

POLITECHNIKA OPOLSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY
KATEDRA MECHANIKI I PODSTAW KONSTRUKCJI MASZYN



**Wpływ obciążenia i kształtu próbki na trwałość
zmęczeniową przy zginaniu**

ROZPRAWA DOKTORSKA

Opracowała: mgr inż. Ewa Marcisz
Promotor: dr hab. inż. Dariusz Rozumek, prof. PO

Opole 2016

*Składam serdeczne podziękowania mojemu promotorowi
dr hab. inż. Dariuszowi Rozumek, prof. PO
za opiekę merytoryczną, za cenne uwagi sugestie,
za zaangażowanie, dzięki któremu możliwe było napisanie tej pracy.*

*Składam podziękowania również dla
Pana dr inż. Zbigniewa Marciniaka
za pomoc w wykonaniu badań doświadczalnych,
za poświęcony mi czas i cenne uwagi.*

Dziękuję rodzinie za wsparcie

*Niniejszą pracę dedykuję **Ani i Piotrowi**,
którzy zawsze we mnie wierzyli i mocno mnie wspierali*

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń.....	5
1. Wprowadzenie	6
2. Kryteria zmęczeniowe	8
2.1. Analiza naprężeniowych kryteriów zmęczeniowych	8
2.2. Analiza odkształceniowych kryteriów zmęczeniowych	12
2.3. Analiza energetycznych kryteriów zmęczeniowych	15
2.3.1. Kryteria parametru energetycznego oparte na energii sprężystej odkształcenia.....	16
2.3.2. Kryteria parametru energetycznego oparte na energii plastycznej odkształcenia.....	17
2.3.3. Kryteria parametru energetycznego oparte na energii sprężystej i plastycznej odkształcenia	19
2.4. Podsumowanie kryteriów zmęczeniowych	23
3. Czynniki wpływające na wytrzymałość zmęczeniową.....	25
3.1. Wpływ parametru obciążenia próbki na trwałość zmęczeniową	27
3.2. Wpływ kształtu próbki na trwałość zmęczeniową	31
3.3. Podsumowanie czynników wpływających na wytrzymałość zmęczeniową	34
4. Cel, zakres i teza pracy.....	37
5. Metodyka badań.....	38
5.1. Struktura i własności badanego materiału.....	40
5.2. Próbki do badań.....	42
5.3. Stanowisko badawcze.....	42
5.4. Parametr energetyczny	46
5.5. Cechowanie stanowiska badawczego	48
5.6. Regulator PID	51
6. Obliczenia numeryczne	55
7. Wyniki badań zmęczeniowych	65
7.1. Wyniki badań zmęczeniowych przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego	75

7.2. Wyniki badań zmęczeniowych przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego	78
7.3. Opracowanie statystyczne wyników badań.....	81
7.4. Porównanie wyników badań doświadczalnych z wynikami obliczeniowymi.....	83
8. Wpływ obciążenia próbki na trwałość zmęczeniową	87
9. Wpływ kształtu próbki na trwałość zmęczeniową	92
10. Analiza pęknięć zmęczeniowych.....	96
10.1. Analiza złomów zmęczeniowych	101
11. Wnioski.....	106
Literatura.....	108
Załączniki	120

Wykaz ważniejszych oznaczeń

A, m – stałe materiałowe,

b – wykładnik wytrzymałości zmęczeniowej,

B, K, F – stałe umożliwiające wybór szczególnej wersji kryterium,

c – wykładnik zmęczeniowego odkształcenia plastycznego,

E – moduł Younga,

f, k – stałe dla danej liczby cykli,

K' – współczynnik cyklicznego odkształcenia,

n' – wykładnik umocnienia cyklicznego,

N_f - liczba cykli do zniszczenia,

p – współczynnik wyznaczany eksperymentalnie,

$p(t)$ – moc chwilowa,

R_m – wytrzymałość na rozciąganie,

t – granica zmęczenia przy cyklicznym zginaniu i skręcaniu,

W^m - energia odkształcenia sprężystego pochodząca od obciążenia średniego,

W^p - energia właściwa odkształcenia plastycznego,

α – współczynnik charakteryzujący wrażliwość materiału na naprężenia średnie,

β - stała materiałowa,

Δ - zakres,

ε - odkształcenie,

ε'_f – współczynnik zmęczeniowego odkształcenia plastycznego,

σ_n - naprężenie normalne,

σ'_f – współczynnik wytrzymałości zmęczeniowej przy rozciąganiu –ściskaniu,

τ - naprężenie styczne,

ϕ - przesunięcie fazowe,

δ_{ij} – delta Kroneckera.

Indeksy

a – amplituda,

m – wartość średnia,

n - kierunek płaszczyzny normalnej,

τ - naprężenie styczne.

1. Wprowadzenie

Zmęczenie materiału to inaczej uszkodzenie materiału, które powstało pod wpływem zmieniającego się naprężenia (odkształcenia) w czasie, skutkiem tego jest pojawienie się uszkodzenia (zmęczenia) materiału. Wytrzymałość materiałów to dziedzina wiedzy zajmująca się badaniem zjawisk zachodzących w materiałach konstrukcyjnych i konstrukcjach poddanych zewnętrznym obciążeniom. Materiał może być obciążony jednoosiowym rozciąganiem, zginaniem, skręcaniem lub połączeniem tych obciążeń dających stany wieloosiowe. Zjawisko zmęczenia materiałów można przedstawić w postaci charakterystyk zmęczeniowych takich jak: wykres Wöhlera, Mansona-Coffina-Basquina, Ramberga-Osgooda, Smitha, Haicha, Heywooda, itp. Na przestrzeni lat powstało wiele charakterystyk, modeli, kryteriów czy parametrów opisujących zjawisko zmęczenia materiałów, są ciągle rozwijane, modyfikowane oraz powstają całkiem nowe. Wpływ wywiera ciągły rozwój techniki oraz uzależnienie jej od ekonomii. Rozwój skomplikowanych konstrukcji prowadzi do potrzeby ulepszania parametrów pracy takich jak: moc, prędkość czy wydajność. W celu ulepszenia parametrów pracy maszyn i ich elementów, a także poprawnego szacowania trwałości potrzebna jest wiedza na temat zjawisk zachodzących w materiale, z którego został dany element wykonany. Historia przedstawia wiele problemów związanych z oceną trwałości elementów konstrukcyjnych wykonanych z nieodpowiednich materiałów. Skutkiem czego wielokrotnie spotykaliśmy się z katastrofami w przemyśle lotniczym, kolejowym, górniczym, itp.

W niniejszej prac zostaną przedstawione innowacyjne wyniki badań zmęczeniowych prowadzonych przy kontroli amplitudy parametru energetycznego. Zostanie określony wpływ parametru obciążenia na trwałość zmęczeniową. Zastosowane dwa rodzaje badanych próbek pozwoliły na określenie wpływu kształtu na trwałość zmęczeniową. W rozdziale 2 zostanie przedstawiony przegląd wybranych kryteriów stosowanych do opisu badań zmęczeniowych w zakresie niskocyklowym i wysokocyklowym. Kryterium jest to osiągnięcie stanu granicznego materiału w skutek pojawienia się krytycznej wartości naprężenia, odkształcenia lub nieodwracalnie rozproszonej energii. W rozdziale 3 zostały przedstawione najważniejsze czynniki posiadające wpływ na trwałość zmęczeniową. Szerzej opisany został wpływ parametru obciążenia i wpływ kształtu próbki na trwałość zmęczeniową. Rozdział 4 przedstawia cel, zakres i tezę pracy. Metodyka prowadzonych badań została przedstawiona w rozdziale 5. W rozdziale tym zostały omówione materiały użyte w trakcie badań, przedstawione kształty i rozmiary próbek oraz stanowisko badawcze wraz z parametrem

energetycznym, który był zaimplementowany w systemie sterującym pracą maszyny. Przedstawione zostały wyniki uzyskane w trakcie cechowania maszyny oraz sposób doboru regulatora PID. W rozdziale 6 zostały przedstawione i omówione wyniki obliczeń numerycznych stali C45 i stopu aluminium 2024 dla zamodelowanych kształtów próbek posiadających przekrój poprzeczny okrągły i kwadratowy. Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla dwóch wartości momentu gnącego. Celem przeprowadzenia obliczeń numerycznych było uzyskanie rozkładu map naprężeń i odkształceń. Wyniki obliczeń numerycznych umożliwiły szybszą lokalizację inicjacji pęknięcia w trakcie badań doświadczalnych. W rozdziale 7 zostały przedstawione i omówione wyniki badań zmęczeniowych dla stali C45 i stopu aluminium 2024 próbek kwadratowych i okrągłych prowadzonych przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego i parametru energetycznego. Dla uzyskanych wyników badań doświadczalnych przedstawione zostały wyniki badań obliczeniowych: współczynniki równani regresji i korelacji. Uzyskane wyniki badań doświadczalnych zostały porównane z wynikami obliczeniowymi dla innych wybranych modeli parametru energetycznego. Do analizy wybrano model parametru energetycznego: Pawliczka, Lachowicza oraz model dla zakresu liniowo sprężystego. W rozdziale 8 przedstawiony został wpływ obciążenia próbki na trwałość zmęczeniową, a w rozdziale 9 wpływ kształtu próbki na trwałość zmęczeniową. W rozdziale 10 została przedstawiona analiza pęknięć i złomów zmęczeniowych uzyskanych w trakcie badań. Rozdział 11 zawiera wnioski z przeprowadzonych badań oraz ich analizy.

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych dla dwóch materiałów, kształtów próbek, rodzajów obciążenia oraz na podstawie przeprowadzonych obliczeń i analiz można stwierdzić, że istnieje możliwość prowadzenia badań eksperymentalnych przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego.

2. Kryteria zmęczenia

Źródła literaturowe przedstawiają szereg prac przeglądowych opisujących charakterystyki zmęczenia materiałów [49, 54, 78]. Charakterystyki zmęczenia materiałów pozwalają na oszacowanie trwałości konstrukcji i urządzeń. Jak już zostało wspomniane charakterystyki zmęczenia możemy przedstawić przy pomocy parametrów naprężenia, odkształcenia i energii. Normy ASTM [4, 5] definiują i opisują sposób wyznaczania charakterystyk naprężeniowych ($\sigma_a - N_f$) i odkształceniowych ($\epsilon_a - N_f$). Wyznaczanie energetycznych charakterystyk zmęczenia nie zostało jeszcze znormalizowane choć w literaturze odnajdujemy sposoby ich wyznaczenia [73, 85]. Energetyczne charakterystyki zmęczenia materiałów ($W_a - N_f$) opisujące zależność amplitudy parametru energetycznego W_a od liczby cykli do zniszczenia N_f wyznaczone są najczęściej pośrednio na drodze obliczeniowej [121] z użyciem parametrów odkształceniowej charakterystyki zmęczenia ($\epsilon_a - N_f$) opisanej równaniem Mansona-Coffina-Basquina [7, 17, 76].

2.1. Analiza naprężeniowych kryteriów zmęczenia

Wytrzymałość zmęczeniowa, w zakresie ograniczonej liczby cykli, zostaje określona dla parametru naprężenia po przeprowadzeniu badań eksperymentalnych na określonej liczbie próbek (zgodnie z normą) obciążonych różnymi wartościami naprężenia aż do ich zniszczenia przy liczbie cykli N_f lub do czasu przekroczenia granicznej liczby cykli N_G . Otrzymane wyniki pozwalają na utworzenie wykresu w układzie współrzędnych $\sigma - N_f$. Najpopularniejszym jest wykres zmęczeniowy zwany również wykresem Wöhlera [53, 54], który można zapisać w układzie pojedynczo lub podwójnie logarytmicznym. W układzie $\sigma_a - \log N_f$ (rys. 1) wykres zmęczeniowy przyjmuje postać linii prostej łamanej [6], który opisuje następująca zależność

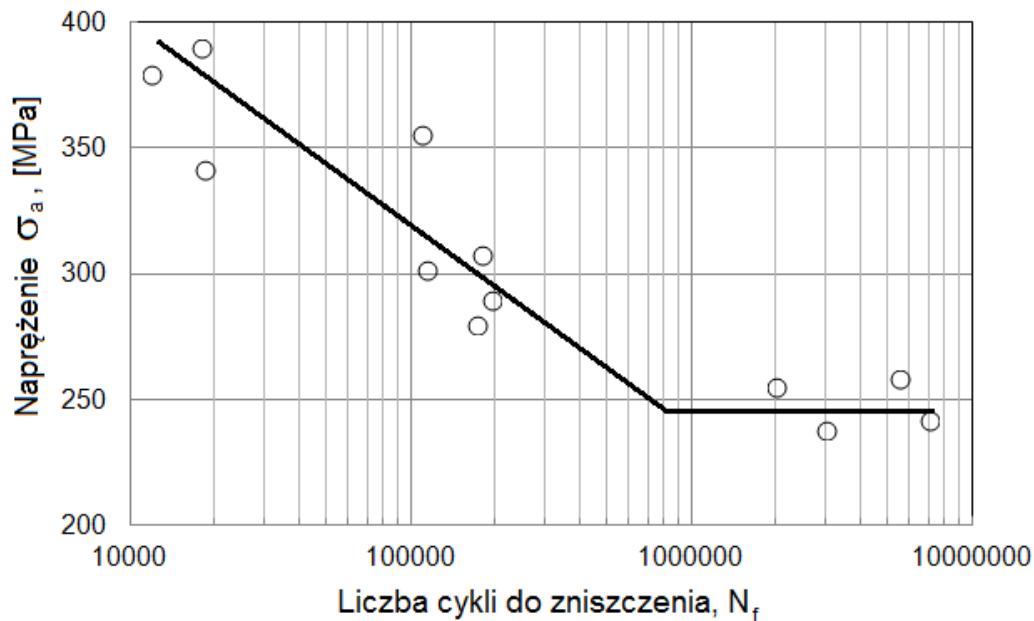
$$\log N_f = A + m\sigma_a. \quad (1)$$

Powyższe równanie możemy zapisać w postaci wykładniczej przedstawionej przez Morrowa [76, 108]

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b. \quad (2)$$

Na rys. 1 został przedstawiony przykładowy wykres Wöhlera w układzie $\sigma - \log N_f$. Przedstawiony wykres zmęczeniowy obrazuje wyniki badań i ich aproksymację w postaci dwóch linii prostych, punkt ich przecięcia to teoretyczna granica zmęczenia N_0 (lewa strona

wykresu to trwałość ograniczona, a prawa strona wykresu to trwałość nieograniczona). Prosta znajdująca się po lewej stronie wykresu przedstawia obszar naprężeń większy od granicy zmęczenia (w zakresie nisko i wysokocyklowym).



Rys. 1. Przykładowy wykres zmęczeniowy Wöhlera

Obecnie w literaturze specjalistycznej odnajdujemy bardzo dużą grupę naprężeniowych kryteriów zmęczeniowych. W niniejszej pracy zostaną zaprezentowane wybrane kryteria, które weryfikowano w testach materiałowych. Gough i Pollard już w roku 1935 zaprezentowali empiryczne kryterium zwane również ćwiartką elipsy [39]

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{af}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_a}{\tau_{af}}\right)^2 = 1. \quad (3)$$

Autorzy sformułowali kryterium na podstawie wyników badań proporcjonalnego zginania ze skręcaniem dla materiałów w stanie elastoplastycznym.

Badając materiały sprężysto-krucho poddane cyklicznym obciążeniom gięto skrętnym Gough [38] w 1949 sformułował kryterium empiryczne zwane także łukiem elipsy

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{af}}\right)^2 \left(\frac{\sigma_{af}}{\tau_{af}} - 1\right) + \frac{\sigma_a}{\sigma_{af}} \left(2 - \frac{\sigma_{af}}{\tau_{af}}\right) + \left(\frac{\tau_a}{\tau_{af}}\right)^2 = 1. \quad (4)$$

W 1985 Soon-Bok Lee [59] zmodyfikował kryterium Gough'a dla obciążeń nieproporcjonalnych

$$\sigma_{a,eq_LEE} = \sigma_{af} \left[\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{af}} \right)^\alpha + \left(\frac{\tau_a}{\tau_{af}} \right)^\alpha \right]^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (5)$$

gdzie:

$\alpha=2(1+\beta\sin\phi)$ dla stali,

$\alpha=1,5(1+\beta\sin\phi)$ dla żeliwa,

β - stała materiałowa (czułość materiałowa na przesunięcia fazowe ϕ)

W grupie naprężeniowych kryteriów zmęczeniowych liczną część stanowią kryteria, które uwzględniają wartość średnią obciążenia. Obciążenia średnie powodowane są np. przez ciężar własny konstrukcji oraz przez dodatkowe obciążenie stałe wynikające z charakteru pracy konstrukcji. W tabeli 1 zostały przedstawione wybrane modele naprężeniowe uwzględniające wartość średnią obciążenia.

Tabela 1. Kryteria naprężeniowe, które w swoich równaniach uwzględniają wartość średnią obciążenia

Autor	Rok	Kryterium
Findley [27]	1953	$\tau_{c\theta} = f - k\sigma_\theta$
Sines [126]	1955	$\left[(\sigma_{a1} - \sigma_{a2})^2 + (\sigma_{a2} - \sigma_{a3})^2 + (\sigma_{a1} - \sigma_{a3})^2 \right]^{\frac{1}{2}} + m(\sigma_{m1} + \sigma_{m2} + \sigma_{m3}) = \frac{\sqrt{2}\sigma_N}{\beta_k}$
Marin [96]	1956	$\sigma_a = \sigma_{af} \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{R_m} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$
Crossland [18]	1956	$\left[(\sigma_{a1}^2 + \sigma_{a2}^2 + \sigma_{a3}^2 - \sigma_{a1}\sigma_{a2} - \sigma_{a2}\sigma_{a3} - \sigma_{a1}\sigma_{a3}) \right]^{\frac{1}{2}} =$ $= \sqrt{3}\tau_{af} - \left(\sqrt{3} \frac{\tau_{af}}{\sigma_{af}} - 1 \right) (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)$
Morrow [108, 77]	1968	$\sigma_a = \sigma'' (2N_f)^b$, gdzie $\sigma'' = \sigma' - \sigma_m$
Gerber [31]	1974	$\sigma_a = \sigma_{af} \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{R_m} \right)^2 \right]$
Lee [60]	1985	$\sigma_{eq} = \frac{\sigma_a \left[1 + \left(\frac{bK}{2t} \right)^\alpha \right]^{\frac{1}{\alpha}}}{1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right)^n}$, gdzie $K = \frac{2\tau_a}{\sigma_a}$, $\alpha = 2(1 + \beta \sin \phi)$
McDiarmid [100]	1985	$\tau_a = C_3 - C_4\sigma_\tau^n$

Macha [70]	1989	$\max_t \{B\tau_{\eta_s}(t) + K\sigma_{\eta}(t)\} = F$
Achtelik [1]	1991	$f(Z_{gw}, Z_{so}) = \frac{p \cdot Z_{gw}}{\sqrt{1 + \left[\left(p \frac{Z_{gw}}{Z_{so}} \right)^2 - 1 \right] \sin^2 \alpha}}$
Lee Chianga [61]	1991	$\left(\frac{\sigma_a}{b} \right)^{\frac{b(1+\gamma \sin \phi)}{t}} + \left(\frac{\tau_a}{T} \right)^{\frac{2(1+\gamma \sin \phi)}{t}} = \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma'_f} \right)^{n_1} \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{\tau_m}{\tau'_f} \right)^{n_2} \right]$
Goodman [36]	1994	$\sigma_a = \sigma_{af} \left(1 - \frac{\sigma_m}{R_m} \right)$

W grupie kryteriów naprężeniowych, można wyróżnić grupę kryteriów, która powstała na podstawie analizy położenia płaszczyzn inicjacji i propagacji pęknięć zmęczeniowych. Koncepcja płaszczyzny krytycznej posiada dużą efektywność i szeroki zakres zastosowania dlatego też w ciągu ostatnich lat zyskała znaczną popularność. Celem koncepcji płaszczyzny krytycznej jest redukcja wieloosiowego stanu naprężenia do stanu jednoosiowego naprężenia ekwiwalentnego. W tabeli 2 zostały zaprezentowane ważniejsze kryteria naprężeniowe bazujące na płaszczyźnie krytycznej.

