

**POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ  
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING**

6(3)/2015, 43-55

Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

---

Stanisław MROZIŃSKI, Radosław SKOCKI

**WPLYW TEMPERATURY NA WYNIKI OBLICZEŃ  
TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ**

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wyniki niskocyklowych prób zmęczeniowych próbek ze stali P91 w warunkach obciążeń stałoamplitudowych oraz programowanych. Próby przeprowadzono w dwóch temperaturach:  $T_1 = 20^\circ\text{C}$  i  $T_2 = 600^\circ\text{C}$ . Na podstawie badań stwierdzono, że temperatura istotnie wpływa na trwałość zmęczeniową. Poza temperaturą na trwałość zmęczeniową w warunkach obciążeń programowanych wpływ ma również sekwencja stopni w programie obciążenia. W pracy przeprowadzono doświadczalną weryfikację liniowej hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych Palmgren-Minera. Stwierdzono, że na skuteczność hipotezy sumowania uszkodzeń wpływ ma zarówno temperatura badań, jak również sekwencja stopni w programie obciążenia.

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

## 1. WPROWADZENIE

Obliczenia trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych związane są z zagadnieniem sumowania uszkodzeń zmęczeniowych. W metodzie obliczeń trwałości zmęczeniowej zaproponowanej przez L. Tuckera [17] podczas obliczeń wykorzystuje się dane materiałowe określone podczas niskocyklowych badań zmęczeniowych. Określa się je z tzw. okresu stabilizacji właściwości cyklicznych [1]. Na podstawie analizy wyników niskocyklowych badań zmęczeniowych można stwierdzić, że w przypadku wielu materiałów metalowych stabilizacja właściwości nie występuje lub występuje bardzo krótko [5, 6, 10, 11]. W takich przypadkach przyjmuje się uproszczenie polegające na tym, że dane materiałowe określa się z okresu odpowiadającego połowie trwałości zmęczeniowej ( $n/N = 0,5$ ) [1]. Brak stabilizacji właściwości cyklicznych metali komplikuje istotnie opracowywanie wyników badań metali i stopów w temperaturach podwyższonych. W temperaturze podwyższonej wielkość zmian właściwości cyklicznych jest zdecydowanie większa niż w temperaturze otoczenia [2, 3, 15]. Ze względu na to, że podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej wykorzystywane są te same modele obliczeniowe wątpliwości muszą budzić

---

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

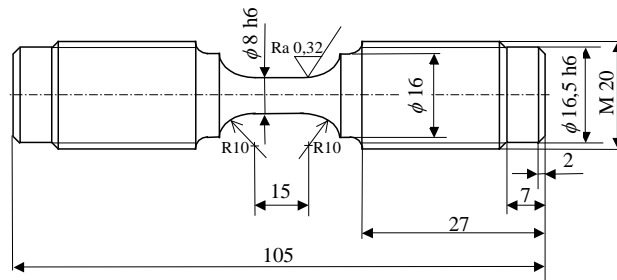
Radosław SKOCKI, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: Radoslaw.Skocki@utp.edu.pl

zatem wyniki obliczeń uzyskane przy założeniu istnienia okresu stabilizacji właściwości cyklicznych [9].

Celem badań była ilościowa ocena wpływu temperatury na skuteczność obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych.

## 2. OPIS BADAŃ

Próbki do badań wykonano ze stali P91 zgodnie z wytycznymi zamieszczonymi w [1]. Kształt próbki do badań pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Kształt i wymiary próbki wykorzystywanej podczas badań  
Fig. 1. Shape and dimensions of specimen used in tests

Niskocyklowe próby zmęczeniowe przeprowadzono w warunkach obciążenia stałoaamplitudowego i programowanego. Badania w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych prowadzono przy kontrolowanej wartości odkształcenia całkowitego ( $\varepsilon_{ac} = \text{const}$ ). Badania polegały na poddawaniu próbek obciążeniu zmiennemu do chwili powstania pęknięcia zmęczeniowego. Podczas badań mierzono odkształcenia próbki z wykorzystaniem ekstensometru o bazie 12,5 mm i zakresie pomiarowym  $\pm 15\%$ . Próby zmęczeniowe przeprowadzono na pięciu poziomach amplitudy odkształcenia całkowitego w zakresie od  $\varepsilon_{ac} = 0,25\%$  do  $\varepsilon_{ac} = 0,60\%$  oraz dwóch temperaturach:  $T_1 = 20^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 600^\circ\text{C}$ . Podczas prób rejestrowano chwilowe wartości siły obciążającej oraz odkształcenia próbki dla wybranych cykli obciążenia. Najważniejsze parametry obciążeń stałoaamplitudowych izotermicznych zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry obciążeń stałoaamplitudowych izotermicznych  
Table 1. Isothermal loads parameters

