

ANALIZA PĘTLI HISTEREZY STALI 41CR4

Karolina Karolewska¹, Anna Jasińska, Bogdan Ligaj²

1. WSTĘP

Próby badania zmęczenia materiałów i liczne publikacje do dzisiaj nie przyniosły jednoznacznej odpowiedzi, jak zapobiegać uszkodzeniom wywołanym zmianami zmęczeniowymi, co przełożyłoby się w znaczący sposób na przedłużenie czasu użytkowania i zwiększenie trwałości elementów poddawanych obciążeniom zmiennym [Szala i Ligaj 2011]. Proces zmęczenia materiału, którego efektem jest zmęczeniowe pękanie elementów maszyn oraz konstrukcji, jest zjawiskiem niebezpiecznym. Uszkodzenie zmęczeniowe pojawia się zazwyczaj niespodziewanie i może być bardzo groźne w skutkach, doprowadzając niekiedy do katastrof lotniczych, drogowych, kolejowych czy też morskich [Szala 2001]. Zachodzi ono w wyniku zmian w strukturze materiału, na skutek kumulacji wielu czynników, w wyniku poddawania elementów maszyn czy konstrukcji obciążeniom zmiennym [Mroziński i Szala 2011]. Zmęczenie materiału zależne jest głównie od poziomu naprężeń występujących w elemencie konstrukcyjnym oraz od czasu trwania takiego obciążenia [Ligaj 2016]. Wynikiem działania obciążeń zmiennych na elementy maszyn lub konstrukcji jest pętla histerezy. Na wyznaczenie pętli odkształceniowo-naprężeniowych pozwala pomiar takich wartości, jak siła lub moment obciążający, a także pomiar odkształceń. Pętla odkształceniowa opisana jest parametrami mikro- i makroskopowymi zachodzącymi w materiale, które jako jedne z wielu czynników wpływają na trwałość zmęczeniową elementów maszyn i konstrukcji. Wykresy pętli histerezy buduje się jako zależność amplitudy naprężeń cyklu do wydłużenia całkowitego próbki, w układzie σ - ϵ . Każda z powstających pętli histerezy ma określone pole powierzchni. Pole to stanowi miarę rozpraszanej energii podczas danego cyklu obciążenia występującego w materiale [Kocańda i Szala 1997]. Pola powierzchni pętli odkształceniowo-naprężeniowych używa się, opisując zmiany właściwości cyklicznych materiału, którym jest m.in. energia odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} . W przypadku działania obciążeń zmiennych dochodzi do kumulacji energii rozproszonej, czyli sumowania energii odkształcenia plastycznego $\Sigma \Delta W_{pl}$ [Ellyin i Kujawski 1984, Kaleta 1998], a także odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} i sprężystego ΔW_s [Golaś i Ellyin 1988, Łagoda 2001]. Wyniki analizy pętli histerezy zawarte w pracy stanowią podstawę opracowania wykresu trwałości zmęczeniowej w ujęciu energetycznym.

2. BADANIA DOŚWIADCZALNE

2.1. Warunki badań

Podstawę analizy wyników badań stanowiły parametry pętli histerezy zarejestrowane w warunkach obciążenia stałoamplitudowego. Badania prowadzono dla cyklu wahadłowego obciążenia o współczynniku asymetrii cyklu $R = -1$ oraz cyklu niesymetrycznego $R = -0,5$. Do analizy badań wykorzystano wyniki zawarte w pracy [Szala i Ligaj 2011].

