

# ZAGADNIENIE CYKLICZNEGO UMOCNIEŃ LUB OSŁABIENIA METALI W WARUNKACH OBCIĄŻENIA PROGRAMOWANEGO

Stanisław MROZIŃSKI\*, Józef SZALA\*

\*Instytut Mechaniki i Konstrukcji Maszyn, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J. J. Śniadeckich, Al. Prof. Sylwestra Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz

[stanislaw.mrozinski@utp.edu.pl](mailto:stanislaw.mrozinski@utp.edu.pl), [jszpkm@mail.utp.edu.pl](mailto:jszpkm@mail.utp.edu.pl)

**Streszczenie:** Zjawisko cyklicznego umocnienia lub osłabienia metali i ich stopów jest znane od ponad 40 lat. Mimo tak długiego okresu badań brak jest ogólnego opisu uniwersalnych modeli tych zjawisk. Podstawą w ich ocenie są badania doświadczalne prowadzone w warunkach obciążeń sinusoidalnych stałoamplitudowych. Wyróżnia się badania ze stałą amplitudą naprężenia lub stałą amplitudą odkształcenia. Warunki te nie są równoważne w zakresie obciążeń, w których nie obowiązuje prawo liniowej zależności naprężenia od odkształcenia. Zagadnienie cyklicznego umocnienia lub osłabienia metali ich stopów istotnie komplikuje się w przypadku zmiennie amplitudowych obciążeń, które są charakterystyczne dla obciążeń eksploatacyjnych elementów konstrukcyjnych. W niniejszej pracy opisano badania własności cyklicznych trzech stopów metali: stopu aluminium PA7 silnie umacniającego się cyklicznie, stali stopowej, 30HGSa podlegającej silnemu cyklicznemu osłabieniu oraz stali konstrukcyjnej C45, która w zależności od poziomu obciążenia ulega cyklicznemu osłabieniu lub cyklicznemu umocnieniu. Badania przeprowadzono w warunkach programowanych obciążeń ze stopniowo rosnącą amplitudą naprężenia.

## 1. WPROWADZENIE

Proces zmęczenia metali i ich stopów jest bardzo złożony, zależny od wielu czynników i trudny do opisanego (Kocańda, 1985; Kocańda i Kocańda, 1989). Mimo blisko 200 – letniego okresu intensywnych badań i ponad 90000 publikacji (dane od roku 1995 według bazy Science Direct) brak dotąd uniwersalnego opisu procesu zmęczenia. Metody obliczeń elementów konstrukcyjnych na zmęczenie oparte są na niskocyklowych własnościach materiałów wyznaczanych doświadczalnie zgodnie z odpowiednimi normami (Kocańda i Szala, 1997). Brak stabilności własności cyklicznych metali stanowi poważny problem w ich opisie, zwykle w postaci charakterystyk zmęzeniowych (wykresy Wöhlera, Mansona – Coffina i Ramberga-Osgooda). Zagadnienie stabilizacji własności cyklicznych metali było szeroko analizowane w pracy Mrozińskiego (2008). Wymienione charakterystyki wyznacza się w ujęciu naprężeniowym (wykresy  $S-N$  Wöhlera), odkształceniowym (wykresy  $\epsilon-2N_f$  Mansona-Coffina i wykresy  $\sigma-\epsilon$  Ramberga-Osgooda). Wykresy Wöhlera stosuje się w obliczeniach w zakresie tzw. wysokocyklowego zmęczenia (WCZ), w którym dominują odkształcenia sprężyste materiału w strefie inicjacji pęknięć zmęzeniowych, natomiast wykresy Mansona-Coffina i Ramberga-Osgooda stosuje się w obliczeniach w zakresie tzw. niskocyklowego zmęczenia (NCZ), w którym dominują odkształcenia plastyczne w strefie pęknięć. Jako kryterium kwalifikacji wymienionych zakresów WCZ i NCZ przyjmuje się granicę plastyczności  $R_e$  wyznaczaną dla metali w próbie statycznego rozciągania. Granica ta nie odpowiada warunkom cyklicznego obciążenia i jest słabym kryterium (Duyi i Zhenlin, 2011a, b; Szala i inni, 2002). Kolejną wątpliwość dotyczy założenia, że w warunkach obciążeń stałoamplitudowych (stałej amplitudy naprężenia  $\sigma_a$  lub stałej amplitudy odkształcenia całkowitego lub plastycznego) występuje stan stabilizacji własności cyklicznych. Jak wykazano w pracy

Mrozińskiego (2008), własności cykliczne metali są własnościami „chwilowymi” – różnymi w poszczególnych fazach procesu zmęczenia. Zjawisko braku stabilizacji ujawnia się silnie w przypadku zmiennieamplitudowego obciążenia, każda zmiana wartości obciążenia powoduje zmianę własności cyklicznych metali. W ogólnym przypadku obciążeń losowych, a taki charakter obciążenia eksploatacyjne elementów konstrukcyjnych, zmiana wartości obciążenia (naprężeń lub odkształceń) następuje „cykl po cyklu”.

Istotnym problemem poznawczym i użytkowym jest zatem rozpoznanie zmian własności cyklicznych w warunkach zmiennieamplitudowych obciążeń mieszczących się w zakresie WCZ i NCZ- powyższe stanowi podstawowy cel pracy. Celami pomocniczymi są:

- wykazanie słabości przyjęcia granicy plastyczności  $R_e$  jako kryterium kwalifikacji obciążenia do zakresu WCZ i NCZ,
- wyznaczenie trwałości zmęzeniowej w warunkach obciążenia programowanego,
- analiza porównawcza wybranych własności mechanicznych wyznaczonych w warunkach obciążeń monotonicznych i cyklicznych.

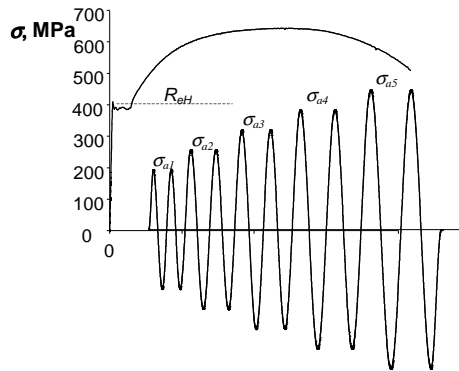
## 2. OPIS BADAŃ

### 2.1. Metoda i program badań

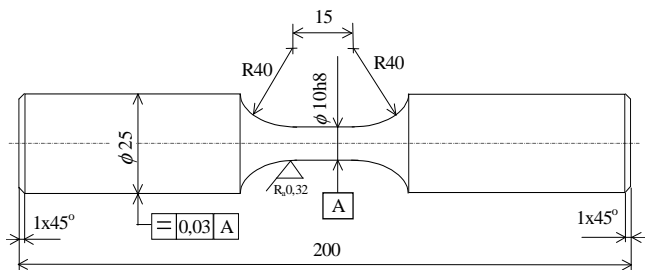
Podstawą oceny własności cyklicznych badanych metali były parametry pętli histerezy naprężeniowo-odkształceniowej rejestrowanych podczas testów od pierwszego do ostatniego cyklu zarówno w warunkach obciążenia stałoamplitudowego jak i programowanego.

