

Tadeusz SZYMCZAK¹
Zbigniew L. KOWALEWSKI²

ZASTOSOWANIE KLEPSYDRYCZNEJ PRÓBKII RURKOWEJ DO WYZNACZANIA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH

W pracy zamieszczono wyniki badań statycznych i zmęczeniowych z prób przeprowadzonych na stali P91 z wykorzystaniem rurkowej cienkościennej mini-próbki klepsydrycznej. Zaprezentowano charakterystyki rozciągania i skręcania badanego materiału oraz wyznaczone na ich podstawie parametry mechaniczne. Przedstawiono wpływ rodzaju sterowania maszyną wytrzymałościową (sygnał przemieszczenia, odkształcenia lub naprężenia) na zachowanie materiału, w postaci jego odpowiedzi ilustrujących zmiany amplitudy naprężenia, odkształcenia i pętli histerezy. Zaprezentowano różnice w liniach ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej, wynikające z zastosowania obciążenia w postaci cyklicznie zmiennego odkształcenia i naprężenia.

Słowa kluczowe: mini-próbka klepsydryczna, właściwości mechaniczne, sygnał wymuszenia, zmęczenie materiału, wzmocnienie, osłabienie.

1. Wprowadzenie

Próbki klepsydryczne, podobnie jak pozostałe rodzaje próbek wytrzymałościowych, charakteryzują się typowymi strefami geometrycznymi, tj.: chwytową, roboczą i pomiarową, rys. 1 ÷ 3. Pierwsza z nich przyjmuje kształt walcowy (rys. 1, 2) lub płaski o wymiarach umożliwiających zamocowanie próbki w maszynie wytrzymałościowej. Strefa robocza ma kształt krzywoliniowy, opisany zazwyczaj promieniem o dużej wartości, rys. 1, 2. W jej środkowej części znajduje się strefa pomiarowa. Rozmiar tego obszaru, w porównaniu do strefy roboczej, jest kilkakrotnie mniejszy. W większości przypadków wynika on z promienia podcięcia technologicznego i założeń programu badań.

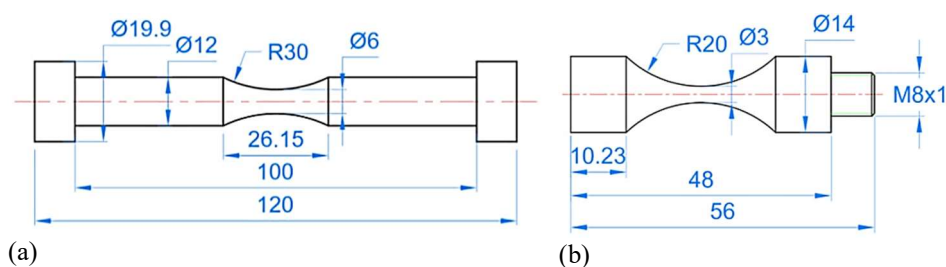
¹ Tadeusz Szymczak (autor do korespondencji), Instytut Transportu Samochodowego, 03-301 Warszawa, ul. Jagiellońska 80, 22 438 53 07, tadeusz.szymczak@its.waw.pl

² Zbigniew L. Kowalewski, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, 02-106 Warszawa, ul. Pawińskiego 5B, 22 826 12 81, zkowalew@ippt.pan.pl

Poza próbkami o wymiarach standardowych wykorzystuje się również próbki w skali mini (rys. 2) lub mikro (rys. 3). Służą one prowadzeniu badań mechanicznych materiałów elementów o niewielkich wymiarach, np. prętów [1], [2]. Podobnie jak próbki większych rozmiarów, mikro-próbki poddawane są obciążeniom zmęczeniowym [1]. W trakcie prób prowadzone są pomiary odkształcenia. Odbywa się to dzięki wykorzystaniu odpowiednich uchwytów, umożliwiających umieszczenie próbki w łańcuchu kinematycznym maszyny wytrzymałościowej, oraz wykorzystaniu ekstensometru.