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Zakład Mechatroniki i Maszyn Roboczych, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz,¹ e-mail: karkar003@utp.edu.pl;
² e-mail: Bogdan.ligaj@utp.edu.pl

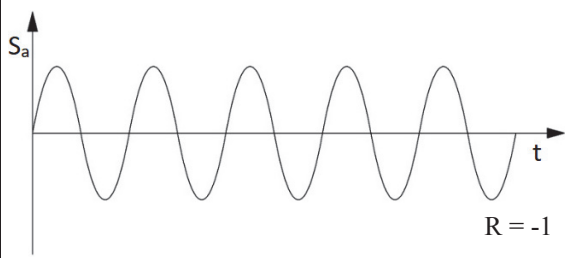
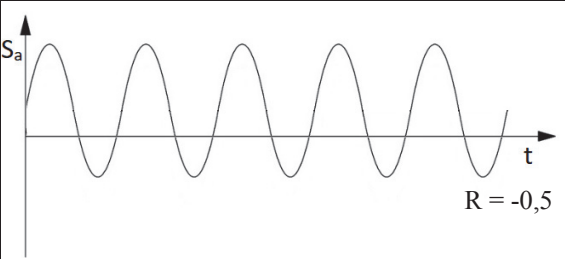
Do przeprowadzenia badań zmęczeniowych użyto stali konstrukcyjnej 41Cr4 do ulepszenia cieplnego. Jest to stal chromowa poddająca się łatwo obróbce mechanicznej, natomiast trudno spawalna, mająca strukturę martenzytu wysokoodpuszczonego po hartowaniu i odpuszczaniu. Stal 41Cr4 z łatwością poddaje się azotowaniu, kuciu oraz walcowaniu. Materiał ten ma granicę plastyczności R_e równą 780 MPa, natomiast wytrzymałość na rozciąganie R_m określa się w granicach 980 MPa. Wydłużenie próbki A_5 jest większe lub równe 10%, a przewężenie Z oscyluje w granicach 45%. W tabeli 1 przedstawiono zawartość składników stali oraz ich podział procentowy. Twardość stali 41Cr4 w skali Brinella w stanie ulepszonym wynosi 240 HB. Jej wartość w skali Rockwella po hartowaniu osiąga wartość 60 HRC, natomiast w stanie ulepszonym jest równa 32 HRC. Stosuje się ją głównie na części i elementy przeznaczone do hartowania powierzchniowego. Stal 41Cr4 jest wykorzystywana również do produkcji kół zębatach, wałów korbowych, osi lub tulei.

Tabela 1. Skład chemiczny stali 41Cr4 według normy PN-EN 10083-2008 (opracowanie własne)

Zawartość składników wg normy PN-EN 10083 [%]							
C	Si	Mn	Cr	S	P	Cu	Ni
Min ÷ Max							Max
0,36÷0,45	0,17÷0,37	0,50÷0,90	0,80÷1,20	0÷0,035	0÷0,035	0÷0,30	0,30

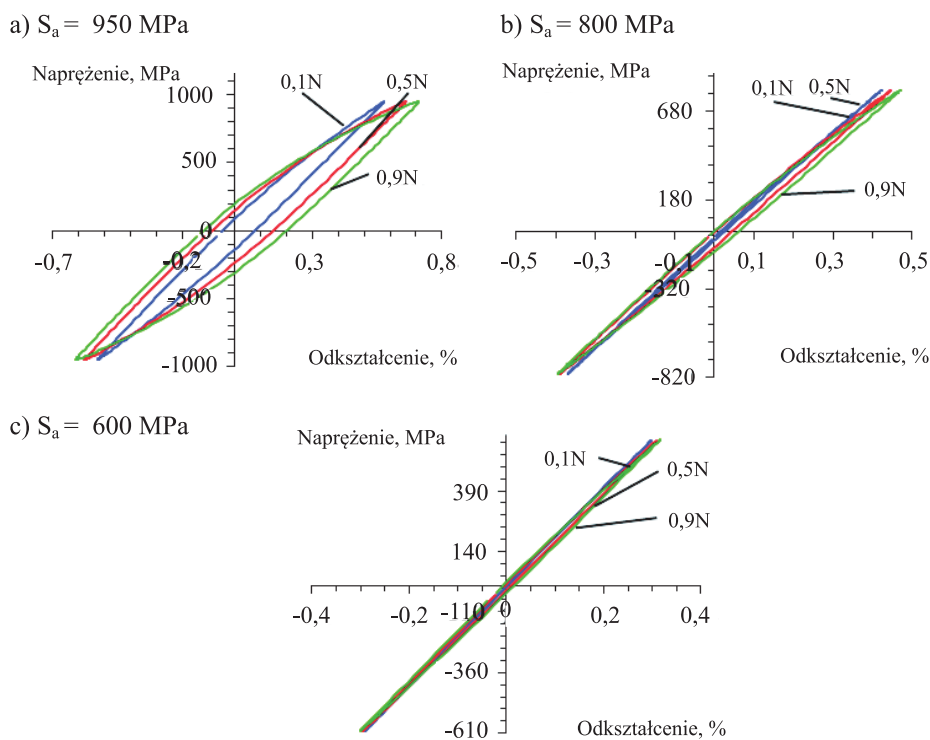
Badane próbki zarówno dla współczynnika asymetrii cyklu $R = -1$, jak i dla $R = -0,5$ zrealizowano dla trzech poziomów naprężenia. Wartością stałą było naprężenie, natomiast sterowaną odkształcenie próbek. Dla każdego z tych poziomów wykonywano trzy próby zmęczeniowe. Wartości amplitudy naprężeń przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Program obciążeń (opracowanie własne)

