

Radosław SKOCKI, Stanisław MROZIŃSKI

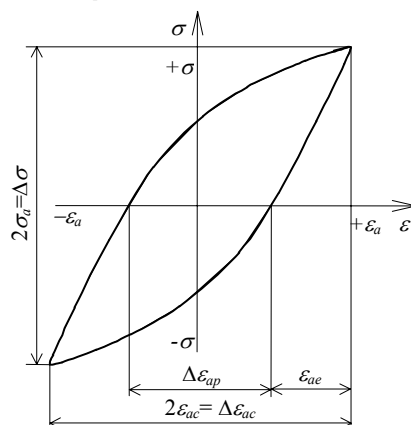
BADANIE WPŁYWU TEMPERATUR PODWYŻSZONYCH NA WŁAŚCIWOŚCI CYKLICZNE STALI P91

Streszczenie: W pracy przedstawiono wybrane wyniki niskocyklowych badań zmęczenia stali P91 w warunkach obciążeń stałoamplitudowych w temperaturze otoczenia oraz w temperaturze podwyższonej. Na podstawie uzyskanych wyników dokonano analizy porównawczej podstawowych parametrów pętli histerezy uzyskanych w różnych temperaturach w funkcji liczby cykli.

Słowa kluczowe: wytrzymałość zmęczeniowa, zmęczenie niskocyklowe, właściwości cykliczne stali

1. WPROWADZENIE

Cykliczne odkształcenia plastyczne wywołują w metalach i stopach metali złożony splot zjawisk zależnych od wielu czynników. Nazywamy je ogólnie zmianami zmęczeniowymi. Do ich opisu można przyjmować różne wielkości fizyczne. Niektóre wielkości podczas badań zmęczeniowych podlegają pomiarom lub obliczeniom. Do najważniejszych można zaliczyć np. parametry pętli histerezy, takie jak ε_{ac} , ε_{ap} , ε_{ae} , σ_a (rys. 1).

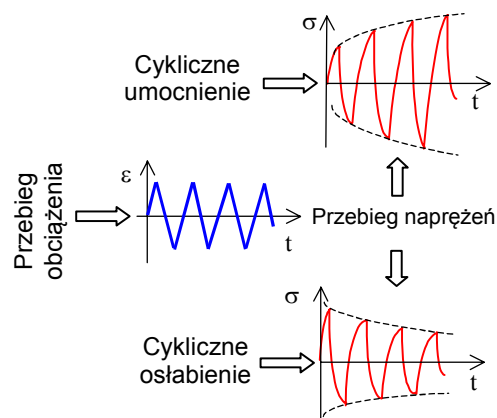


Rys. 1. Pętla histerezy oraz jej podstawowe parametry
Fig. 1. Hysteresis loop and its basic parameters

dr hab. inż. Stanisław MROZIŃSKI, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy,
Wydział Inżynierii Mechanicznej, al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz,
e-mail: Stanislaw.Mrozinski@utp.edu.pl

Radosław SKOCKI, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii
Mechanicznej, al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz

Parametry pętli histerezy mogą być traktowane jako wielkości kryterialne w stosowanych obecnie opisach zmęczenia (odkształceniowy, naprężeniowy, energetyczny) [2]. Występujące w różnych okresach trwałości związki pomiędzy wielkościami kryterialnymi a liczbą cykli obciążenia n nazywa się ogólnie właściwościami cyklicznymi, które podczas badań mogą się zmieniać lub być stałe. W przypadku zmian właściwości można mówić o cyklicznym umocnieniu lub osłabieniu, a w przypadku braku zmian o stabilizacji. Przebieg umocnienia i osłabienia schematycznie przedstawiono na rysunku 2.