Schemat programu	$\varepsilon_{ac}$ %	$T$ , °C	R
	0,25 0,30 0,35 0,50 0,60	20 600	$\varepsilon_{min}/\varepsilon_{max} = -1$

Badania programowane realizowano podobnie jak obciążenia stałoaamplitudowe w warunkach kontrolowanego odkształcenia ( $\varepsilon_{ac} = \text{const}$ ) w dwóch temperaturach ( $T_1 = 20^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 600^\circ\text{C}$ ). Podczas badań stosowano obciążenia

dwustopniowe. 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:

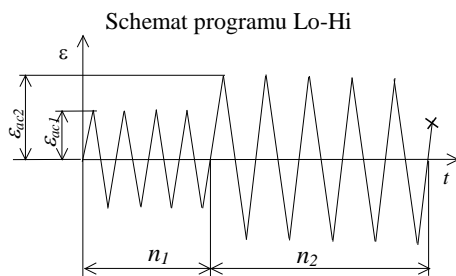
$$D = n_i/N_i \quad (1)$$

gdzie:

- $n_i$  – bieżąca liczba cykli obciążenia stałoamplitudowego na poziomie  $\varepsilon_{aci}$  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  $\varepsilon_{aci}$  i temperaturze próbki  $T_i$  do chwili pęknięcia próbki.

Na rysunku 2 przedstawiono schematy programu obciążenia Lo-Hi i Hi-Lo oraz podano ich parametry.

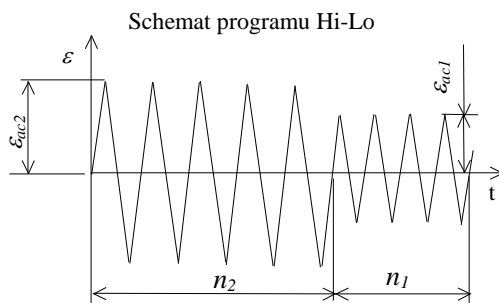
a)



Parametry

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

b)



Parametry

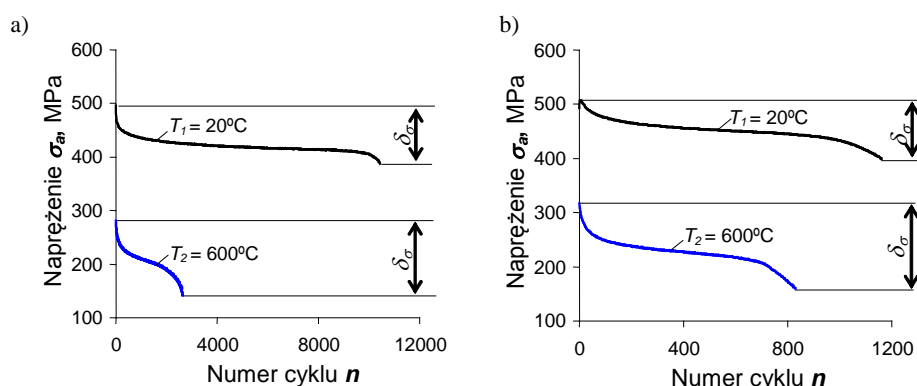
$$\begin{aligned} \varepsilon_{ac(1)} &= 0,30\%, \quad \varepsilon_{ac(2)} = 0,60\% \\ T_1 &= 20^\circ\text{C}, \quad N_2 = 1296 \text{ (z badań)} \\ T_2 &= 600^\circ\text{C}, \quad N_2 = 597 \text{ (z badań)} \\ n_2 &= 0,25N_2 \\ n_2 &= 0,50N_2 \\ n_2 &= 0,75N_2 \end{aligned}$$

Rys. 2. Obciążenie dwustopniowe: a) Lo-Hi, b) Hi-Lo  
Fig. 2. Two stage loading: a) Lo-Hi, b) Hi-Lo

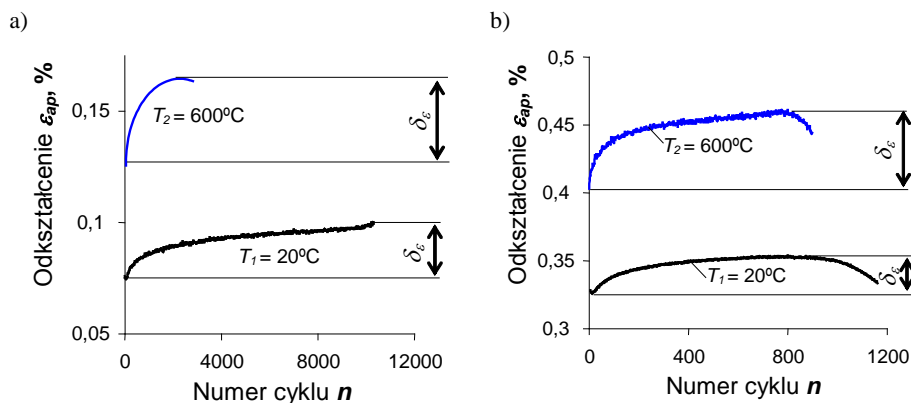
### 3. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