Schemat zadanego obciążenia	Wartość amplitudy naprężenia
	$S_a = 950$ MPa
	$S_a = 800$ MPa
	$S_a = 600$ MPa
	$S_a = 870$ MPa
	$S_a = 750$ MPa
	$S_a = 555$ MPa

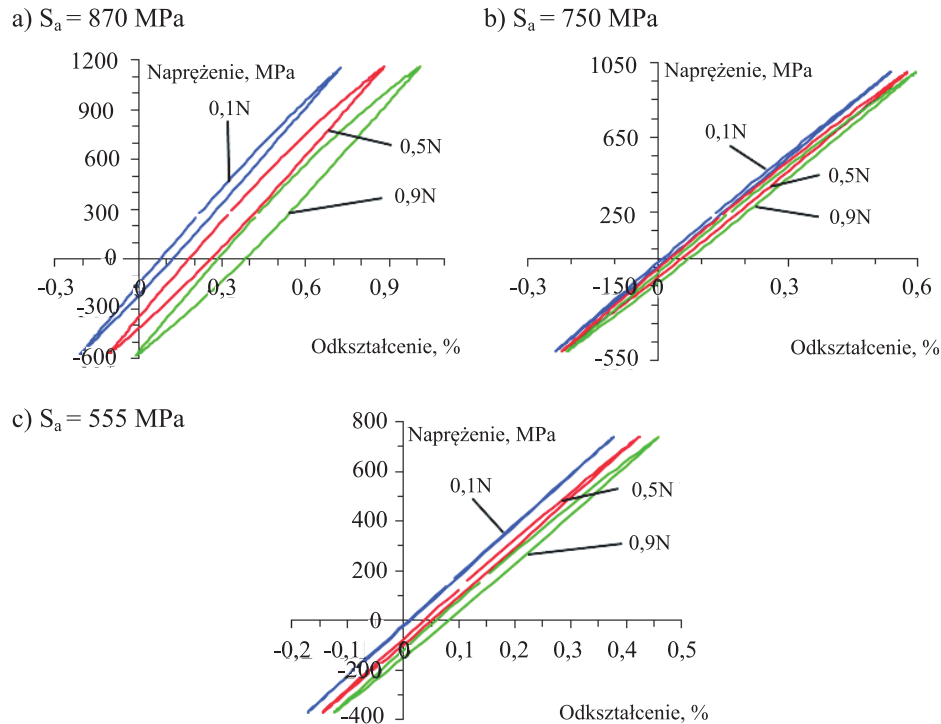
2.2. Wyniki badań

Na rysunku 1 przedstawiono otrzymane w wyniku badań pętle naprężeniowo-odkształceniowe dla stali 41Cr4 w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych charakteryzujących się współczynnikiem asymetrii cyklu $R = -1$. Na każdym z rysunków pokazano trzy wybrane pętle histerezy dla 0,1 N, 0,5 N, a także dla 0,9 N cykli niszczących. Różny kształt otrzymanych pętli, a także różna wartość ich pól powierzchni podkreślają zmiany właściwości cyklicznych materiału. Otrzymane wartości pól powierzchni pętli odkształceniowych pozwalają na wyznaczenie parametru energii dyssypowanej w cyklu obciążenia, a także zbudowanie wykresów trwałości zmęczeniowej.