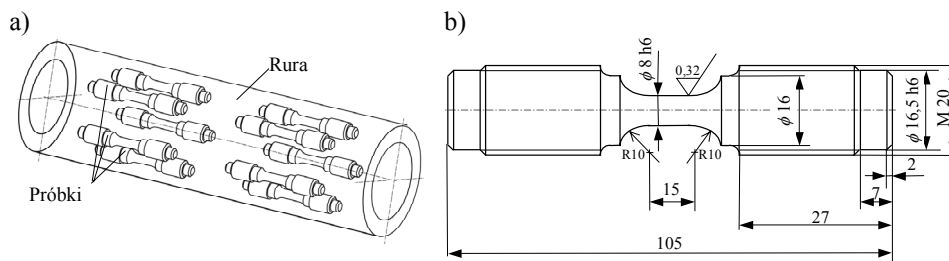
Rys. 2. Schemat cyklicznego umocnienia i osłabienia materiału
Fig. 2. Cyclic hardening and softening of material

Problemem badawczym podejmowanym przez wielu badaczy jest zarówno analityczny opis przebiegu zmian właściwości cyklicznych w temperaturach podwyższonych, jak również możliwość przewidywania jego przebiegu. W przypadku temperatur podwyższonych opis właściwości cyklicznych ulega skomplikowaniu, gdyż zmiany właściwości cyklicznych są wynikiem wzajemnych interakcji przebiegu obciążenia jak i temperatury.

Celem podstawowym pracy jest analiza porównawcza właściwości cyklicznych stali P91 w temperaturze otoczenia oraz temperaturze podwyższonej. Celem dodatkowym jest określenie wpływu temperatury podwyższonej na trwałość oraz zmiany właściwości cyklicznych opisywanych z wykorzystaniem podstawowych parametrów pętli histerezy.

2. OPIS BADAŃ

Próbki do badań wykonano ze stali P91 stosowanej na instalacje ciepłownicze. Sposób pobrania próbek z rury oraz jej ostateczne wymiary przedstawione na rysunku 3. Skład chemiczny stali P91 zestawiono w tabeli 1.



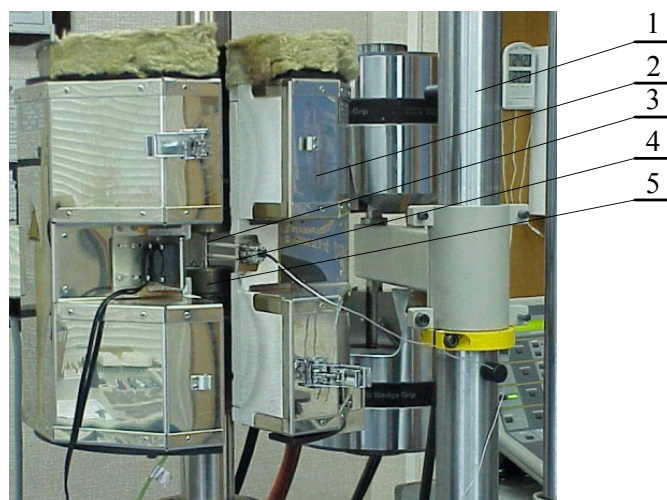
Rys. 3. Kształt (a) i wymiary (b) próbek wykorzystywanych podczas badań
Fig. 3. Shape (a) and dimensions(b) of specimens used in tests

Tabela 1. Skład chemiczny stali P91

Table 1. Chemical composition of P91 steel

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
0,197	0,442	0,489	0,017	0,005	8,82	0,971	0,307	0,012	0,017	0,036	0,074	0,004	0,201	0,02

Badania zmęczeniowe przeprowadzono na hydraulicznej maszynie wytrzymałościowej Instron 8502 wyposażonej w komorę grzewczą o mocy 3,5 kW. Do pomiaru odkształceń próbki zastosowano ekstensometr o bazie pomiarowej 12,5 mm. Na rysunku 4 pokazano widok stanowiska badawczego.