Tabela 2. Kryteria naprężeniowe, które w swoich równaniach uwzględniają płaszczyznę krytyczną

Autor	Rok	Kryterium
Findley [28]	1956	$\tau_{ns,c} = f - k\sigma_n$
McDiarmid [98]	1972	$\tau_{ns,a} = C_1 - C_2\sigma_{n,a}^{1,5}$
Diatmana-Isslera [100]	1974	$\tau_{ns,a} = \tau_{ns,a,c}$
Matake [97]	1977	$\tau_{ns} = \tau_{af} - k\sigma_n$
Macha [71,69]	1979	$\max_t \{B\tau_{ns}(t) + K\sigma(t)\} = F$
Dang Van [19]	1985	$\tau_a + ap = b$
Sempruch [125]	1992	$\sqrt{(\sigma_{n,a,c}(\xi) - \sigma_{n,a}(\xi))(\sigma_{s,a,c}(\xi) - \sigma_{s,a}(\xi))(\tau_{ns,a,c}(\xi) - \tau_{ns,a}(\xi))} = 0$
Papadopoulos [114]	1994	$\sigma_{h,max} = \max_t [\sigma_{kk}(t)/3]$
Vidal i inni [144]	1996	$\sigma_{eq,a} = \tau_{ns,a} + a(N)\sigma_{n,a} + b(N)\sigma_{n,m}$

2.2. Analiza odkształceniowych kryteriów zmęzeniowych

Odkształceniowe charakterystyki zmęczeniowe (ε_a - N_f) przedstawiają amplitudę odkształcenia całkowitego, która składa się z amplitudy odkształcenia sprężystego ε_e i amplitudy odkształcenia plastycznego ε_p .

$$\varepsilon_a = \varepsilon_e + \varepsilon_p. \quad (6)$$

Odkształcenie sprężyste to takie, które powraca do stanu wyjściowego po usunięciu siły (naprężenia), która je spowodowała. Odkształcenie plastyczne to takie odkształcenie, które nie ustępuje pod wpływem naprężenia, które je wywołało i powoduje trwałe zmiany w materiale.

Manson [76] zaproponował zapisanie zależności pomiędzy amplitudą odkształcenia sprężystego, a liczbą cykli do zniszczenia materiału

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b. \quad (7)$$

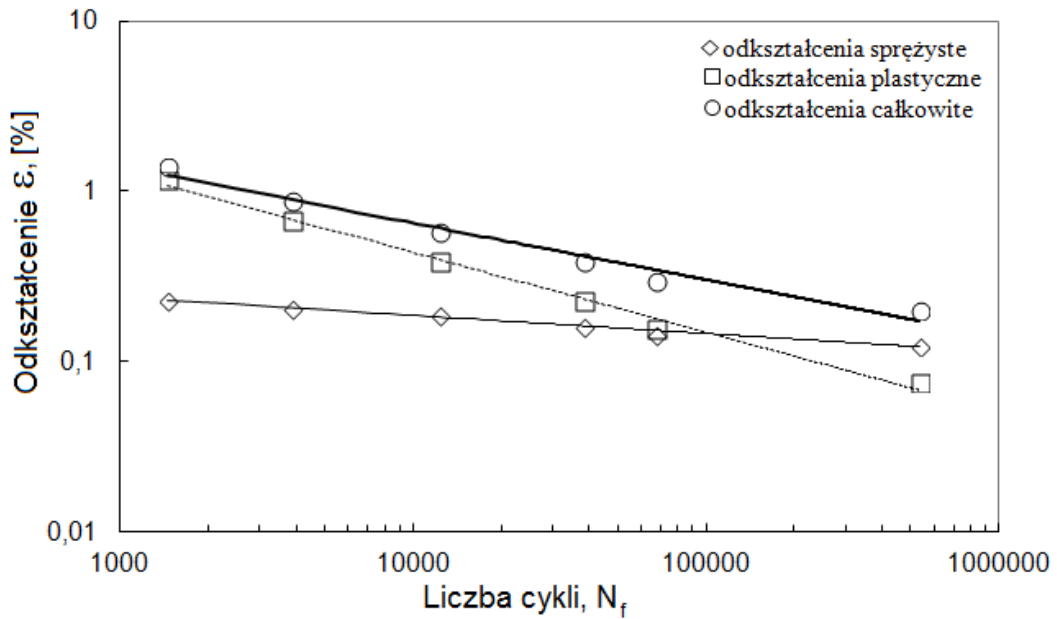
Analogicznie Coffin [17] zapisał zależność pomiędzy amplitudą odkształcenia plastycznego, a liczbą cykli do zniszczenia materiału

$$\varepsilon_p = \varepsilon'_f (2N_f)^c. \quad (8)$$

Równanie Mansona-Coffina-Basquina [7] przyjęło postać

$$\varepsilon_a = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c. \quad (9)$$

Na rysunku 2 został przedstawiony przebieg odkształceń plastycznych, sprężystych oraz całkowitych w układzie logarytmicznym zgodnie z równaniem Mansona-Coffina-Basquina.



Rys. 2. Amplituda odkształceń sprężystych, plastycznych oraz całkowitych w zależności od liczby cykli do zniszczenia

W celu opisu analitycznego wykresu stosuje się model zaproponowany przez Ramberga-Osgooda [118]

$$\varepsilon_a = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}}, \quad (10)$$

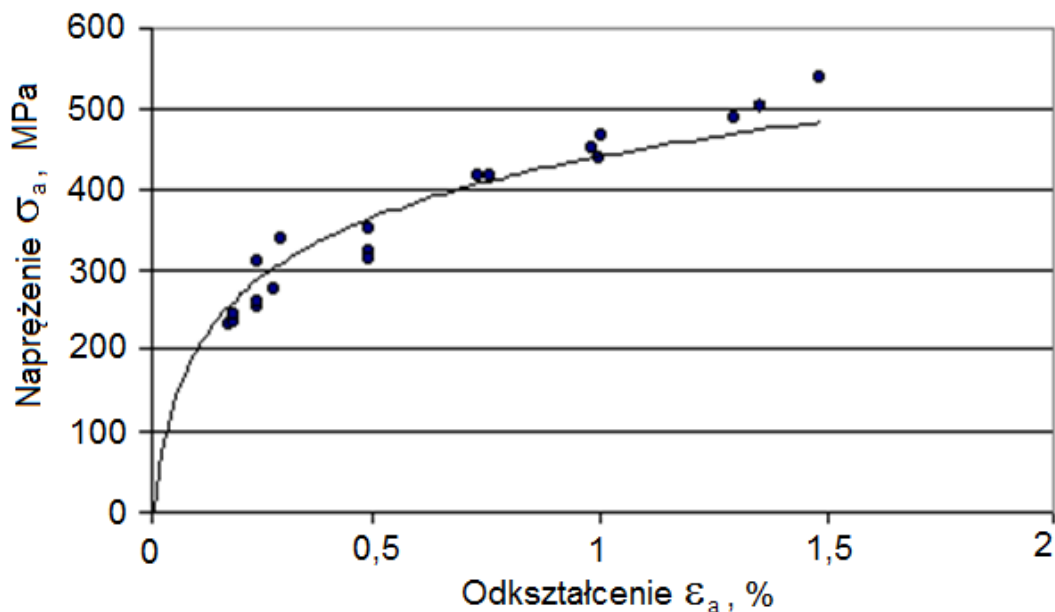
gdzie amplitudę odkształcenia sprężystego opisuje zależność

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma_a}{E} \quad (11)$$

oraz amplitudę odkształcenia plastycznego

$$\varepsilon_p = \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}}. \quad (12)$$

Przykładowy przebieg odkształceń opisany przez Ramberga-Osgooda został przedstawiony na rys. 3.



Rys. 3. Przebieg odkształceń opisany przez Ramberga-Osgooda

Przedstawione równania opisujące modele odkształceniowe posiadają zbliżoną strukturę w swym zapisie wyróżniają część sprężystą i część plastyczną odkształcenia.

W literaturze odnajdujemy opis wielu kryteriów odkształceniowych, które w swoim zapisie uwzględniają: odkształcenie postaciowe, wartość krytyczną odkształcenia ekwiwalentnego czy płaszczyznę krytyczną. Niektóre wybrane kryteria zostały przedstawione w tabeli 3.

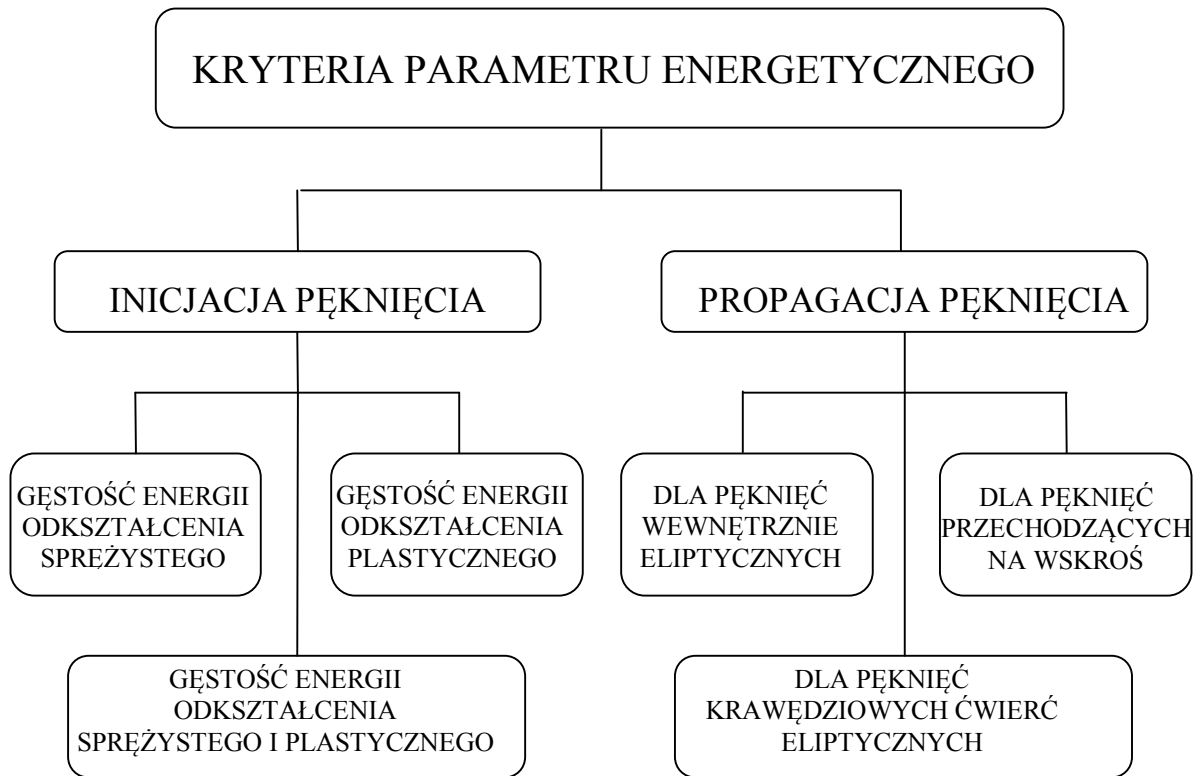
Tabela 3. Wybrane kryteria odkształceniowe

Autor	Rok	Kryterium
Sines [126]	1955	$\varepsilon_{red} = \frac{\left[(\varepsilon_{a1} - \varepsilon_{a2})^2 + (\varepsilon_{a2} - \varepsilon_{a3})^2 + (\varepsilon_{a3} - \varepsilon_{a1})^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{(1-\nu)\sqrt{2}}$
Brown, Miller i inni [12]	1973	$\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2} = f \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} \right]$
Zamrik i Frishmuth [145]	1974	$\varepsilon_T = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2}$
Lohr i Ellison [66]	1980	$\gamma_{max} + k\varepsilon_n = C$
Socie i inni [129]	1985	$\gamma_{max} + \varepsilon_{an} + \frac{\sigma_{n0}}{E} = \gamma'_f (2N_f)^c + \frac{\tau'_f}{G} (2N_f)^b$
Socie [128]	1987	$\hat{\gamma} + \hat{\varepsilon}_n + \frac{\hat{\sigma}_n}{E} = \gamma'_f (2N_f)^c + \frac{\tau'_f}{G} (2N_f)^b$

Macha [69, 71]	1988	$\max_t \{b\varepsilon_{ns}(t) + k\varepsilon_n(t)\} = q$
Itoh i inni [46]	1995	$\Delta\varepsilon_{NP} = (1 + \alpha f_{NP}) \Delta\varepsilon_I$
De-Guang i De-Jun [47]	1998	$\frac{\Delta\varepsilon_{eq}^{cr}}{2} = \sqrt{\left[\varepsilon_n^{*2} + \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta\gamma_{max}}{2} \right)^2 \right]}$
Che, Xu, Huang [14]	1999	$\Delta\varepsilon_1^{max} \Delta\sigma_1 + \Delta\gamma_1 \Delta\tau_1 = 4 \frac{\sigma_f'^2}{E} (2N_f)^{2b} + 4\sigma_f' \varepsilon_f' (2N_f)^{b+c}$
Varvani-Farahani [141]	2000	$\frac{1}{\sigma_f' \varepsilon_f'} \Delta\sigma_n \Delta\varepsilon_n + \frac{1 + \frac{\sigma_{n,m}}{\sigma_f'}}{\tau_f' \gamma_f'} \Delta\tau_{ns,max} \Delta \left(\frac{\gamma_{ns,max}}{2} \right) = f(N_f)$

2.3. Analiza energetycznych kryteriów zmęzeniowych

Kryterium energetyczne opisuje energia rozproszona w materiale w czasie obciążenia zmiennego aż do zniszczenia elementu [122, 109]. Za twórcę podejścia energetycznego w zmęczeniu uważa się Inglis'a, który już w 1927 roku analizował pętle histerezy uzyskane w trakcie badań przy obrotowym zginaniu [45]. W ostatnich latach można zaobserwować duży rozwój kryteriów opartych na parametrze energetycznym, które możemy sklasyfikować w dwóch grupach w zależności od postępu uszkodzenia [72, 82, 81]. Pierwsza grupa dotyczy modeli parametru energetycznego do inicjacji pęknięcia, druga modeli parametru energetycznego w zakresie propagacji pęknięcia. Do kryteriów parametru energetycznego do inicjacji pęknięcia zaliczamy kryteria uwzględniające: gęstość energii odkształcenia plastycznego, gęstość energii odkształcenia sprężystego oraz gęstość energii odkształcenia sprężystego i plastycznego. W grupie kryteriów parametru energetycznego stosowanych w zakresie propagacji pęknięcia możemy wyróżnić kryteria: dla pęknięć wewnętrznie eliptycznych, dla pęknięć przechodzących na wskroś oraz dla pęknięć krawędziowych ćwierć eliptycznych. Propozycja podziału kryteriów parametru energetycznego została przedstawiona na rysunku 3.



Rys. 4. Podział kryteriów parametru energetycznego

2.3.1. Kryteria parametru energetycznego oparte na energii sprężystej odkształcenia

Kryteria gęstości energii odkształcenia sprężystego powstały dzięki dostosowaniu do zmęczenia hipotez statycznych wytrzymałości. Najczęściej weryfikowanym kryterium w testach zmęczeniowych jest hipoteza Hubera-Misesa-Henckyego. Kryterium to zakłada, że energią krytyczną jest energia odkształcenia sprężystego [27].

$$W_f = \frac{1}{2} s_{aij} \cdot e_{aij} = \frac{1}{2} \left[\left(\sigma_{aij} - \frac{1}{3} \sigma_{akk} \delta_{ij} \right) \cdot \left(\varepsilon_{aij} - \frac{1}{3} \varepsilon_{akk} \delta_{ij} \right) \right]. \quad (13)$$

Kryterium gęstości energii odkształcenia sprężystego przyjmuje się za prawidłowe w zakresie wysokocyklowym w przypadkach, gdzie pomija się wpływ składowej plastycznej odkształcenia.

Hipoteza Beltramiiego rozpoznawalna również pod nazwą kryterium odkształcenia objętościowego i postaciowego. Kryterium to zakłada, że o złomie zmęczeniowym decyduje energia odkształcenia całkowitego [27, 106].

$$\phi = \frac{1}{2} \sigma_{aij} \varepsilon_{aij}. \quad (14)$$

Kolejne kryterium opisuje energię odkształcenia obliczaną z mocy chwilowej z zerową wartością średnią, przedstawił Lachowicz [58]. Całkowitą energię odkształcenia całkowaną po czasie można zapisać jako

$$E(t) = \int p(t)dt = \int \sigma_{ij}(t)\dot{\epsilon}_{ij}(t)dt. \quad (15)$$

gdzie:

σ_{ij} - tensor naprężenia,

$\dot{\epsilon}_{ij}$ - tensor prędkości odkształcenia.

