

Zbigniew LIS

**BADANIA NISKOCYKLOWE STALI
W WARUNKACH ZMĘCZENIA CIEPLNO-MECHANICZNEGO:
PROJEKT I WERYFIKACJA STANOWISKA BADAWCZEGO**

Streszczenie: W pracy przedstawiono projekt oraz opis stanowiska do badań próbek ze stali w warunkach zmęczenia cieplno-mechanicznego. Zakres pracy obejmuje analizę stanu techniki, projekt oraz przedstawienie wyników prób weryfikacyjnych stanowiska w zróżnicowanych warunkach obciążenia.

Słowa kluczowe: zmęczenie cieplno-mechaniczne, stanowisko badawcze, badania stali w podwyższonej temperaturze, nagrzewanie indukcyjne

1. WPROWADZENIE

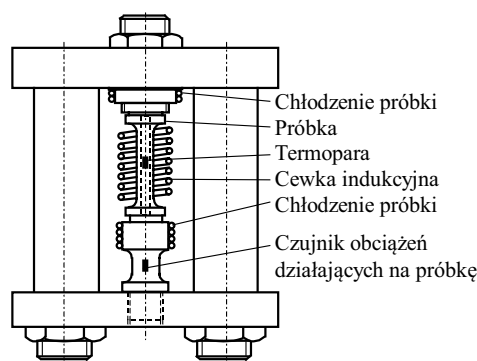
Rozwój przemysłu energetycznego stawia wykorzystywanym obecnie materiałom konstrukcyjnym, pracującym w podwyższonych temperaturach, coraz wyższe wymagania co do wytrzymałości, niezawodności, masy, odporności na działanie czynników zewnętrznych. Trwają intensywne prace nad poszukiwaniem nowych materiałów oraz nad metodami badań tych materiałów. Osobną kwestią jest stały trend wzrostu wymagań technicznych i eksploatacyjnych stawianych urządzeniom przemysłu energetycznemu. Dotyczy on między innymi poprawy sprawności bloków energetycznych poprzez podwyższenie temperatury pary wykorzystywanej do napędu turbin. Wzrost temperatury eksploatacji obiektów energetycznych powoduje zwiększenie wyężenia materiałów zastosowanych na te obiekty, a tym samym konieczność określania parametrów wytrzymałościowych materiałów w zakresie zmęczenia cieplnego lub cieplno-mechanicznego.

2. APARATURA DO BADAŃ ZMĘCZENIA W TEMPERATURZE PODWYŻSZONEJ

2.1. Urządzenia do badań zmęczenia cieplnego i cieplno-mechanicznego

Pierwsze badania w zakresie niskocyklowego zmęczenia w temperaturach podwyższonych przeprowadzono w latach 60. ubiegłego wieku. Rozpoczęły je badania zmęczenia cieplnego próbek obciążanych naprężeniami termicznymi wywołanymi zmieniającą się temperaturą. Przyczyniła się do tego prostota stanowiska niezbędnego do realizacji takich badań. W utwierdzonym elemencie poddanym działaniu zmiennej temperatury w wyniku rozszerzalności cieplnej materiału pojawiają się zmienne naprężenia. Mogą one wywołać takie samo zniszczenie zmęczeniowe, jakie ma miejsce w warunkach zmiennego obciążenia

mechanicznego. Z tego też względu niektóre z danych materiałowych uzyskanych w warunkach zmęczenia mechanicznego mogą być odpowiednikami danych uzyskanych podczas zmęczenia cieplnego. Schemat prostego stanowiska do badań w warunkach zmęczenia cieplnego pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat stanowiska do badań w warunkach zmęczenia cieplnego [6]
Fig. 1. Diagram of the test stand in thermal fatigue conditions [6]

Stanowiska do badań w warunkach zmęczenia cieplnego – pomimo swojej prostoty – są obecnie urządzeniami zaawansowanymi technicznie. Są w pełni skomputeryzowane, pozwalają na sterowanie przebiegiem zmian temperatury próbki, jej chłodzeniem i monitorowaniem stanu. Takie urządzenie zostało m.in. zaprojektowane i wykonane w Instytucie Odlewnictwa w Krakowie [6].