Rys. 4. Stanowisko do badań zmęczeniowych w podwyższonych temperaturach: 1 – rama maszyny wytrzymałościowej, 2 – komora grzewcza, 3 – próbka, 4 – ekstensometr, 5 – uchwyt

Fig. 4. Laboratory test bench for fatigue tests at elevated temperatures: 1 – tensile strength machine frame, 2 – heating chamber, 3 – specimen, 4 – extensometer, 5 – holder

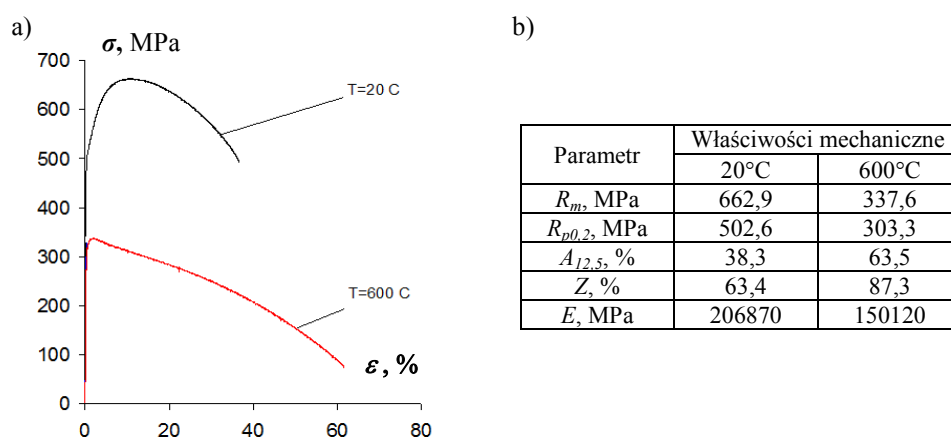
Badania zmęczeniowe zostały poprzedzone próbami statycznego rozciągania. Po analizie prób statycznego rozciągania do prób zmęczeniowych przyjęto pięć poziomów odkształcenia całkowitego: $\epsilon_{ac} = 0,25\%$; $0,3\%$; $0,35\%$; $0,5\%$; $0,6\%$. Próby statycznego rozciągania jak również próby zmęczeniowe

przeprowadzono w dwóch temperaturach $T_1 = 20^\circ\text{C}$, $T_2 = 600^\circ\text{C}$. Częstotliwość obciążenia f wynosiła podczas badań 0,2 Hz. Przyjęta w trakcie badań częstość próbkowania sygnału siły i odkształcenia pozwalała opisywać rejestrowane cykle obciążenia 200 punktami.

3. WYNIKI BADAŃ

3.1. Próby statyczne

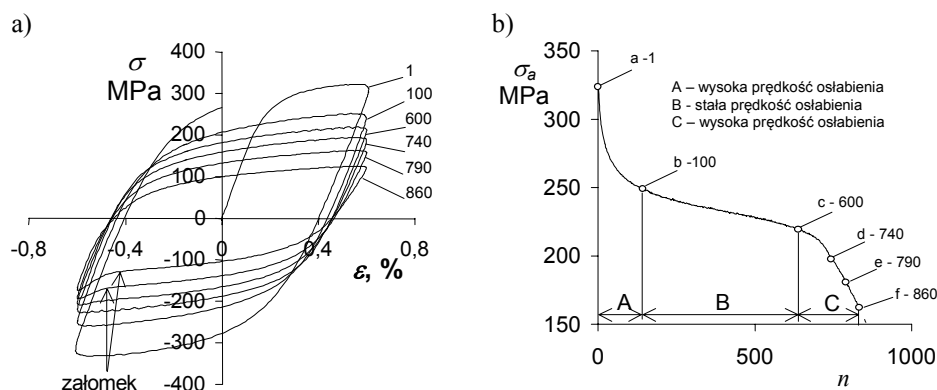
Wyniki prób statycznego rozciągania stali P91 w dwóch temperaturach ($T_1 = 20^\circ\text{C}$, $T_2 = 600^\circ\text{C}$) przedstawiono na rysunku 5a w formie wykresów rozciągania w układzie współrzędnych wydłużenie próbki ε – naprężenie σ . Naprężenia w próbce podczas prób statycznych oraz zmęczeniowych obliczano, dzieląc zarejestrowane podczas próby chwilowe wartości siły obciążającej przez pole przekroju początkowego próbki. Podstawowe właściwości mechaniczne badanej stali zestawiono w tabeli na rysunku 5b.