Przebieg czasowy mocy chwilowej wyliczany jest z następującej zależności

$$p(t) = \sigma_{ij}(t)\dot{\epsilon}_{ij}(t). \quad (16)$$

Kryterium uśrednionej energii odkształcenia zaproponował Palin – Luc i Lasserre [113] bazując na energii właściwej odkształcenia, która została uśredniona w okresie cyklu T. W przypadku występowania gradientu naprężenia po objętości materiału V*. Autorzy [113] przedstawili kryterium na podstawie średniej w okresie cyklu energii odkształcenia objętościowego

$$\hat{W}_v = \frac{1}{T} \int_0^T \phi_v(t)dt = \left(\frac{1-2\nu}{6E} \right) \frac{1}{T} \int_0^T \sigma_{kk}^2(t)dt. \quad (17)$$

Na podstawie przedstawionych zależności możliwe jest przedstawienie sumy uśrednionych energii odkształceń i energetyczny stopień trójosiowości .

$$\hat{W}_v = \hat{W}_v + \hat{W}_f, \quad (18)$$

$$T_{ED} = \frac{\hat{W}_v}{\hat{W}_v + \hat{W}_f}. \quad (19)$$

Kolejny model użyty do przeprowadzenia analizy porównawczej to model parametru energetycznego według zakresu liniowo-sprężystego przedstawiony w rozdziale 5.4. [116]

$$W_a = 0,5\sigma_a \epsilon_a \quad (20)$$

2.3.2. Kryteria parametru energetycznego oparte na energii plastycznej odkształcenia

Poniższe kryteria opisują energię zgromadzoną w materiale, która uaktywnia się podczas jego pracy przy pomocy odkształcenia plastycznego. Pole pętli histerezy zdefiniowane przez Morrowa [108], który zakłada potęgową zależność pomiędzy amplitudą naprężenia a amplitudą odkształcenia plastycznego, zaproponował model

$$\Delta W_p = \frac{1-n'}{1+n'} \Delta \sigma \Delta \varepsilon_p = \frac{1-n'}{1+n'} \Delta \sigma \cdot 2 \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (21)$$

przy czym jako ΔW_p zdefiniował on energie odkształcenia plastycznego dla jednego cyklu obciążenia. Morrow przedstawił również koncepcję dla materiałów, które nie podlegają prawu Masinga, czyli wraz ze wzrostem liczby cykli uwidacznia się zmiana pętli histerezy i wówczas kryterium przyjmuje postać

$$\Delta W_p = \frac{1-n'}{1+n'} \Delta \sigma \Delta \varepsilon_p + \frac{2n'}{1+n'} \delta \sigma_0 \Delta \varepsilon_p. \quad (22)$$

Wśród kryteriów wieloosiowego zmęczenia często stosowane jest kryterium energii odkształcenia efektywnego Lefebvere'a i innych [62]. Kryterium to zakłada, że o zniszczeniu decyduje energia plastyczna odkształcenia efektywnego cyklu zmęczeniowego

$$\Delta \bar{\sigma} \Delta \bar{\varepsilon}^p = KN_f^c. \quad (23)$$

Zakresy naprężenia i odkształcenia efektywnego wyznaczone są z zależności

$$\Delta \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \Delta s_{ij} \Delta s_{ij}}, \quad (24)$$

$$\Delta \bar{\varepsilon}^p = \sqrt{\frac{2}{3} \Delta \varepsilon_{ij}^p \Delta \varepsilon_{ij}^p}. \quad (25)$$

Stałe K i c wyznaczone są z danych eksperymentalnych w warunkach obciążenia jednoosiowego. Zaproponowane kryterium zostało zweryfikowane na podstawie badań wykonanych dla stali miękkiej 1018 w stanie normalizowanym. Materiał został poddany jednoosiowemu rozciąganiu i czystemu skręcaniu. Prawdliwość kryterium została również stwierdzona na podstawie badań próbek rurowych cienkościennych w warunkach jednoosiowego rozciągania ze skręcaniem.

Kryterium Klimana [51] uwzględnia wpływ wartości średniej naprężenia na energię odkształcenia plastycznego w cyklu. Zaproponowana zależność przyjęła postać

$$\Delta W = 3 \sigma_a \varepsilon_{a_p} = 3 (\sigma'_f - \sigma_m) \varepsilon'_f \left(\frac{\sigma_a}{\sigma'_f - \sigma_m} \right)^{\frac{(b+c)}{b}}. \quad (26)$$

Kryterium energii odkształcenia normalnego i stycznego zostało zaproponowane przez Garuda [30]. Kryterium to zakłada, że energia odkształcenia plastycznego jest równa sumie energii wszystkich składowych stanu naprężenia w cyklu.

$$\Delta W^p = \int_{\text{cykl}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} = AN_f^{\beta}. \quad (27)$$

Halford [40] uznając, że pęknięcie w materiale następuje gdy suma energii odkształcenia plastycznego osiąga wartość krytyczną, porównał ją z energią pochłoniętą w trakcie statycznej próby rozciągania, co opisał zależnością

$$W_f = A(2N_f)^\alpha. \quad (28)$$

Analizując równanie (26) Mroziński i Topoliński [110] proponują zapisać zależność w postaci podwójnie logarytmicznej używając przy tym linii stałych uszkodzeń zaproponowanych w pracy [139]

$$\log \Delta W_{pl} = \alpha \cdot \log(N_f) + K_p \quad (29)$$

Xiao, De i Hao [16] również zmodyfikowali zależność opisaną przez Halford'a

$$\Delta W_f = W'_f (2N_f)^\beta, \quad (30)$$

gdzie

$$W'_f = 4 \frac{1-n'}{1+n'} \sigma'_f \varepsilon'_f. \quad (31)$$

2.3.3. Kryteria parametru energetycznego oparte na energii sprężystej i plastycznej odkształcenia

Najwięcej propozycji opisu parametru energetycznego stanowi grupa kryteriów, która w swym zapisie uwzględnia energię sprężystą i plastyczną odkształcenia. Kryteria te mogą być stosowane w zakresie małej liczby cykli, gdzie mamy do czynienia z energią sprężystą i plastyczną odkształcenia oraz w zakresie dużej liczby cykli kiedy mamy do czynienia tylko z energią sprężystą odkształcenia.

Ellyin [23] w swoich początkowych pracach zaproponował kryterium gęstości energii, w którym za parametr uszkodzenia przy obciążeniach proporcjonalnych założył energię odkształcenia postaciowego cyklu

$$W_f = \int_{\text{cykl}} s_{ij} de_{ij} = \zeta \Delta \bar{\sigma} \Delta \bar{\varepsilon} + \bar{\sigma}_m \Delta \bar{\varepsilon}. \quad (32)$$

W zależności występuje s_{ij} czyli dewiator stanu odkształcenia, który jest sumą odkształceń sprężystych i plastycznych.

Kolejne prace przedstawiają modyfikacje zaproponowanego kryterium. Ellyin wraz z Kujawskim [25] zaproponowali energetyczny parametr zmęczenia Ψ

$$\Psi = \frac{\zeta \Delta \bar{\varepsilon} \Delta \bar{\sigma} \left(1 + \alpha \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \right)}{f(\bar{\rho})}. \quad (33)$$

Ellyin i Gołoś [24] przeprowadzili badania zmęczeniowe, na podstawie których wprowadzili kolejne modyfikacje powyższego modelu (32). W celu wyliczenia energii odkształcenia sprężystego pod uwagę wzięto tylko część tej energii, dla której naprężenie w cyklu jest dodatnie

$$\Delta W^t = \Delta W^p + \Delta W^{e+} = \int_{\text{cykl}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^p + \int_{\text{cykl}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^e. \quad (34)$$

Kryterium to było wielokrotnie udoskonalane w swej ostatecznej formie, opracowanej przez Gołosia i Eshtewa [35], przyjęło postać

$$\Delta W^t = \frac{\kappa(\rho)}{f(\sigma_m)} N_f^\alpha + \frac{C(\rho)}{f(\sigma_m)}. \quad (35)$$

Założenia Ellyina i Gołosia można zaobserwować w kryterium gęstości energii Parka i Nelsona [115]. Kryterium opisuje energię odkształcenia całkowitego i wyróżnia energię obciążenia średniego w cyklu, co zostało opisane poniższą zależnością

$$W = \Delta W_p^d + \Delta W_e^d + \Delta W^h + W_m^h. \quad (36)$$

Gęstość energii w przedstawionym kryterium (36) została porównana z funkcją trwałości zmęczeniowej przyjmującej postać

$$W = AN_f^\alpha + BN_f^\beta. \quad (37)$$

Kryterium (37) stosowane jest w przypadku jednoosiowego stanu naprężenia. Dla potrzeb stanu wieloosiowego zaproponowano rozwiązanie, w którym zastosowano współczynnik wieloosiowości TF_s oraz trójosiowy współczynnik wartości średniej TF_m , a ich wartość jest zależna od naprężenia głównego oraz składowej dewiatora naprężenia

$$TF_s = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)_a}{\sqrt{\frac{3}{8} \Delta s_{ij}}}, \quad TF_m = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)_m}{\sqrt{\frac{3}{8} \Delta s_{ij}}}. \quad (38)$$

Autorzy zaproponowane kryterium (38) weryfikowali w badaniach jedno i dwuosiowych rozciągania, ściskania i skręcania oraz zginania ze skręcaniem dla obciążeń proporcjonalnych i nieproporcjonalnych dla różnych materiałów.

Kryterium sumy energii sprężystej i plastycznej zaproponował Leis [63] z uwzględnieniem wartości średniej obciążenia. Głównym założeniem w kryterium jest fakt, że w warunkach wieloosiowego proporcjonalnego obciążenia zmęczeniowego oraz zmęczenia połączonego z pełzaniem o zniszczeniu w momencie inicjacji pęknięcia decyduje energia wewnętrzna materiału. Zaproponowane kryterium energii odkształcenia objętościowego i postaciowego przyjmuje postać

$$U_T = \int_{\text{cykl}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} . \quad (39)$$

Łagoda i Macha [68] zaproponowali uogólnioną postać kryterium zmęczenia wieloosiowego z rozszerzeniem na zakres obciążeń losowych. Kryterium przyjmuje postać dla stanu granicznego

$$\max_t \{ \beta W_{ns}(t) + \kappa W_n(t) \} = Q . \quad (40)$$

Najczęściej stosowanym kryterium energetycznym jest zależność zaproponowana przez Smitha, Watsona i Toppera [127]. W kryterium (40) energia krytyczna odkształcenia jest traktowana całościowo, a jego ogólną postać przedstawia się następująco

$$\sqrt{\varepsilon_a \sigma_{\max} E} = \text{const} . \quad (41)$$

Jako funkcje wyężenia przyjmuje się zależność opartą na wzorze Mansona-Coffina-Basquina

$$p_{SWT} = \varepsilon_a \sigma_{\max} E = \sigma'_f (2N_f)^{2b} + \sigma'_f \varepsilon'_f E (2N_f)^{b+c} . \quad (42)$$

Bergmann i Seeger [10] uwzględnili w kryterium Smitha, Watsona i Toppera wrażliwość materiału na wpływ wartości średniej naprężenia. Wprowadzając współczynnik k model przyjął postać

$$p_{\text{eff}} = \sqrt{\varepsilon_a (\sigma_a + k\sigma_m) E} . \quad (43)$$

Model parametru energetycznego zaproponowanego przez Pawliczka [29] przyjmuje jako parametr uszkodzenia zmęczeniowego energię rozproszoną w materiale podczas obciążenia W^* którą uzyskuje się

$$W^* = W^e + W^m + W^p . \quad (44)$$

gdzie:

W^e – energia właściwa odkształcenia sprężystego,

W^m – energia odkształcenia sprężystego pochodząca od naprężenia średniego,

W^p – energia właściwa odkształcenia plastycznego.

Energia właściwa odkształcenia sprężystego została wyrażona w postaci

$$W^e = \frac{1}{2} \frac{\Delta\sigma}{2} \varepsilon_e = \frac{1}{2E} \left(\frac{\Delta\sigma}{2} \right)^2 . \quad (45)$$

Energia właściwa odkształcenia sprężystego pochodząca od naprężenia średniego jest wyliczana z zależności

$$W^m = \frac{1}{2} \sigma_m \varepsilon_m = \frac{1}{2E} \Psi(N) \cdot \sigma_m^2 , \quad (46)$$

gdzie $\psi(N) = \gamma^* N^\lambda$.

Energię właściwą odkształcenia plastycznego opisuje zależność

$$W^p = K_1 \Delta\sigma (\Delta\sigma + 2\Psi(N)\sigma_m)^{\frac{1}{n'}} + K_1 \frac{n'}{1+n'} (\Delta\sigma)^{\frac{1+n'}{n'}} - K_1 \frac{n'}{1+n'} (\Delta\sigma + 2\Psi(N)\sigma_m)^{\frac{1+n'}{n'}} + K_1 \frac{n'}{1+n'} (\Delta\sigma + 2\Psi(N)\sigma_m)^{\frac{1+n'}{n'}}, \quad (47)$$

gdzie $K_1 = \frac{2}{(2K')^{\frac{1}{n'}}$.

Kryterium zakłada w przypadku obciążeń złożonych, że naprężenia należy potraktować jako ekwiwalentne, wyznaczone w oparciu o przyjętą hipotezę wyczerpania.

Kryteria energetyczne, które w swym zapisie uwzględniają energię plastyczną i sprężystą odkształcenia zaliczamy do najliczniejszej grupy kryteriów energetycznych. Kolejne wybrane modele energetyczne zostały przedstawione w tabeli 4.

Tabela 4. Wybrane kryteria energetyczne oparte na sumie energii sprężystej i plastycznej odkształcenia

Autor	Rok	Kryterium
Lee i inni [37]	1983	$W^* = W_e^* + W_p^* = \left(\frac{\sigma'_f - \sigma_n^0}{2E} \right)^2 (2N_f)^b + 4(\sigma'_f - \sigma_n^0) \varepsilon'_f \frac{c-b}{c+b} (2N_f)^{b+c}$
Beanantine, Socie [8]	1985	$\varepsilon_a \sigma_a = C(2N_f)^\beta$
Lin [64]	1998	$W_f = W_p + Q + E_o + E_k$
Nitta, Ogata i Kuwabara [111]	1989	$\Delta E_1 = \frac{1}{2} \Delta\sigma_1 \Delta\varepsilon_1 = AN_f^{-\alpha}$ $\Delta E_2 = \Delta\tau_{\max} \Delta\gamma_{\max} = BN_f^{-\alpha}$
Hoffman, Seeger [43]	1989	$P = \sqrt{E\sigma\varepsilon_{1a}}$
Hansel, Engel, Geiger [41]	1993	$\Delta W^{eff} = \Delta W^t - \Delta W^h$
Liu [65]	1993	$\Delta W = \Delta W_n + \Delta W_s = \Delta\sigma_n \Delta\varepsilon_n + \frac{\Delta\tau_n \Delta\gamma_n}{2}$
Chu i inni [15]	1994	$C_{SWT} = 2\tau_{\max} \gamma_a + (\sigma_n)_{\max} (\varepsilon_n)_a$
Glinka i inni [33]	1995	$W^* = \frac{\Delta\sigma}{2} \frac{\Delta\varepsilon}{2} + \frac{\Delta\tau}{2} \frac{\Delta\gamma}{2}$
Rolovic, Tipton [119]	1999	$[\tau_a + f_1(\sigma_n)] \gamma_a + [\sigma_{n,a} + f_2(\sigma_n)] \varepsilon_{n,a} = f_3(N_f)$

**Vwarvani-
Farahani,
Topper**
[142]

$$2000 \quad \frac{1}{\sigma_f \varepsilon_f} (\Delta \sigma_n \Delta \varepsilon_n) + \frac{1}{\tau_f \gamma_f} \left[\Delta \tau_{\max} \Delta \left(\frac{\gamma_{\max}}{2} \right) \right] = f(N_f)$$

2.4. Podsumowanie kryteriów zmęczenia

Kryteria zmęczeniowe przedstawiają i opisują zmiany zachodzące w materiale podczas jego pracy. W zależności od rodzaju parametru decydującego o zniszczeniu w pracy zostały przedstawione kryteria: naprężeniowe, odkształceniowe lub naprężeniowo-odkształceniowe zwane także energetycznymi. W rozdziale 2 został przedstawiony przegląd wybranych, ważniejszych kryteriów zmęczeniowych.

Historycznie jako pierwsze powstały kryteria naprężeniowe. Na przestrzeni lat wraz z rozwojem technik badawczych i ich metod oraz analizy zjawiska zmęczenia kryteria te okazywały się niewystarczające. W stanach jednoosiowego obciążenia opis zmęczeniowego zachowania materiału nie stanowi większych problemów. Dla stanu wieloosiowego obciążenia materiału spotykamy się z wieloma modyfikacjami naprężeniowych kryteriów zmęczeniowych, które pozwalają w lepszy sposób opisać zmęczeniowe zachowanie się materiału. W grupie kryteriów naprężeniowych stosowanych do opisu zakresu wieloosiowego najwięcej jest wyników badań dla obciążeń wieloosiowych cyklicznych i dla tych obciążeń najwięcej jest kryteriów zmęczeniowych. W przypadku obciążeń losowych lub zmienno amplitudowych liczba badań jest znacznie ograniczona, więc i kryteriów jest znacznie mniej. Kryteria naprężeniowe charakteryzuje różnorodność podejść badaczy do ich formułowania, możemy wyróżnić:

- kryteria empiryczne,
- kryteria bazujące na uśrednianiu obciążeń na wszystkich płaszczyznach,
- kryteria w których uśrednia się obciążenia w pewnej objętości,
- kryteria bazujące na płaszczyźnie krytycznej.

Kolejne próby opisu zjawiska zmęczenia doprowadziły do powstania kryteriów odkształceniowych. Najczęściej stosowanymi kryteriami odkształceniowymi są kryteria Mansona-Coffina-Basquina i Ramberga-Osgooda. Jak zostało przedstawione powyżej na energię odkształcenia całkowitego składa się suma energii odkształceń plastycznych i sprężystych. Obie propozycje zostały zobrazowane przez autorów za pomocą charakterystyk odkształceniowych. W przypadku propozycji Mansona-Coffina-Basquina zostały zaprezentowane trzy krzywe, które odpowiednio opisują amplitudy odkształcenia

plastycznego, sprężystego i całkowitego w zależności od liczby cykli do zniszczenia. Propozycja Ramberga-Osgooda przedstawia krzywą cyklicznego odkształcenia zawierającą amplitudę odkształcenia plastycznego i sprężystego. Wykres odkształceniowy zobrazowany został dla odkształcenia w funkcji naprężenia.