Rys. 1. Wybrane pętle histerezy dla stali 41Cr4 w warunkach obciążeń o współczynniku asymetrii cyklu $R = -1$ dla naprężenia: a) 950 MPa, b) 800 MPa, c) 600 MPa (opracowanie własne)

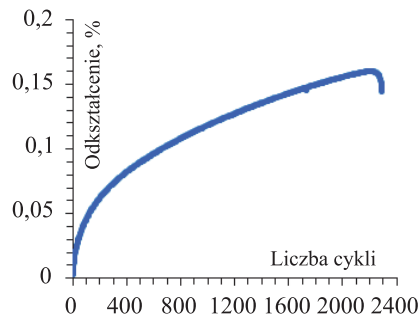
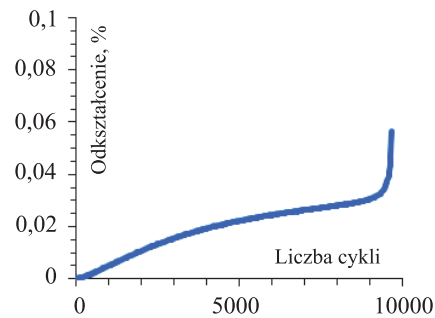
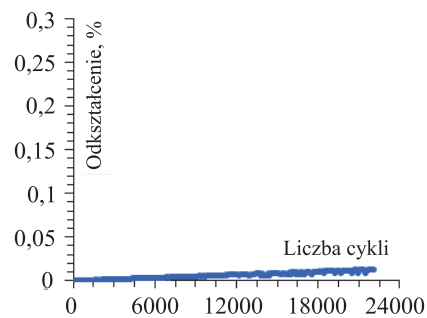
Podobnie jak dla obciążeń stałoaamplitudowych, charakteryzujących się współczynnikiem asymetrii cyklu $R = -1$, na rysunku 2 przedstawiono pętle histerezy otrzymane dla cyklu niesymetrycznego o współczynniku asymetrii $R = -0,5$. Każdy z rysunków pokazuje trzy wybrane pętle odkształceniowe dla 0,1, 0,5 oraz 0,9 N cykli niszczących. Oprócz zmian swoich powierzchni, pętle naprężeniowo-odkształceniowe przedstawione na rysunku 2 charakteryzują się zmianami swojego położenia. Wynika to z zachodzenia zjawiska pełzania w badanym materiale.



Rys. 2. Wybrane pętle histerezy dla stali 41Cr4 w warunkach obciążeń o współczynniku asymetrii cyklu $R = -0,5$ dla naprężenia: a) 870 MPa, b) 750 MPa, c) 555 MPa (opracowanie własne)

3. ANALIZA PARAMETRÓW PĘTLI HISTEREZY STALI 41CR4

Na podstawie otrzymanych wyników badań i pętli histerezy przedstawionych w podrozdziale 2.2 utworzono wykresy amplitudy odkształcenia plastycznego w zależności od liczby cykli oraz wykresy zmian parametru energii pola pętli naprężeniowo-odkształceniowej. Na rysunku 3 przedstawiono przebiegi zmian amplitudy odkształcenia plastycznego ε_{apl} dla różnych wartości amplitudy naprężenia S_a i współczynnika asymetrii cyklu $R = -1$. W każdym z przedstawionych przypadków wzrostowi liczby cykli towarzyszy wzrost wartości odkształceń plastycznych. Dla amplitudy naprężenia na poziomie 950 MPa wartości odkształceń plastycznych są najwyższe, natomiast dla 600 MPa odkształcenia są najmniejsze. Wzrost odkształceń plastycznych w każdym kolejnym cyklu przekłada się na osłabienie materiału. Jedynie w przypadku amplitudy naprężenia równej 950 MPa po osiągnięciu 2200 cykli materiał umacnia się, aż do momentu jego pęknięcia.