Program badań obejmował pięciostopniowe obciążenie o okresie programu zawierającego dziesięć cykli (Rys. 1). Badania przeprowadzono na próbkach wykonanych ze stali

C45, stali 30HGSA oraz stopie aluminium PA7 (Rys. 2). Wymienione stopy istotnie różniły się własnościami cyklicznymi i monotonicznymi.

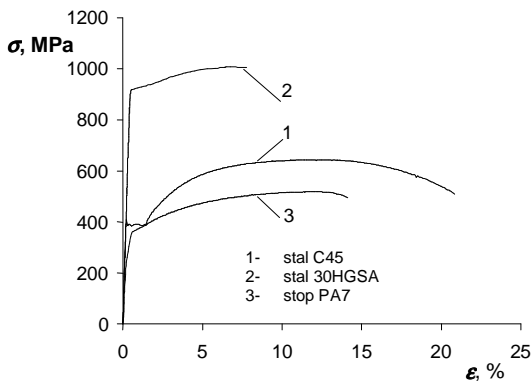


Rys. 1. Program obciążenia



Rys. 2. Próbkki do badań zmęczeniowych

## 2.2. Własności monotoniczne badanych metali



Rys. 3. Wykresy rozciągania próbek

Tab. 1. Parametry wytrzymałościowe materiałów do badań

Parametr	Materiał		
	stal C45	stal 30HGSA	stop PA7
$R_{eH}$ , MPa	446,3	936,7	321,7
$R_{m}$ , MPa	713,3	1030	514,7
$E$ , MPa	215000	207000	75000
$A_5$ , %	22	9,5	16

Wykresy rozciągania próbek wymienionych w punkcie 2.1. w warunkach obciążeń monotonicznych zamieszczono na Rys. 3, natomiast własności wytrzymałościowe wyznaczone na ich podstawie zestawiono w Tab. 1.

## 2.3. Programy obciążeń

Obciążenia stałoaamplitudowe zrealizowano na pięciu poziomach odkształcenia całkowitego  $\epsilon_{ac} = \text{const}$ . Na każdym poziomie odkształcenia realizowano trzy próby zmęczenia. Rejestracji podlegały pętle histerezy w poszczególnych fazach procesu zmęczenia. Jako kryterium końca próby zmęczeniowej przyjęto wystąpienie deformacji ramienia pętli histerezy w półcyklu ściskania (powstanie załomka). Czas próbkowania sygnału siły obciążającej próbkę i odkształcenia wynosił 0,025 s, co przy częstotliwości obciążenia  $f = 0,2$  Hz pozwalało opisać pętlę histerezy 200 punktami. Parametry badań w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych zestawiono w Tab. 2.

Tab. 2. Parametry obciążeń stałoaamplitudowych

Schemat programu	Parametry	
	stal C45, stal 30HGSA	stop PA7
	$\epsilon_{ac} = 0,35\%$	$\epsilon_{ac} = 0,50\%$
	$\epsilon_{ac} = 0,5\%$	$\epsilon_{ac} = 0,65\%$
	$\epsilon_{ac} = 0,8\%$	$\epsilon_{ac} = 0,80\%$
	$\epsilon_{ac} = 1,0\%$	$\epsilon_{ac} = 1,0\%$
	$\epsilon_{ac} = 2,0\%$	$\epsilon_{ac} = 1,5\%$
	$f = 0,2$ Hz	$f = 0,2$ Hz

Podczas badań w warunkach obciążeń programowanych, parametrem sterującym było naprężenie. Prędkość przyrostu naprężenia wynosiła  $50 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ . Podobnie jak podczas badań w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych dla każdej sekwencji obciążenia programowanego realizowano po trzy próby zmęczenia. Podczas badań w warunkach obciążeń programowanych rejestrowano chwilowe wartości siły obciążającej próbkę oraz jej odkształcenia dla całych wybranych bloków obciążenia o pojemności  $n_o = 10$  cykli. Program obciążeń realizowany był poprzez powtarzanie bloków programu do momentu całkowitego złomu zmęczeniowego. Wartości amplitud naprężeń na poszczególnych stopniach badanych materiałów podano w Tab. 3.

Tab. 3. Parametry obciążeń programowanych

Materiał	Amplituda naprężenia na stopniu $\sigma_{ai}$					
	$\sigma_{a1}$	$\sigma_{a2}$	$\sigma_{a3}$	$\sigma_{a4}$	$\sigma_{a5}$	$\sigma_{a6}$
Stal 30HGSA	510	570	630	690	750	810
Stal 45	200	260	320	380	440	-
Stop PA7	325	350	375	425	450	475

## 3. WYNIKI BADAŃ

### 3.1. Obciążenia stałoaamplitudowe

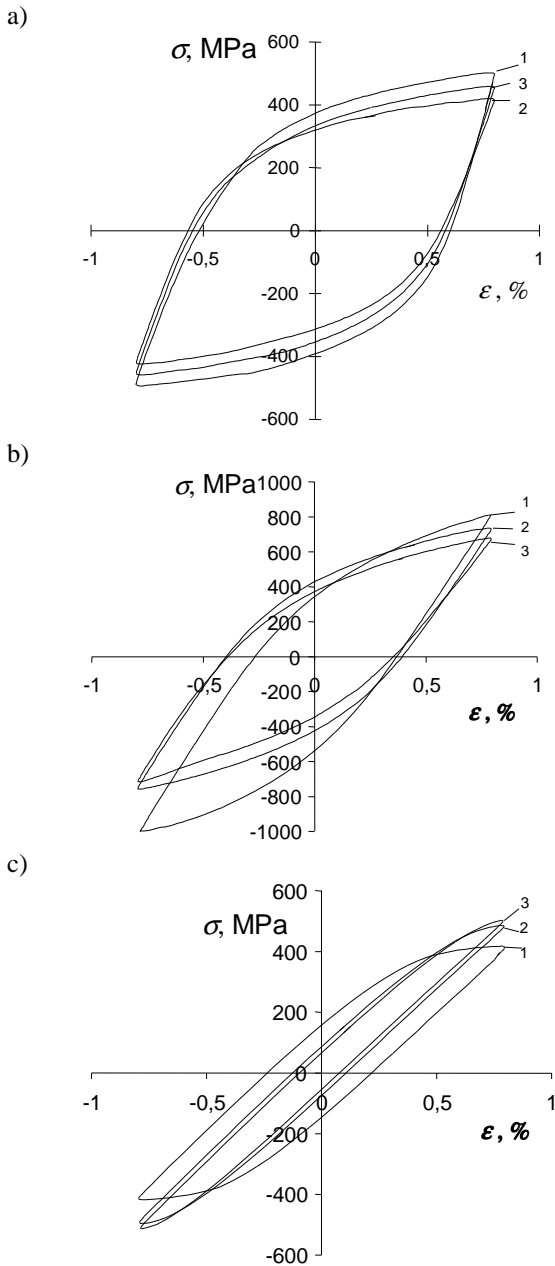
Przykładowe pętle histerezy dla jednego poziomu amplitudy odkształcenia całkowitego  $\epsilon_{ac} = 0,8\%$  pokazano na Rys. 4. Dla przejrzystości rysunków dla każdego materiału wykreślono tylko trzy charakterystyczne pętle: 1-dla pierwszego cyklu, 2-dla cyklu z połowy trwałości zmęczenia