Kolejna grupa kryteriów (modeli) w swym zapisie uwzględnia wartość naprężenia i odkształcenia, czyli modele oparte na parametrze energetycznym. W rozdziale 2.3 został zaprezentowany proponowany podział kryteriów energetycznych. W pracy zostały przedstawione wybrane modele do inicjacji pęknięcia. Modele energetyczne należące do grupy modeli stosowanych do inicjacji pęknięcia zostały podzielone ze względu na rodzaj uwzględnionej gęstości energii odkształcenia. Modele energetyczne uwzględniające gęstość energii odkształceń plastycznych stosowane są do obliczeń trwałości zmęczeniowej w zakresie małej liczby cykli, modele bazujące na gęstości energii odkształceń sprężystych stosowane są w obliczeniach wysokocyklowej trwałości zmęczeniowej. Modele bazujące na sumie gęstości energii odkształceń plastycznych i sprężystych posiadają najszersze zastosowanie dla obliczeń trwałości zmęczeniowej zarówno niskocyklowej i wysokocyklowej, stąd też to właśnie ta grupa modeli jest najliczniejsza. Modele energetyczne uwzględniają więcej czynników niż modele naprężeniowe czy odkształceniowe. Przedstawione modele energetyczne były weryfikowane w badaniach zmęczeniowych, co potwierdzało ich zgodność z wynikami doświadczeń [32, 34, 68]. Stosowanie modeli do oceny trwałości zmęczeniowej wymaga znajomości wielu danych uzyskiwanych doświadczalnie. Największy problem stanowi określenie skutecznej procedury obliczeniowej energii odkształceń plastycznych przy wieloosiowych obciążeniach zmiennie-amplitudowych i losowych. Temat ten został szeroko przedstawiony w literaturze. Macha i Sonsino [75] przedstawili obszerny i szczegółowy materiał będący porównaniem i analizą energetycznych modeli zmęczenia wieloosiowego.

3. Czynniki wpływające na wytrzymałość zmęczeniową

Wytrzymałość zmęczeniową zwaną również graniczną liczbą cykli nazywamy największe naprężenie σ_{\max} , przy którym próbka lub element nie ulega zniszczeniu po osiągnięciu umownej granicznej liczbie cykli N_G . Wytrzymałość zmęczeniową ustala się doświadczalnie na podstawie norm [4, 5]. Na wytrzymałość zmęczeniową wpływa wiele czynników nie tylko zewnętrznych ale i wewnętrznych, należą do nich:

- Materiał
- Parametr obciążenia
- Kształt próbki
- Częstotliwość

Analiza wpływu parametru obciążenia oraz kształtu próbki na trwałość zmęczeniową zostanie przedstawiona w kolejnych rozdziałach.

Wymieniając wśród czynników posiadających wpływ na trwałość zmęczeniową materiał mam na myśli jaki materiał został użyty, ale również procesy technologiczne, którym został poddany. Do budowy maszyn i konstrukcji stosowane są materiały różnego rodzaju od stali, żeliwa, stopów aluminium, aż po tworzywa sztuczne i ceramikę. Materiały te posiadają inne trwałości zmęczeniowe i ich zastosowanie jest różne. Istotne jest jak zachowuje się materiał w danych warunkach pracy oraz jaką posiada trwałość zmęczeniową. Materiały możemy podzielić na trzy grupy: cyklicznie osłabiające się, cyklicznie umacniające się i stabilne. Aby stwierdzić, do której z grup należy dany materiał należy przeprowadzić doświadczenie. Doświadczenia prowadzi się przy stałej wartości amplitudy odkształcenia całkowitego ε_c lub dla stałej wartości amplitudy naprężenia cyklu σ_a . Analiza uzyskanych pętli histerezy pozwala określić, do której grupy sklasyfikujemy dany materiał. W przypadku gdy naprężenia szczytowe pętli histerezy sukcesywnie zmniejszają się przy kontroli odkształcenia wówczas materiał ulega cyklicznemu osłabieniu, gdy naprężenia szczytowe sukcesywnie zwiększają się, oznacza to że materiał umocnienia się. W przypadku gdy badania zostały przeprowadzone przy stałej amplitudzie naprężenia analizuje się szerokość pętli histerezy, gdy zwiększa się szerokość pętli histerezy materiał osłabia się, gdy szerokość pętli histerezy zmniejsza się materiał się umacnia. Materiały, w przypadku których naprężenia szczytowe nie zmieniają się oraz szerokość pętli histerezy pozostaje stała lub zmiany te są niewielkie, określane są jako stabilne [52].

Istotna w określeniu trwałości zmęczeniowej jest analiza struktury materiału. Struktura materiału pozwala na określenie budowy materiału: składu chemicznego i strukturę

krystaliczną faz, wielkość i kształtu ziaren poszczególnych faz i ich wzajemne rozmieszczenie oraz stopień zdefektowania sieci krystalicznych i sposób przestrzennego rozmieszczenia defektów [22, 56]. Struktura materiału decyduje o mechanicznych właściwościach i odporności na korozję ale jest zależna od zastosowanych czynników technologicznych w trakcie obróbki materiału. Czynniki technologiczne czyli wszystkie zabiegi posiadające wpływ na stan powierzchni wierzchniej materiału. W technologii obróbki materiału najistotniejszy wpływ ma: obróbka skrawaniem, obróbka plastyczna i odlewnictwo oraz spawanie. Każdy rodzaj i sposób obróbki powierzchni ma wpływ na wytrzymałość zmęczeniową. Obróbka materiału powoduje utworzenie szeregowych wielokrotnych mikrokarbów. W przypadku nieprawidłowo przeprowadzonej obróbki możliwe jest również występowanie rys, siatki spękań czy przypalenia, które istotnie zmniejszają wytrzymałość zmęczeniową materiału [52].

Stan powierzchni wierzchniej na trwałość zmęczeniową można określić przy pomocy współczynnika β_p

$$\beta_p = \frac{Z}{Z_p} , \quad (48)$$

gdzie:

Z – wytrzymałość zmęczeniowa próbki gładkiej,

Z_p – wytrzymałość zmęczeniowa próbki o zmienionym stanie powierzchni.

Istnieje możliwość obróbki polepszającej warstwę wierzchnią materiału, dla których przeprowadza się różne zabiegi mechaniczne, cieplne i cieplno-chemiczne. Wymienione zabiegi istotnie zwiększają wytrzymałość zmęczeniową.

W. A. Kuźmienko [54] w 1963 przedstawił wpływ częstotliwości obciążenia na granicę zmęczenia. Wzrost wytrzymałości materiałów obserwujemy w przypadku podwyższenia częstotliwości obciążenia do 10^3 Hz, lecz wzrost wytrzymałości jest zależny od materiału. W przedziale częstotliwości 5 – 200 Hz wzrost wytrzymałości nie jest większy niż 5 % dlatego też jest on często pomijany. Powyżej częstotliwości 10^4 Hz wytrzymałość zmęczeniowa zmniejsza się, powodem takiego zachowania materiału jest wzrost wartości temperatury i brak możliwości chłodzenia ze względu na efekty korozyjne. Wpływ częstotliwości na trwałość zmęczeniową występują dla częstotliwości ultradźwiękowych (18-24 kHz) [54].

Wpływ częstotliwości obciążenia dla stopu aluminium został przedstawiony w pracy [48]. Autorzy stwierdzili, że trwałość zmęczeniowa w stopie aluminium 2024 jest znacznie większa przy mniejszych częstotliwościach niż dla wyższych częstotliwości. Dla częstotliwości 0,3 Hz trwałość zmęczeniowa była od 30 do 50% niższa niż dla częstotliwości 37 Hz. Jednak

badania dla stopu aluminium 7075 nie wskazywały aż tak dużej różnicy w trwałości zmęczeniowej dla różnych wartości częstotliwości. Hartman i Schijve [42] zauważyli wpływ częstotliwości dla różnych współczynników R. Najnowsza literatura przedstawia wpływ częstotliwości obciążenia na trwałość zmęczeniową w bardziej złożonych stanach i przy różnych innych czynnikach wpływających na trwałość zmęczeniową. W pracy [55] badano poliester wzmacniany włóknem szklanym, który jest stosowany do budowy samolotów, samochodów i łodzi. Materiał został poddany badaniom dla ścinania przy częstotliwości w zakresie od 1 do 10 Hz. Według analizy statystycznej wykonane badania trwałości zmęczeniowej nie są istotne dla zastosowanego zakresu częstotliwości. Autorzy kolejnej pracy [109] poddali badaniom próbki spawane wykonane ze stali Cr-Ni-Mo-V. Badania dla rociągania-ściskania przeprowadzono w zakresie wysokich częstotliwości od 110 Hz do 20 kHz. Wykazano, że miejsca inicjacji pęknięcia i złamania spoiny były zależne od poziomu naprężenia i częstotliwości. Wpływ częstotliwości na trwałość zmęczeniową był inny dla różnych części złącza spawanego.

3.1. Wpływ parametru obciążenia próbki na trwałość zmęczeniową

Obciążenie jest to oddziaływanie siły zewnętrznej na konstrukcję lub jej element. Obciążenia jakie powstają w maszynach oraz ich elementach są obciążeniami zmiennymi w czasie, a ich przebieg określa widmo obciążenia. Parametry obciążenia stosowane w badaniach zmęczeniowych to: naprężenie, odkształcenie i energia.

Nishihara i Kawamoto [114] zaproponowali kryteria naprężeniowe, których postać zależy od stanu materiału i nieproporcjonalności obciążeń. Swoje postulaty potwierdzili badając klepsydryczne próbki wykonane z czterech różnych materiałów: stali 982FA, 5695, duraluminium D-30 oraz żeliwa IC2. Próbki zostały poddane cyklicznemu zginaniu ze skręcaniem z różnymi przesunięciami w fazie i stosunkami amplitud naprężenia. Analiza wyników badań zmęczeniowych wykazała, że dla stali i żeliwa przesunięcie fazy zwiększa granicę wytrzymałości, w przypadku duraluminium wykazano nieczułość na przesunięcie fazy. Autorzy przedstawili kilka modeli energetycznych dla różnych przesunięć faz i dla różnych stanów materiału.

Kryterium McDramid'a [98, 99], wzór (tabela 2) zostało zaproponowane na podstawie analiz literaturowych badań zmęczeniowych dla zginania ze skręcaniem. Autor zauważył, że o uszkodzeniu decyduje płaszczyzna maksymalnego naprężenia stycznego, w której uwzględnia się wpływ naprężeń normalnych. McDramid [101] latami analizował i sprawdzał zaproponowane kryterium, co spowodowało modyfikację tego kryterium. Modyfikacja

polegała na uwzględnieniu wartości średniej naprężenia i koncentratora naprężenia opisanego teoretycznym współczynnikiem kształtu [100]

$$\tau_a = \frac{\left[\tau_{af} - C_1 (K_t \sigma_a)^{1,5} - C_2 \sigma_m^2 \right]}{K_t}, \quad (49)$$

gdzie:

$$C_1 = \frac{\left[\tau_{af} - \left(\frac{\sigma_{af}}{2} \right) \right]}{\left(\frac{\sigma_{af}}{2} \right)^{1,5}}, \quad (50)$$

$$C_2 = \frac{\left(\frac{\sigma_{af}}{2} \right)}{\left(\frac{R_m}{2} \right)^2}. \quad (51)$$

Autor kryterium przeprowadził badania przy nieproporcjonalnym rozciąganiu-ściskaniu z ciśnieniem wewnętrznym oraz z uwzględnieniem wartości średniej naprężenia i różnych częstotliwościach pomiędzy naprężeniami i dla różnych stosunków naprężeń. Badania zostały przeprowadzone dla próbek rurowych wykonanych ze stali EN24T. Najważniejszym wnioskiem z analizy wyników badań autora jest stwierdzenie, że nie można bazować na stałych otrzymanych z testów dla rozciągania-ściskania dla wszystkich rodzajów obciążeń, gdyż wprowadzają błędne wyniki. Wyniki badań zmęczeniowych pozwoliły na kolejną modyfikację kryterium, które uwzględnia efekt anizotropii i wpływ wartości średniej naprężenia [103, 104, 102]

$$\tau_a = C_1 - C_2 \sigma_n^{1,5} - C_3 \sigma_{nm}^2, \quad (52)$$

gdzie:

$$C_1 = \tau_{af}, \quad (53)$$

$$C_2 = \frac{\left[\tau_{af} - \left(\frac{\sigma_{af}}{2} \right) \right]}{\left(\frac{\sigma_{af}}{2} \right)^{1,5}}, \quad (54)$$

$$C_3 = \frac{\left(\frac{\sigma_{af}}{2}\right)}{\left(\frac{R_m}{2}\right)^2}. \quad (55)$$

Autor w modyfikacji równania (51) pomija wpływ wartości średniej naprężenia stycznego ze względu na znikomy jego wpływ na trwałość zmęczeniową.

Kryterium naprężeniowe Sonsino i innych również było wielokrotnie modyfikowane i ulepszone. Sonsino we współpracy z Grubisic przedstawili kryterium opisujące amplitudę naprężenia ekwiwalentnego dla określonej liczby cykli [134, 135]

$$\sigma_{aeq} = \sigma_{ax} \sqrt{\frac{1+K_{tt}}{1+K_{tb}} \left\{ \frac{\tau_{axy}}{\sigma_{ax}} + \left(1 - \frac{\tau_{axy}}{\sigma_{ax}}\right) \left(\frac{\phi - \frac{\pi}{2}}{\frac{\pi}{2}}\right)^2 \right\}}, \quad (56)$$

gdzie: K_{tt} , K_{tb} – teoretyczne współczynniki działania karbu odpowiednio dla skręcania i zginania.

Zaprezentowane kryterium zostało poparte wynikami badań zmęczeniowych przy cyklicznym zginaniu ze skręcaniem, przy przesunięciu kąta fazowego pomiędzy naprężeniami $\phi = 0$ i $\pi/2$. Badania przeprowadzono dla próbek pełnych z karbem, które badano w zakresie $10^4 - 2 \cdot 10^6$ cykli. Analiza wyników badań wykazała, że przesunięcie fazy powoduje wzrost trwałości.

Sonsino [132, 134] analizując zaproponowane kryterium dla kolejnych badań, tym razem dla połączeń spawanych, próbek ze stali St460, zaproponował postać kryterium ekwiwalentnego naprężenia (EESH)

$$\sigma_{eq}(\phi) = \sigma_{aq}(\phi=0) \frac{\tau_{aeq}(\phi)}{\tau_{aeq}(\phi=0)} \sqrt{\frac{1+K_{tb}}{1+K_{tt}} \exp \left[1 - \left(\frac{\phi - \frac{\pi}{2}}{\frac{\pi}{2}}\right)^2 \right]}, \quad (57)$$

gdzie $\sigma_{aeq}(\phi=0)$ wylicza się ze związku

$$\sigma_{eq}(\phi=0) = \sqrt{\sigma_{axx}^2 + \sigma_{ayy}^2 - \sigma_{axx}\sigma_{ayy} + f_s^2 3\tau_{axy}^2}, \quad (58)$$

f_s – współczynnik wyznaczany dla czystego rozciągania lub zginania i skręcania.

Amplitudę ekwiwalentnego naprężenia stycznego τ_{aeq} wyznaczano z zależności

$$\tau_{aeq} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \tau_n(\gamma) d\gamma, \quad (59)$$

gdzie

$$\tau_n(\gamma) = \tau_{axy} [\cos^2(\gamma) - \sin^2(\gamma)] - (\sigma_{axx} - \sigma_{ayy}) \cos(\gamma) \sin(\gamma), \quad (60)$$

gdzie:

γ - jest to kąt pomiędzy osią podłużną próbki, a normalną do płaszczyzny krytycznej.

Kolejne badania Sonsino i Küppers [136, 137] prowadzili dla połączeń spawanych próbek wykonanych ze stopu aluminium AlSi1MgMn-T6. Badania przeprowadzono dla cyklicznych i zmiennie amplitudowych obciążeń proporcjonalnych i nieproporcjonalnych. Zaobserwowano dla obciążeń cyklicznych brak wpływu przesunięcia fazy na trwałość zmęczeniową.

Ciekawą propozycję przedstawił Socie [130], który w swym kryterium przyjął jako funkcje odkształcenia normalnego zależność Mansona-Coffina, uwzględnił w kryterium również postulat Lindleya, który stwierdza, że w płaszczyźnie maksymalnych odkształceń postaciowych jedynie normalne naprężenia średnie mają wpływ na amplitudę odkształcenia postaciowego. Zaproponował modyfikację modelu Browna i Millera

$$\hat{\gamma}_p + \hat{\varepsilon}_{np} + \frac{\hat{\sigma}_{no}}{E} = 1,75 \varepsilon_f' (2N_f)^c. \quad (61)$$

przy czym $\hat{\sigma}_{no}$ - naprężenie normalne do płaszczyzny krytycznej.

Autor weryfikował zaproponowany model podczas badań zmęczeniowych. Badaniom rozciągania-ściskania z jednoczesnym skręcaniem w zakresie zmęczenia niskocyklowego zostały poddane próbki cylindryczne wykonane ze stopu Inconel 718. Analiza badań wykazała, że wartość średnia naprężenia ma wpływ na trwałość zmęczeniową, przy czym nie ma wpływu na orientację płaszczyzny krytycznej [130, 131].

Socie kontynuował badania zmęczeniowe dla rozciągania-skręcania w warunkach obciążeń proporcjonalnych i nieproporcjonalnych. Badania prowadził na próbkach cylindrycznych wykonanych ze stopu Inconel 718 oraz ze stali AISI 304. Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań zaproponował modyfikację kryterium [128]

$$\hat{\gamma}_p + \hat{\varepsilon}_n + \frac{\hat{\sigma}_n}{E} = \gamma_f' (2N_f)^c + \frac{\tau_f'}{G} (2N_f)^b. \quad (62)$$

Na uwagę zasługuje budowa kryterium, w której lewa strona równania opisuje parametr uszkodzenia zdefiniowanego w płaszczyźnie maksymalnego odkształcenia postaciowego. Prawa strona równania przedstawia zapis Mansona-Coffina dla cyklicznego skręcania. Równanie zawiera składową sprężystą odkształceń co oznacza, że kryterium znajduje swoje zastosowanie również dla badań wysokocyklowych, gdzie odkształcenia plastyczne posiadają

nieznaczący wpływ na trwałość zmęczeniową. Wyniki badań dla stopu Inconel 718 były poprawne. Badania stali AISI 304 okazały się niedokładne, autor jako przyczynę wskazywał na dodatkowe umocnienie się materiału przy obciążeniach nieproporcjonalnych, co zostało potwierdzone przez Lee i Chiang'a [61].