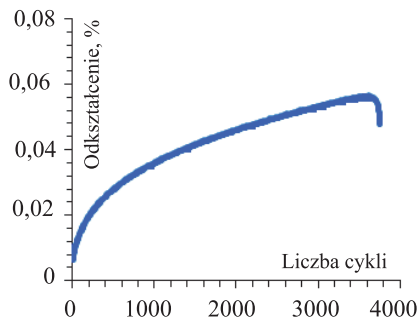
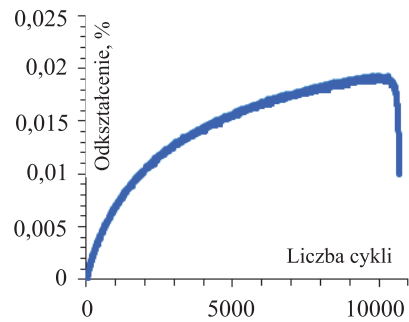
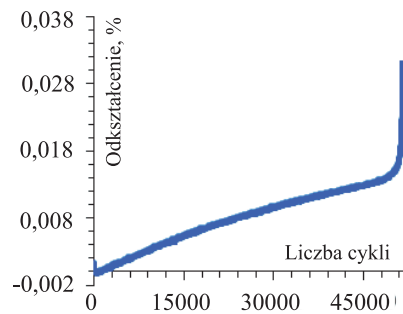
a) $S_a = 950$ MPab) $S_a = 800$ MPac) $S_a = 600$ MPa

Rys. 3. Przykładowe przebiegi zmian amplitudy odkształceń plastycznych dla stali 41Cr4 w warunkach obciążeń o współczynniku asymetrii cyklu $R = -1$ dla naprężenia: a) 950 MPa, b) 800 MPa, c) 600 MPa (opracowanie własne)

Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi zmian amplitudy odkształceń plastycznych stali 41Cr4 dla współczynnika asymetrii cyklu $R = -0,5$. Podobnie jak w przypadku zmian przebiegów odkształceń plastycznych dla współczynnika asymetrii cykli $R = -1$, najwyższe wartości odkształceń plastycznych występują przy najwyższych wartościach amplitudy naprężenia.

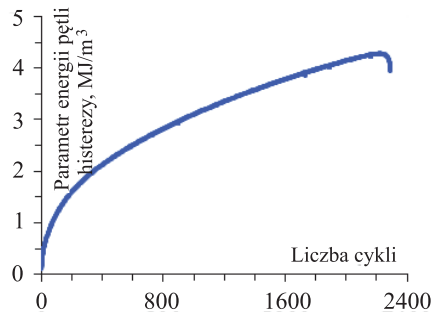
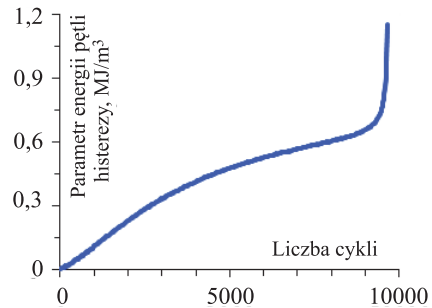
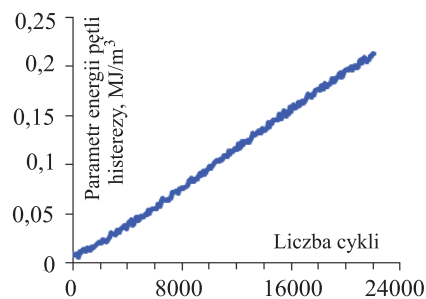
Przy rosnącej liczbie cykli obciążenia wzrastają znacząco odkształcenia plastyczne. Dla wartości naprężeń 870 i 750 MPa po osiągnięciu 0,9 N materiał ulega umocnieniu po czym pęka.