Badania w zakresie zmęczenia cieplno-mechanicznego mogą być również prowadzone na standardowych maszynach wytrzymałościowych. Współczesne maszyny wytrzymałościowe to najczęściej urządzenia uniwersalne, pozwalające na realizację szerokiego spektrum badań. Charakteryzują się bardzo wysoką dokładnością pomiarów sił, przemieszczeń, jak i odkształceń lokalnych. Urządzenia do badań – w zależności od potrzeb – mogą być wyposażone w pakiety programów do badań statycznych, dynamicznych, badań w zakresie mechaniki kruchego pęknięcia, badań w obszarze niskocyklowego zmęczenia metali i obliczenia parametrów wytrzymałościowych. Pozwalają nie tylko na sterowanie pracą maszyny, ale również służą do rejestracji, a następnie opracowywania wyników badań. Hydrauliczne maszyny wytrzymałościowe umożliwiają realizację zarówno prostych stanów obciążenia (np. rozciągania/ściskania, zginania, skręcania), jak i złożonych stanów obciążenia (np. jednoczesne rozciąganie/ściskanie i skręcanie). Można na nich przeprowadzać badania procesów pełzania, zmęczenia, relaksacji naprężeń itp. Współczesne maszyny wytrzymałościowe mogą być wyposażone w dodatkowy osprzęt przeznaczony do badań w obszarze zmęczenia cieplno-mechanicznego: ekstensometry, specjalne piece, diuary, interferometry, pirometry, kamery termowizyjne itp.

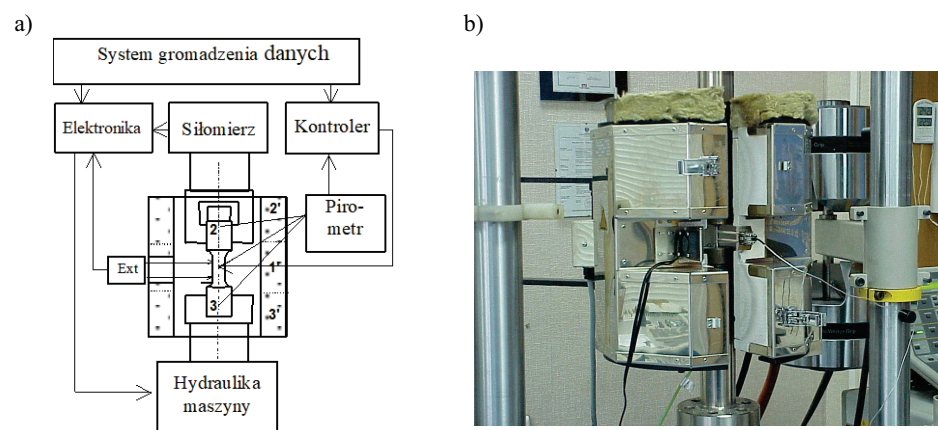
2.2. Nagrzewanie próbek

Urządzenia do nagrzewania próbki zamocowanej na stanowisku badawczym (np. z rys. 1) lub na maszynie wytrzymałościowej mają istotne znaczenie i wpływ na uzyskiwane wyniki. W większości istniejących rozwiązań możliwych jest kilka metod nagrzewania badanych próbek. Najważniejsze z nich to:

- nagrzewanie w komorze (piecu mocowanym na maszynie),
- nagrzewanie oporowe,
- nagrzewanie indukcyjne.

Nagrzewanie w komorze

Badania polegają na grzaniu próbki zamontowanej w specjalnej komorze (piecu). Widok przykładowego stanowiska do badań z wykorzystaniem komory grzewczej przedstawiono na rysunku 2. Obciążenie zadawane na maszynie jest przenoszone na próbkę za pomocą specjalnych chłodzonych ciągien.