Kolejną grupą parametrów obciążenia stosowanych w badaniach zmęczeniowych są parametry energetyczne. Jak już wiemy przedstawiono wcześniej modele parametru energetycznego możemy podzielić ze względu na zawarte w nich rodzaje gęstości energii. Źródła literaturowe przedstawiają niewiele badań wykonanych przy obciążeniach z użyciem parametru energetycznego. W większości prac parametr energetyczny jest obliczany na podstawie wyników badań zmęczeniowych. Jedną z prób przeprowadzenia badań zmęczeniowych przy obciążeniu parametrem energetycznym jest propozycja Będkowskiego i współautorów [11]. Przeprowadzono badania zmęczeniowe stopu aluminium 2024 w zakresie wytrzymałości niskocyklowej przy jednoosiowym stanie obciążenia. Parametr energetyczny, który był kontrolowany w trakcie badań zaproponował Łagoda i Macha [67]. Amplituda parametru energetycznego dla przebiegów cyklicznych naprężeń i odkształceń wyznaczana była z poniższej zależności

$$W_a = \frac{1}{2} \sigma_a \varepsilon_a. \quad (63)$$

Badania prowadzono w zakresie częstotliwości 1-7 Hz. W trakcie badań rejestrowano przebiegi naprężeń, odkształceń oraz parametru energetycznego. Na podstawie uzyskanych wyników badań została przedstawiona energetyczna charakterystyka. Wyniki badań przy kontrolowanym parametrze energetycznym różnią się od wyników badań przy kontrolowanym odkształceniu. Kolejne wyniki badań zostaną przedstawione w niniejszej pracy, które zostały zaprezentowane w artykułach [2, 3, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95].

3.2. Wpływ kształtu próbki na trwałość zmęczeniową

Elementy maszyn i urządzeń posiadają różny kształt i wielkość, bardzo ważne jest aby spełniały one wymaganą trwałość. Dobór kształtu i wielkości elementu pracującego zmęczeniowo jest dobierany na podstawie badań zmęczeniowych. Co pozwala na znaczne wydłużenie czasu pracy maszyny. Wiele wytycznych do projektowania odnajdujemy w normach ISO [46].

Wpływ kształtu próbki jest uwydatniany w przypadku nagłej zmiany przekroju próbki lub w przypadku zmiany przekroju poprzecznego próbki. W przypadku nagłej zmiany przekroju

próbki występuje efekt polegający na spiętrzeniu naprężeń. Wpływ kształtu próbki na trwałość zmęczeniową definiuje współczynnik kształtu karbu α_k

$$\alpha_k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n}. \quad (64)$$

Źródła literaturowe przedstawiają wiele wyników badań dla zginania próbek o różnych kształtach [21]. W dalszej części przeglądu literatury zostaną przedstawione wybrane wyniki badań zmęczeniowych dla zginania.

W pracy [9] zostały zaprezentowane wyniki badań stopu aluminium Al 7075. Próbki do badań zmęczeniowych przy zginaniu posiadały kształt pryzmatyczny o przekroju poprzecznym prostokątnym, a ich geometria została ustalona na podstawie normy ISO 3928 [116]. Przedstawiono wyniki badań dla próbek bez obróbki oraz dla próbek po różnych sposobach młotkowania. Wszystkie sposoby młotkowania zwiększyły wytrzymałość zmęczeniową materiału. Granica zmęczenia materiału nie poddanego obróbką ulepszającym wyniosła 900000 cykli do zniszczenia, w przypadku ulepszenia materiału poprzez młotkowanie granica zmęczenia wzrosła do 1100000 cykli.

Autorzy kolejnej pracy [143] badali innowacyjne półprzewodniki, które swoje zastosowanie znalazły w przemyśle chłodniczym/grzewczym. W pracy [143] przedstawiono wyniki badań dla zginania próbek o przekroju poprzecznym prostokątnym posiadającym niewielki otwór czyli kanał do przepływu cieczy w półprzewodniku. Badania czteropunktowego zginania przeprowadzono w temperaturze pokojowej, 120°C oraz 200°C. Badanym materiałem był stop aluminium AA5083-H111. Badania zmęczeniowe przeprowadzono, na 4 poziomach naprężenia, dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$ przy częstotliwości 10 Hz.

Przedstawiona w pracy charakterystyka S-N wskazuje, że najwyższą wytrzymałość posiadał materiał poddany badaniu w temperaturze pokojowej. Charakterystyki materiału badanego w różnych temperaturach zbliżają się do siebie dla poziomu naprężenia $\sigma_{\max} = 100$ MPa. Na podstawie przedstawionych wyników badań stwierdza się, że wraz ze wzrostem naprężenia maleje wpływ temperatury na trwałość zmęczeniową.

Zhai i inni [146] przedstawili pracę, w której analizowano wyniki badań zmęczeniowych własne i literaturowe. Materiałem badanym i z literatury był stop aluminium Al-Li 8090. Na podstawie analiz numerycznych stwierdzono, że prawidłowo rozstawione rolki zginające powinny być od siebie oddalone o 6 mm, natomiast rolki podtrzymujące o 30 mm. Badania przeprowadzono dla 13 próbek o szerokości 10 mm i długości 36,5mm. Siedem z nich posiadało grubość 4,1 mm pozostałe posiadały grubość w przedziale od 2 do 6 mm. Przedstawione wyniki badań wskazują, że próbki o grubości mniejszej niż 3 mm posiadają

niższą trwałość (około 55%) i próbki te ulegały zniszczeniu w pobliżu rolek obciążających, natomiast próbki grubsze ulegały zniszczeniu pomiędzy rolkami obciążającymi. Wyniki badań próbek o grubości 4,1 mm zostały porównane z wynikami badań literaturowych. Badania literaturowe zostały przeprowadzone w zakresie 250-380 MPa, na 6 poziomach naprężenia. Wyniki badań przedstawione przez autorów dotyczyły zakresu 250-500 MPa dla 7 poziomów naprężenia. Zaproponowana w pracy [146] metoda prowadzenia badań okazała się prawidłowa. Wyniki badań własnych oraz wyniki literaturowe posiadają dużą zgodność.

Celem kolejnej pracy [124] jest przedstawienie procedury analitycznej w celu oceny własności statycznych dla zastosowanej koncepcji trybu mieszanego rozkładu Weibulla [140]. Przedstawiono wyniki badań zginania stali łożyskowej SUJ2, dla próbek okrągłych. Badania prowadzono do inicjacji pęknięcia i uszkodzenia całkowitego. Wytrzymałość zmęczeniowa dla tego materiału wynosi 10^7 cykli. Przedstawiono dwie krzywe w układzie S-N. W przypadku badań dla inicjacji pęknięcia widocznej na powierzchni materiału wykreślono charakterystykę przyjmującą model dwuliniowy S-N [123], Druga krzywa S-N dla wewnątrz inicjowanego złamania wykreślono przyjmując model regresji liniowej. Wyniki badań potwierdziły, że stal ta posiada dwie różne krzywe S-N odpowiadające różnym rodzajom uszkodzenia. Materiał był poddany badaniom w zakresie naprężenia 800-2100 MPa. Badania do inicjacji pęknięcia przeprowadzono dla 10^3 - 10^7 cykli do zniszczenia. Natomiast całkowitemu zniszczeniu materiał ulegał w zakresie 10^5 - 10^9 cykli.

Htoo A. T. i inni [44] przedstawili wyniki badań stopu aluminium 2024-T4, które poddano rozciąganiu. Badano dwa rodzaje próbek: gładkie okrągłe oraz próbki z karbem typu U. Badania próbek gładkich i próbek z karbem przeprowadzono dla $R=0,1$ i $R=0,5$. Autorzy przy pomocy parametru Smitha-Watsona-Toppera (SWT) drogą obliczeniową przewidywali trwałość zmęczeniową. Wyniki badań eksperymentalnych wskazują, że największą trwałość posiadały próbki gładkie poddane badaniom dla $R=0,1$. Próbki te badano w zakresie naprężeń $\sigma_a = 180$ - 220 MPa, które ulegały zniszczeniu od 12000 cykli i więcej. Próbki z karbem poddane rozciąganiu dla $R = 0,1$ posiadały znacznie niższą trwałość w szczególności dla niższych wartości naprężenia. Próbki te badano w zakresie naprężeń $\sigma_a = 100$ - 190 MPa, które ulegały zniszczeniu od 9000 cykli wzwyż. Inną trwałość posiadały próbki gładkie okrągłe badane dla $R = 0,5$, które ulegały zniszczeniu w zakresie $\sigma_a = 90$ - 140 MPa, ich trwałość wyniosła w zależności od poziomu naprężenia od 7000 cykli wzwyż. Najniższą trwałość posiadały próbki z karbem dla $R = 0,5$, które badano w zakresie naprężeń $\sigma_a = 60$ - 160 MPa, a ich trwałość wynosiła od 1000 do 10^7 cykli. Otrzymany wykres S-N dla próbek z karbem jest

nieliniowy czego przyczyną jest rozwój odkształceń plastycznych. Przewidywana trwałość zmęczeniowa przedstawiona przy pomocy parametru SWT była zbliżona z wynikami obliczeniowymi.

3.3. Podsumowanie czynników wpływających na wytrzymałość zmęczeniową

W niniejszym rozdziale został przedstawiony wpływ wybranych czynników na trwałość zmęczeniową. Podczas pracy elementów cyklicznie, istnieje wiele więcej czynników wpływających na trwałość zmęczeniową, takich jak: działanie karbu i wrażliwość materiału na jego działanie czy wpływ warunków pracy. Celem przedstawionego stanu wiedzy w niniejszej pracy jest określenie wpływu parametrów obciążenia i kształtu próbki na trwałość zmęczeniową. Z przeglądu stanu wiedzy określającego wpływ parametrów obciążenia na trwałość zmęczeniową wynika, że istnieje wiele badań i ich analiz pokazujących wpływ obciążenia parametrem naprężeniowym czy odkształceniowym. Dla parametru energetycznego w literaturze została przedstawiona tylko jedna praca [67]. Z badań dotyczących różnych parametrów obciążenia wynika, że w celu weryfikacji modelu parametru obciążenia należy wykonać wiele różnych badań czego potwierdzeniem są wielokrotne modyfikacje zaproponowanych modeli parametrów obciążenia. W literaturze również występują propozycje uwzględniające w modelach różne współczynniki i wartości naprężenia średniego. Na podstawie przeprowadzonych badań zmęczeniowych McDramid stwierdził, że niepoprawne jest bazowanie na stałych materiałowych otrzymanych z testów rozciągania-ściskania dla wszystkich rodzajów obciążeń. Natomiast Sonsino i Küppers stwierdzili brak wpływu przesunięcia fazy na trwałość zmęczeniową dla obciążeń cyklicznych badanego materiału. Badacze przedstawiają wiele propozycji obciążenia różnymi parametrami: naprężeniowymi, odkształceniowymi i nieliczne energetycznymi. Ogrom różnych badań dla różnych materiałów przedstawionych przez autorów doprowadził do podziału modeli również ze względu na rodzaj materiału stosowanego w badaniach. W celu weryfikacji poprawności prowadzonych badań i zadanych parametrów odkształcenia analizuje się wyniki badań dla różnych modeli obliczeniowych. Niestety nie przedstawiono jeszcze uniwersalnego modelu do obliczeń określonego parametru. Propozycja prowadzenia badań dla obciążenia parametrem energetycznym jest skomplikowana, a na drodze do wykonania badań eksperymentalnych stoi wiele przeszkód. Autorzy prac [85, 86, 92, 67] przedstawiają propozycję prowadzenia badań w warunkach obciążenia parametrem energetycznym. Wyniki badań zmęczeniowych dla obciążenia parametrem energetycznym to

kolejny krok w rozwoju technik badawczych i dokładniejszego szacowania trwałości zmęczeniowej maszyn i ich elementów. Propozycja metodyki prowadzenia badań przy obciążeniu parametrem energetycznym zostanie przedstawiona w dalszych rozdziałach niniejszej pracy.

Określenie wpływu kształtu próbki (elementu) stanowi większy problem. Dane literaturowe przedstawiają liczne porównania wyników badań próbek z różnego typu karbami na trwałość zmęczeniową [44, 26, 112]. W celu określenia wpływu kształtu należałoby przeprowadzić badania w identycznych warunkach pracy próbek o różnych kształtach. W niniejszej pracy zostały przedstawione pozycje literaturowe, które przedstawiają wyniki badań różnych materiałów dla różnych kształtach próbek, jedynie w pracy [89] został przedstawiony wpływ kształtu próbek na trwałość zmęczeniową z tego samego materiału i w tych samych warunkach pracy.

Bardzo ważnym aspektem przy projektowaniu maszyn jest odpowiednie dobranie kształtów elementów. Maszyny mają za zadanie nie tylko posiadać wysoką sprawność ale także czas ich eksploatacji powinien być jak najdłuższy. Dlatego też już w czasie projektowania minimalizuje się najczęstsze przyczyny uszkodzeń eksploatacyjnych (zmęczeniowych). W celu zmniejszenia ryzyka uszkodzenia zmęczeniowego minimalizuje się ilość karbów, spawów, złączy, itp. Kształty elementów dobierane są w taki sposób aby trwałość zmęczeniowa była jak najdłuższa. Dobre elementy weryfikowane są na podstawie analiz symulacji komputerowych, a następnie w eksploatacji.

W rozdziale 3.2 przedstawiono wybrane prace prezentujące badania zmęczeniowe różnych próbek wykonanych z różnych materiałów. W każdej z zaprezentowanych prac przedstawiony był inny problem trwałości zmęczeniowej. Z przeglądu literaturowego wynika, że nie ma uniwersalnej charakterystyki zmęczeniowej materiału. Praca [9] dotyczy ważnego aspektu zwiększania trwałości zmęczeniowej poprzez proces młotkowania. Zaprezentowane wyniki badań obrazują różne trwałości zmęczeniowe próbek o tym samym kształcie wykonanych z aluminium Al7075 dla obróbki młotkowaniem. Materiał wykazał się znacznie niższą trwałością w przypadku próbek nie poddanych procesowi młotkowania. W przypadku młotkowania próbek granica zmęczenia wzrosła o 200000 cykli w porównaniu do tych samych próbek nie poddanych obróbce młotkowaniem [9]. Autorzy kolejnej pracy [143] przedstawili wpływ temperatury na trwałość zmęczeniową wraz ze wzrostem naprężenia. Następnie Zhai i inni zaobserwowali wpływ grubości próbki na trwałość zmęczeniową. Na podstawie uzyskanych wyników badań wykazano, że próbki o grubości poniżej 3 mm

posiadają trwałość niższą o 55% od próbek o grubości 4,1 mm. W Kolejnej pracy przedstawiono jak wpływa stopień uszkodzenia na charakterystyki zmęczeniowe materiału. Przytoczone w pracy czynniki wpływające na trwałość zmęczeniową materiałów przedstawiają jak szeroki i skomplikowany jest to problem. Na materiał może jednocześnie wpływać kilka czynników, które w znaczący sposób zmniejszają ich trwałość. Problem czynników zewnętrznych i wewnętrznych wpływających na trwałość zmęczeniową wymagają dalszej analizy i opisów w celu zmniejszenia zagrożeń jakie mogą powodować.

4. Cel, zakres i teza pracy

Głównym *celem* pracy jest zaprezentowanie innowacyjnej metody prowadzenia badań zmęczeniowych przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego, którą porównano z amplitudą momentu zginającego dla próbek o przekroju poprzecznym okrągłym i kwadratowym wykonanych ze stali C45 i stopu aluminium 2024.

Zakres pracy:

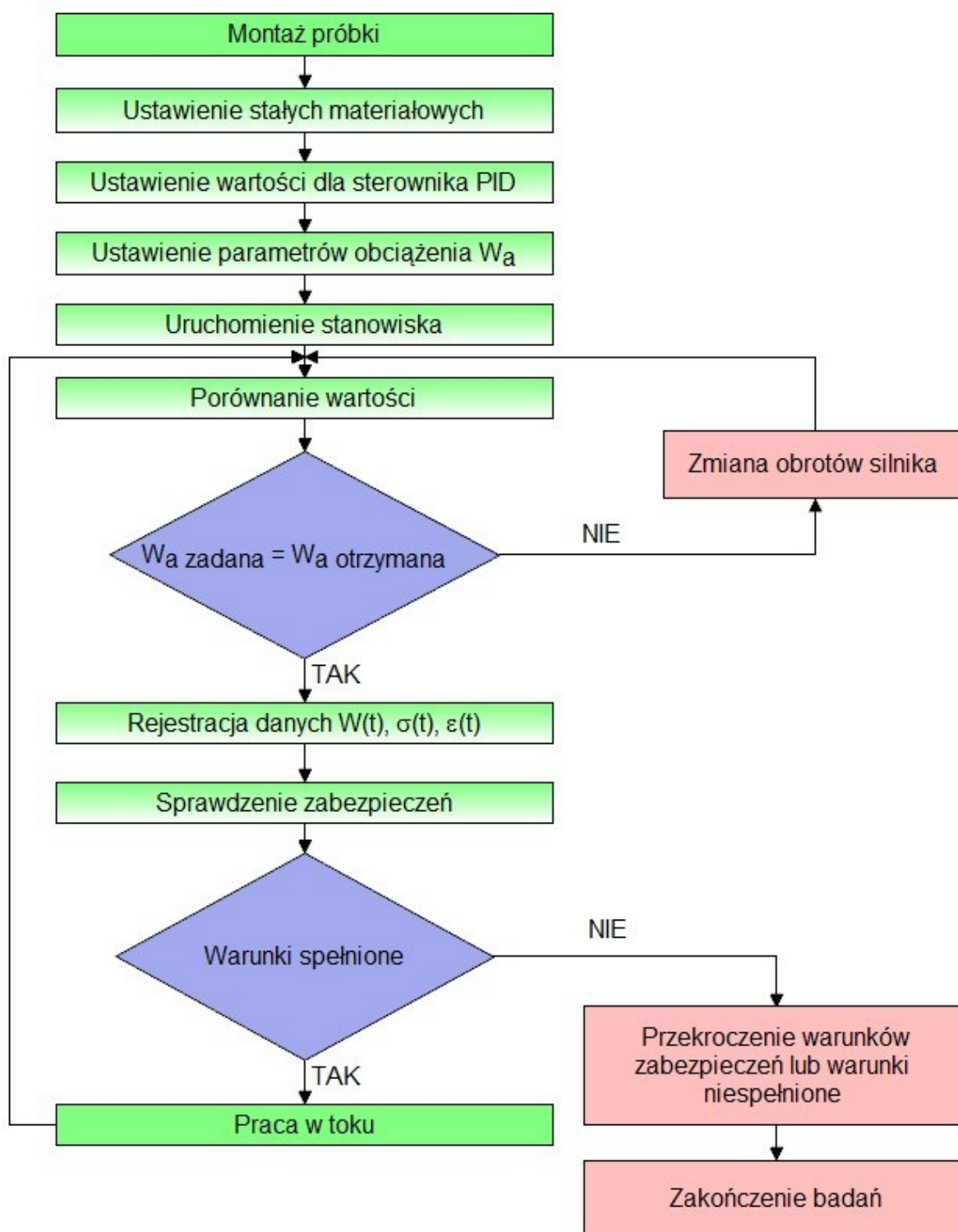
- przegląd i analiza zasobów literaturowych dotyczących zmęczeniowych modeli naprężeniowych, odkształceniowych i energetycznych,
- omówienie czynników wpływających na wytrzymałość zmęczeniową w szczególności wpływu obciążenia i kształtu próbki,
- przedstawienie metodyki badań (badane materiały, kształt próbki oraz maszyna zmęczeniowa),
- zaprezentowanie obliczeń numerycznych,
- przedstawienie wyników badań zmęczeniowych,
- omówienie wpływu zastosowanego obciążenia na trwałość zmęczeniową,
- omówienie wpływu kształtu próbki na trwałość zmęczeniową,
- weryfikacja wyników badań przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego z wybranymi modelami energetycznymi,
- analiza złomów zmęczeniowych,
- sformułowanie wniosków.