Do wyznaczenia przebiegów zmian parametru energii stali 41Cr4 posłużyły pętle histerezy przedstawione w podrozdziale 2.2. Pole pętli odkształceniowo-naprężeniowych, które odzwierciedlają ilość rozproszonej energii, wyznaczono za pomocą metody obliczeniowej, polegającej na wyznaczaniu obwiedni wokół gałęzi naprężeniowo-odkształceniowych, zaproponowanej w pracy [5].

a) $S_a = 870$ MPab) $S_a = 750$ MPac) $S_a = 555$ MPa

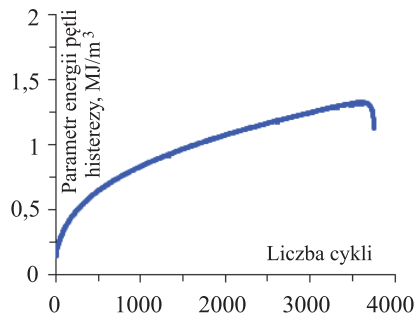
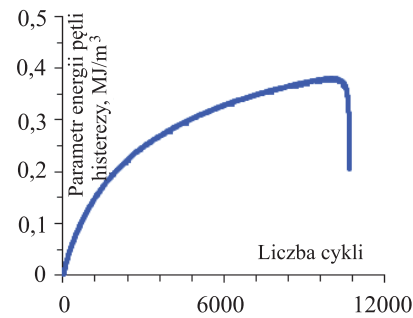
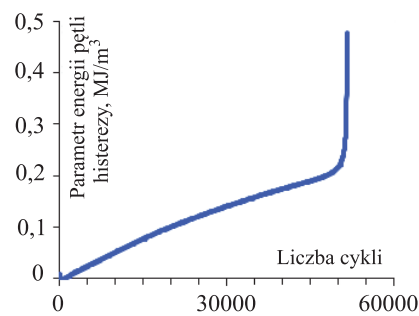
Rys. 4. Przykładowe przebiegi zmian amplitudy odkształceń plastycznych dla stali 41Cr4 w warunkach obciążeń o współczynniku asymetrii cyklu $R = -0,5$ dla naprężenia: a) 870 MPa, b) 750 MPa, c) 555 MPa (opracowanie własne)

Analizując otrzymane przebiegi zmian parametru energii, przedstawione na rysunku 5, w warunkach obciążeń o wartości współczynnika asymetrii cyklu $R = -1$, zauważa się wzrost parametru energii przy rosnącej wartości cykli obciążenia. Najwyższa wartość parametru energii występuje dla największej wartości amplitudy naprężenia. Natomiast najniższe wartości tego parametru otrzymuje się przy najmniejszej amplitudzie naprężenia.