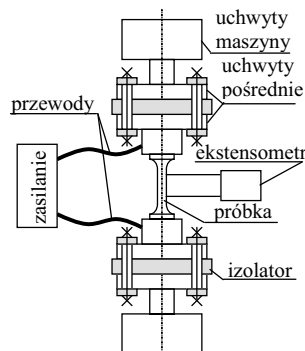
Rys. 2. Nagrzewanie próbek w piecu grzewczym: a) schemat komory, b) widok [2]
Fig. 2. Specimen heating in a heating furnace: a) chamber diagram, b) view [2]

Zasadniczą wadą grzania próbek w komorze jest bardzo duża bezwładność cieplna, co wyklucza realizację szybkich zmian temperatury i zastosowanie do badań w warunkach zmęczenia cieplnego. Duża bezwładność cieplna jest natomiast zaletą w długotrwałych badaniach izotermicznych, gdzie istnieje potrzeba utrzymania stałej temperatury w długim czasie na niezmiennym poziomie. Nie ma w tym przypadku praktycznego znaczenia długi czas potrzebny na nagrzanie, a następnie ustabilizowanie temperatury.

Nagrzewanie oporowe

Nagrzewanie oporowe polega na przepływie przez próbkę prądu o dużym natężeniu. Schemat stanowiska do nagrzewania oporowego pokazano na rysunku 3. Przepływ prądu powoduje nagrzewanie próbki w całej objętości, co jest olbrzymią zaletą metody. Problemem jest natomiast konieczność izolowania

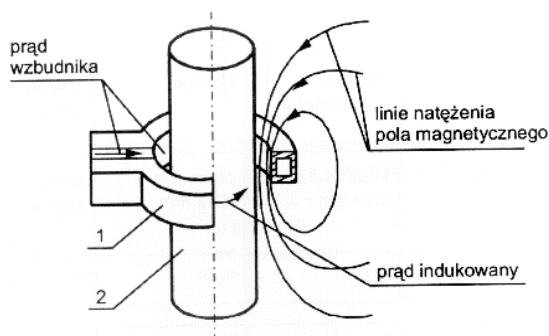
elektrycznego układu obciążania od próbki. Przepływ prądu zmiennego o dużym natężeniu powoduje również powstanie silnego pola magnetycznego wzdłuż przewodnika, które może zakłócić pracę przyrządów pomiarowych znajdujących się w pobliżu próbki. Zastosowanie prądu stałego eliminuje ten problem, ale przy niskich napięciach powoduje duże straty elektryczne w zasilaczu.



Rys. 3. Nagrzewanie oporowe próbek na maszynie wytrzymałościowej [2]
Fig. 3. Resistance heating of samples on a testing machine [2]

Nagrzewanie indukcyjne próbek

Podstawowym zjawiskiem fizycznym wykorzystywanym w nagrzewnicach indukcyjnych jest indukcja magnetyczna. Polega ona na powstaniu prądów wirowych w metalach poddanych zmiennemu polu magnetycznemu, wytwarzanemu przez wzbudnik nagrzewnicy. Efekt cieplny uzyskuje się w wyniku zmiany energii pola elektromagnetycznego w energię cieplną wydzielaną wewnątrz nagrzewanego materiału. Umożliwia to nagrzewanie części pomiarowej badanej próbki bez nagrzewania elementów mocujących. Główną zaletą metody jest szybkość nagrzewania, nieporównywalna z nagrzewaniem w komorze grzewczej. Cecha ta jest szczególnie pożądana podczas badań próbek stalowych w warunkach zmiennej temperatury. Schemat nagrzewnicy indukcyjnej przedstawiono na rysunku 4.