niowej próbki oraz 3- dla cyklu odpowiadającego całkowitej trwałości. Położenie wybranych pętli histerezy i ich kształt wskazuje na istotne różnice własności cyklicznych badanych materiałów w świetle zjawiska cyklicznego umocnienia lub osłabienia. Pełen obraz zmienności parametrów pętli histerezy na wszystkich przyjętych poziomach amplitudy odkształcenia całkowitego (Tab. 2) pokazano na Rys. 5, natomiast zestawienie średnich trwałości w Tab. 4.

nich materiałów w obliczeniach zmęczeniowych. Powyższe zagadnienie opisane zostanie w punkcie 4-analiza wyników badań.

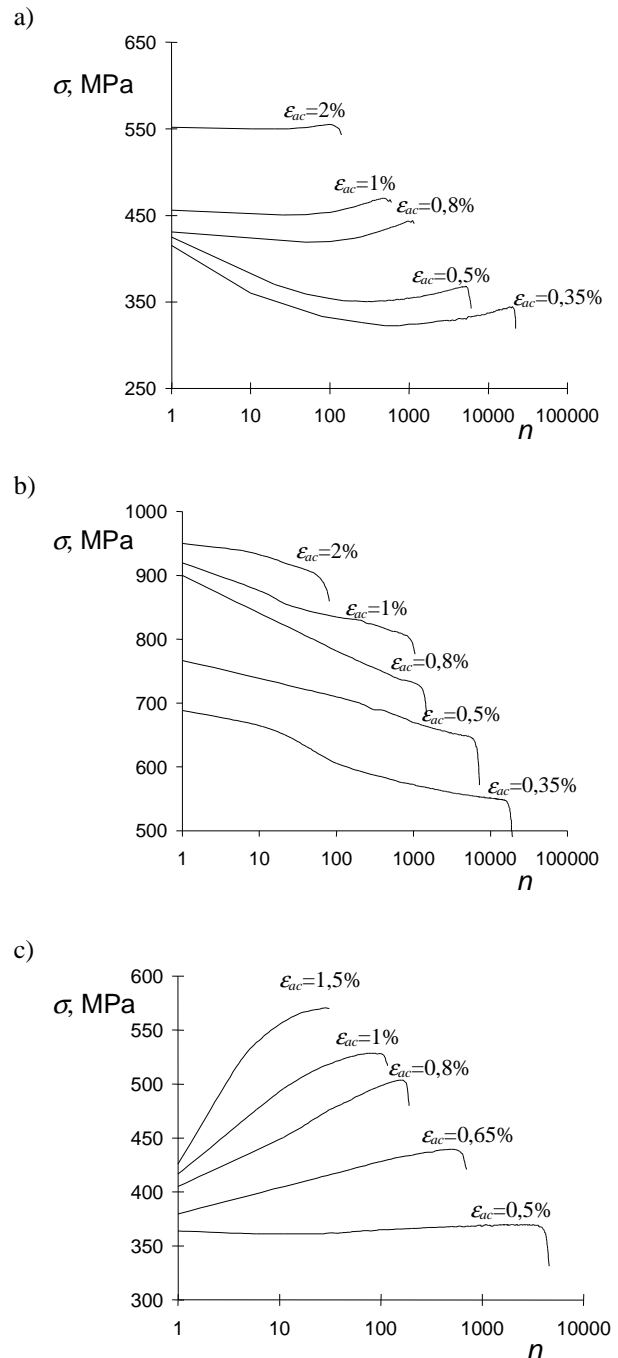
**Tab. 4.** Trwałość w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych

Materiał	Amplituda odkształcenia $\epsilon_{ac}$ , %						
	0,35	0,5	0,65	0,8	1,0	1,5	2,0
C45	21167	4952	-	995	567	-	127
30HGSA	25417	5500	-	1467	830	-	133
PA7	-	3767	702	192	97	28	-



**Rys. 4.** Przykładowe pętle histerezy z początku (1), środka (2) i końca (3) okresu trwałości zmęczeniowej: a) próbki ze stali C45, b) próbki ze stali 30HGSA, c) próbki ze stopu PA7

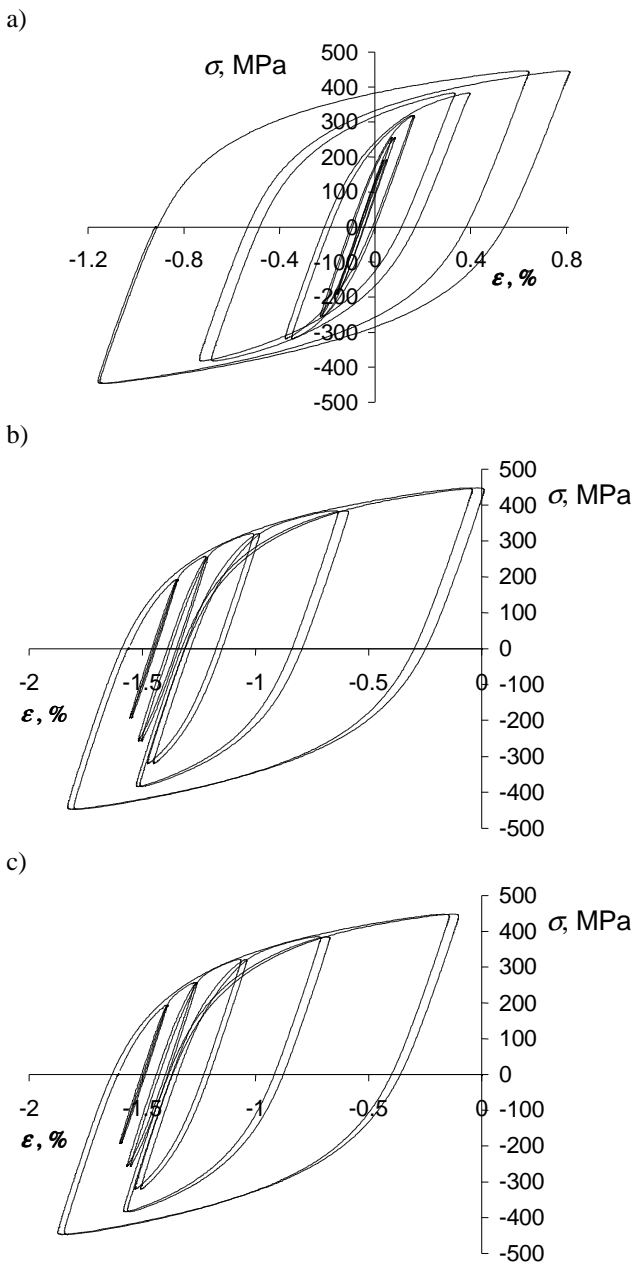
Przebieg wykresów zamieszczonych na Rys. 5 pozwala ocenić ilościowo zjawisko umocnienia lub osłabienia badanych materiałów oraz ponadto umożliwia ocenę przyjmowanego założenia o fazach stabilizacji własności cyklicz-



