresów trwałości zmęczeniowej (rys. 5, 6, 7, 8) stwierdzono znacznie większą trwałość stali Cr-Mn w stosunku do stali Cr-Ni w temperaturze pokojowej.

Jak bowiem wynika z rysunku 8, tym samym wartościom zakresu odkształceń plastycznych w temperaturze pokojowej większą liczbę cykli do zniszczenia należy przyporządkować stalom na bazie chromu i manganu (por. proste 1). Temperatura wpływa jednakże w znacznie większym stopniu na ich trwałość, niż ma to miejsce w przypadku stali chromowo-niklowych, o czym świadczą wartości wykładników k (tabl. 3) we wzorze (4). W temperaturze 873 K trwałość stali 5H12G16J2 jest znacznie mniejsza od obu stali Cr-Ni. Stale chromowo-niklowe, jak można sądzić na podstawie przebiegu wykresów zmęczeniowych (rysunek 8) oraz wartości wykładnika k (tabl. 3) charakteryzuje znaczna stabilność liczby cykli do zniszczenia (N_f) w tempe-

Wykresy cyklicznego odkształcenia (rys. 2,3,4) ujawniają różny charakter cyklicznego umacniania stali Cr-Mn i Cr-Ni. Najmniejsze umocnienie stali 5H12G16J2 badanej w trzech różnych temperaturach (4) obserwowano w temperaturze 293 K, a więc najniższej z nich. Stale H18N9S oraz H23N18 wykazują natomiast wzrost umocnienia (rys. 2, 3) wraz ze zmniejszaniem temperatury. Przebieg wykresów cyklicznego odkształcenia wskazuje na oddziaływanie na własności stali 5H12G16J2 dodatkowych mechanizmów umocnienia, oprócz zasadniczych związanych z plastycznym odkształceniem, których wpływ (rys. 8) na trwałość zmęczeniową w temperaturach podwyższonych okazuje się niekorzystny.

Stale chromowo-manganowe, pomimo szeregu swoich zalet, nie wykazują jeszcze w chwili obecnej własności porównywalnych ze stalami na bazie niklu i chromu. Znacznie mniejsza jest ich zdolność do przenoszenia odkształceń plastycznych w temperaturach podwyższonych.

Spośród badanych tworzyw jedynie stale chromowo-niklowe posiadają własności predysponujące je do zastosowania w warunkach oddziaływania cyklicznych zmian pól temperatur.

Stosowanie w tych samych warunkach stali 5H12G16J2 wymaga znacznego ograniczenia temperatury eksploatacji.

LITERATURA

- [1] Pisarienko G.S., Możarowski N.S., Antipow E.A.: Soprotiwlenije żaroprotocznych materialow niestacionarnym siłowym i temperaturowym wozdijstwijam. Izdatielstwo Naukowa Dumka, Kijów 1974.
- [2] Manson S.S.: Temperaturnyje napriazhenija i małocyklowaja ustałost. Izd. Maszinostrojenije, Moskwa 1974.
- [3] Żuchowski R.: Zmęczenie cieplne metali. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1979.
- [4] Gierzyński M., Smarzyński Z., Wrona T.: Wpływ cyklicznie zmiennych obciążeń cieplnych i mechanicznych na dekohezję stali WNL. ZN Politechniki Śląskiej, Hutnictwo z. 19/79, Gliwice 1979.
- [5] Okrajni J.: Badania wpływu cyklicznych zmian pól temperatur i związanych z nimi odkształceń cieplnych na trwałość stali austenitycznych. Praca doktorska. Bibl. Główna Politechniki Śląskiej, Gliwice 1982.
- [6] Maciejny A. i inni: Sprawozdanie z pracy naukowo-badawczej za rok 1976, 1977, 1978, 1979, 1980. IIM Politechniki Śląskiej, Katowice 1976-80 (niepublikowana).
- [7] Coffin L.F., Goldhoff R.M.: Predictive Testing in Elevated Temperature Fatigue and Creep. Status and Problems: ASTM STP 15. Atlantic City 1971.

ОЦЕНА ПРИГОДНОСТИ ИЗБРАННЫХ МАРОК АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА БАЗЕ УСТАЛОСТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ДИАПАЗОНЕ МАЛОГО КОЛИЧЕСТВА ЦИКЛОВ

Резюме

В работе представлены результаты усталостных исследований в диапазоне малого количества циклов проведенных для аустенитных сталей H18N9S, H23N18, 5H12G16J2, 5H17G17. Проведена сравнительная характеристика усталостных свойств этих сталей с точки зрения их пригодности для работы в условиях термической усталости. Авторы уделили внимание возможности применения усталостных исследований в диапазоне малого количества циклов для оценки прочности аустенитных сталей к термической усталости.

THE ESTIMATION CONCERNING THE SUITABILITY OF THE SELECTED GRADES OF AUSTENITIC STEELS FOR WORK IN THE CONDITIONS OF CYCLIC CHANGES CONCERNING FIELDS OF TEMPERATURE IN VIRTUE OF FATIGUE INVESTIGATIONS IN THE LOW-CYCLIC RANGE

Summary

This paper contains results of low cycle fatigue investigations for austenitic steels - H18N9S, H23N18, 5H12G16J2, 5H17G17. The comparison of fatigue properties under thermal fatigue conditions is done. Possibility of application low cycle fatigue investigations for the estimation of thermal fatigue resistance of austenitic steels is shown.