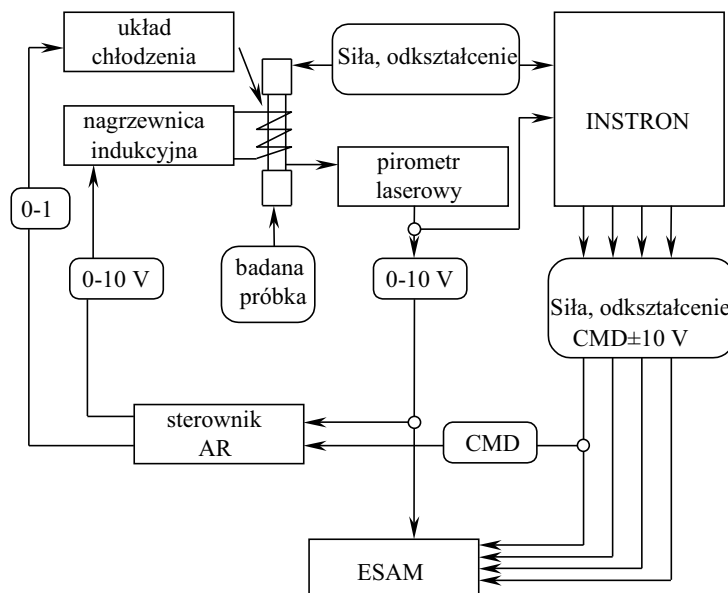


Rys. 4. Schemat nagrzewania indukcyjnego: 1 – wzbudnik, 2 – materiał nagrzewany [6]
Fig. 4. Scheme of induction heating: 1 – inductor, 2 – heated material [6]

Nagrzewanie indukcyjne nie wymaga również izolacji elektrycznej pomiędzy próbką a maszyną wytrzymałościową, co znacznie upraszcza sposób montażu. Metoda nagrzewania ma jednak szereg wad. Pewne ograniczenia stwarza cewka generatora, która ogranicza dostęp do powierzchni próbki i mocowanie na niej przyrządów pomiarowych, takich jak: ekstensometr czy pirometr. Z uwagi na duży prąd płynący przez cewkę roboczą generatora niezbędne jest jej chłodzenie. Realizuje się to poprzez przepływ przez rurkę generatora odpowiedniego chłodziwa (powietrza lub wody). Do wad metody należy również zaliczyć silne, szybkozmienne pole elektromagnetyczne w pobliżu cewki indukcyjnej. W polach magnetycznych o dużej częstotliwości, prąd indukowany płynie w warstwie powierzchniowej próbki (powstaje zjawisko naskórkowości). Przy nagrzewaniu próbek o większej objętości powoduje to dłuższy czas nagrzewania. W takim przypadku wskazane jest zmniejszenie częstotliwości wzbudzenia. Innym rozwiązaniem – bardzo często wykorzystywanym w praktyce – jest stosowanie do badań próbek drażonych. Ich zastosowanie pozwala zapewniać niewielki gradient temperatury a jednocześnie umożliwia zastosowanie chłodzenia wewnętrznego próbki. Chłodziwem jest najczęściej powietrze przepływające poprzez drażoną próbkę oraz dodatkowo strumień zewnętrzny powietrza podawany z symetrycznie położonych dysz. Rozwiązanie takie zaproponowano między innymi w pracy [1].

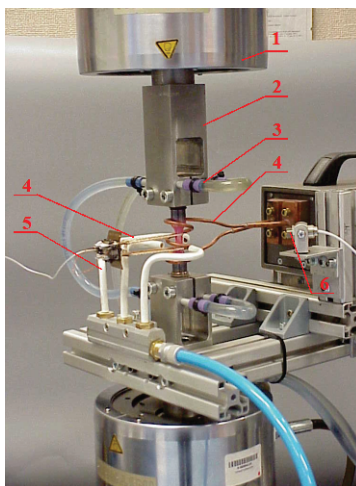
2.3. Opis stanowiska badawczego

Realizacja prób zmęczeniowych wymaga opracowania układu sterowania nagrzewnicą i jego synchronizacji z programem obciążenia maszyny wytrzymałościowej. Na rysunku 5 przedstawiono schemat układu nagrzewania indukcyjnego.



Rys. 5. Schemat układu nagrzewania indukcyjnego (opracowanie własne)
Fig. 5. Diagram of an induction heating system (own study)