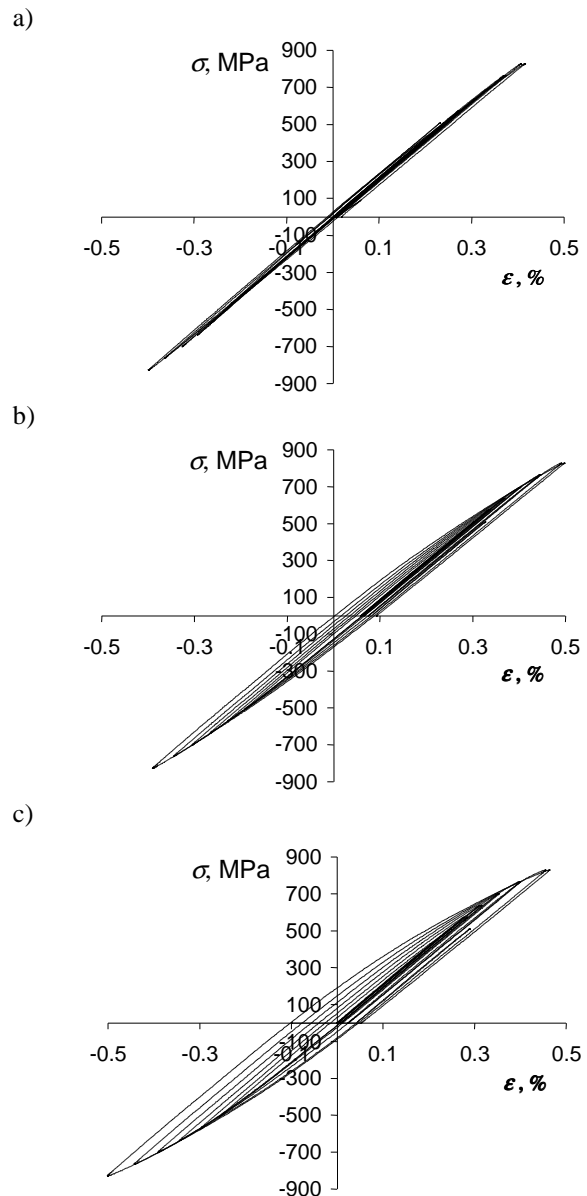
**Rys. 5.** Wartości  $\sigma_a$  w zależności od liczby cykli obciążenia stałoaamplitudowego: a) próbki ze stali C45, b) próbki ze stali 30HGSA, c) próbki ze stopu aluminium PA7

### 3.2. Wyniki badań w warunkach obciążeń programowanych

Bardziej złożone zjawiska umocnienia i osłabienia występują w przypadkach obciążenia ze zmienną amplitudą: programowanego lub losowego. Na kolejnych Rys. 6-8 zilustrowano powyższe stwierdzenie wykreślając wybrane pętle histerezy dla pierwszego bloku obciążenia programowanego (rysunki oznaczone literą a), bloku w połowie trwałości zmęczeniowej (oznaczenie b) oraz bloku końcowego odpowiadającego połowie trwałości zmęczeniowej (oznaczenie c). Wyniki dotyczące: stali C45 pokazano na Rys. 6, stali 30 HGSA na Rys. 7 oraz aluminium PA7 na Rys. 8.



**Rys. 6.** Pętle histerezy uzyskane w warunkach obciążeń programowanych próbek ze stali C45: a) pierwszy blok programu obciążenia, b) blok z połowy trwałości zmęczeniowej, c) blok ostatni

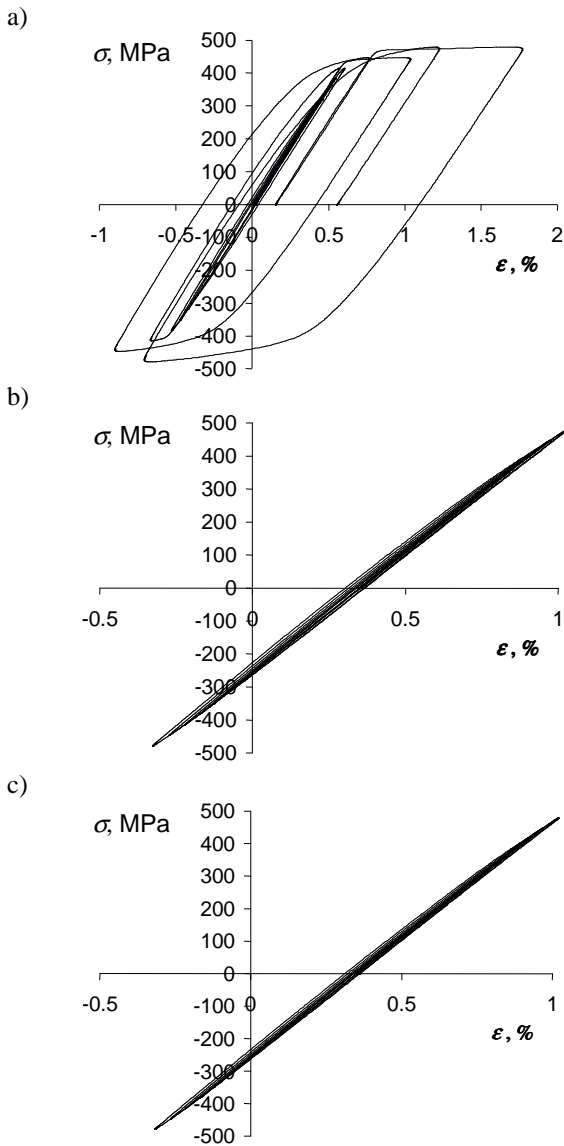


**Rys. 7.** Pętle histerezy uzyskane w warunkach obciążeń programowanych próbek ze stali 30HGSA: a) pierwszy blok programu obciążenia, b) blok z połowy trwałości zmęczeniowej, c) blok ostatni

Z przedstawionych na Rys. 6-8 wykresów wynika, że w warunkach obciążenia programowanego przy sterowaniu siłą (przeliczoną na napężenie) występuje zjawisko cyklicznego pełzania istotnie utrudniające analizę wyników badań. W omawianych badaniach wyznaczono także trwałość zmęczeniową. Dane te zamieszczono w Tab. 5.