#### 3.1. Badania stałoamplitudowe

Podczas badań na wszystkich poziomach odkształcenia w temperaturze otoczenia ( $T_1 = 20^\circ\text{C}$ ), jak również w temperaturze podwyższonej ( $T_2 = 600^\circ\text{C}$ ) obserwowano cykliczne osłabienie stali P91. W celu scharakteryzowania obserwowanego osłabienia na rysunkach 3 i 4 przedstawiono przykładowe wykresy zmian naprężenia  $\sigma_a$  oraz odkształcenia plastycznego  $\varepsilon_{ap}$  w funkcji liczby cykli obciążenia dla dwóch poziomów odkształcenia całkowitego  $\varepsilon_{ac} = 0,3\%$  i  $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ .



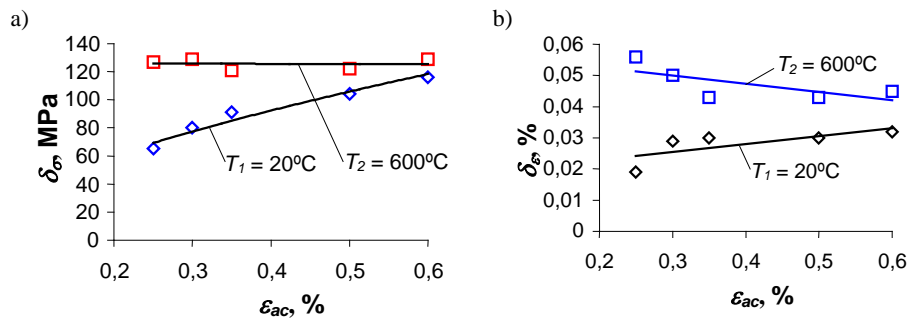
Rys. 3. Zmiany amplitudy naprężenia  $\sigma_a = f(n)$ : a)  $\varepsilon_{ac} = 0,3\%$ , b)  $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$   
Fig. 3. Course of stress  $\sigma_a = f(n)$ : a)  $\varepsilon_{ac} = 0,3\%$ , b)  $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$



Rys. 4. Zmiany amplitudy odkształcenia plast.  $\varepsilon_{ap} = f(n)$ : a)  $\varepsilon_{ac} = 0,3\%$ , b)  $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$   
Fig. 4. Course  $\varepsilon_{ap} = f(n)$ : a)  $\varepsilon_{ac} = 0,3\%$ , b)  $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$

Wpływ temperatury na wielkość zmian właściwości cyklicznych jest widoczny zarówno przy wykorzystaniu opisu naprężeniowego ( $\sigma_a$ ), jak i odkształceniowego ( $\varepsilon_{ap}$ ). Na rysunkach 3 i 4 zaznaczono zakres zmian naprężenia

$\delta_\sigma$  oraz odkształcenia plastycznego  $\delta_\varepsilon$ , jaki obserwowano w całej próbie. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że na tych samych poziomach odkształcenia w temperaturze 600°C zmiany parametrów pętli są większe niż w temperaturze 20°C. Dla zilustrowania wpływu temperatury na wielkość zmian parametrów pętli na rysunku 5 zestawiono wartości parametrów  $\delta_\sigma$  oraz  $\delta_\varepsilon$  w zależności od odkształcenia  $\varepsilon_{ac}$  i temperatury.



Rys. 5. Zmiany parametrów pętli: a)  $\delta_\sigma$  b)  $\delta_\varepsilon$

Rys. 5. Change of hysteresis loop parameters: a)  $\delta_\sigma$  b)  $\delta_\varepsilon$

Zmiany analizowanych parametrów zależą zarówno od temperatury, jak również poziomu odkształcenia. W temperaturze  $T_1 = 20^\circ\text{C}$  najmniejsze zmiany  $\delta_\varepsilon$  oraz  $\delta_\sigma$  występują na najniższych poziomach i ulegają zwiększeniu wraz ze wzrostem odkształcenia. W temperaturze  $T_2 = 600^\circ\text{C}$  wartość parametru  $\delta_\varepsilon$  ulega obniżeniu wraz ze wzrostem odkształcenia, natomiast parametr  $\delta_\sigma$  nie zależy od odkształcenia. Szczegółową analizę wpływu temperatury na wielkość zmian parametrów pętli histerezy omówiono między innymi w pracach [12-14].