Próbki klepsydryczne stosowane są również do monitorowania powstawania mikropęknięć w ramach analizy parametrów mechaniki uszkodzenia, ich wzrostu i łączenia się oraz propagacji dominującego pęknięcia pod działaniem zmiennego cyklicznie naprężenia normalnego, rys. 2a, [3]. Do tego celu wykorzystuje się pomiar odkształcenia poprzecznego, którego wartości dają możliwość obliczania odkształcenia wzdłużnego przy znajomości współczynnika Poissona. Na podstawie takich wyników badań mogą być opracowywane diagramy rozwoju uszkodzeń w funkcji liczby cykli dla różnych stosowanych wartości amplitudy naprężenia [3]. Próbki klepsydryczne wykorzystywane są również do badań zmęczeniowych przy sterowaniu sygnałem odkształcenia wzdłużnego, prowadzonych w temperaturze do około 1000°C z użyciem układu grzania indukcyjnego [4]. Pomiar temperatury odbywa się z wykorzystaniem termopar w kilku wybranych punktach (rys. 2b), uwzględniając również strefę pomiarową. W badaniach autorów pracy [4] zaobserwowano, że prawidłowe usytuowanie układu grzewczego zapewnia uzyskiwanie zaplanowanych największych wartości temperatury dokładnie w strefie pomiarowej. Wynik taki potwierdzono przy 6 różnych wartościach temperatury. Ponadto, ich badania uwiaryściły 10-krotne obniżenie trwałości zmęczeniowej badanego materiału ze wzrostem temperatury od 430 °C do 816°C.

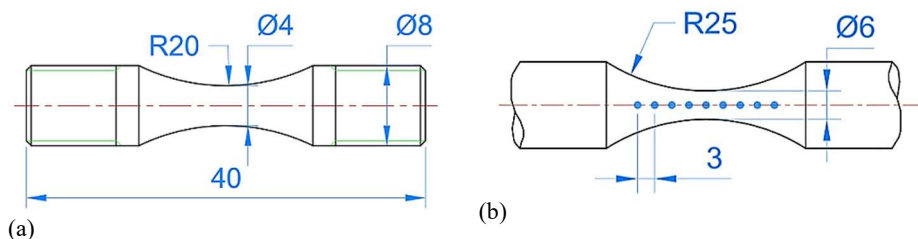
W zakresie badań wysokoczęstotliwościowych próbki klepsydryczne pozwalają określać wpływ częstotliwości sygnału wymuszenia na zmęczenie materiału [5].



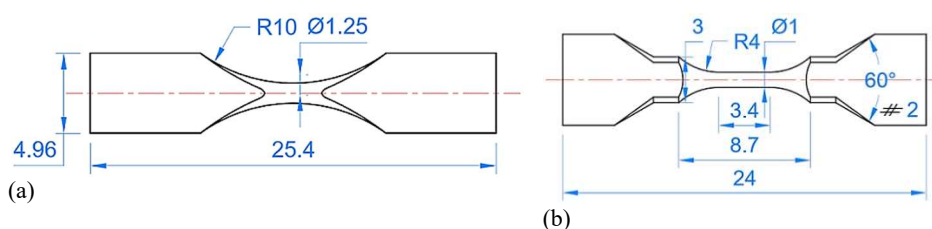
Rys. 1. Próbki klepsydryczne do badań zmęczeniowych sterowanych sygnałem wymuszenia o częstotliwości : (a) 5 Hz [7]; (b) 20 kHz [8]

W porównaniu do próbek walcowych, testowanych przy częstotliwości funkcji obciążenia (20 kHz), otrzymano wyniki badań wskazujące na niższą trwałość

zmęczeniową. Próbki klepsydryczne mogą również służyć określaniu różnic w zachowaniu materiału, wskutek wysokoczęstotliwościowego sygnału obciążenia, w stanie dostawy i po przetopieniu [6]. Jak wykazały rezultaty prób zmęczeniowych autorów pracy [1], [2], wpływ rozmiaru mikro-próbek z rys. 3 na liczbę cykli do zniszczenia materiału był niewielki.



Rys. 2. Mini-próbki klepsydryczne do testów zmęczeniowych dotyczących: (a) badania uszkodzeń [3]; (b) określania wpływu temperatury na liczbę cykli do zniszczenia [4]



Rys. 3. Mikro-próbki klepsydryczne do badań zmęczeniowych: (a) [1]; (b) [2]

Zaletą próbek klepsydrycznych jest minimalizacja efektu wyboczenia wskutek działania zmęczeniowych cykli rozciąganie-ściskanie, oraz możliwość śledzenia rozwoju uszkodzeń, zmian deformacji i wzrostu pęknięcia – bez konieczności poszukiwania miejsc ich występowania. Z tych względów, próbki klepsydryczne wykorzystywane są z powodzeniem w badaniach zmęczeniowych, charakteryzujących się typowymi, jak i wysokimi wartościami częstotliwości. W dostępnej literaturze występuje jednak wyraźny brak informacji o wariantach wykorzystania cienkościennych próbek rurkowych klepsydrycznych, które w porównaniu do próbek pełnych, poszerzają zakres badań o próby skręcania lub próby stanowiące różne kombinacje rozciągania ze skręcaniem. Dlatego też, za cel pracy przyjęto przedstawienie dodatkowych możliwości zastosowań takich próbek w różnych rodzajach prób mechanicznych.