**Tab. 5.** Trwałość zmęczeniowa w programowanych badaniach

Materiał	Trwałość zmęczeniowa N	
	Liczba bloków	Liczba cykli
Stal C45	98	979
Stal 30HGSA	31	305
Stop PA7	139	1388



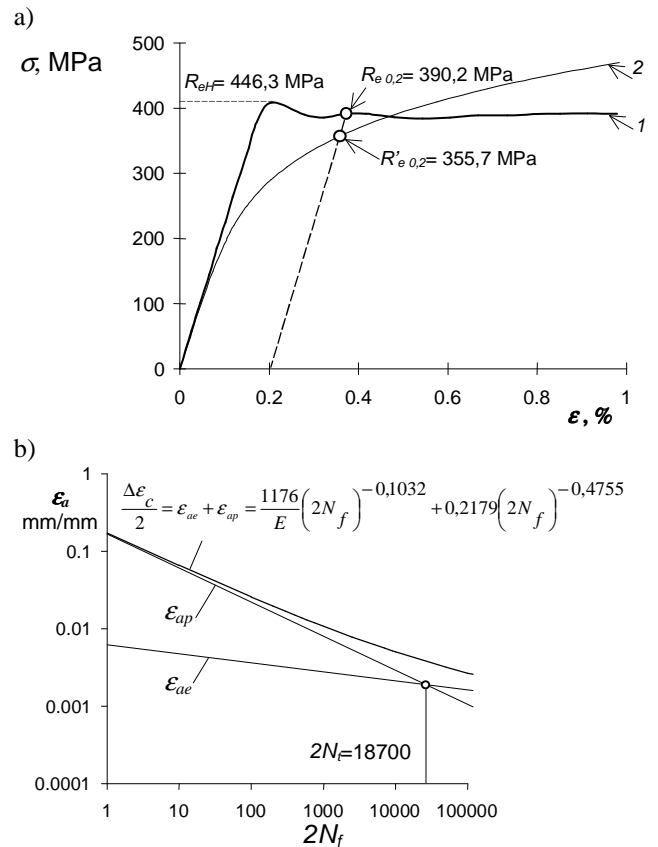
**Rys. 8.** Pętle histerezy uzyskane w warunkach obciążeń programowanych próbek ze stopu PA7: a) pierwszy blok programu obciążenia, b) blok z połowy trwałości zmęczeniowej, c) blok ostatni

Wyniki trwałości zmęczeniowej podane w Tab. 5 mogą być wykorzystane do doświadczalnej weryfikacji metod obliczeń. Ze względu na zakres niniejszego opracowania metody te nie będą opisane w analizie wyników badań.

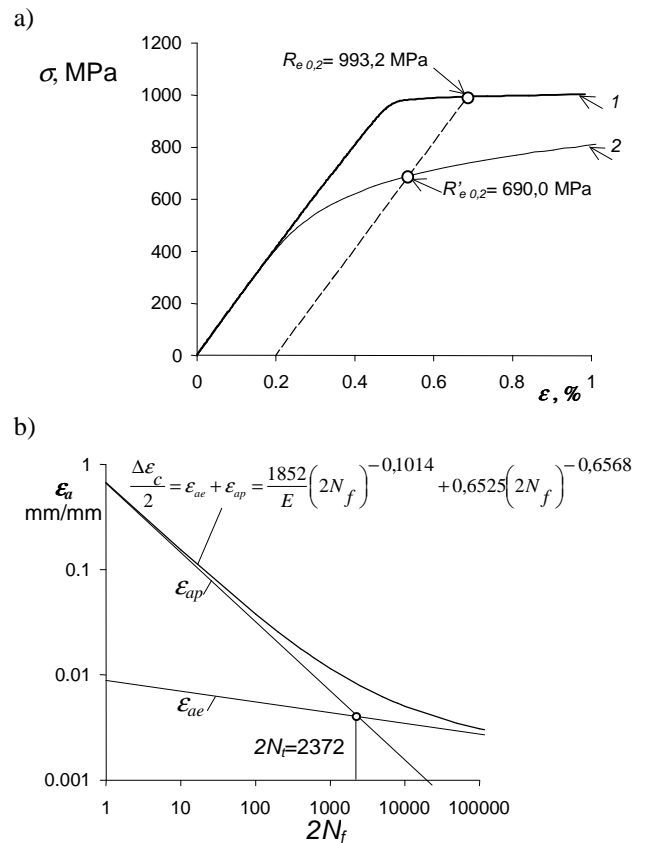
#### 4. ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW

##### 4.1. Wyniki badań stałoamplitudowych

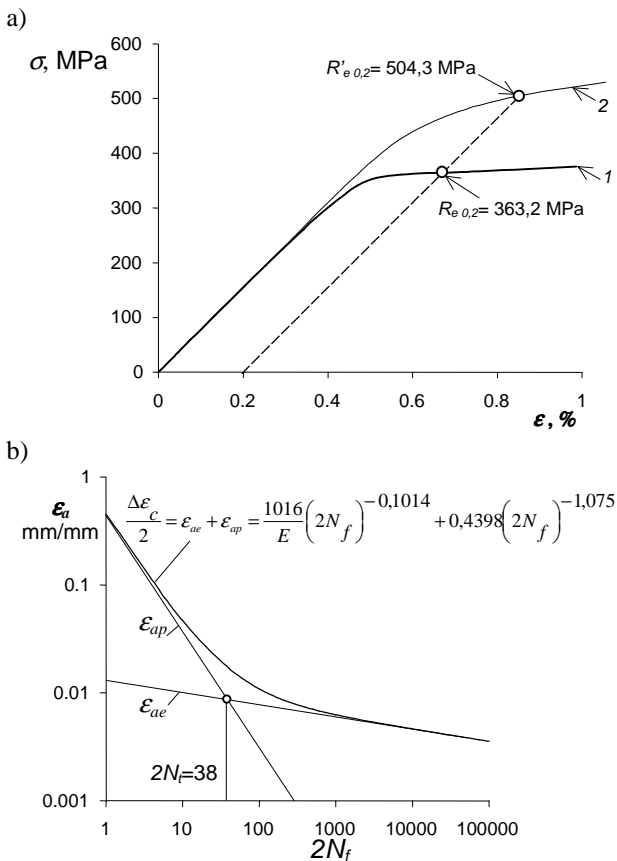
Na podstawie wyników badań opisanych w punkcie 3 możliwe jest wyznaczenie wykresów cyklicznego odkształcenia  $\sigma$ - $\varepsilon$  (Ramberga-Osgooda) oraz wykresów zmęczeniowych  $\varepsilon$ - $2N_f$  (Mansona-Coffina) stosowanych w obliczeniach zmęczeniowych w zakresie niskocyklowego zmęczenia (NCZ). Zestawienia tych wykresów dokonano na Rys. 9-11. Na każdym z tych rysunków zamieszczono wykres cyklicznego odkształcenia na tle wykresu monotonicznego rozciągania (rysunki-a) i wykresy zmęczeniowe (rysunki-b).