Rys. 5. Wyniki prób statycznych: a) wykresy rozciągania, b) właściwości mechaniczne
Fig. 5. Static tests results: a) tensile test diagrams, b) mechanical properties

3.2. Próby zmęczeniowe

Jako kryterium końca prób zmęczeniowych przyjęto wystąpienie deformacji ramienia pętli histerezy (powstanie załomka) w półcyklu ściskania. W celu wyjaśnienia przyjętego kryterium końca próby zmęczeniowej na rysunku 6 przedstawiono pętle histerezy zarejestrowane w różnych okresach trwałości zmęczeniowej na poziomie odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ i temperaturze $T_2 = 600^\circ\text{C}$.

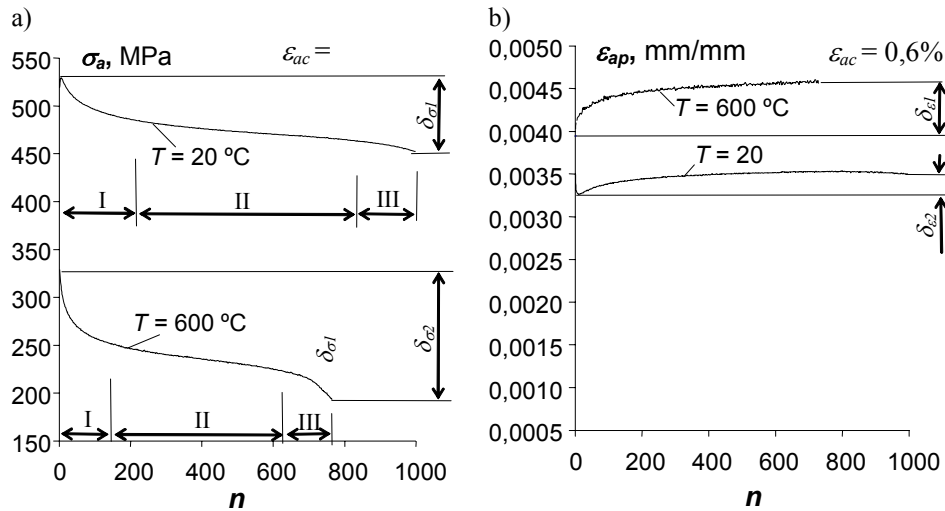


Rys. 6. Pętle histerezy na poziomie $\epsilon_{ac} = 0,6\%$ i $T_2 = 600^\circ\text{C}$: a) pętle, b) zmiany σ_a
 Fig. 6. Hysteresis loops at the level of $\epsilon_{ac} = 0,6\%$ and $T_2 = 600^\circ\text{C}$: a) loops, b) changes of σ_a

Na rysunku zaznaczono numery cykli obciążenia, którym odpowiadają poszczególne pętle. Na podstawie analizy rysunku 6a można stwierdzić, że podczas obciążenia stałoaamplitudowego zmianie ulegają zarówno kształt oraz parametry pętli histerezy (ϵ_{ap} i σ_a).

Analizę właściwości cyklicznych próbek ze stali P91 prowadzono z wykorzystywaniem parametrów pętli histerezy mających bezpośredni wpływ na dane materiałowe wykorzystywane podczas obliczeń [5]. Zaliczono do nich parametry pętli ϵ_{ap} i σ_a . Na rysunku 6b pokazano przykładowy wykres naprężenia σ_a obliczonego dla pętli histerezy pokazanych na rysunku 6a. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że od pierwszego cyklu obciążenia występuje ciągłe (w kolejnych cyklach obciążenia) obniżanie analizowanego parametru. Charakter zmian naprężenia σ_a świadczy o cyklicznym osłabieniu stali P91. Osłabienie obserwowano na wszystkich poziomach odkształcenia ϵ_{ac} w temperaturze otoczenia ($T_1 = 20^\circ\text{C}$) oraz w temperaturze podwyższonej ($T_2 = 600^\circ\text{C}$).