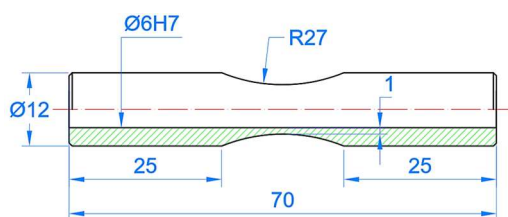
2. Technika badawcza

Program badań zawierał następujące rodzaje prób mechanicznych:

- a) statyczną próbę rozciągania i skręcania,

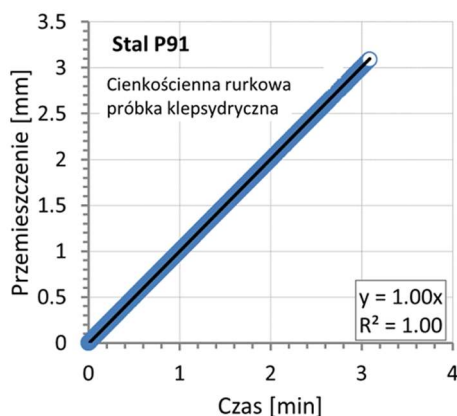
- b) próby zmęczeniowe przy dwóch rodzajach sterowania, tj. sygnałem odkształcenia i naprężenia,
 c) próby zmęczeniowe pod obciążeniem skręcającym.

Badania prowadzono z użyciem cienkościennych rurkowych mini-próbek klepsydrycznych wytworzonych ze stali P91 i charakteryzujących się grubością ścianki w strefie pomiarowej o wartości 1 mm, rys. 4. Próbki mocowano bezpośrednio w uchwytych elektrodynamicznej maszyny wytrzymałościowej Electropuls E10000 Instron, rys. 5. Poddawano je działaniu obciążenia statycznego i zmęczeniowego, wykorzystując sygnały przemieszczenia, kąta obrotu, odkształcenia oraz naprężenia. Próbę rozciągania realizowano przy prędkości przemieszczenia równej 1 mm/min (rys. 6a), natomiast próbę skręcania prowadzono z prędkością kąta obrotu wynoszącą 1 °/min, rys. 6b. Do pomiaru odkształcenia wzdłużnego stosowano ekstensometer jednoosiowy 2620-601 Instron (rys. 5).

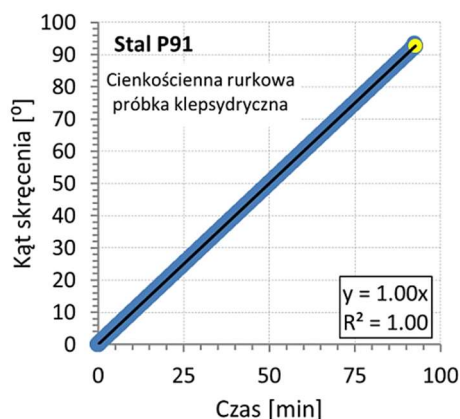


Rys. 4. Geometria oraz wymiary cienkościennej klepsydrycznej mini-próbki rurkowej

Rys. 5. Klepsydryczna mini-próbka rurkowa zamocowana wraz z ekstensometrem w maszynie wytrzymałościowej



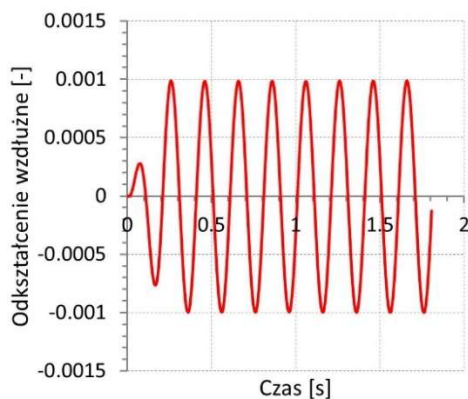
(a)