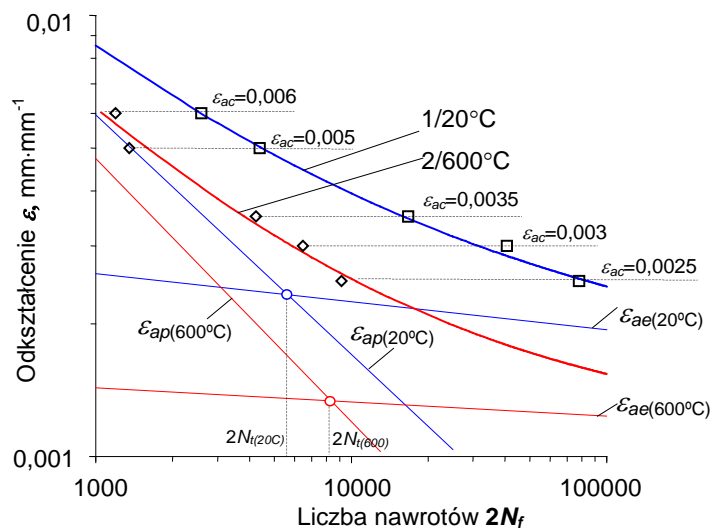
Wyniki trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń stałoamplitudowych opracowano w formie wykresów. Wykresy zmęczeniowe aproksymowano równaniem w postaci [4, 7]:

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

gdzie:

- $b$  – wykładnik wytrzymałości zmęczeniowej,
- $c$  – wykładnik cyklicznego odkształcenia,
- $\sigma_f'$  – współczynnik wytrzymałości zmęczeniowej,
- $\varepsilon_f'$  – współczynnik cyklicznego odkształcenia plastycznego,
- $E$  – moduł Younga.

Na rysunku 6 pokazano wykresy zmęczeniowe uzyskane podczas badań w temperaturach 20 oraz 600°C. Współczynniki oraz wykładniki równania 2 zestawiono w tabeli 2.



Rys. 6. Wykresy porównawcze trwałości zmęczeniowej stali P91  
 Fig. 6. Comparative diagrams of fatigue life of P91 steel

Tabela 2. Dane materiałowe stali P91  
 Table 2. Material data of P91 steel

Wykres/temp	<i>b</i>	<i>c</i>	$\sigma_f', MPa$	$\epsilon_f'$	$2N_f$	<i>E, MPa</i>
1/20°C	-0,0633	-0,5426	825,5	0,2525	5639	205339
2/600°C	-0,0319	-0,5964	260,1	0,2918	8350	145870

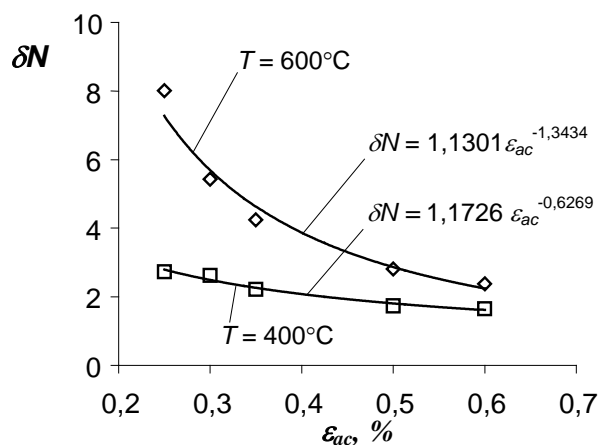
Analiza położenia wykresów (rys. 6) pozwala stwierdzić, że temperatura wpływa na trwałość zmęczeniową. Jej wpływ zależy od poziomu amplitudy odkształcenia. Wpływ temperatury na trwałość jest najmniejszy w obszarze największych odkształceń i wzrasta w miarę ich obniżania. W celu ilościowego określenia wielkości obniżenia trwałości w temperaturze podwyższonej wprowadzono współczynnik  $\delta N$  obliczany z zależności:

$$\delta N = \frac{2N_{f(20^\circ C)}}{2N_{f(600^\circ C)}} \quad (3)$$

gdzie:

- $2N_{f(20^\circ C)}$  – liczba nawrotów obciążenia do pęknięcia próbki w temperaturze 20°C na i-tym poziomie odkształcenia,
- $2N_{f(600^\circ C)}$  – liczba nawrotów obciążenia do pęknięcia próbki w temperaturze 600°C na i-tym poziomie odkształcenia.

Na rysunku 7 przedstawiono wykresy zmian  $\delta N$  w zależności od poziomu odkształcenia w temperaturach podwyższonych ( $T = 600^\circ C$  oraz  $T = 400^\circ C$ ).