Miarą obserwowanych zmian tego parametru może być np. różnica pomiędzy naprężeniem σ_a na początku i na końcu próby oznaczona na rysunku 7a jako $\delta_{\sigma 1}$ oraz $\delta_{\sigma 2}$. W przypadku temperatury 600°C różnica $\delta_{\sigma 2}$ jest zdecydowanie większa od różnicy $\delta_{\sigma 1}$ uzyskanej w temperaturze otoczenia. Podobny charakter zmian obserwowano w przypadku odkształcenia plastycznego ϵ_{ap} (rys. 7b), gdzie w temperaturze 600°C różnica odkształceń plastycznych $\delta_{\epsilon 1}$ jest większa od różnicy $\delta_{\epsilon 2}$ uzyskanej w temperaturze otoczenia.



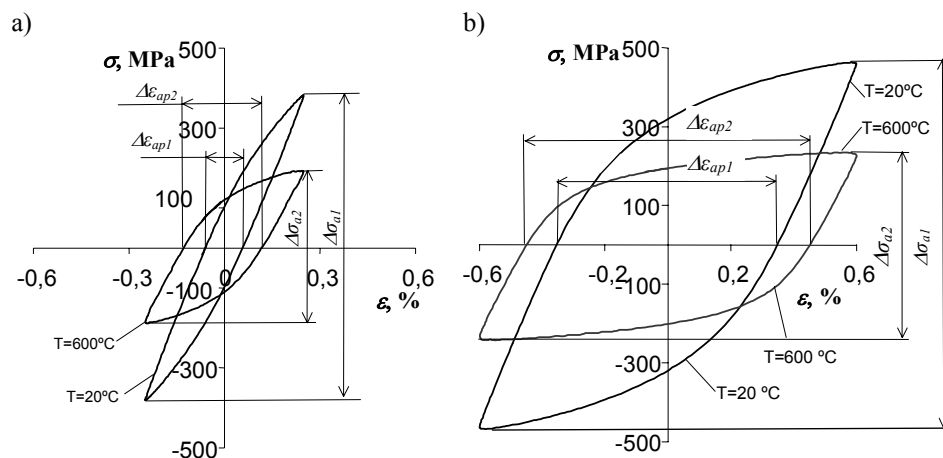
Rys. 7. Wpływ temperatury na parametry pętli histerezy ($\epsilon_{ac} = 0.6\%$): a) $\sigma_a = f(n)$, b) $\epsilon_{ap} = f(n)$
 Fig. 7. Influence of temperature on hysteresis loop parameters ($\epsilon_{ac} = 0.6\%$): a) $\sigma_a = f(n)$, b) $\epsilon_{ap} = f(n)$

Ze względu na ograniczoną objętość poniższej pracy i występujące podobieństwo wykresów podstawowych parametrów pętli histerezy dla wszystkich poziomów odkształcenia uzyskane wyniki omówiono na przykładzie tylko jednego poziomu odkształcenia ($\epsilon_{ac} = 0.6\%$) realizowanego w dwóch temperaturach. Na podstawie analizy wykresów (rys. 7) można stwierdzić, że w przebiegach zmian parametrów pętli histerezy w temperaturze otoczenia i temperaturze podwyższonej można wyróżnić trzy charakterystyczne etapy:

- etap I – stal ulega wyraźnemu osłabieniu. Cechą tego etapu jest wysoka prędkość osłabienia, która maleje wraz ze wzrostem liczby cykli obciążenia. Długość etapu zależy od poziomu odkształcenia i wynosi od 5% wszystkich cykli do pęknięcia N_f na poziomie $\epsilon_{ac} = 0.25\%$ do około 25% wszystkich cykli na poziomie $\epsilon_{ac} = 0.6\%$;
- etap II – parametry pętli histerezy podlegają tylko niewielkim zmianom. Prędkość osłabienia jest stała. Długość tego etapu obejmuje od około 50% wszystkich cykli do pęknięcia N_f na poziomie $\epsilon_{ac} = 0.6\%$ do około 90% wszystkich cykli na poziomie odkształcenia $\epsilon_{ac} = 0.25\%$;
- etap III – stal podlega dalszemu silnemu osłabieniu. Na tym etapie zostaje zainicjowane pęknięcie, które się rozwija, aż do całkowitego pęknięcia próbki. Długość etapu zależy od poziomu odkształcenia i wynosi od kilku procent wszystkich cykli do pęknięcia na najwyższym poziomie odkształcenia do kilkunastu procent wszystkich cykli do pęknięcia na poziomie odkształcenia $\epsilon_{ac} = 0.25\%$.