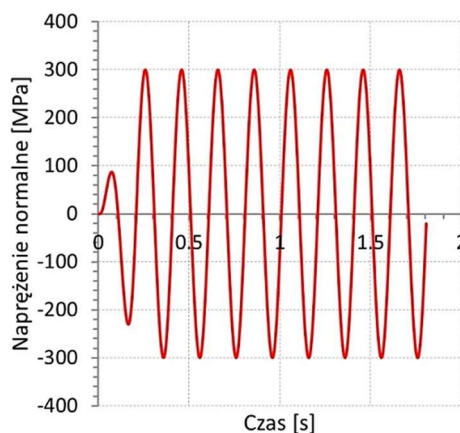
(b)

Rys. 6. Przebiegi sygnałów wymuszenia w próbie statycznego: (a) rozciągania; (b) skręcania

Próby zmęczeniowe pod działaniem cykli osiowych prowadzono stosując sygnał zmiennego cyklicznie odkształcenia wzdłużnego (rys. 7) oraz naprężenia normalnego, rys. 8. Wartości amplitudy wymienionych sygnałów wymuszenia określały współrzędne punktu z odcinka stosowalności prawa Hooke'a krzywej rozciągania badanego materiału.



Rys. 7. Przebieg sygnału odkształcenia wzdłużnego



Rys. 8. Przebieg sygnału naprężenia normalnego

Próby zmęczeniowe w warunkach cykli skrętnych realizowano stosując sinusoidalnie zmienny cykliczny sygnał naprężenia stycznego dla siedmiu wartości amplitudy z zakresu od 147 MPa do 534 MPa.

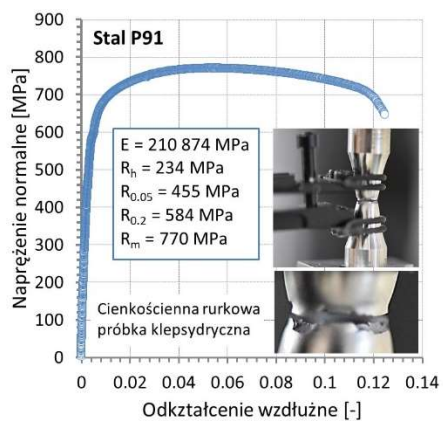
W przypadku obu rodzajów prób zmęczeniowych częstotliwość sygnałów wymuszenia przyjmowała wartość 5Hz. Wszystkie próby prowadzono w temperaturze pokojowej.

3. Wyniki badań

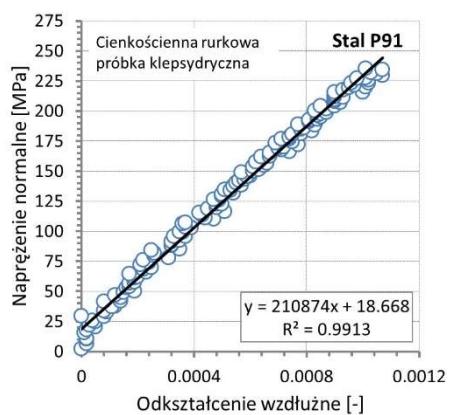
3.1. Rezultaty prób statycznych

Rezultaty badań z próby pod obciążeniem osiowym umożliwiły wyznaczenie charakterystyki rozciągania badanej stali oraz wszystkich istotnych dla praktyki inżynierskiej parametrów mechanicznych, rys. 9, w tym modułu Younga, rys. 10. Przełom zastosowanej próbki był zlokalizowany w środku jej strefy pomiarowej (rys. 11) i wskazywał na udział naprężenia normalnego i stycznego w niszczeniu badanego materiału.

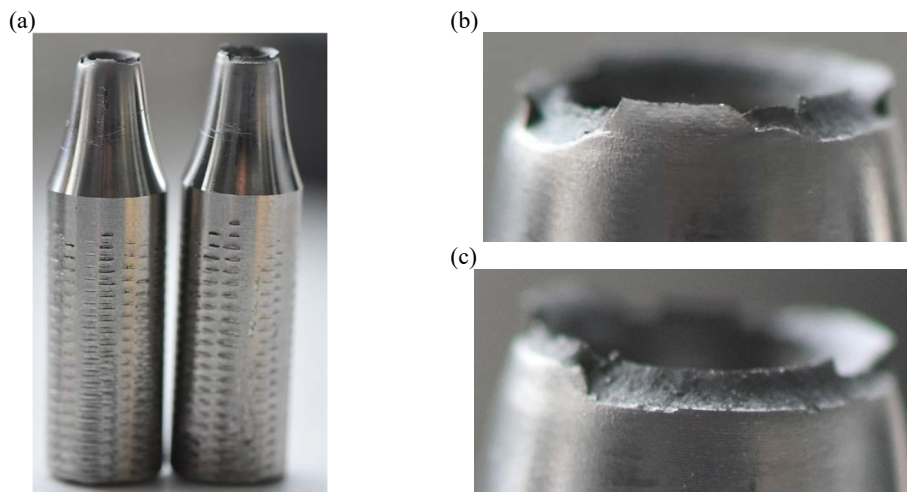
Podobny zestaw wyników badań, jak z próby rozciągania, uzyskano z próby statycznego skręcania, rys. 12, 13.