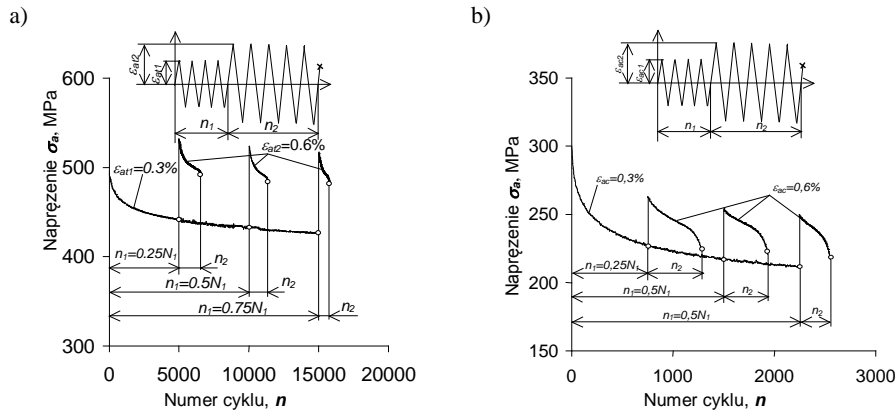


Rys. 7. Wpływ temperatury na obniżenie trwałości zmęczeniowej  
 Fig. 7. Temperature influence on the fatigue life decreasing

Uzyskane wartości  $\delta N$  w funkcji odkształcenia  $\varepsilon_{ac}$  opisano funkcją potęgową i naniesiono na rysunku. Uzyskane wyniki badań potwierdzają wyniki obserwowane na rysunku 6. Na poziomie odkształcenia  $\varepsilon_{ac} = 0,25\%$  trwałość zmęczeniowa w temperaturze  $T = 600^\circ\text{C}$  jest prawie 8-krotnie mniejsza od trwałości na tym poziomie w temperaturze  $T = 20^\circ\text{C}$ . W przypadku poziomu największego ( $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ ) trwałość w temperaturze  $T = 600^\circ\text{C}$  jest około 3-krotnie mniejsza od trwałości uzyskanej w temperaturze otoczenia ( $20^\circ\text{C}$ ). W miarę obniżania temperatury wpływ poziomu odkształcenia na trwałość ulega wyraźnemu obniżeniu. Dla przykładu na najmniejszym poziomie odkształcenia trwałość w temperaturze  $T = 400^\circ\text{C}$  jest już tylko około 3-krotnie, a na największym około 2-krotnie mniejsza od trwałości uzyskanych w temperaturze otoczenia.

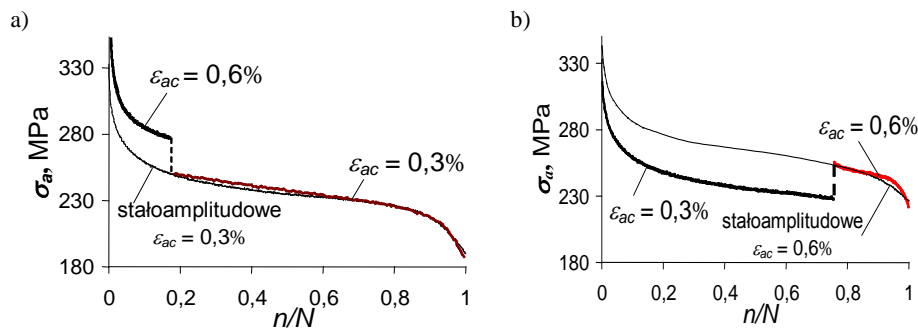
### 3.2. Obciążenia programowane

Wyniki badań w warunkach obciążeń programowanych analizowano w kontekście wpływu temperatury na zmiany podstawowych parametrów pętli histerezy przed i po zmianie stopnia programu. Na rysunku 8 przedstawiono przykładowe wykresy zmian naprężenia  $\sigma_a$  dla sekwencji programu obciążenia Lo-Hi w temperaturze  $20^\circ\text{C}$  i  $600^\circ\text{C}$ .



Rys. 8. Zmiana naprężenia  $\sigma_a$  dla obciążenia programowanego Lo-Hi: a)  $T_1 = 20^\circ\text{C}$ , b)  $T_2 = 600^\circ\text{C}$   
 Fig. 8. Change of stress  $\sigma_a$  for programmed loading Lo-Hi: a)  $T_1 = 20^\circ\text{C}$ , b)  $T_2 = 600^\circ\text{C}$

Na podstawie wykresów można stwierdzić, że podobnie jak podczas badań stałoamplitudowych w warunkach obciążeń programowanych występują zmiany parametrów pętli histerezy oraz brak okresu stabilizacji. Do momentu zmiany poziomu odkształcenia przebieg zmian właściwości cyklicznych jest taki, jak podczas obciążenia stałoamplitudowego. Po zmianie poziomu odkształcenia stal ulega dalszemu osłabieniu. Wielkość osłabienia zależy od liczby cykli obciążenia zrealizowanych na pierwszym stopniu programu. Dotyczy to zarówno temperatury  $T_1 = 20^\circ\text{C}$ , jak również  $T_2 = 600^\circ\text{C}$ . Jak należało oczekiwać, wraz ze wzrostem liczby cykli  $n_1$  na pierwszym stopniu obniżeniu ulega liczba cykli zrealizowanych na drugim stopniu. W pracy dokonano analizy porównawczej parametrów pętli histerezy uzyskanej podczas obciążeń stałoamplitudowych i programowanych. Na rysunku 9 przedstawiono przykładowe wykresy naprężenia  $\sigma_a$  w warunkach obciążeń stałoamplitudowych i programowanych w  $T_2 = 600^\circ\text{C}$  w funkcji trwałości względnej  $n/N$ .