a) $S_a = 950$ MPab) $S_a = 800$ MPac) $S_a = 600$ MPa

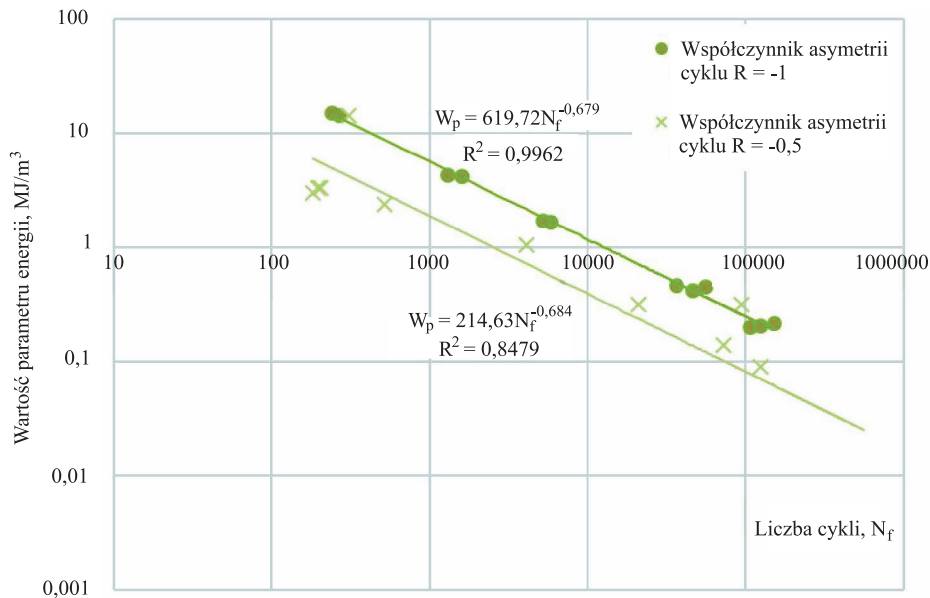
Rys. 5. Przykładowe przebiegi zmian parametru energii dla stali 41Cr4 w warunkach obciążeń o współczynniku asymetrii cyklu $R = -1$ dla naprężenia: a) 950 MPa, b) 800 MPa, c) 600 MPa (opracowanie własne)

Przykładowe przebiegi zmian parametru energii w warunkach obciążeń o współczynniku asymetrii cyklu $R = -0,5$ przedstawiono na rysunku 6. Na pokazanych wykresach energia pętli histerezy rośnie do około 0,9 N, a następnie dla 870 MPa i 750 MPa maleje aż do chwili zniszczenia próbki. W przypadku obciążenia o wartości 555 MPa jest odwrotnie, materiał dyssypuje większą ilość energii.

a) $S_a = 870$ MPab) $S_a = 750$ MPac) $S_a = 555$ MPa

Rys. 6. Przykładowe przebiegi zmian parametru energii dla stali 41Cr4 w warunkach obciążeń o współczynniku asymetrii cyklu $R = -0,5$ dla naprężenia: a) 870 MPa, b) 750 MPa, c) 555 MPa (opracowanie własne)

Na podstawie uzyskanych wyników badań opracowano wykres trwałości zmęczeniowej w ujęciu energetycznym dla stali 41Cr4, dla dwóch wartości współczynnika asymetrii cyklu R . Na wykresie pokazanym na rysunku 7 przedstawiono zależności między parametrem energii wyznaczonym dla $0,5 N$ przy różnych wartościach amplitudy naprężenia a liczbą cykli. Współczynniki korelacji R^2 przyjmują różne wartości, co oznacza, że najpewniejsze i najbardziej powtarzalne wyniki otrzymane zostały dla współczynnika asymetrii cyklu $R = -0,5$. Natomiast mniejszym współczynnikiem korelacji charakteryzuje się stal 41Cr4 o współczynniku asymetrii R równym -1 . Wyniki dla tej próby cechuje umiarkowana zależność, co przekłada się na występowanie dużych odstępstw w otrzymanych wynikach. Analizując otrzymane wykresy, można zauważyć, że najwięcej energii rozpraszanej zostaje w cyklach obciążeń o współczynniku asymetrii cyklu $R = -1$. Stal 41Cr4 o współczynniku asymetrii cyklu równym $R = -0,5$ ma zdecydowanie mniejszą wartość parametru energii.