Badana próbka zamocowana w maszynie do badań wytrzymałościowych jest nagrzewana nagrzewnicą indukcyjną. Efektywność nagrzewania metodą indukcyjną zależy od mocy generatora. Do standardowych prób zmęczeniowych z wykorzystaniem próbek o średnicy pomiarowej około 10 mm wystarczające są generatory o mocy od 2 do 5 kW. Temperatura badanej próbki mierzona jest za pomocą pirometru laserowego. Sygnał z pirometru jest przekazywany do trzech urządzeń: komputera sterująco-pomiarowego maszyny wytrzymałościowej, wielokanałowego mostka pomiarowego, oraz do sterownika AR. Program sterownika w zależności od zmiennej sterującej dostosowuje moc nagrzewnicy do zadanej temperatury i kontroluje układ chłodzenia. Chwilowe wartości przemieszczenia tłoka, siły, odkształcenia, oraz sygnał sterujący COMND rejestrowane są w wielokanałowym mostku pomiarowym ESAM równocześnie z sygnałem temperatury. W celu uniknięcia rozgrzewania uchwytów hydraulicznych maszyny wytrzymałościowej, a także łatwiejszego montażu nagrzewnicy zaprojektowano specjalny, chłodzony uchwyt pośredni, na którym zamocowano nagrzewnicę i pirometr. Na rysunku 6 przedstawiono widok próbki podczas badania.



Rys. 6. Stanowisko do badań w warunkach zmęczenia cieplno-mechanicznego: 1 – uchwyty maszyny, 2 – uchwyt pośredni, 3 – chłodzenie uchwytów pośrednich, 4 – cewka nagrzewnicy indukcyjnej, 5 – chłodzenie próbki, 6 – pirometr (opracowanie własne)

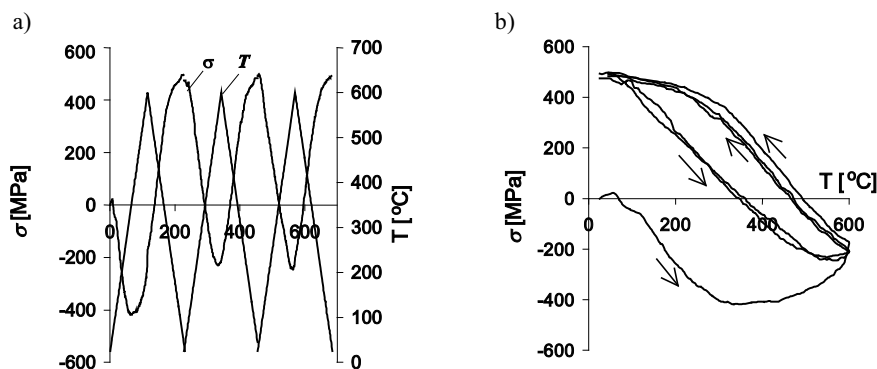
Fig. 6. Stand for tests in thermal and mechanical fatigue: 1 – machine holders, 2 – intermediate handle, 3 – cooling of intermediate holders, 4 – induction heater coil, 5 – sample cooling, 6 – pyrometer (own study)

3. WERYFIKACJA DOŚWIADCZALNA STANOWISKA

3.1. Badania w warunkach zmęczenia cieplnego

Badania zmęczenia cieplnego przeprowadzono na standardowej maszynie wytrzymałościowej, na której zamontowano urządzenie nagrzewania indukcyjnego, pokazane na rysunku 6. Zmiany temperatury utwardzonej próbki (rys. 7a)

powodują powstanie w próbce naprężeń ściskających lub rozciągających. Na rysunku 7b pokazano wynik badań próbek wykonanych w warunkach zmęczenia cieplnego w postaci zarejestrowanych wykresów odkształcania w funkcji zmian temperatury [4]. Na podstawie wykonanych przebiegów zmian naprężenia w funkcji czasu można stwierdzić, że do około 400°C zmiany naprężenia wywołane zmianą temperatury mają charakter liniowy. Powyżej tego poziomu następuje uplastycznienie próbki i zależność pomiędzy naprężeniem a temperaturą przestaje być liniowa. Na rysunku 7b – w celu zilustrowania postaci wyników badań – pokazano zmiany naprężeń podczas tylko kilku cykli zmian temperatury. Podczas badań wykorzystywano próbki wykonane ze staliwa GX12CrMoVNbN9-1 (GP91). Realizacja kolejnych cykli zmian temperatury może doprowadzić do wystąpienia pęknięcia, podobnie jak w warunkach obciążenia mechanicznego. Czas trwania takiej próby może być jednak istotnie większy.