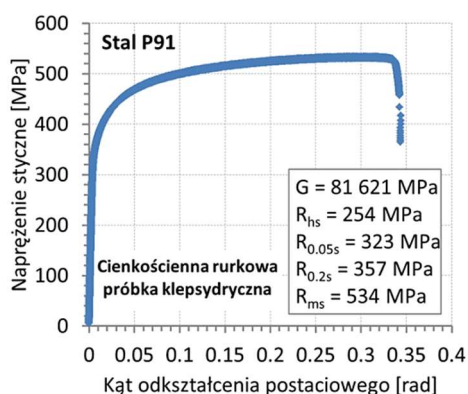
Rys. 9. Charakterystyka rozciągania stali P91 wyznaczona z użyciem cienkościennej rurkowej mini-próbki klepsydrycznej



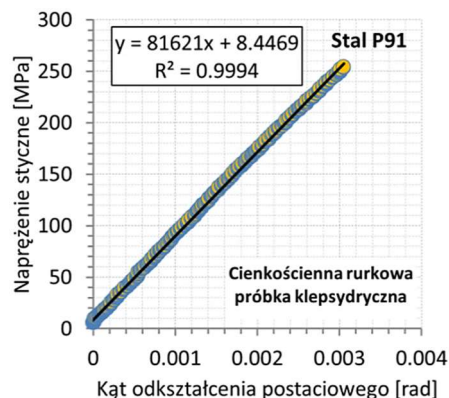
Rys. 10. Prostoliniowy odcinek krzywej rozciągania z rys. 9 wykorzystany do wyznaczenia modułu Younga



Rys. 11. Klepsydryczna cienkościenna mini-próbka rurkowa po teście monotonicznego rozciągania w widoku na: (a) dwie połówki próbki; (b) i (c) przełom



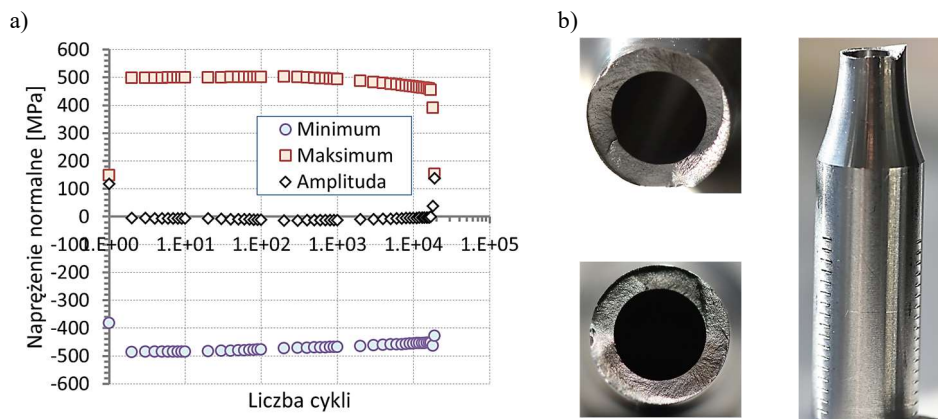
Rys. 12. Charakterystyka skęrcenia stali P91 wyznaczona przy użyciu rurkowej mini-próbki klepsydrycznej