Rys. 7. Wykres trwałości zmęczeniowej w ujęciu energetycznym dla połowy cykli niszczących stali 41Cr4 o współczynniku asymetrii cyklu $R = -1$ oraz o współczynniku asymetrii cyklu $R = -0,5$ (opracowanie własne)

4. PODSUMOWANIE

Z porównania pętli histerezy, otrzymanych w rezultacie przeprowadzonych badań, wynika, że zarówno w przypadku pętli odkształceniowych uzyskanych dla współczynnika asymetrii cyklu $R = -1$, jak i $R = -0,5$ dla wszystkich wartości amplitudy naprężenia, wzrostowi liczby cykli towarzyszy powiększanie się pola pętli histerezy. Przekłada się to na wzrost wartości rozpraszanej energii w trakcie przeprowadzanych badań. Pomiedzy pętlami odkształceniowymi uzyskanymi w warunkach obciążenia o współczynniku $R = -1$, a $R = -0,5$ występuje wyraźna różnica w ich położeniu. Przesunięcie to spowodowane jest pojawiającym się zjawiskiem pełzania materiału i uwidacznia się bardziej w cyklu niesymetrycznym. Powiększanie się pól pętli histerezy w każdym kolejnym cyklu wpływa na zwiększanie się wartości odkształceń plastycznych, co wpływa na osłabianie właściwości cyklicznych materiału. Wielkość odkształceń plastycznych ma ścisły związek z ilością rozpraszanej energii w trakcie obciążania próbek. Im większe pole pętli odkształceniowej, tym występują większe odkształcenia plastyczne, a także więcej energii zostaje dyssypowanej.

Otrzymane wartości parametru energii pozwoliły na opracowanie wykresów trwałości zmęczeniowej. Wykresy te sporządzono dla połowy cykli niszczących z uwagi na to, iż cechują się one największą dokładnością. Dla współczynnika asymetrii cyklu $R = -1$ materiał rozprasza więcej energii niż przy współczynniku $R = -0,5$. Na podstawie otrzymanych wykresów trwałości można przewidzieć czas eksploatacji materiału, znając skumulowaną wartość parametru energii odkształcenia plastycznego.

Dla współczynnika asymetrii cyklu $R = -1$ współczynnik determinacji R^2 osiąga wysoką wartość. Oznacza to, że otrzymane wyniki są pewne i powtarzalne. Wartość

współczynnika determinacji R^2 dla współczynnika asymetrii cyklu $R = -0,5$ otrzymanego w wyniku utworzenia wykresu trwałości zmęczeniowej nie jest wysoka. Przekłada się to na małą powtarzalność wyników badań. Przyczyną takiego stanu mogła być zbyt mała liczba przebadanych próbek, a także budowanie wykresu trwałości zmęczeniowej na podstawie wyników przeprowadzonych dla różnych zakresów, tj. zakres wytrzymałości quasi-statycznej oraz zakres niskocyklowego zmęczenia.

LITERATURA

Ellyin F., Kujawski D., 1984. Plastic strain energy in fatigue failure. *Journal Pressure Vessel Technology*, 342-347.

Gołaś K., Ellyin F., 1988. A total strain energy theory for cumulative fatigue damage. *Journal Pressure Vessel Technology*, 35-41.

Kaleta J., 1998. Doświadczalne podstawy formułowania energetycznych hipotez zmęczeniowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.

Kocańda S., Szala J., 1997. Podstawy obliczeń zmęczeniowych. PWN Warszawa.

Ligaj B., 2016. Analiza pętli histerezy na przykładzie obciążeń o charakterze zmiennoparametrycznym. *Solid State Phenomena* 250, 94-99.

Łagoda T., 2001. Energetyczne modele trwałości zmęczeniowej materiałów konstrukcyjnych w warunkach jednoosiowych i wieloosiowych obciążeń losowych. *Studia i monografie* 121, Wydawnictwo Politechniki Opolskiej.

Mroziński S., Szala J., 2011. Charakterystyki zmęczeniowe metali w ujęciu energetycznym. *Acta Mechanica et Automatica* 5(2), 99-107.

Szala J., 2001. Problematyka zmęczenia materiałów i konstrukcji w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn. Materiały z zebrania naukowego Komitetu Budowy Maszyn PAN, Łódź, 57-68.

Szala G., Ligaj B., 2011. Dwuparametryczne charakterystyki zmęczeniowe stali konstrukcyjnych i ich eksperymentalna weryfikacja. Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy Radom.