**Rys. 9.** Stal C45: a) wykres monotonicznego rozciągania-1 i wykres cyklicznego odkształcenia-2, b) wykres zmęczeniowy



**Rys. 10.** Stal 30 HGSA: a) wykres monotonicznego rozciągania-1 i wykres cyklicznego odkształcenia-2, b) wykres zmęczeniowy



**Rys. 11.** Stop PA7: a) wykres monotonicznego rozciągania-1 i wykres cyklicznego odkształcenia-2, b) wykres zmęczenia-3

Przykładowe pętle histerezy pokazane na Rys. 4 a szczególnie zmienność parametrów pętli histerezy na wszystkich przyjętych w badaniach poziomach odkształceń zilustrowane na Rys. 5 wskazują na brak pełnej stabilizacji własności cyklicznych badanych materiałów. Fakt ten istotnie komplikuje wyznaczenie wykresu cyklicznego odkształcenia ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) i wykresu zmęczenia ( $\varepsilon$ - $2N_f$ ). Wymienione wykresy zamieszczone na Rys. 9-11 wyznaczono na podstawie pętli histerezy rejestrowanej w połowie trwałości zmęzeniowej.

Analizę wpływu zmienności parametrów pętli histerezy dla różnych faz procesu zmęczenia na przebieg wykresów ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ), ( $\varepsilon$ - $2N_f$ ) przedstawiono w pracy Mrozińskiego (2008). Z analizy tej wynika, że własności cykliczne metali są własnościami „chwilowymi” zależnymi od stopnia zmęczenia tych metali. Nieuwzględnienie tego faktu w obliczeniach może prowadzić do znacznych różnic pomiędzy wynikami obliczeń i wynikami badań doświadczalnych.

## 4.2. Kryterium niskocyklowego zmęczenia

W obliczeniach zmęzeniowych elementów konstrukcyjnych w przypadku występowania odkształceń plastycznych w strefach zmęzeniowego pęknięcia, stosuje się metody z zastosowaniem wykresów cyklicznego odkształcenia ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) i wykresów zmęzeniowych ( $\varepsilon$ - $2N_f$ ) odpowiadające tzw. niskocyklowemu zmęczeniu. Jako kryterium niskocy-

klowego zmęczenia przyjmuje się powszechnie warunek (Procedury FITNET):

$$\Delta\sigma \leq 2R_e \text{ dla } R=-1 \text{ lub } \sigma \leq R_e \text{ dla } R \neq -1 \quad (1)$$

W przypadku braku wyraźnej granicy plastyczności  $R_e$  przyjmuje się wartość naprężenia, dla którego odkształcenie plastyczne wynosi 0,2% ( $\sigma = R_{e0,2}$ ). Z danych zamieszczonych na Rys. 9-11 wynika, że różnice w zależności od badanych materiałów pomiędzy granicą plastyczności  $R_e$  lub  $R_{e0,2}$  a cykliczną granicą plastyczności  $R'_{e0,2}$  są znaczne i zależą od tego czy materiał ulega cyklicznemu umocnieniu czy osłabieniu. Z Rys. 9a wynika, że stal C45 w początkowej fazie dla amplitud  $\sigma_{\alpha} \leq R_e$  ulega cyklicznemu osłabieniu następnie dla  $\sigma_{\alpha} > R_e$  ulega cyklicznemu umocnieniu. Wartość cyklicznej granicy plastyczności  $R'_{e0,2} = 355,7$  MPa jest nieznacznie niższa od granicy plastyczności  $R_e = 390,2$  MPa.

W przypadku stali 30 HGSA, która jak wynika z Rys. 10a podlega silnemu cyklicznemu osłabieniu wartości te wynoszą odpowiednio  $R_{e0,2} = 993,2$  MPa natomiast  $R'_{e0,2} = 690,0$  MPa czyli cykliczna granica plastyczności  $R'_{e0,2}$  jest znacznie mniejsza od granicy plastyczności  $R_{e0,2}$ .

Odmierna sytuacja ma miejsce w przypadku silnie umacniającego się aluminium PA7 (Rys. 11a), dla którego  $R_{e0,2} = 363,2$  MPa a  $R'_{e0,2} = 504,3$  MPa, czyli cykliczna granica plastyczności  $R'_{e0,2}$  jest znacznie wyższa od granicy plastyczności  $R_{e0,2}$ .

Z powyższego porównania wynika, że przyjmowanie granicy plastyczności  $R_{e0,2}$  jako kryterium oceny zakresu niskocyklowego zmęczenia jest obarczone znacznym błędem z dwóch powodów:

- przyjmowanie w analizach zmęzeniowych wartości parametrów, w tym granicy plastyczności, z próby monotonicznego rozciągania jest zawodne ze względu na zróżnicowanie w przebiegu procesów zniszczenia,
- brak możliwości wyznaczenia zależności pomiędzy wartością granicy plastyczności  $R_e$  (lub  $R_{e0,2}$ ) i cyklicznej granicy plastyczności  $R'_{e0,2}$  utrudnia opracowanie kryterium niskocyklowego zmęczenia na podstawie wartości  $R_e$  (lub  $R_{e0,2}$ ), w związku z tym przyjęcie jako kryterium wartości  $R'_{e0,2}$  jest bardziej właściwe.

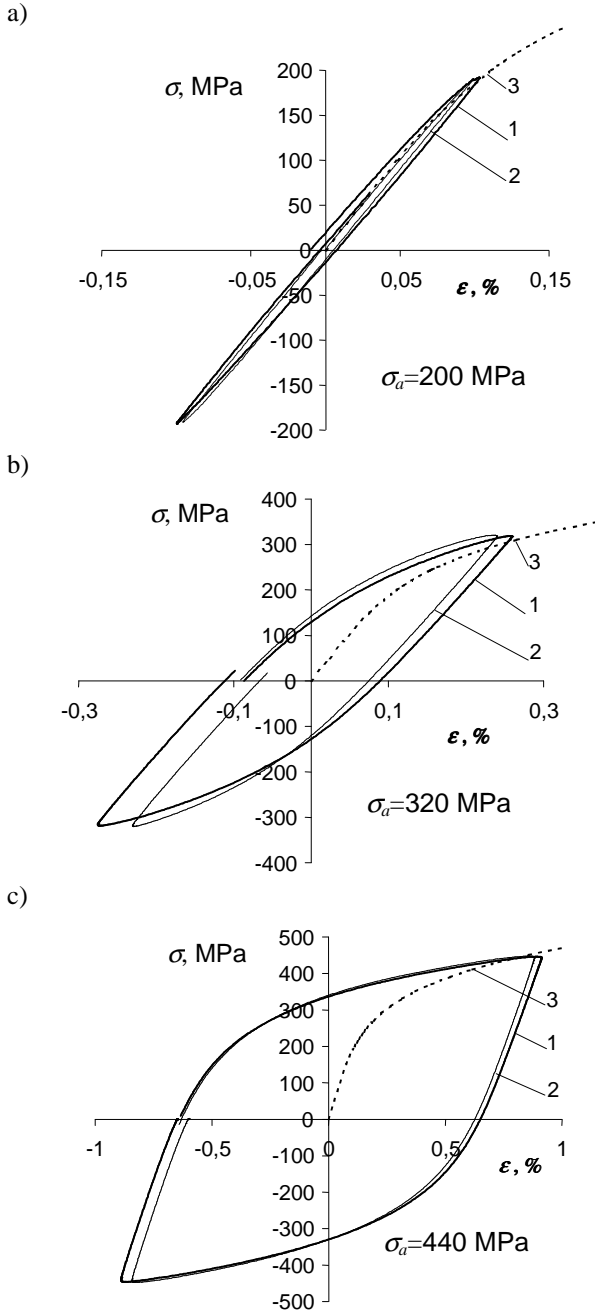
## 4.3. Analiza wyników programowanych badań