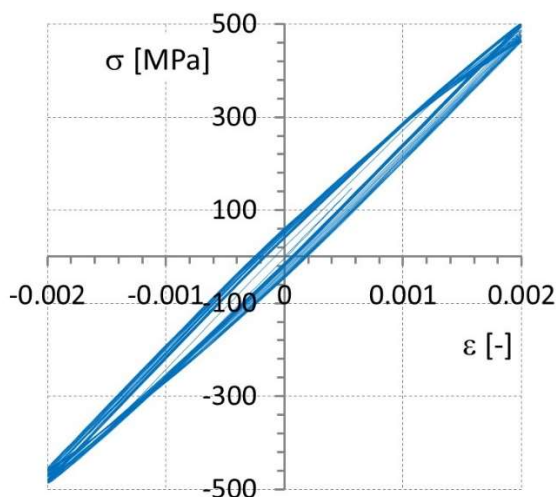
Rys. 13. Prostoliniowy odcinek krzywej skęrcenia z rys. 12, wykorzystany do wyznaczenia modułu Kirchhoffa

3.2. Rezultaty prób zmęczeniowych

Wyniki badań próby zmęczeniowej, realizowanej w warunkach działania zmiennego cyklicznie odkształcenia wzdłużnego o amplitudzie $\pm 0.2\%$, wskazały na cykliczne osłabianie stali, przejawiające się obniżaniem wartości bezwzględnych naprężenia, bezpośrednio przed rozdzieleniem próbki, rys. 14a. Efekt ten widoczny był również w zmianach pętli histerezy, rys. 15. W przełomie obserwowano wielopłaszczyznowość, wskazującą na zmianę składowych stanu naprężenia i ich wartości podczas pęknięcia badanego materiału, rys. 14b.

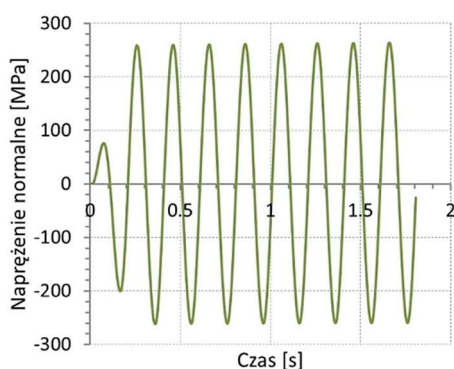


Rys. 14. Wyniki badań zrealizowanych przy odkształceniu cyklicznym o amplitudzie $\pm 0.2\%$: (a) zmiany parametrów sygnału naprężenia normalnego w funkcji liczby cykli wskutek zastosowanego przebiegu wymuszenia; (b) fotografie przełomu próbki

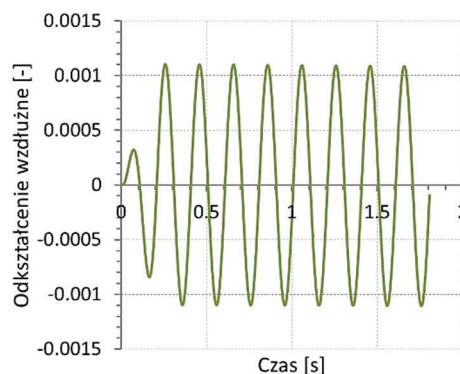


Rys. 15. Zmiany pętli histerezy stali P91 wskutek amplitudy odkształcenia wzdłużnego o wartości: $\pm 0.2\%$

Badania zmęczeniowe realizowane przy dwóch rodzajach sterowania, tj. odkształceniu (rys. 7) i naprężeniu (rys. 8), których amplitudy miały wartości w zakresie stosowalności prawa Hooke'a, wskazały na występowanie istotnych różnic względem oczekiwanych nominalnych odpowiedzi badanego materiału. Efekt ten widoczny był już we wczesnej fazie procesu zmęczenia, rys. 16, 17.



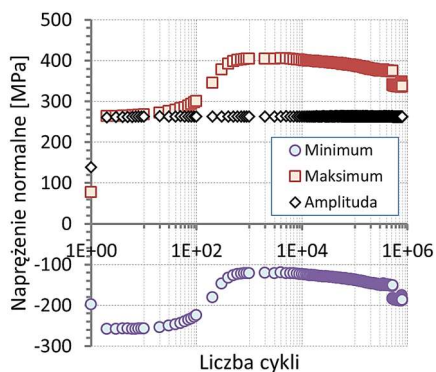
Rys. 16. Naprężeniowa odpowiedź stali P91 w początkowych cyklach na przebieg odkształcenia z rys. 7