Teza pracy

Istnieje możliwość prowadzenia zmęczeniowych badań doświadczalnych zarówno przy sterowaniu parametrem naprężeniowym jak i energetycznym.

5. Metodyka badań

Zaprezentowane w pracy wyniki badań były zrealizowane według schematu blokowego, który został przedstawiony na rysunku 5. Schemat przedstawia proces postępowania w trakcie badań, w którym pierwszym krokiem jest montaż próbki. Kolejny krok to wprowadzenie do programu stałych materiałowych takich jak: moduł Younga E , współczynniki K' i n' cyklicznej krzywej rozciągania. Następnie ustawiane były wartości parametrów regulatora PID czyli wartość współczynnika wzmocnienia k_p , czasu całkowania T_i i czasu różniczkowania T_d , których sposób doboru zostanie przedstawiony w rozdziale 5.6. Kolejny krok to wprowadzenie do programu sterującego pracą maszyny wartość parametru energetycznego W_a . Po ustawieniu powyższych parametrów zostaje uruchomione stanowisko. W celu sprawdzenia czy wprowadzone wartości zostały odpowiednio zadane i prawidłowo została zamontowana próbka kontroluje się wartość zadaną, rejestrowaną parametru energetycznego. Co zostało przedstawione w bloku decyzyjnym schematu blokowego (rys. 5). Jeżeli bieżąca wartość parametru energetycznego jest różna od wartości zadanej, wówczas program wprowadza zmiany w obrotach silnika i powraca się do bloku porównywania wartości. Gdy wartość bieżąca parametru energetycznego jest równa wartości zadanej następuje rejestracja danych pomiarowych $W(t)$, $\sigma(t)$ i $\epsilon(t)$. Jeżeli maszyna zostaje wyłączona poprzez wyłącznik bezpieczeństwa w przedstawionym schemacie pojawia się kolejny blok decyzyjny, który mówi o sprawdzeniu zabezpieczeń. Jeżeli warunki początkowe nadal są spełnione wówczas następuje dalszy ciąg pracy stanowiska począwszy od etapu porównania wartości. Jeżeli warunki zabezpieczeń są przekroczone lub niespełnione, następuje zakończenie badań, próbka została uszkodzona.



Rys. 5. Schemat blokowy prowadzenia badań zmęczeniowych przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego

5.1. Struktura i własności badanego materiału

Badania doświadczalne zostały przeprowadzone dla stali C45 (przedstawiona w normie PN-EN 10083 z 2006 r.) i stopu aluminium 2024 (przedstawiona w normie PN-EN 754-2 stare oznaczenie stopu aluminium PA7) [79, 117, 120].

Stal C45 jest to stal węglowa konstrukcyjna o wyższej jakości, ogólnego przeznaczenia, wysokiej wytrzymałości i znacznej ciągliwości. Materiał ten jest powszechnie stosowany na części maszyn średnio obciążone i odporne na ścieranie np. osie, wały, wrzeciona, koła zębate, piasty do kół, tarcze, drążki, walce, wirniki pomp, itp. Skład chemiczny materiału został przedstawiony w tabeli 5, a w tabeli 6 przedstawiono właściwości statyczne badanego materiału.

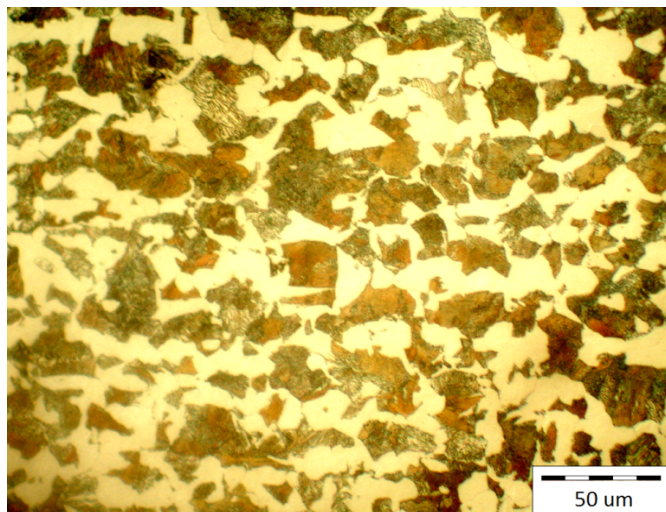
Tabela 5. Skład chemiczny stali C45 (w %)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Fe
0,46	0,73	0,24	0,015	0,009	0,05	0,09	0,2	0,02	reszta

Tabela 6. Właściwości statyczne stali C45

σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	E (GPa)	A ₅ (%)
547	739	215	17,5

Stal C45 posiada strukturę ferrytyczno perlityczną przedstawioną na rysunku 6.



Rys. 6. Struktura stali C45 w powiększeniu 50 razy

Drugim badanym materiałem jest stop aluminium 2024 (duraluminium), który charakteryzuje bardzo niska odporność na utlenianie i wysokie właściwości wytrzymałościowe. Jest materiałem niespawalnym oraz średnio poddającym się procesom obróbki. Materiał ten

zalicza się do grupy materiałów cyklicznie umacniających się. Stop 2024 stosowany jest na przekładnie, wały, śruby, tłoki, sprzęgła, części samolotów, zaworów hydraulicznych i elementy komputerów oraz sprzęt ortopedyczny. Skład chemiczny materiału został przedstawiony w tabeli 7, a w tabeli 8 przedstawiono właściwości statyczne badanego materiału.

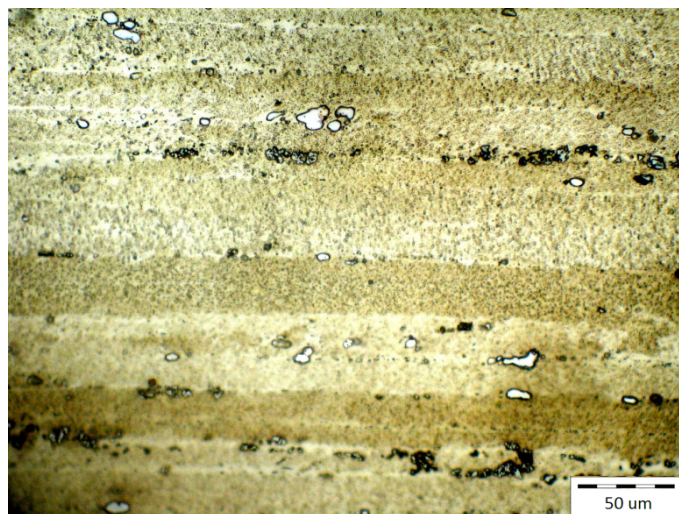
Tabela 7. Skład chemiczny stopu aluminium 2024 (w %)

Cu	Mn	Zn	Mg	Fe	Cr	Si	Ti	Al
4,40	0,62	0,08	1,70	0,25	0,01	0,13	0,05	reszta

Tabela 8. Właściwości statyczne stopu aluminium 2024

σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	E (GPa)	A ₅ (%)
432	552	77.5	12

Stop aluminium 2024 jest roztworem stałym α posiadającym liczne wydzielenia faz międzymetalicznych CuAl₂, Al₃Mg₂, Al₆Mn, jak również ciemne wydzielenia fazy zawierającej żelazo Cu₂FeAl, rozmieszczone pasmowo głównie na granicach ziaren (rys. 7).



Rys. 7. Struktura stopu aluminium 2024 w powiększeniu 50 razy

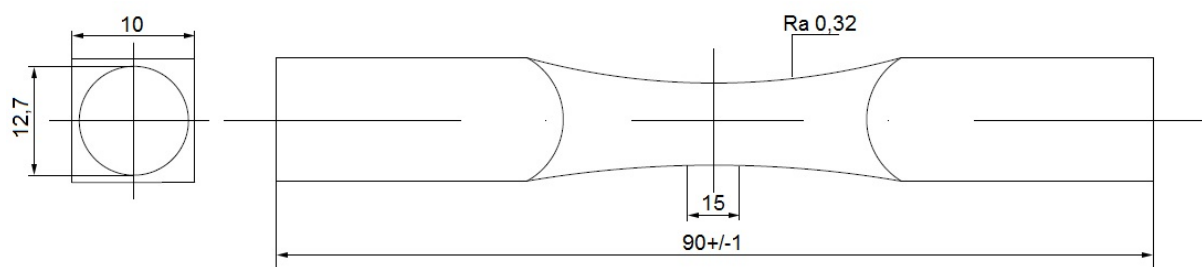
Materiałem wyjściowym do wykonania próbek był pręt ciągniony w stanie normalizowanym o średnicy 20 mm dla stali C45 i stopu aluminium 2024.

Przedstawione materiały zostały wybrane ze względu na ich dużą różnorodność. Swoje zastosowanie znajdują w różnych elementach maszyn. Posiadają różne właściwości statyczne oraz inny skład chemiczny. Dzięki różnorodności badanych materiałów istnieje możliwość

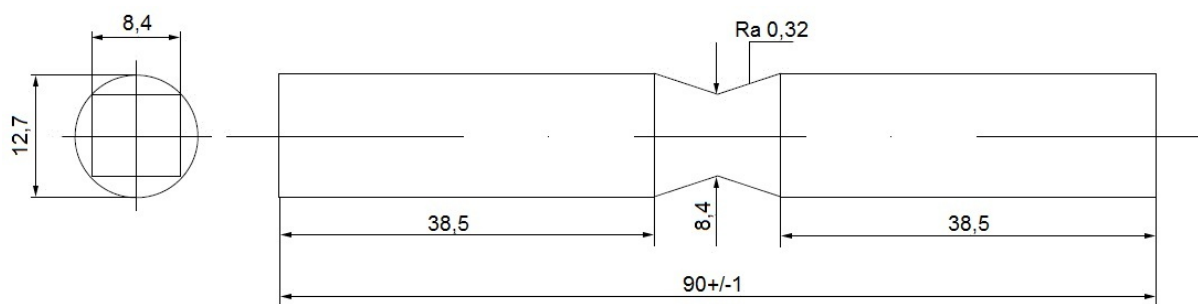
stwierdzenia czy przedstawiony w niniejszej pracy sposób prowadzenia badań umożliwia badanie różnych materiałów.

5.2. Próbki do badań

Badania zmęczeniowe zostały przeprowadzone dla próbek o przekroju poprzecznym okrągłym (rys. 8) i kwadratowym (rys. 9). Powierzchnię próbek szlifowano i polerowano.



Rys. 8. Kształt i wymiary próbki do badań zmęczeniowych o przekroju poprzecznym okrągłym



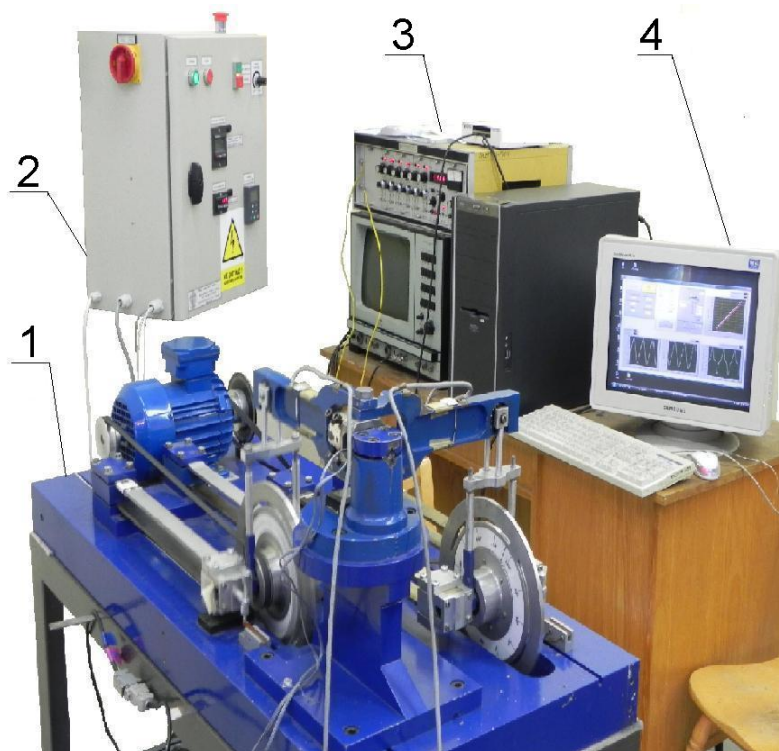
Rys. 9. Kształt i wymiary próbki do badań zmęczeniowych o przekroju poprzecznym kwadratowym

Kształt badanych próbek został dobrany na podstawie wskaźnika przekroju poprzecznego próbki, który dla obu próbek posiada zbliżoną wartość.

5.3. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze umożliwia prowadzenie badań, cyklicznych (sinusoidalnych), materiałów konstrukcyjnych poddanych różnym kombinacją obciążeń zginająco-skręcających. Na rysunku 10 zostało przedstawione stanowisko badawcze, które składa się z maszyny zmęczeniowej MZGS-100Ph – (1), (2) – szafy sterowniczej, (3) – mostka tensometrycznego, (4) – komputera. Szafa sterownicza (2) będąca elementem stanowiska badawczego posiada włącznik i wyłącznik zasilania elektrycznego maszyny, wskazuje wartość częstotliwości pracy, zamontowany jest również ręczny przemiennik częstotliwości

(potencjometr) oraz licznik do zliczania liczby cykli. Wewnątrz szafy sterowniczej zamontowany został falownik. Mostek tensometryczny (3), służący do pomiaru odkształcenia. W praktyce mostek tensometryczny pokazuje wartość odkształcenia, na podstawie którego (dla zakresu liniowego) wyliczana jest wartość naprężenia [3].



Rys. 10. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze składa się z trzech podzespołów: obciążającego, napędowego oraz kontrolno-pomiarowego. Maszyna zmęczeniowa MZG-100Ph została przedstawiona na rysunku 11. Silnik (1) swą prędkość obrotową przy pomocy przekładni zębatych pasowych (2) przekazuje do podzespołu obciążającego na wibratory (3), które osadzone są na sprężynach (4) a te przykręcone są do łoża maszyny (5). Ciężarki są przymocowane do wibratorów, które podczas ruchu obrotowego wywołują drgania, a te poprzez cięgna (6) przenoszone są na dźwignie (7) i (8) wywołując obciążenie na próbce (9). Próbka zamocowana jest w maszynie jednym końcem w uchwycie ruchomym (10), a drugim końcem w uchwycie stałym (11). Na próbce i dźwigni zostały przyklejone tensometry, które umożliwiły rejestrację przebiegu odkształcenia. Na podstawie rejestrowanych wartości odkształcenia wyliczano wartość naprężenia według modelu Łagody-Machy (opisanego w rozdziale 5.4), co pozwoliło na uzyskanie i kontrolę stałej wartości parametru energetycznego według modelu Machy i współpracowników (model opisany w rozdziale 5.4). Podzespół

kontrolno pomiarowy rejestrował w trakcie badań przebieg amplitudy naprężenia, odkształcenia, parametru energetycznego i pętli histerezy.

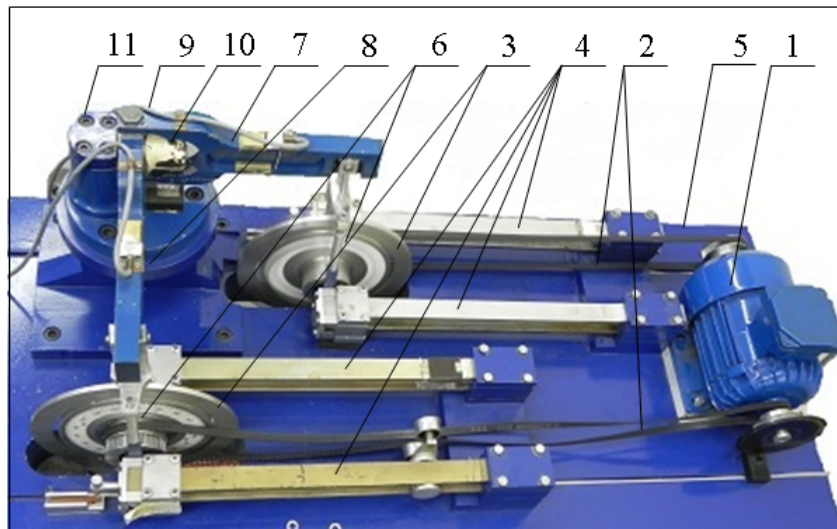
Drgania dźwigni wywołane są przez odśrodkowe siły bezwładności pochodzące od ciężarków przymocowanych do wirujących wibratorów (3). Amplituda momentu zginającego M_a jest równa iloczynowi długości ramienia dźwigni l i wypadkowej siły bezwładności B zestawu ciężarków tarczy

$$M_a = B \cdot l . \quad (65)$$

Wartość wypadkowej siły bezwładności B zależy od masy m ciężarków przymocowanych do tarczy, promienia tarczy r , ich położenia od osi obrotu, kwadratu prędkości kątowej ω oraz kosinusa kąta δ i ich wzajemnego rozstawienia:

$$B = \frac{1}{2} m \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \sqrt{2(l + \cos \delta)} \quad (66)$$

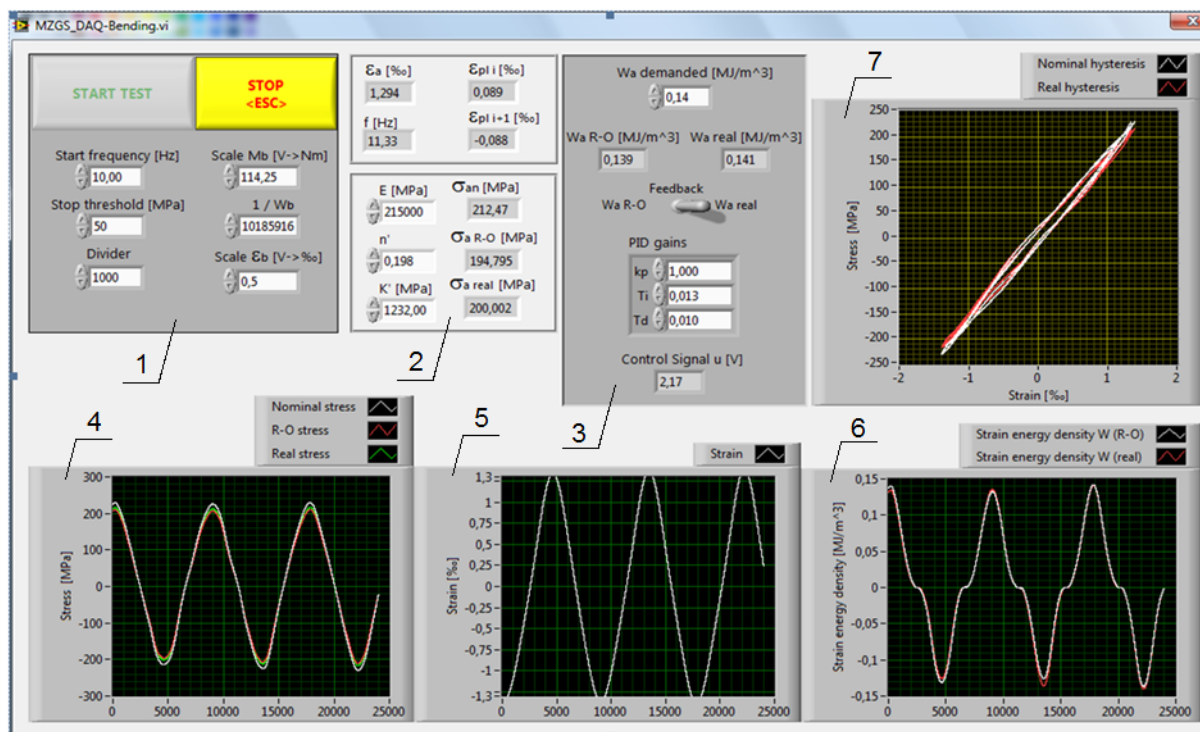
Ze wzoru (66) wynika, że siłę bezwładności B zmieniać można przez zmianę masy ciężarków m , zmianę kąta ich rozchylenia δ oraz częstość obrotów ω . W trakcie badań możliwa jest jedynie zmiana częstości obrotów silnika, którą umożliwia falownik zmniejszając wartość napięcia [2].