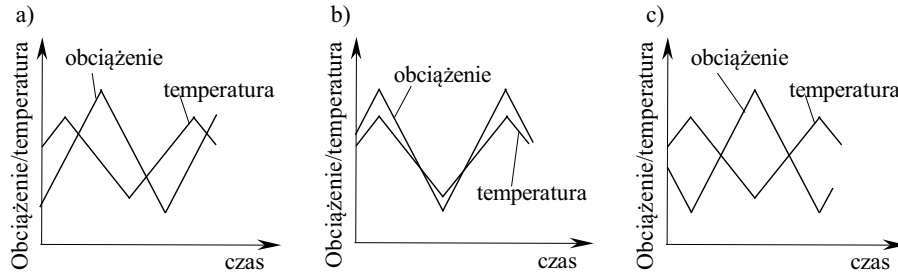


Rys. 7. Wyniki badań w warunkach zmęczenia cieplnego: a) zmiany temperatury oraz naprężeń w czasie, b) zmiany naprężenia w funkcji temperatury [4]

Fig. 7. Test results under thermal fatigue: a) changes in temperature and stress over time, b) changes in stress as a function of temperature [4]

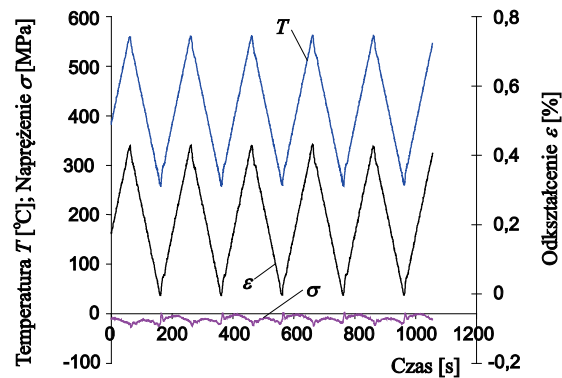
3.2. Badania w warunkach zmęczenia cieplno-mechanicznego

Zmęczenie cieplno-mechaniczne polega na równoczesnym oddziaływaniu na próbkę obciążeń będących skutkiem zmian temperatury oraz obciążeń mechanicznych. Niezależność zmian temperatury oraz cykli mechanicznych powoduje, że teoretycznie istnieje bardzo wiele możliwych kombinacji wzajemnego położenia przebiegów zmian temperatury oraz zmian obciążenia. W praktyce do wyznaczenia właściwości w warunkach zmęczenia cieplno-mechanicznego realizowane dwa rodzaje testów: dla przebiegów zgodnych w fazie ($\varphi = 0^\circ$), kiedy maksymalne odkształcenie mechaniczne występuje w maksymalnej temperaturze oraz dla przebiegów o fazach przeciwnych ($\varphi = 180^\circ$), kiedy maksymalne odkształcenie mechaniczne występuje w minimalnej temperaturze. W ocenie przesunięcia fazowego przyjęto, że kąt 360° odpowiada pełnemu okresowi cyklu. Warianty zmian temperatury i obciążenia w czasie oraz przyjęte oznaczenia pokazano w sposób schematyczny na rysunku 8.



Rys. 8. Zmiany temperatury i obciążenia: a) dowolne przesunięcie fazowe – $0 < \varphi < 180^\circ$, b) w fazie $IP - \varphi = 0^\circ$, c) w przeciwfazie $OP - \varphi = 180^\circ$ (opracowanie własne)
 Fig. 8. Changes of temperature and load: a) any phase shift – $0 < \varphi < 180^\circ$, b) in phase – $IP - \varphi = 0^\circ$, c) counterphase – $OP - \varphi = 180^\circ$ (own study)

Realizacja przebiegów zmian temperatury i obciążenia wymaga od układów sterowania temperaturą próbki (chłodzenie, nagrzewanie) oraz układu obciążenia pracy w układzie sprzężenia zwrotnego. Przed przystąpieniem do badań przeprowadzono doświadczalną weryfikację układów sterowania stanowiskiem badawczym. Badanie takie nazywane jest testem zerowym naprężenia [5]. Test polega na takim sterowaniu przebiegami odkształcenia i temperatury utwardzonej próbki (przebieg w fazie), aby uzyskać w próbce naprężenia zbliżone do zera (brak obciążenia próbki). Na rysunku 9 przedstawiono wyniki testu zerowego naprężenia. Podczas testu zerowego oraz dalszych badań weryfikacyjnych wykorzystywano standardowe próbki do badań w podwyższonej temperaturze wykonane ze stali X10CRMOVNB9-1(P91). Okres zmian temperatury i obciążenia wynosił 200 s.