Niezależnie od poziomu odkształcenia i temperatury najdłuższym etapem jest zawsze etap II. Dla tego etapu podjęto próby analitycznego opisu zmian parametrów pętli w funkcji liczby cykli obciążenia liniami prostymi. Szczegóły zamieszczono między innymi w pracach [3, 4].

W pracy dokonano analizy porównawczej pętli histerezy uzyskanych na tych samych poziomach odkształcenia w dwóch różnych temperaturach. Ze względu na występujące ciągle 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 8 przedstawiono przykładowe pętle uzyskane w temperaturach 20°C i 600°C na dwóch poziomach odkształcenia ($\varepsilon_{ac} = 0,25\%$, $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$).



Rys. 8. Pętle histerezy w połowie trwałości zmęczeniowej dla temperatur 20°C i 600°C
Fig. 8. Hysteresis loops obtained at half fatigue life at the temperature of 20°C and 600°C

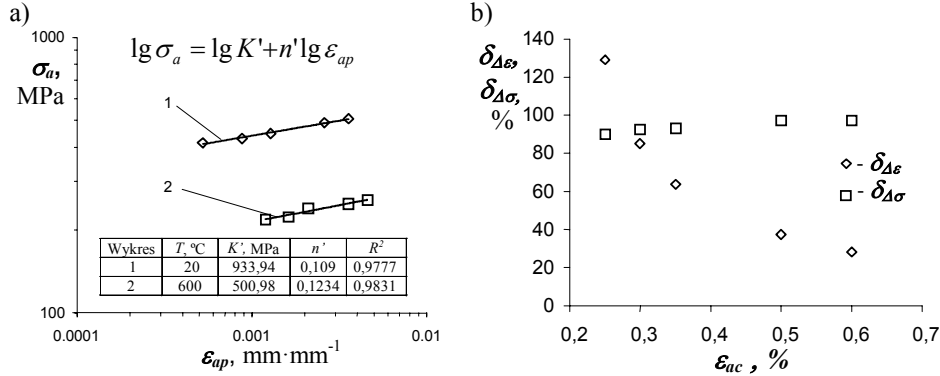
Zgodnie z oczekiwaniami zakres naprężenia $\Delta\sigma_2$ dla pętli uzyskanej w temperaturze podwyższonej jest zdecydowanie mniejszy od zakresu $\Delta\sigma_1$ pętli uzyskanej w temperaturze pokojowej. W przypadku zakresu odkształcenia plastycznego $\Delta\varepsilon_{ap}$ sytuacja jest odwrotna. W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

$$\lg \sigma_a = \lg K' + n' \lg \varepsilon_{ap} \quad (1)$$

gdzie:

K' – współczynnik krzywej cyklicznego odkształcenia, MPa,
 n' – wykładnik krzywej cyklicznego odkształcenia.

Wyniki aproksymacji parametrów pętli σ_a i ε_{ap} na pięciu poziomach odkształcenia i dwóch temperaturach zestawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Wpływ temperatury na ε_{ap} oraz σ_a : a) zależność pomiędzy σ_a i ε_{ap} ,
b) zależność pomiędzy $\Delta\varepsilon_{ap}$, $\Delta\sigma_a$ i ε_{ac}

Fig. 9. Influence of temperature on ε_{ap} and σ_a : a) relation between σ_a and ε_{ap} ,
b) relation between $\Delta\varepsilon_{ap}$, $\Delta\sigma_a$ and ε_{ac}