Rys. 11. Maszyna zmęczeniowa MZGS-100Ph

Program sterujący pracą maszyny został stworzony w środowisku LabVIEW. Interfejs programu sterującego został przedstawiony na rysunku 12. W bloku pierwszym (1) określone zostają warunki pracy maszyny, wprowadzone są minimalne parametry pracy maszyny, przeliczniki skali rejestrowanych parametrów oraz współczynnik kształtu badanej próbki

($1/W_b$). Blok drugi (2) umożliwia wprowadzenie danych materiałowych takich jak: moduł Younga – E , wykładnik umocnienia cyklicznego – n' oraz współczynnik cyklicznego odkształcenia K' . W bloku tym w trakcie realizacji badań wyświetlane są wartości odkształcenia całkowite oraz odkształcenia plastycznego, możliwa jest obserwacja wartości częstotliwości pracy maszyny. W bloku trzecim (3) znajduje się regulacja parametrów PID i możliwe jest prowadzenie badań z parametrami jak i bez nich. Parametry PID to nastawy regulatora proporcjonalnego współczynnika wzmocnienia k_p , czasu całkowania T_i i czas różniczkowania T_d . Przeprowadzono procedurę doboru regulatora PID, która została przedstawiona w rozdziale 5.5. W trakcie badań rejestrowane są wartości naprężenia nominalnego i rzeczywistego, których przebieg można obserwować w bloku (4), a w bloku (5) przebieg odkształcenia, natomiast blok (6) przedstawia przebieg parametru energetycznego w funkcji czasu $t = n\Delta t$, gdzie: n – liczba wartości dyskretnych przebiegu, $\Delta t = 1,2987 \cdot 10^{-5}$ s – okres próbkowania. Podczas pracy maszyny istnieje możliwość obserwacji przebiegu pętli histerezy – blok (7). Na rys. 12 widoczne są dwie pętle histerezy: naprężenie nominalne w funkcji odkształcenia (pętla biała) oraz naprężenie rzeczywiste w funkcji odkształcenia (pętla czerwona).



Rys. 12. Interfejs programu sterującego

5.4. Parametr energetyczny

W trakcie prowadzenia badań przy użyciu tensometrów mierzono wartość odkształcenia ε_{LB} dla dźwigni zginającej. Na podstawie uzyskanych odkształceń wyliczono naprężenia nominalne stosując równanie

$$\sigma_n(t) = \frac{M_B(t)}{W} \quad (67)$$

gdzie

W – wskaźnik wytrzymałości przekroju próbki na zginanie.

Na podstawie statycznego obciążenia dźwigni momentem zginającym M_B oraz pomiaru odkształceń ε na dźwigni zginającej po przeprowadzeniu cechowania zostały ustalone liniowe zależności

$$M_B(t) = K_B \varepsilon_{LB}(t) \quad (68)$$

gdzie

K_B – współczynnik proporcjonalności.

Powyższe zależności umożliwiają przedstawienie modelu w postaci

$$\sigma_n(t) = \frac{K_B}{W} \varepsilon_{LB}(t) = \sigma_{an} \sin \omega t \quad (69)$$

gdzie

ω - częstość obrotowa kołowa wibratora.

Powyższy związek (67) jest proponowany w zakresie odkształceń sprężystych, natomiast w zakresie odkształceń sprężysto-plastycznych rzeczywiste naprężenia $\sigma(t)$ są mniejsze od nominalnych naprężeń $\sigma_n(t)$ wyliczonych ze wzoru (69). Naprężenie $\sigma(t) \leq \sigma_n(t)$, co wynika z charakterystyki cyklicznego odkształcenia opisanej równaniem Ramberga-Osgooda.

Jednym ze sposobów obliczania amplitudy rzeczywistych naprężeń σ_a na podstawie amplitudy nominalnych naprężeń σ_{na} jest zależność energetyczna Łagody - Machy

$$\frac{\sigma_{na}^2}{2E} = \frac{\sigma_a^2}{2E} + \frac{1-n'}{1+n'} \sigma_a \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (70)$$

Wyliczona na podstawie powyższego równania (69) amplituda rzeczywistego naprężenia σ_a umożliwia wyliczenie wartości parametru energetycznego.

Macha i Słowik [74] zaproponowali model parametru energetycznego $W(t)$, który wyraża się połową iloczynu wartości naprężenia $\sigma(t)$ i wartości bezwzględnej z różnicy odkształceń, wyznaczonych przez odejmowanie od bieżącej wartości (zmiennego w czasie t)

odkształcenia $\varepsilon(t)$ jego wartości ε_i^{pl} ustalonej w chwili t_i , w której naprężenie $\sigma(t_i)$ przyjęło wartość odkształcenia plastycznego ε_{i+n}^{pl} ustalonego w chwilach t_{i+n} , w których naprężenie $\sigma(t_{i+n})$ przyjmuje ponownie wartości równe zero, gdzie $n = 1, 2, 3, \dots$

Przebieg w czasie parametru energetycznego oblicza się według następującego wzoru

$$W(t) = 0,5\sigma(t) \cdot |\varepsilon(t) - \varepsilon_i^{pl}| \quad (71)$$

gdzie

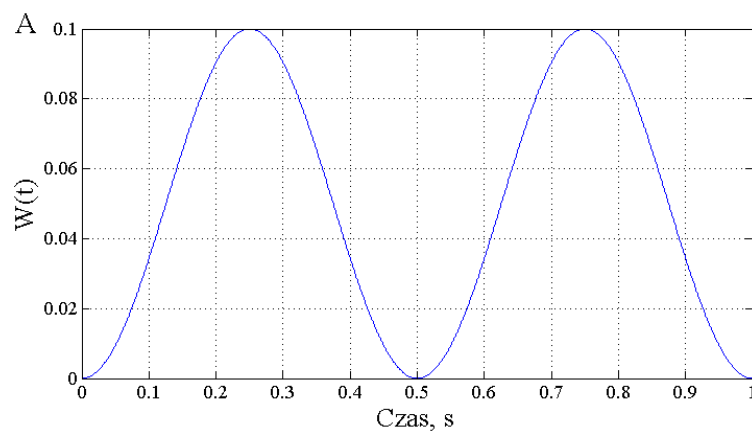
$$\varepsilon_i^{pl} = \varepsilon(t_i) \text{ gdy } \sigma(t_i) = 0.$$

Przedstawiony przez Machę i Słowika model parametru energetycznego, który opisuje zmęczeniowe zachowanie się materiałów przy obciążeniach losowych i znacznych odkształceniach plastycznych zawiera oryginalną myśl. Sposób wyznaczania energetycznej charakterystyki zmęczeniowej materiałów konstrukcyjnych zastrzeżono w Urzędzie Patentowym RP [73].

W przypadku cyklicznego obciążenia oraz braku odkształceń plastycznych w materiale, amplituda parametru energetycznego W_a według równania (71) przyjmuje postać parametru energetycznego według modelu dla zakresu liniowo-sprężystego

$$W_e = 0,5\sigma_a \cdot \varepsilon_a \quad (72)$$

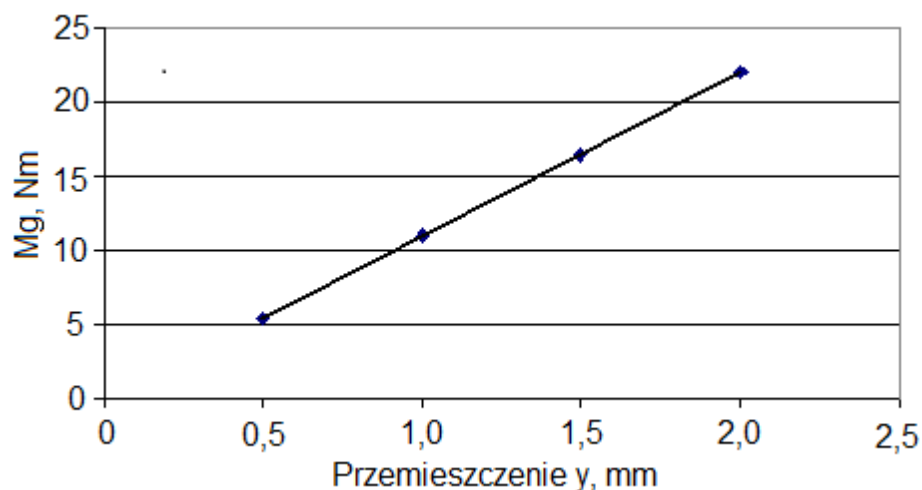
Wartość bezwzględna uwzględniona w modelu parametru energetycznego Machy i Słowika pozwala na prowadzenie badań zmęczeniowych dla wartości dodatnich i ujemnych parametru energetycznego. Model dla zakresu liniowo-sprężystego umożliwia prowadzenie badań tylko dla dodatnich wartości parametru energetycznego. Na rysunku 13 zostały przedstawione przykładowe przebiegi parametru energetycznego A – według zależności dla zakresu liniowo-sprężystego (72) i B – według modelu Machy i Słowika (71).



ruchomy uchwyt, 4 – dźwignia zginająca z naklejonymi tensometrami, 5 – przegub, 6 – ciągnio, 7 – wibrator zginający, 8 – uchwyt wibratora, 9 – tensometry naklejone na sprężynie, 10 – sprężyna wibratora, 11 – podstawa maszyny, 12 – bezkontaktowy czujnik przemieszczeń

Do pomiaru przemieszczeń y dźwigni zginającej (4) w przegubie (5) i uchwytu wibratora (8), które na sztywno połączone są ciągnem (6), zastosowano bezdotykowy czujnik przemieszczeń (12) typu WLM45-UMTL-LiU5x2-0,3-PSG4M przytwierdzony do podstawy (11). Do pomiarów statycznych sygnałów z czujników w zespole obciążającym momentem zginającym M_g użyto próbki walcowej o średnicy 10 mm wykonanej ze stali C45. Pomiarów statycznych prowadzono przy obciążeniu dźwigni zginającej z zawieszonymi ciężarkami o znanych masach. Prowadzono pomiary odkształceń próbki ε_{pr} , odkształceń dźwigni, przedstawiających zmiany momentu zginającego M_g oraz pomiary przemieszczeń y uchwytu wibratora – równoważne przemieszczeniom przegubu dźwigni.

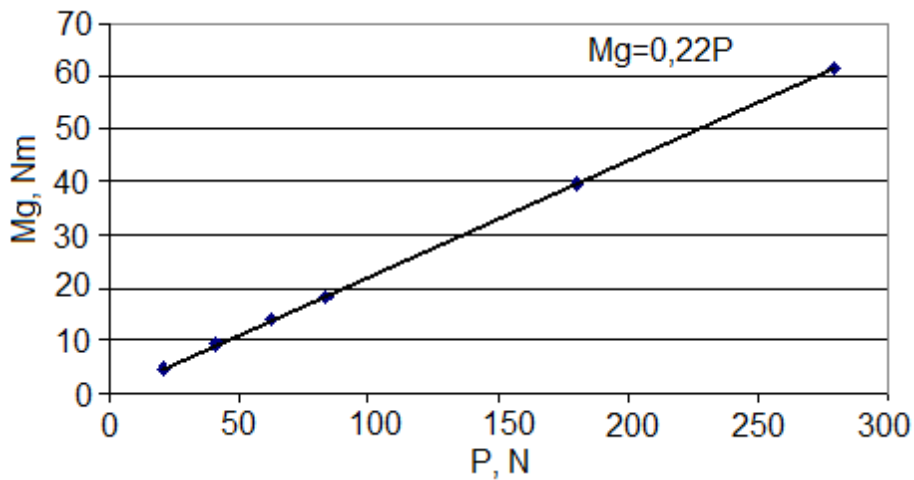
Na rysunku 15 została przedstawiona zależność pomiędzy momentem zginającym M_g , a statycznym przemieszczeniem y wybranego punktu dźwigni zginającej. Liniowa zależność momentu M_g od przemieszczenia y potwierdza zakładaną na etapie projektowania dźwigni jej dużą sztywność na zginanie.



Rys. 15. Zależność pomiędzy momentem zginającym M_g , a statycznym przemieszczeniem dźwigni zginającej

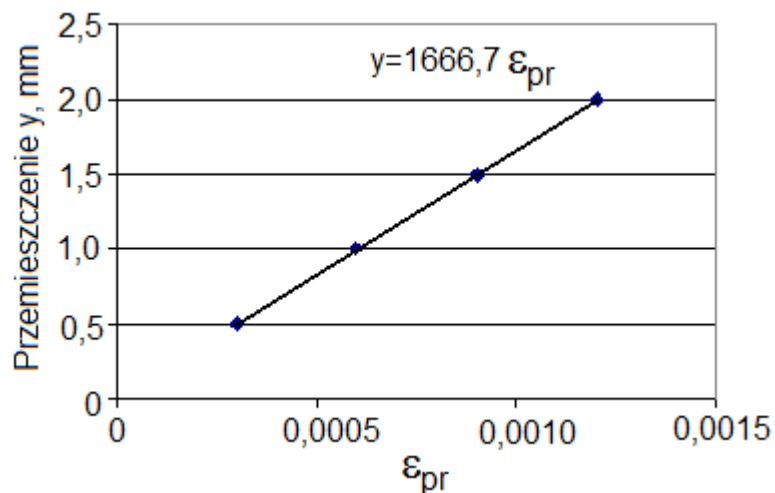
Duża sztywność na zginanie dźwigni wynika również z liniowej zależności pomiędzy momentem zginającym M_g (wyznaczonym z pomiarów odkształceń dźwigni), a obciążeniem (siłą) P zadawanym ciężarkami o znanych masach (rys. 16). Przeskalowany sygnał odkształceń dźwigni przedstawia więc zmiany momentu zginającego M_g i w konsekwencji –

po uwzględnieniu wskaźnika przekroju na zginanie – przebieg nominalnych naprężeń w próbce.



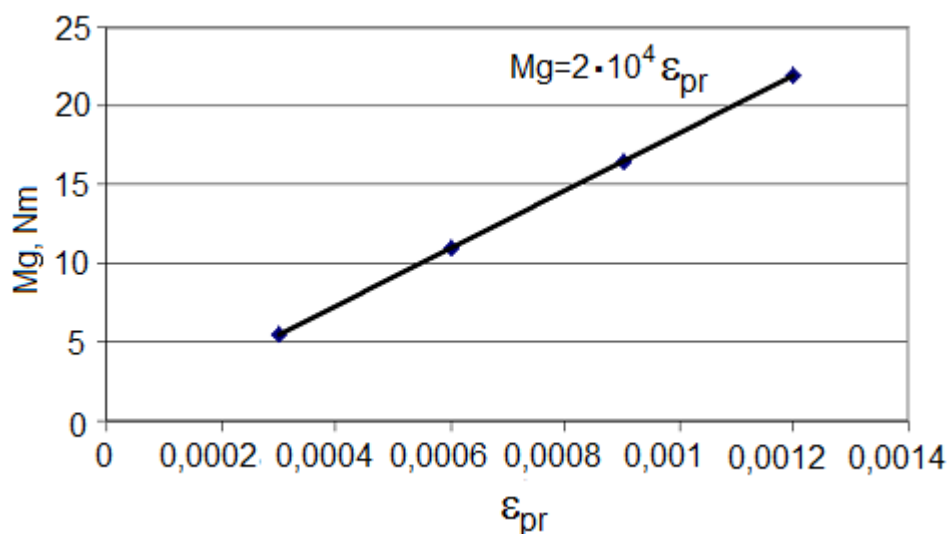
Rys. 16. Zależność momentu zginającego próbkę M_g (wyznaczonego z pomiarów odkształceń dźwigni) od obciążenia P

Na rysunku 17 przedstawiono zależność pomiędzy wynikami pomiarów przemieszczeń y dźwigni, a odkształceniami próbki ϵ_{pr} . Liniowa zależność tych wielkości pozwala używać przeskalowanego sygnału przemieszczeń dźwigni (lub uchwytu wibratora) do wyrażenia odkształceń wzdłużnych próbek bez potrzeby naklejania na każdej z nich tensometrów o bardzo małej bazie pomiarowej, przy zachowaniu tych samych rozmiarów geometrycznych próbek, niezależnie od rodzaju badanego materiału konstrukcyjnego.