Obciążenia w zakresie NCZ w warunkach sterowania parametrem naprężenia wywołują, poza efektem uszkodzenia zmęzeniowego, zjawisko cyklicznego pełzania, co wskazano w punkcie 3 omawiając wyniki badań programowanych. Cykliczne pełzanie wymaga w obliczeniach elementów konstrukcyjnych sprawdzenia warunku granicznego odkształcenia plastycznego. Ta problematyka nie wchodzi w zakres niniejszej pracy.

Interesującym z punktu widzenia obliczeń zmęzeniowych jest zagadnienie relacji pętli histerezy programowanego obciążenia do wykresów cyklicznego odkształcenia. Dla porównania położenia wykresów cyklicznego odkształcenia (3) i pętli histerezy dokonano centrowania pętli do początku układu współrzędnych. Wyniki tych zabiegów zilustrowano na Rys. 12 dla stali C45, na Rys. 13 dla stali 30HGSA oraz dla stopu PA7 na Rys. 14. Do ilustracji wy-

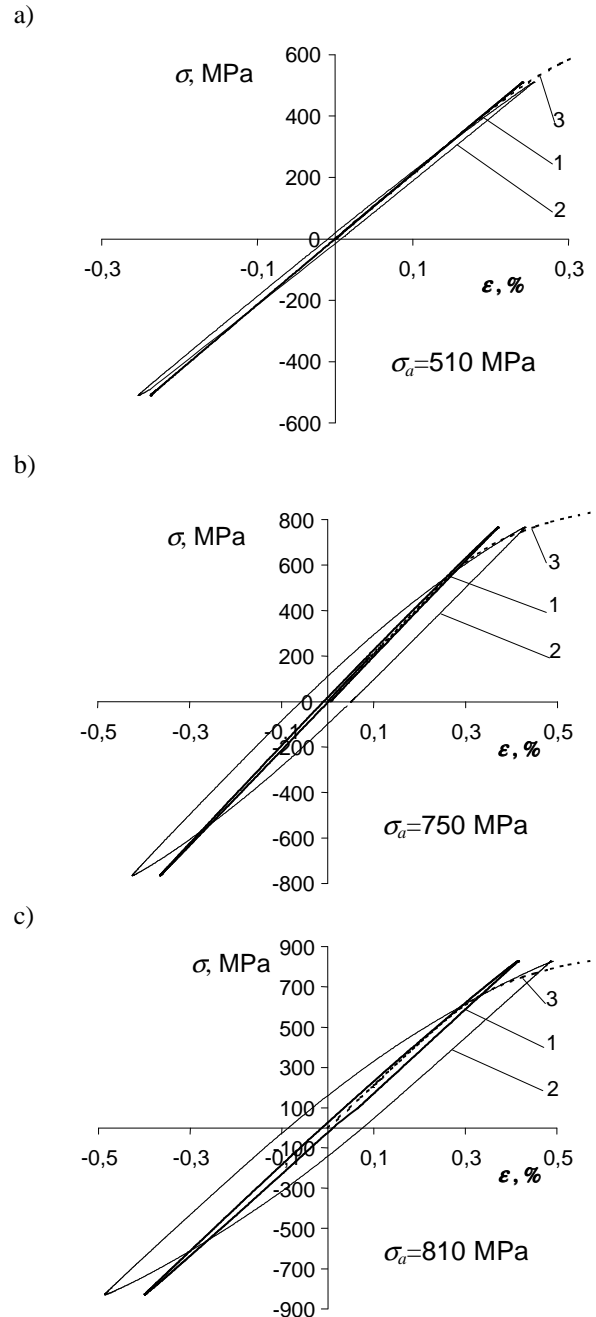
brano pętle odpowiadające najniższym wartościom amplitud (np. Rys. 12a, 13a, 14a), średnie wartości amplitud (Rys. 12b, 13b, 14b) oraz najwyższym wartościom amplitud (Rys. 12c, 13c, 14c) według Tab. 3. W celu zilustrowania zjawiska osłabienia lub umocnienia na rysunkach wykreślono pętle histerezy z pierwszego bloku programu (oznaczenie-1) i z bloku środkowego 2.

naprężeń i odkształceń, ponieważ umożliwia transformację wykresów naprężeń zmiennych w czasie lub programów naprężeń na wykresy odkształceń zmiennych w czasie lub programy odkształceń. Wymienione przekształcenie jest konieczne ze względu na konieczność zastosowania w obliczeniach w zakresie NCZ wykresów zmęzeniowych ( $\epsilon-2N_f$ ).



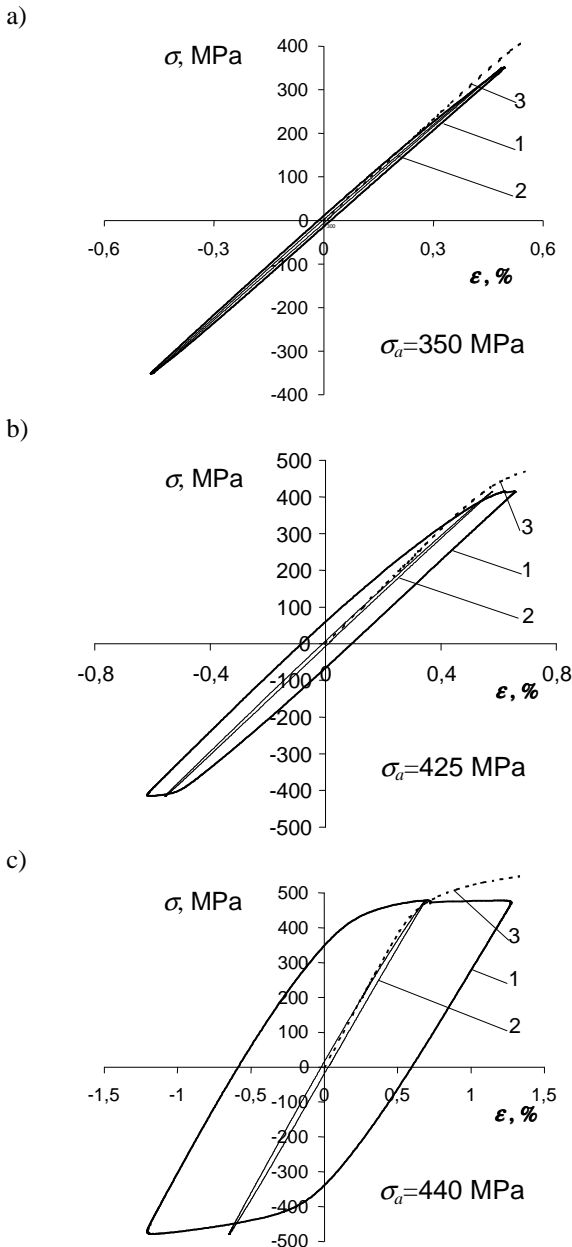
**Rys. 12.** Pętle histerezy uzyskane dla próbek ze stali C45 w warunkach obciążeń programowanych na tle wykresu cyklicznego odkształcenia