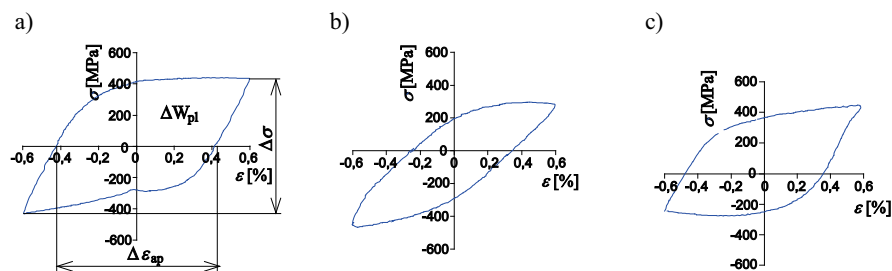


Rys. 9. Wyniki testu zerowego naprężenia (opracowanie własne)
 Fig. 9. Zero stress test results (own study)

Analizując wykonany wykres naprężenia (σ), można stwierdzić, że pomimo istotnych zmian temperatury próbki (T) i związanego z tym jej odkształcenia termicznego (ε) na skutek rozszerzalności cieplnej w próbce zarejestrowano niewielkie naprężenia. Mogą one być efektem niedokładnego określenia współczynnika rozszerzalności cieplnej oraz bezwładności układu sterowania. Naj-

większe różnice (ok. 20 MPa) zaobserwowano w momentach zmiany temperatury. Związane jest to z przyjętym sposobem sterowania, który powoduje, że temperatura zmienia się zgodnie ze zmianą odkształcenia. Występująca bezwładność cieplna próbki i bezwładność układu grzewczego powoduje powstanie niewielkich przesunięć w czasie siły względem temperatury, a w konsekwencji powstania niewielkich naprężeń w próbce.

Próby stałoamplitudowe nieizotermiczne prowadzono w warunkach kontrolowanego odkształcenia ($\varepsilon_{ac} = \text{const}$). Na rysunku 10 zaprezentowano przykładowe pętle histerezy uzyskane na jednym poziomie odkształcenia ($\varepsilon_{ac} = 0,6\%$) dla trzech wariantów obciążenia pokazanych na rysunku 8.



Rys. 10. Przykładowe pętle histerezy dla $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ i $T_{min} = 260^\circ\text{C}$, $T_{max} = 600^\circ\text{C}$: a) przebiegi dowolne, b) w fazie – IP, c) przeciwfazie – OP (opracowanie własne)

Fig. 10. Sample hysteresis loops for $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ and $T_{min} = 260^\circ\text{C}$, $T_{max} = 600^\circ\text{C}$: a) arbitrary waveforms b) in phase – IP, c) counterphase – OP (own study)

Charakteryzuje je zróżnicowanie kilku podstawowych parametrów ($\Delta\varepsilon_{ap}$, $\Delta\sigma$, ΔW_{pl}). W celu zilustrowania wpływu wariantu obciążenia na wymienione parametry w tabeli 1 zestawiono ich wartości na tym poziomie odkształcenia ($\varepsilon_{ac} = 0,6\%$).