Rys. 9. Amplituda naprężenia  $\sigma_a = n/N$  w temperaturze  $T_2 = 600^\circ\text{C}$ : a) Hi-Lo, b) Lo-Hi  
 Fig. 9. Stress amplitude  $\sigma_a = n/N$  at temperature of  $T_2 = 600^\circ\text{C}$ : a) Hi-Lo, b) Lo-Hi



Na podstawie wykresów 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 stałoaamplitudowych. Powyższe stwierdzenie dotyczy temperatury otoczenia oraz temperatury podwyższonej. Świadczy to jednocześnie o tym, że większe zmiany właściwości cyklicznych w temperaturze podwyższonej dotyczą również obciążenia programowanego.

#### 4. OBLICZENIA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

Podczas badań obserwowano wpływ sekwencji programu obciążenia oraz temperatury na trwałość zmęczeniową. Wpływ programu zależy od trwałości względnej  $n_i/N_i$ , przy której dokonywano zmian odkształcenia. Dla  $n_i/N_i = 0,25$  wyższą trwałość w obydwu temperaturach uzyskano podczas realizacji programu Hi-Lo. Dla pozostałych sekwencji programów ( $n_i/N_i = 0,5$ ,  $n_i/N_i = 0,75$ ) trwałość wyższą uzyskano podczas realizacji programu Lo-Hi (tab. 3).

Tabela 3. Wyniki badań oraz obliczeń trwałości w warunkach obciążeń programowanych  
Table 3. Results of fatigue tests and calculations in terms of programmed loadings

Pro-gram	Pró-bka	$T_1 = 20^\circ\text{C}$						$T_2 = 600^\circ\text{C}$					
		$n_i = 0,25 N_i$		$n_i = 0,5 N_i$		$n_i = 0,75 N_i$		$n_i = 0,25 N_i$		$n_i = 0,5 N_i$		$n_i = 0,75 N_i$	
		eks.	obl.	eks.	obl.	eks.	obl.	eks.	obl.	eks.	obl.	eks.	obl.
L <sub>o</sub> -H <sub>i</sub>	1	7354		12584		14654		1358		1758		2254	
	2	6587	6069	10874	10716	15654	15362	1124	1146	2054	1760	3101	2374
	3	5046		10641		18292		1239		2161		2400	
	śr.	<b>6329</b>		<b>11366</b>		<b>16200</b>		<b>1240</b>		<b>1991</b>		<b>2585</b>	
H <sub>i</sub> -L <sub>o</sub>	1	11254		9724		7254		1645		1354		1058	
	2	14359	16180	9854	12238	7174	8296	1542	2371	1395	1806	1050	1240
	3	14587		9872		7222		1661		1309		1095	
	śr.	<b>13400</b>		<b>9817</b>		<b>7217</b>		<b>1616</b>		<b>1353</b>		<b>1068</b>	

Uzyskane podczas badań eksperymentalnych wyniki trwałości dla różnych sekwencji programu obciążenia wykorzystano podczas doświadczalnej weryfikacji liniowej hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych Palmgren-Minera (PM) [8, 16]. W trakcie obliczeń korzystano z charakterystyk zmęczeniowych przedstawionych na rysunku 6. Obliczenia trwałości prowadzono dla programów obciążenia pokazanych na rysunku 2. Zgodnie z hipotezą PM pęknięcie próbki w warunkach obciążenia programowanego powinno nastąpić w przypadku, gdy zostanie spełniony warunek:

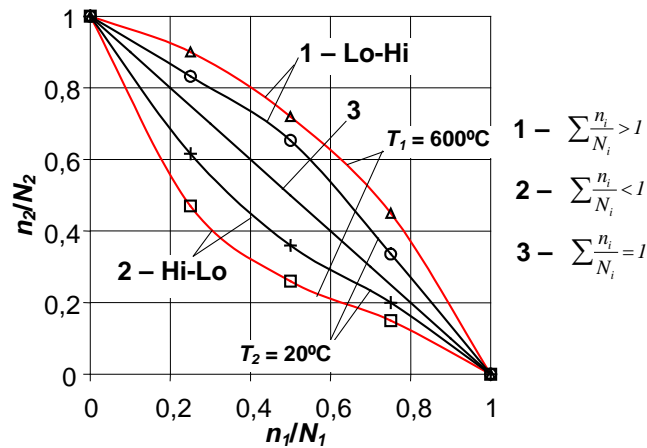
$$\sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = 1,0 \quad (4)$$

gdzie:

- $n_1, n_2$  – liczby cykli na pierwszym oraz drugim stopniu programu obciążenia,
- $N_1, N_2$  – liczby cykli do pęknięcia próbki podczas obciążenia stałoaamplitudowego na poziomach  $\varepsilon_{ac1}$  i  $\varepsilon_{ac2}$ .

Wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej próbek w warunkach obciążeń dwustopniowych oraz stałej temperatury zestawiono na rysunku 10.

Położenie wyników obliczeń na przekątnej 3 wykresu odpowiada sumie uszkodzeń  $\sum n_i/N_i = 1,0$  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  $\sum n_i/N_i \neq 1,0$  świadczy o wpływie historii obciążenia na wyniki obliczeń trwałości. Na podstawie analizy uzyskanych wyników trwałości (rys. 9) stwierdzono, że dla wszystkich sekwencji Lo-Hi trwałość zmęczeniowa uzyskana podczas obliczeń jest mniejsza od trwałości uzyskanej z badań ( $N_{obl} < N_{eks}$ ). Natomiast dla wszystkich sekwencji programów Hi-Lo trwałość z obliczeń jest większa od trwałości uzyskanej z badań ( $N_{obl} > N_{eks}$ ).

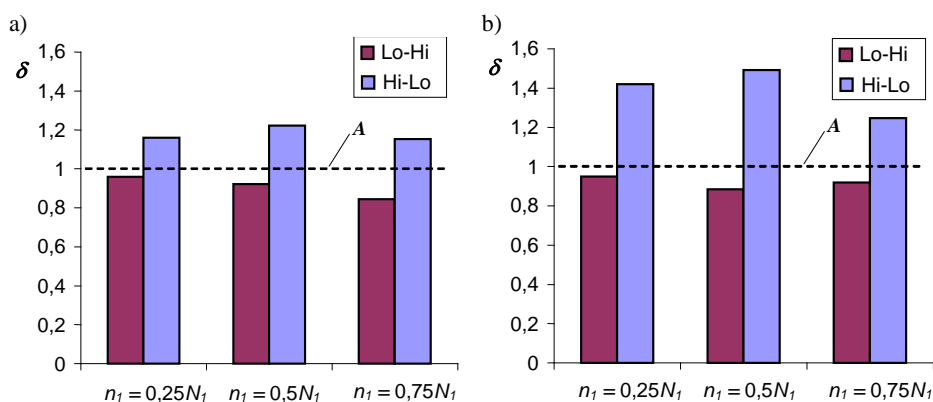


Rys. 10. Wyniki weryfikacji liniowej hipotezy sumowania uszkodzeń  
Fig. 10. Results of verification of PM cumulative damage hypothesis

W celu porównania wyników trwałości z obliczeń ( $N_{obl}$ ) i badań ( $N_{eks}$ ) wprowadzono współczynnik  $\delta$  definiowany jako:

$$\delta = \frac{N_{obl}}{N_{eks}} \quad (5)$$

Wyniki obliczeń współczynnika  $\delta$  przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Wartości współczynnika  $\delta$  dla różnych programów: a)  $T_1 = 20^\circ\text{C}$ , b)  $T_2 = 600^\circ\text{C}$   
 Fig. 11. Coefficient  $\delta$  values for different programs:  $T_1 = 20^\circ\text{C}$ , b)  $T_2 = 600^\circ\text{C}$

Wartości współczynnika  $\delta$  równe jedności (linia A) oznaczają, że suma uszkodzeń obliczona z zależności (4) jest również równa jedności i odpowiada pełnej zgodności wyników obliczeń i badań.

Uzyskanie dla obydwu sekwencji programów obciążenia Lo-Hi i Hi-Lo wartości współczynnika  $\delta \neq 1$  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  $600^\circ\text{C}$ .

## 5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania zmęczeniowe potwierdziły wyraźny wpływ temperatury podwyższonej na trwałość zmęczeniową, jak również przebieg zmian właściwości cyklicznych stali P91.

Na trwałość zmęczeniową oraz wielkość zmian właściwości cyklicznych oprócz temperatury wpływ ma również poziom odkształcenia.

Istnieje podobieństwo ilościowe oraz jakościowe w przebiegu zmian właściwości cyklicznych stali P91 na tych samych poziomach odkształcenia w warunkach obciążenia stałoamplitudowego i programowanego.

W temperaturze podwyższonej na tych samych poziomach odkształcenia zmiany właściwości cyklicznych są większe od zmian obserwowanych w temperaturze otoczenia.