Na podstawie wykonanych wykresów można stwierdzić, że wpływ temperatury na zakres odkształcenia plastycznego $\Delta\varepsilon_{ap}$ jest widoczny na wszystkich poziomach odkształcenia i wzrasta wraz z ich obniżaniem. Na rysunku 9b pokazano procentowe zwiększenie zakresu odkształceń plastycznych $\Delta\varepsilon_{ap}$ 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 $T = 600^\circ\text{C}$. Wzrost zakresu odkształceń plastycznych określono z zależności:

$$\delta_{\Delta\varepsilon} = \frac{\Delta\varepsilon_{ap(600)} - \Delta\varepsilon_{ap(20)}}{\Delta\varepsilon_{ap(20)}} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie:

$\Delta\varepsilon_{ap(600)}$ – zakres odkształcenia plastycznego w temperaturze $T_2 = 600^\circ\text{C}$,

$\Delta\varepsilon_{ap(20)}$ – zakres odkształcenia plastycznego w temperaturze $T_1 = 20^\circ\text{C}$.

Wzrost zakresu naprężeń $\delta_{\Delta\sigma}$ obliczano z analogicznej zależności, w której uwzględniono zakresy naprężeń $\Delta\sigma_a$. 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 naprężeń $\Delta\sigma_a$ uległ obniżeniu o około 90% w stosunku do zakresu naprężenia

obserwowanego na tych samych poziomach odkształcenia w temperaturze otoczenia.

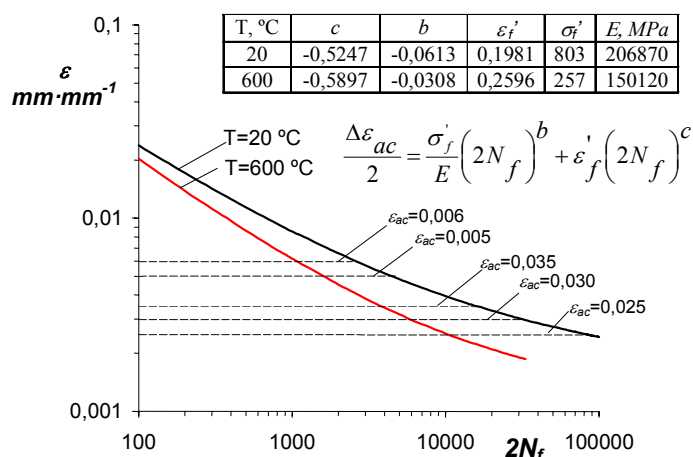
Podczas badań stwierdzono również istotny wpływ temperatury na trwałość zmęczeniową. Zgodnie z [5] wykresy zmęczeniowe w układzie bilogarytmicznym aproksymowano równaniem Mansona-Coffina-Basquina [1] o postaci:

$$\frac{\Delta \varepsilon_{ac}}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_{ae}}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_{ap}}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (3)$$

gdzie:

- b – wykładnik wytrzymałości zmęczeniowej,
- c – wykładnik cyklicznego odkształcenia,
- σ_f' – współczynnik wytrzymałości zmęczeniowej w MPa,
- ε_f' – współczynnik cyklicznego odkształcenia plastycznego,
- E – moduł Younga w MPa.

Ze względu na brak okresu stabilizacji występujące w równaniu (3) współczynniki i wykładniki określono dla parametrów pętli histerezy z połowy trwałości zmęczeniowej ($n/N = 0,5$). Wykresy zmęczeniowe uzyskane w wyniku aproksymacji równaniem (3) rezultatów badań zmęczeniowych prowadzonych w dwóch temperaturach przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Wykresy zmęczeniowe stali P91 w temperaturze 20°C i 600°C
Fig. 10. Fatigue diagrams of P91 steel at the temperature of 20°C and 600°C

Na podstawie przedstawionych wykresów można stwierdzić, że temperatura w sposób istotny wpływa na trwałość zmęczeniową. Jej wpływ zależy od poziomu amplitudy odkształcenia całkowitego. Wpływ ten jest niewielki w obszarze największych odkształceń ($\varepsilon_{ac} = 0,6\%$) i wzrasta w miarę obniżania poziomu odkształcenia. Zdecydowanie większy wpływ temperatury podwyższonej na trwałość zmęczeniową na najniższych poziomach odkształ-

cenia można uzasadnić istotnie większym wzrostem zakresu odkształcenia plastycznego na tych poziomach w temperaturze 600°C w stosunku do wzrostu zakresu odkształceń plastycznych na poziomach najwyższych (rys. 8b).