Tabela 1. Parametry pętli na poziomie $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ dla różnych wariantów obciążenia (opracowanie własne)

Table 1. Loop parameters at $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ for different load variants (own study)

Parametr	Obciążenie i odkształcenie przebiegi dowolne (rys. 10a)	Obciążenie i odkształcenie w fazie (rys. 10b)	Obciążenie i odkształcenie w przeciwfazie (rys. 10c)
$\Delta\varepsilon_{ap}, \%$	0,8362	0,5876	0,8321
$\Delta\sigma, \text{MPa}$	871,5	763,6	724,6
$\Delta W_{pl}, \text{MJ/m}^3$	6,159	3,875	5,084

Na podstawie wyników zestawionych w tabeli 1 można stwierdzić, że przebieg obciążenia ma wpływ na podstawowe parametry pętli histerezy ($\Delta\varepsilon_{ap}$, $\Delta\sigma$, ΔW_{pl}). Wartości tych parametrów mają bezpośredni wpływ na trwałość zmęczeniową na danym poziomie odkształcenia. Mogą być również wykorzystane podczas kumulacji uszkodzeń prowadzonej podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej. W analizowanym przypadku, bez względu na przyjęty opis zmęczenia (naprężeniowy, odkształceniowy, energetyczny), najbardziej niekorzystnym prze-

biegiem obciążenia ze względu na trwałość zmęczeniową jest przebieg dowolny (rys. 10a). Wartości takich parametrów pętli, jak: $\Delta\epsilon_{ap}$, $\Delta\sigma$, ΔW_{pl} , są podczas tego przebiegu największe. Najmniejsze wartości parametrów pętli $\Delta\epsilon_{ap}$, ΔW_{pl} występują podczas przebiegu zgodnego w fazie (rys. 10b).

4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono projekt stanowiska do badań niskocyklowych próbek stalowych w warunkach zmęczenia cieplno-mechanicznego. Podstawę stanowiska stanowi hydrauliczna maszyna wytrzymałościowa, na której zamocowano zaprojektowany i wykonany innowacyjny system nagrzewania i chłodzenia próbek. Indukcyjny system nagrzewania próbek zapewnia realizację prób zmęczeniowych w warunkach zmęczenia mechanicznego, jak również cieplno-mechanicznego. Przeprowadzona doświadczalna weryfikacja stanowiska wykazała poprawność przyjętych założeń konstrukcyjnych oraz możliwość realizacji badań dla różnych wariantów obciążenia mechanicznego i cieplno-mechanicznego próbek. Jego zaletą jest możliwość wykorzystywania podczas badań klasycznych próbek o kształcie cylindrycznym, stosowanych w badaniach niskocyklowego zmęczenia w temperaturze otoczenia.

LITERATURA

- [1] EVANS W.J., SCREECH J.E., WILLIAMS S.J.: Thermo-mechanical fatigue and fracture of INCO718. *International Journal of Fatigue* 30, 2008, 257–267.
- [2] MROZIŃSKI S.: Badania i obliczenia niskocyklowej trwałości zmęczeniowej stali konstrukcyjnych w temperaturze podwyższonej. Wydawnictwa Uczelniane UTP Bydgoszcz, 2019.
- [3] MROZIŃSKI S., MARCINIAK B.: Test stand for the examination of steel cyclic properties under the condition of temperature changes. *Problemy Eksploatacji* 3, 2014, 5–16.
- [4] MROZIŃSKI S., WŁODARCZYK S.: Badania staliwa w warunkach zmęczenia cieplno-mechanicznego. XXIV Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania, Bydgoszcz, Pieczyska, 2012, 321.
- [5] OKRAJNI J.: Zmęczenie cieplno-mechaniczne oraz wytrzymałość i trwałość instalacji energetycznych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice, 2011.
- [6] PYTEL A.: Nowoczesne tworzywa odporne na zmęczenie cieplne. Cz. 1. Zagadnienia ogólne. Wydawnictwa Instytutu odlewnictwa Kraków, 2012.

Publikacja finansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki w ramach projektu badawczego nr 2017/25/B/ST8/02256

LOW-CYCLE TESTS OF STEEL UNDER THERMO MECHANICAL FATIGUE CONDITIONS: DESIGN AND VERIFICATION OF THE TEST STAND

Summary: The paper presents the design of the test stand for testing steel specimens under thermo-mechanical fatigue. The aim of the work includes the analysis of the design and verification tests under various load conditions.

Key words: thermo-mechanical fatigue, test stand, steel tests at elevated temperature, induction heating