We wszystkich wymienionych przypadkach wierzchołki pętli histerezy leżały w przybliżeniu na wykresach cyklicznego odkształcenia. Powyższe stwierdzenie ma podstawowe znaczenie w obliczeniach trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych opartych na metodzie lokalnych



**Rys. 13.** Pętle histerezy uzyskane dla próbek ze stali 30 HGSA w warunkach obciążeń programowanych na tle wykresu cyklicznego odkształcenia

Opisany wyżej efekt uzasadnia także możliwość stosowania metody stopniowego rosnącego cyklicznego obciążenia do wyznaczenia wykresu cyklicznego odkształcenia na jednej próbce w warunkach sterowania parametrem naprężenia (amplitudą naprężenia).



Rys. 14. Pętle histerezy uzyskane dla próbek ze stopu aluminium PA7 w warunkach obciążeń programowanych na tle wykresu cyklicznego odkształcenia

## 5. WNIOSKI

1. Metody obliczeń trwałości zmęczeniowej w zakresie niskocyklowego zmęczenia wymagają, jak wiadomo, znajomości charakterystyk zmęczeniowych w ujęciu odkształceniowym lub energetycznym. W ujęciu odkształceniowym są to wykresy cyklicznego odkształcenia ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) i wykresy zmęczeniowe ( $\epsilon_{ac}$ - $2N_f$ ). W obliczeniach tych wymagana jest transformacja obciążeń w postaci zmian naprężeń w czasie na przebieg odkształceń w czasie. Analiza wyników badań wykazała, że w przypadku zmiennoamplitudowych programów naprężeń

wymieniona transformacja może być wykonana z zastosowaniem wykresu cyklicznego odkształcenia.

2. Porównanie własności wyznaczonych w warunkach obciążenia monotonicznego z własnościami cyklicznymi badanych stopów metali wykazało znaczne różnice tych własności spowodowane zjawiskiem cyklicznego umocnienia (stop aluminium PA7) lub osłabienia (stal 30HGSA). W przypadku stali konstrukcyjnej C45 po początkowym osłabieniu nastąpiło istotne cykliczne umocnienie.
3. Podstawowym parametrem istotnym z punktu widzenia obliczeń zmęczeniowych jest granica plastyczności i moduł sprężystości. Porównanie wykresów rozciągania i wykresów cyklicznego odkształcenia wykazało dużą zgodność modułu sprężystości i istotne różnice w wartościach granicy plastyczności i cyklicznej granicy plastyczności.
4. Analiza wyników badań wykazała, że granica plastyczności  $R_e$  metali stosowana do zakresu niskocyklowego zmęczenia, jest kryterium przybliżonym, nie odpowiadającym procesowi zniszczenia metali w warunkach obciążenia cyklicznego.
5. Jako kryterium oceny zakresu niskocyklowego zmęczenia odpowiednie są parametry związane z własnościami cyklicznymi metali np. cykliczna granica plastyczności wyznaczona z wykresu cyklicznego odkształcenia, którego znajomość jest konieczna w obliczeniach zmęczeniowych w warunkach obciążeń elementów konstrukcyjnych wyróżniających lokalne odkształcenia plastyczne.

## LITERATURA

1. **Duyi Y., Zhenlin W.** (2001a), A new approach to low cycle fatigue damage based on exhaustion of static toughness and dissipation of cyclic plastic strain energy during fatigue, *International Journal of Fatigue*, 23, 679-687.
2. **Duyi Y., Zhenlin W.** (2001b), Change characteristics of static mechanical property parameters and dislocation structures of 45<sup>#</sup> medium carbon structural steel during fatigue failure process, *Materials Science & Engineering*, A297, 54-61.
3. **Kocańda S.** (1985), *Zmęczeniowe pękanie metali*, WNT Warszawa.
4. **Kocańda S., Kocańda A.** (1989), *Niskocyklowa wytrzymałość zmęczeniowa metali*, PWN Warszawa.
5. **Kocańda S., Szala J.** (1997), *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*, PWN Warszawa.
6. **Mroziński S.** (2008), *Stabilizacja własności cyklicznych metali i jej wpływ na trwałość zmęczeniową*, Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, Rozprawy Nr 128.
7. **Procedury FITNET** (Fitness - for - service NETwork), opracowane w ramach Europejskiego Programu Badawczego Nr GIRT-CT-2001-05071.
8. **Szala J., Ligaj B., Szala G.** (2002), Wytrzymałość wstępnie cyklicznie obciążonych próbek ze stopu aluminium D16CzATW, *XIX Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania*, Pieczęyska k. Bydgoszczy, 373-382.



## **PROBLEM OF CYCLIC HARDENING OR SOFTENING IN METALS UNDER PROGRAMMED LOADING**

**Abstract:** The phenomenon of cyclic hardening or softening in metals and their alloys has been known for over 40 years. Despite such a long period of investigations there is lack of a general description of universal models of these phenomena. The basis of their valuation are tests performed under sine constant amplitude loadings. There can be found tests with constant stress amplitude or constant strain amplitude. These conditions are not equivalent for the range of loadings in which the law of the linear stress - strain relation is not valid. Indeed, the problem of cyclic hardening or softening in metals and their alloys becomes complicated in the case of variable amplitude loadings which are typical for the working loadings of the construction elements. In this paper there are presented investigations of cyclic properties of three metal alloys: PA7 aluminium alloy, which undergoes the strong cyclic hardening, 30HGSA alloy steel, which undergoes the strong cyclic softening and C45 construction steel, which undergoes cyclic hardening or cyclic softening, depending on the loading level. The tests were performed under programmed loadings with gradually increasing stress amplitude.

Praca naukowa finansowana ze środków finansowych na naukę w latach 2010-2012 jako projekt badawczy nr NN 503222139