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że stal P91 jest materiałem, który podczas niskocyklowych badań zmęczeniowych, niezależnie od temperatury, podlega silnemu osłabieniu. Osłabienie stali występuje na wszystkich realizowanych poziomach odkształcenia. W przebiegu osłabienia można wyróżnić trzy charakterystyczne etapy o zróżnicowanej prędkości tego procesu. Niezależnie od poziomu odkształcenia występuje zawsze etap charakteryzujący się stałą prędkością osłabienia.

Temperatura podwyższona ma wpływ na podstawowe parametry pętli histerezy ($\Delta\epsilon_{ap}$, $\Delta\sigma_a$). Zakres odkształcenia $\Delta\epsilon_{ap}$ w temperaturze $T = 600^\circ\text{C}$ jest zawsze większy od zakresu odkształcenia w temperaturze otoczenia. Na wzrost zakresu odkształcenia $\Delta\epsilon_{ap}$ w temperaturze podwyższonej wpływ ma poziom odkształceń całkowitych ϵ_{ac} . Drugi parametr pętli ($\Delta\sigma_a$) w temperaturze podwyższonej jest zawsze mniejszy od jego wartości w temperaturze otoczenia. Wielkość obniżenia $\Delta\sigma_a$ w niewielkim stopniu zależy od poziomu odkształcenia.

Temperatura podwyższona ma wpływ na trwałość zmęczeniową. Wpływ temperatury na trwałość zmęczeniową zależy od poziomu odkształcenia. Jest on niewielki w obszarze bardzo dużych odkształceń ($\epsilon_{ac} = 0,6\%$) i wzrasta wraz z obniżeniem poziomu odkształcenia.

Podczas obciążenia zmiennego próbek ze stali 91 w temperaturze podwyższonej występują znacznie większe zmiany właściwości cyklicznych niż w temperaturze pokojowej. Powoduje to, że wątpliwości budzi prowadzenie obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych eksploatowanych w podwyższonych temperaturach przy wykorzystaniu danych materiałowych określonych np. połowie trwałości zmęczeniowej ($n/N = 0,5$). Dane te odzwierciedlają bowiem, jedynie chwilowe właściwości materiału. Większe zmiany właściwości cyklicznych w temperaturze podwyższonej mogą powodować znacznie większy rozrzut wyników uzyskanych z obliczeń i badań w stosunku rozrzutu wyników uzyskanych w temperaturze otoczenia.

Podczas eksploatacji obiektów technicznych w podwyższonych temperaturach występują interakcje związane z jednoczesnymi zmianami obciążenia oraz temperatury. Przedstawione w pracy badania prowadzone były w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych izotermicznych ($T = \text{const}$). W celu sformułowania wniosków szczegółowych dotyczących właściwości zmęczeniowych stali P91 dalsze prace powinny uwzględniać występowanie podczas badań zmian obciążenia i temperatury.

LITERATURA

- [1] COFFIN L.F.: A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal, Trans. ASME 76, 1954, 931-950.
- [2] FELTNER C.E., MORROW J.D.: Microplastic strain hysteresis energy as a criterion for fatigue fracture. Journal Basic Engineering ASSME, March, 1961, 15-22.
- [3] MROZIŃSKI S., SKOCKI R.: Softening of martensitic cast steel. CIMAC 6, 2011, 173-181.
- [4] 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 LCF7, 2013, 57-62.
- [5] PN-84/H-04334 Badania niskocyklowego zmęczenia metali.

THE INFLUENCE OF ELEVATED TEMPERATURES ON THE CYCLIC PROPERTIES OF P91 STEEL

Summary: This paper deals with the issue of the elevated temperatures influence on cyclic properties of P91 steel. There were shown selected parts of research, namely low cycle tests results of P91 steel under constant amplitude loadings. Basing on these results analysis of the stress and strain amplitude course was carried out as a function of number of cycles.

Key words: fatigue strength, low cycle fatigue, cyclic properties of steel