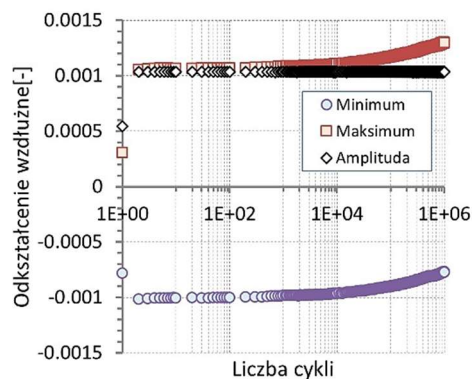
Rys. 17. Odkształceniowa odpowiedź stali P91 w początkowych cyklach na naprężenia odkształcenia z rys. 8

W przypadku sterowania sygnałem odkształcenia wzdłużnego w odpowiedzi materiału obserwowano wartości amplitudy poniżej 300 MPa, rys. 16. Z kolei dla naprężenia normalnego rejestrowana amplituda odkształcenia przyjmowała wartości przekraczające 0.001 mm/mm, rys. 17. Takie wyniki dały podstawę do

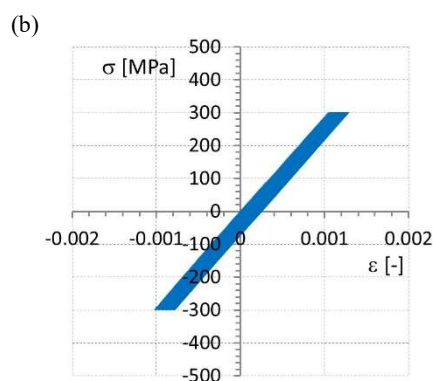
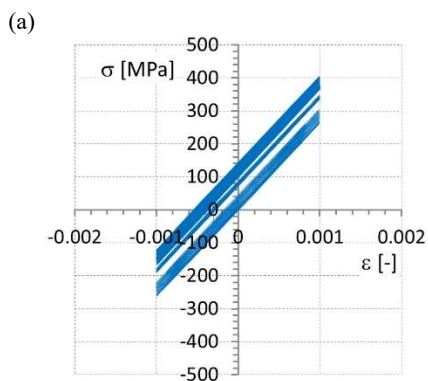
dalszych badań. Prowadzono je do chwili uzyskania granicznej liczby cykli. Wyniki z tych prób zamieszczono na rys. 18-20. Analiza rezultatów z rys. 18 wskazuje na cykliczne umacnianie badanego materiału podczas rozciągania oraz osłabianie przy ściskaniu. Stal testowana w próbie sterowanej sygnałem naprężenia (rys. 19) wykazywała efekt cyklicznego osłabiania podczas rozciągania oraz efekt umacniania wskutek naprężenia ściskającego. Efekty te były wyraźnie widoczne na pętłach histerezy zamieszczonych na rys. 20.



Rys. 18. Zmiany parametrów naprężenia normalnego w funkcji liczby cykli wskutek przebiegu odkształcenia wzdłużnego cyklicznego o amplitudzie $\pm 0.1\%$; w końcowym etapie próby zmęczeniowej



Rys. 19. Zmiany odkształcenia wzdłużnego w funkcji liczby cykli wskutek przebiegu naprężenia normalnego o amplitudzie 300 MPa odpowiadającej odkształceniu 0.1%; w końcowym etapie próby zmęczeniowej

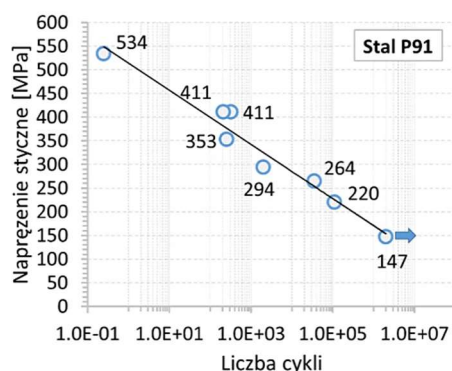


Rys. 20. Zmiany pętli histerezy stali P91 wskutek: (a) cyklicznie zmiennego odkształcenia wzdłużnego o amplitudzie $\pm 0.1\%$ oraz cyklicznie zmiennego naprężenia normalnego o amplitudzie 300 MPa, zarejestrowane do chwili osiągnięcia granicznej liczby cykli tj.: 2×10^6

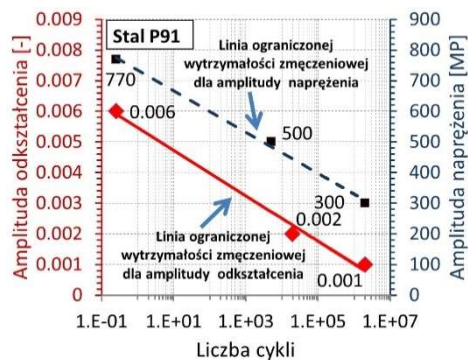
Próby zmęczeniowe prowadzone z użyciem rurkowej cienkościenniej mini-próbki klepsydrycznej w warunkach działania symetrycznych cykli naprężenia

stycznego umożliwiły wyznaczenie wykresu Wöhlera stali P91, rys. 21. Granica zmęczenia badanego materiału wyniosła 147 MPa.