Sekwencja stopni w programie obciążenia ma wpływ na trwałość zmęczeniową. Wpływ sekwencji stopni w programie obciążenia zależy od liczby cykli zrealizowanych na pierwszym stopniu.

Temperatura podwyższona powoduje obniżenie skuteczności metod obliczeń trwałości zmęczeniowej. Jedną z przyczyn większego zróżnicowania wyników trwałości z badań i obliczeń mogą być większe zmiany właściwości cyklicznych obserwowane w temperaturze podwyższonej.

## LITERATURA

- [1] ASTM E606-92: Standard Practice for Strain -Controlled Fatigue.
- [2] CHEN D.L., WEISS B., STICKLER R.: Cyclic plasticity of recrystallized Mo at low temperatures Materials Science & Engineering A234-236, 1997, 766-769.
- [3] CHEN L.J., EANG Z.G., YAO G., TIAN J.F.: The influence of temperature on low cycle fatigue behavior of nickel base superalloy GH4049 International Journal of Fatigue 21, 1999, 791-797.
- [4] COFFIN L.F.: A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal, Trans. ASME 76, 1954, 931-950.
- [5] GOSS Cz., KŁYSZ S., TELEGA J.: Wpływ sekwencji obciążeń na kształt pętli histerezy w zakresie małej liczby cykli obciążenia. XX Symposium Zmęczenie i Mechanika Pękania, Pieczyska k. Bydgoszczy, 2004, 97-103.
- [6] KUNZ L., LUKAS P., WEISS B., MELISOVA D.: Effect of loading history on cyclic stress-strain response. Materials Science & Engineering A314, 2001, 1-6.
- [7] Manson S.S., Halford G.R.: Re-Examination of Cumulative Fatigue Damage Analysis – an Engineering Perspective. Engineering Fracture Mechanics, 25(5/6), 1986, 539-571.
- [8] MINER M.A.: Cumulative Damage in Fatigue, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. Journal of Applied Mechanics 67, 1945, 159-164.
- [9] MROZIŃSKI S.: O zmienności danych materiałowych do obliczeń trwałości zmęczeniowej. II Symposium Mechanika i Zniszczenie Materiałów i Konstrukcji, Augustów, 2003, 259-262.
- [10] MROZIŃSKI S.: Analiza porównawcza dwóch metod wyznaczania własności cyklicznych metali. Przegląd Mechaniczny 4, 2004, 30-36.
- [11] MROZIŃSKI S.: Wpływ sekwencji programu obciążenia na przebieg procesu stabilizacji stali 45. Zesz. Nauk. ATR w Bydgoszczy, Mechanika 54, 2004, 197-207.
- [12] MROZIŃSKI S., SKOCKI R.: Wpływ temperatury badań na parametry pętli histerezy. XXIV Symposium Zmęczenia i Mechaniki Pękania, Bydgoszcz-Pieczyska 2012, 105-106.
- [13] MROZIŃSKI S., SKOCKI R.: Softening of Martensitic Cast Steel, Journal of Polish CIMAC 5(3), 2011, 173-180.
- [14] 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, 57-62.
- [15] NAGESHA A., VALSAN M., KANNAN R., BHANU SANKARA RAO K., MANNAN K.: Influence of temperature on the low cycle fatigue behaviour of a modified 9Cr–1Mo ferritic steel. International Journal of Fatigue 24, 2002, 1285-1293.
- [16] PALMGREN A.: Die Lebensdauer von Kugellagem, Verfahrenstechnik VDI-Z, Berlin 68, 1924, 339-341.
- [17] TUCKER L.E.: A Procedure for Designing Against Fatigue Failure of Notched Parts. Society of Automotive Engineers, Inc., SAE Paper No 720265, New York, 1972.

Publikacja finansowana z NCBR w ramach Programu "INNOTECH" – ścieżka programowa IN-TECH (umowa nr INNOTECH-K3/IN3/32/227826/NCBR/14).

## TEMPERATURE INFLUENCE ON THE FATIGUE LIFE CALCULATION RESULTS

**Summary:** Authors presents results of static, constant amplitude and programmed tests of P91 steel for the two levels of temperature ( $T_1 = 20^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 600^\circ\text{C}$ ). It was stated that, during constant amplitude tests, temperature significantly influences the fatigue life and depends on the level of strain amplitude. Obtained results of the fatigue life in terms of programmed loadings were compared to the results of calculations. During calculation of the fatigue life there was used the Palmgren-Miner fatigue damage accumulation hypothesis. Basing on the comparison of the results of the fatigue life tests and calculations there were stated that the hypothesis effectiveness at elevated temperatures is lower than at the room temperature. The above was explained by larger changes of the cyclic properties at elevated temperatures.

**Key words:** fatigue life, low cycle fatigue life, cyclic properties of steel