Efekt wywołany odmiennym rodzajem wariantu sterowania maszyny wytrzymałościowej w badaniu stali wykorzystano do wyznaczenia linii ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej, rys. 22. Uzyskany wynik wykazał istotne różnice w trwałości zmęczeniowej stali. Niższe jej wartości zaobserwowano, gdy sygnał wymuszenia był sterowany cyklicznie zmiennym odkształceniem wzdłużnym.



Rys. 21. Krzywa Wöhlera stali P91 uzyskana dla symetrycznych cykli skrętnych



Rys. 22. Linie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej stali P91 uzyskane przy sterowaniu: odkształceniem (wykres dolny) lub naprężeniem (wykres górny)

4. Podsumowanie

Zaproponowana rurkowa cienkościenna mini-próbka klepsydryczna może być wykorzystywana w badaniach statycznych i zmęczeniowych, zawierających obciążenia osiowe i skręcające. Dzięki występowaniu fizycznej płaszczyzny zniszczenia przydatna jest również w badaniach rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych. Może być z powodzeniem wykorzystywana do wyznaczania wykresu Wöhlera i określania granicy zmęczenia przy różnych wariantach sterowania maszyną wytrzymałościową.

Wyniki przeprowadzonych badań pokazują również, jak ważny jest problem wyboru wariantu sterowania maszyną wytrzymałościową. W przypadku testowanej stali P91 wyższe wartości trwałości zmęczeniowej uzyskano przy sterowaniu sygnałem naprężenia. W celu sformułowania bardziej ogólnych wniosków związanych z zaobserwowanymi efektami, podobne badania należy przeprowadzić w przyszłości dla większej liczby materiałów.

Literatura

- [1] Miwa Y., Jitsukawa S., Hishinuma A.: Development of a miniaturized hour-glass shaped fatigue specimen, *Journal of Nuclear Materials*, vol. 258-263, 1998, pp. 457-461, [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(98\)00306-7](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(98)00306-7).
- [2] Nogami S., Itoh T., Sakasegawa H., Tanigawa H., Wakai E., Nishimura A., Hasegawa A.: Study on fatigue life evaluation using small specimens for testing neutron-irradiated materials, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 48(1), 2011, pp. 60-64, <https://doi.org/10.1080/18811248.2011.9711679>.
- [3] Socha G.: Experimental of fatigue cracks nucleation, growth and coalescence in structural steel, *International Journal of Fatigue*, 25(2), 2003, pp. 139-147, [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(02\)00068-3](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(02)00068-3).
- [4] Slot T., Stentz R.H.: Experimental procedures for low-cycle-fatigue research at high temperatures, *Experimental Mechanics*, March 1968, pp. 107-114.
- [5] Li Y., Song Q., Feng S., Sun Ch.: Effects of loading frequency and specimen geometry on high cycle and very high cycle fatigue life of a high strength titanium alloy, *Materials*, 11 (9), 2018, 1268, pp. 1-9, <https://doi.org/10.3390/ma11091628>.
- [6] Tridelloa A., Paolinob D.S., Chiandussic G., Rossettod M.: VHCF response of H13 steels produced with different manufacturing processes, *Procedia Engineering*, vol. 160, 2016, pp. 93-100, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.867>.
- [7] Wu H., Starke P., Boller C.: Characterization of the fatigue behaviour and lifetime evaluation of metallic materials based on thermographic NDT-methods, 14th Quantitative Infra-Red Thermography Conference (IRT2018), 25-29 June 2018, Berlin, Germany, 8 pages.
- [8] Istomin K, Donbes G., Schell N., Christ H-J., Pietsch U.: Analysis of VHCF damage in a duplex stainless steel using hard X-ray diffraction techniques, *International Journal of Fatigue*, vol. 66, 2014, pp. 177-182, DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.04.001.

<http://dx.doi.org/10.7862/rm.2021.04>