Rys. 17. Przemieszczenie dźwigni zginającej y w zależności od odkształcenia wzdłużnego próbki ϵ_{pr} przy statycznym zginaniu momentem M_g

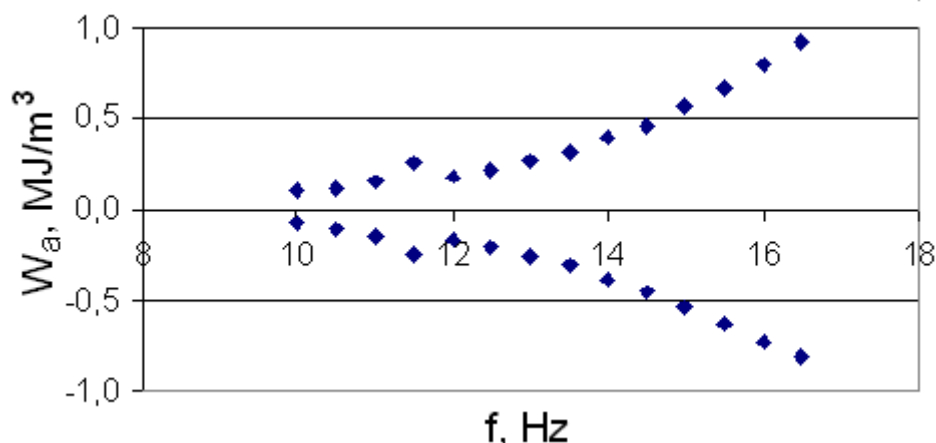
Zmierzono również liniową zależność pomiędzy statycznym zginaniem momentem M_g , a odkształceniem próbki ε_{pr} , którą pokazano na rysunku 18. Ta zależność przestanie być liniowa w przypadku wystąpienia sprężysto-plastycznych odkształceń próbki.



Rys. 18. Zależność pomiędzy statycznym zginaniem momentem M_g , a sprężystym odkształceniem próbki ε_{pr}

5.6. Regulator PID

Dla ustalonego rozmieszczenia ciężarków przymocowanych do tarczy wibratora bezwładnościowego i dla przyjętego materiału, z którego wykonane zostały próbki do badań, zadana wielkość amplitudy parametru energetycznego W_a jest zależna od częstotliwości drgań wibratora. Na rys. 19 zostały przedstawione wyniki pomiarów amplitudy parametru energetycznego przy zginaniu W_a w zależności od częstotliwości drgań wibratora f . Obserwuje się silną nieliniową zależność wiążącą te wielkości. Można zaobserwować, że małe zmiany częstotliwości drgań wibratora f wywołują bardzo duże zmiany amplitudy parametru energetycznego W_a . Dla częstotliwości drgań wibratora bezwładnościowego przekraczających 16 Hz, próbki wykonane ze stali C45 w krótkim czasie intensywnie się nagrzewały.



Rys. 19. Zmiany amplitudy parametru energetycznego przy zginaniu W_a w zależności od zmian częstotliwości drgań wibratora bezwładnościowego f

Nieliniowa zależność amplitudy parametru energetycznego W_a od częstotliwości drgań wibratora bezwładnościowego f znacznie utrudniła dobór właściwych nastaw parametrów regulatora PID. Sprawdzanie poprawnej pracy układu sterującego przy zginaniu i nastaw parametrów regulatora PID wykonywano z użyciem próbek ze stali C45 i stopu aluminium 2024.

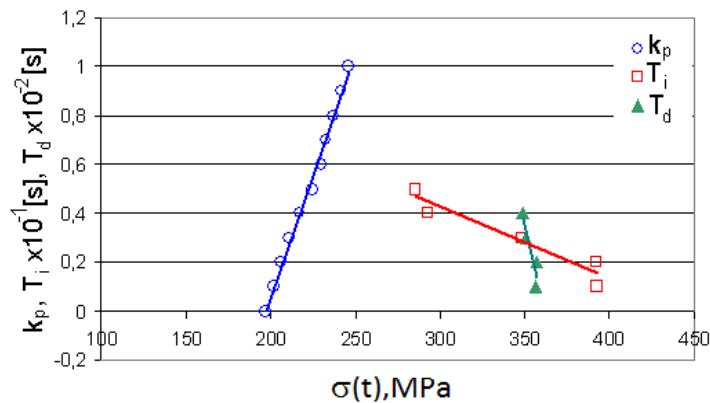
Regulator PID stosowany jest w układzie regulacji i składa się z trzech członów: proporcjonalnego k_p , całkującego T_i i różniczkującego T_d . Człon proporcjonalny regulatora odpowiedzialny jest za zmniejszenie błędów statystycznych i zmniejsza czas regulacji. Człon całkujący (całka z sygnału uchybu) likwiduje całkowicie błędy statystyczne i znacznie wydłuża czas regulacji oraz może spowodować wyjście poza granice stabilności. Człon różniczkujący (pochodna z sygnału uchybu) występuje tylko w stanach przejściowych i powoduje zmniejszenie czasu regulacji przez przyspieszenie początkowej fazy procesu przejściowego.

Źródła literaturowe przedstawiają kilka metod strojenia regulatora PID mianowicie: strojenie ręczne, metodę Zieglera-Nicholsa, metodę Cohena-Coona oraz strojenie poprzez specjalistyczne oprogramowanie [13, 50, 57, 138]. Strojenie ręczne regulatora PID nie wymaga narzędzi matematycznych i umożliwia strojenie regulatora podłączonego do obiektu. Metodę tę możemy podzielić na trzy etapy. Pierwszy etap pozwala ustawić wartość członu proporcjonalnego przy zerowych wartościach członu całkującego i różniczkującego. Wielkość członu proporcjonalnego ustala się poprzez zwiększanie jego wartości aż do momentu wystąpienia oscylacji, a jego wartość powinno przyjąć się w połowie wartości powodującej oscylację. Drugi etap to dobranie odpowiedniej wartości członu całkującego przy dobranej już wartości członu proporcjonalnego i zerowej wartości członu różniczkującego. Człon

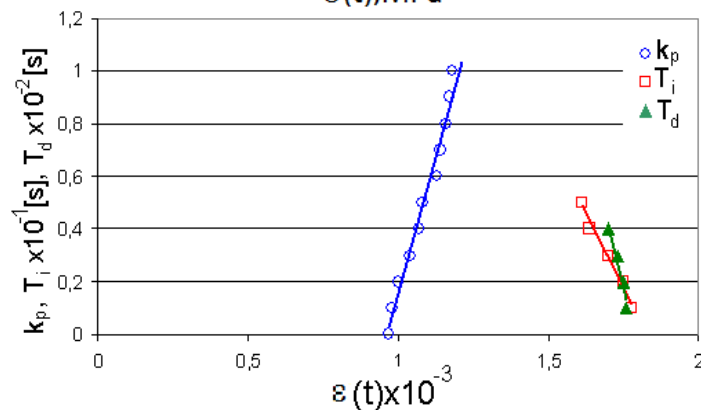
całkujący zostaje ustalony ze względu na najdłuższą stabilizację zadanych parametrów (zbyt wysoka wartość doprowadza do niestabilności). Trzeci etap to ustalenie wartości członu różniczkującego, jego wielkość dobiera się przy ustalonych wcześniej wartościach k_p i T_i poprzez jego zwiększanie aż do momentu odpowiednio szybkiego osiągnięcia nastaw sterujących. Metoda Zieglera-Nicholsa jest to metoda typu online zapewnia dobre tłumienie zakłóceń i powoduje duże przeregulowania przy skokowych zmianach wartości zadanych. Wadą tej metody są zaburzenia procesu oraz ofensywne strojenie jak i brak dobrych wskaźników jakości. Zaletą tej metody jest uzyskanie stabilności układu regulacji. Metoda Cohena-Coona jest metodą typu offline i należy ją stosować w przypadku procesów wykorzystujących dynamikę pierwszego rzędu. Strojenie wykorzystujące specjalistyczne oprogramowanie może być zastosowane w systemie online lub offline i pozwala na wykonanie symulacji przed wdrożeniem. Dobór regulatorów PID na potrzeby przedstawionych w pracy wyników badań został wykonany metodą ręczną [90].

Na rysunku 20 zostały przedstawione tendencje zmian poszczególnych członów k_p , T_i , T_d . Na podstawie rys. 20 można zauważyć dla naprężenia σ_a , odkształcenia ϵ_a i parametru energetycznego W_a podobne zachowanie członu regulatora k_p , natomiast T_i , T_d wykazują podobne tendencje dla ϵ_a , W_a , które różnią się dla naprężenia σ_a . Nachylenie krzywych członu k_p , we wszystkich badanych przypadkach, przyjmuje dodatnie wartości, członów T_i , T_d ujemne wartości.

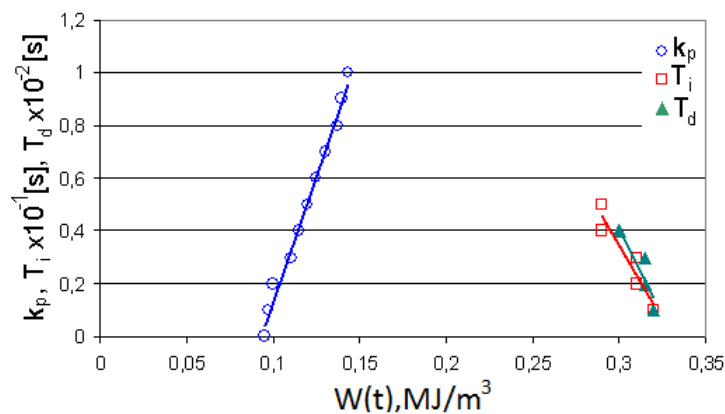
a)



b)



c)



Rys. 20. Zmiany parametru k_p , T_i , T_d w funkcji: a) naprężenia σ_a , b) odkształcenia ε_a , c) parametru energetycznego W_a

Analizy doboru regulatora PID wskazują, że dla zmiany wartości członu proporcjonalnego k_p od 0 – 1 następuje wzrost wartości naprężenia, odkształcenia i parametru energetycznego. Nachylenie krzywej członu k_p , we wszystkich badanych przypadkach, przyjmuje dodatnie wartości. Zmieniając czas całkowania i różniczkowania od zera do określonej wartości zadanej obserwuje się zmniejszanie wartości naprężenia, odkształcenia i parametru energetycznego. Nachylenie krzywych T_i , T_d przyjmuje ujemne wartości i wykazuje podobne tendencje dla ε_a , W_a . Natomiast dla naprężenia σ_a krzywa T_i różni się. Przeprowadzone wstępne badania zmęczeniowe pozwoliły na dobranie najlepszych wartości regulatorów PID wynoszących odpowiednio: $k_p = 0,5$, $T_i = 0,02$ s, $T_d = 0,001$ s.

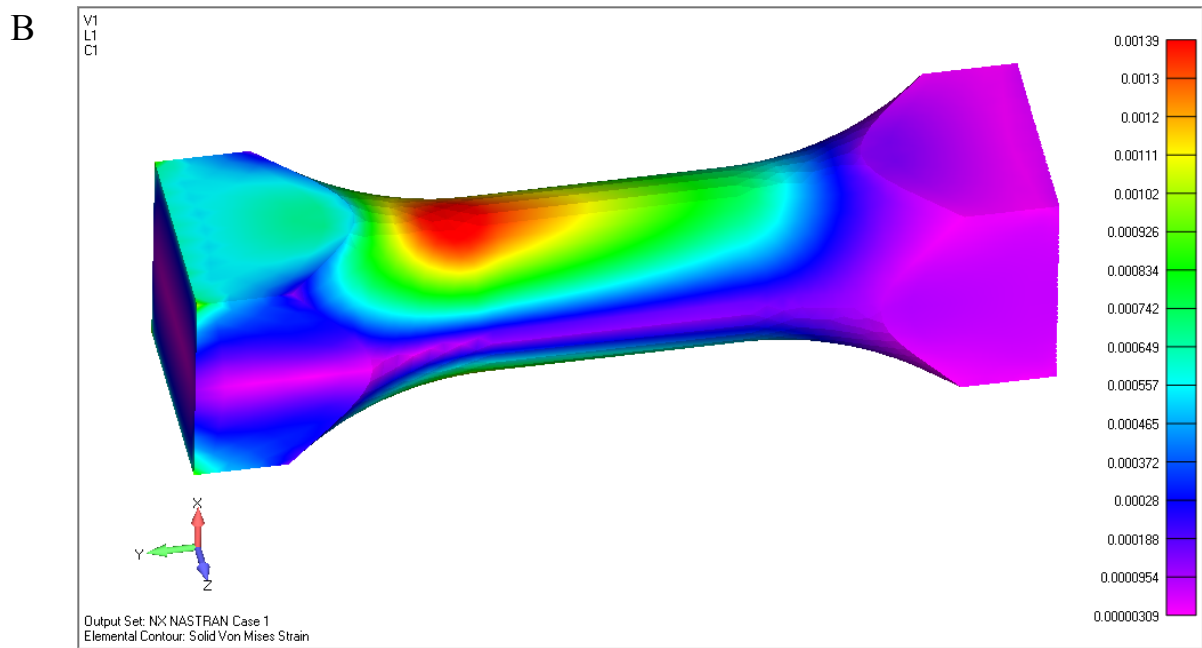
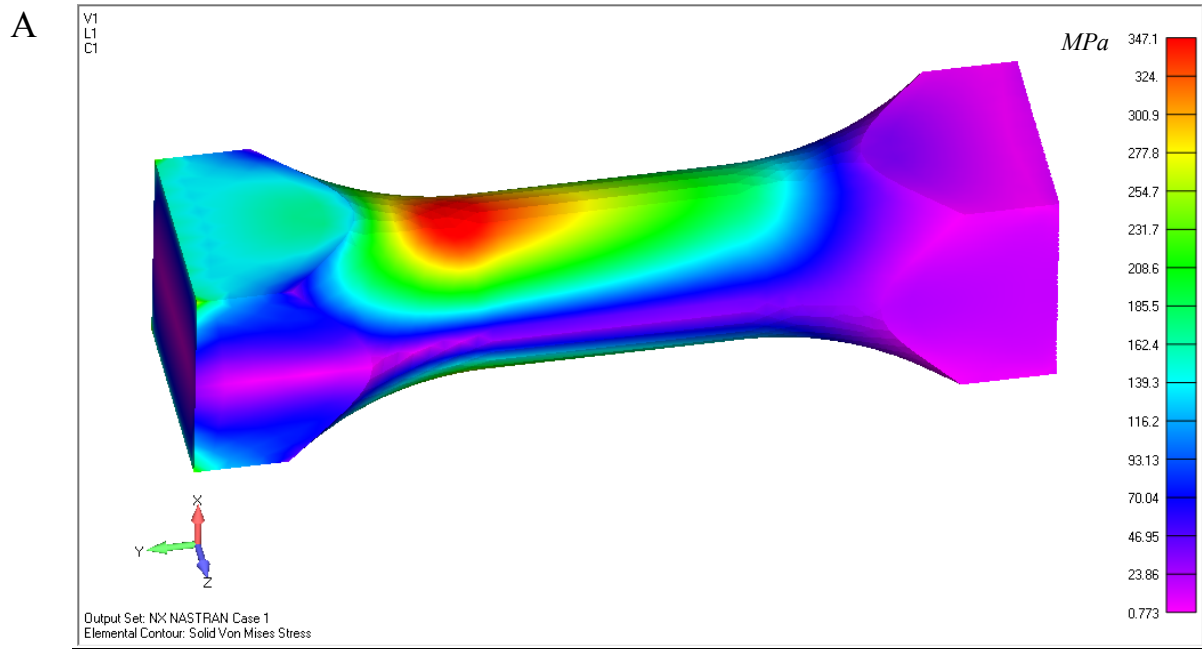
6. Obliczenia numeryczne

W programie Femap przeprowadzono obliczenia numeryczne próbek o przekroju poprzecznym okrągłym i kwadratowym (przedstawionych w rozdziale 5.2.). Modele geometryczne próbek wykonano w programie Catia, a obliczenia w Femap. Obliczenia przeprowadzono z uwzględnieniem stałych materiałowych dla stali C45 i stopu aluminium 2024. Obliczenia numeryczne zostały przeprowadzone na modelach próbek poddanych zginaniu. Na zamodelowane próbki nanoszona była siatka elementów skończonych składająca się z trójkątów o długości boku 0,9 mm. Model geometryczny próbki został utwierdzony jednym końcem, a na drugim końcu zadawana była siła na ramieniu 0,05 m, która odpowiadała momentom gnącym zgodnie z tabelą 9. Obliczenia numeryczne zostały przeprowadzone w celu określenia miejsc występowania największych naprężeń i odkształceń

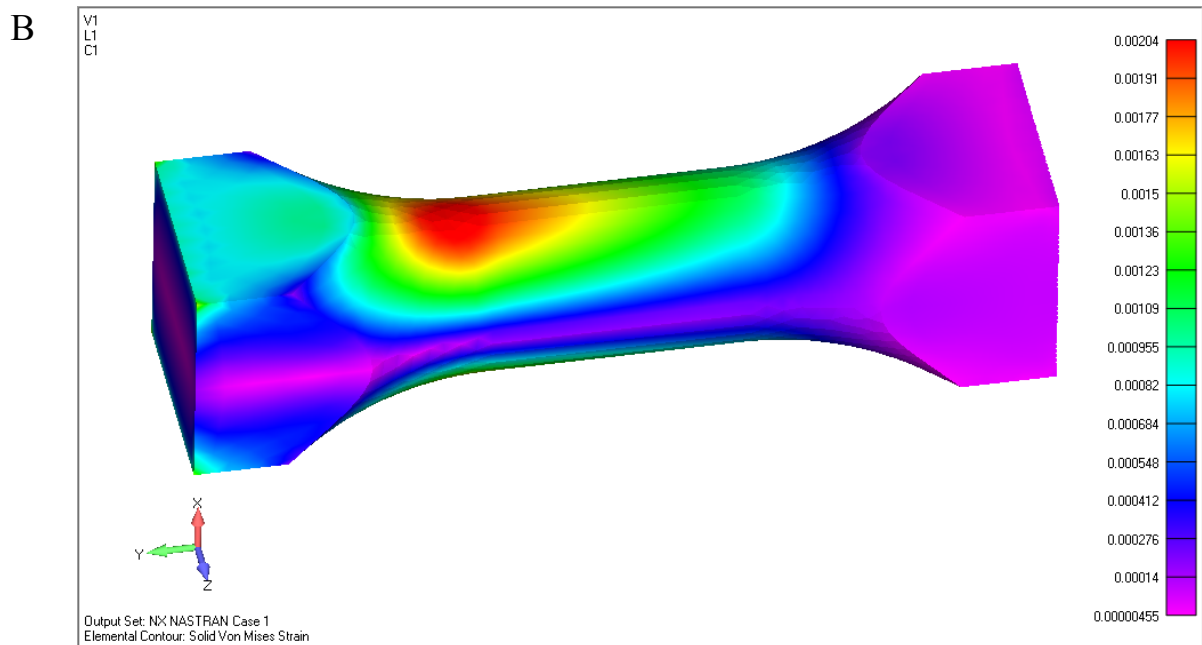
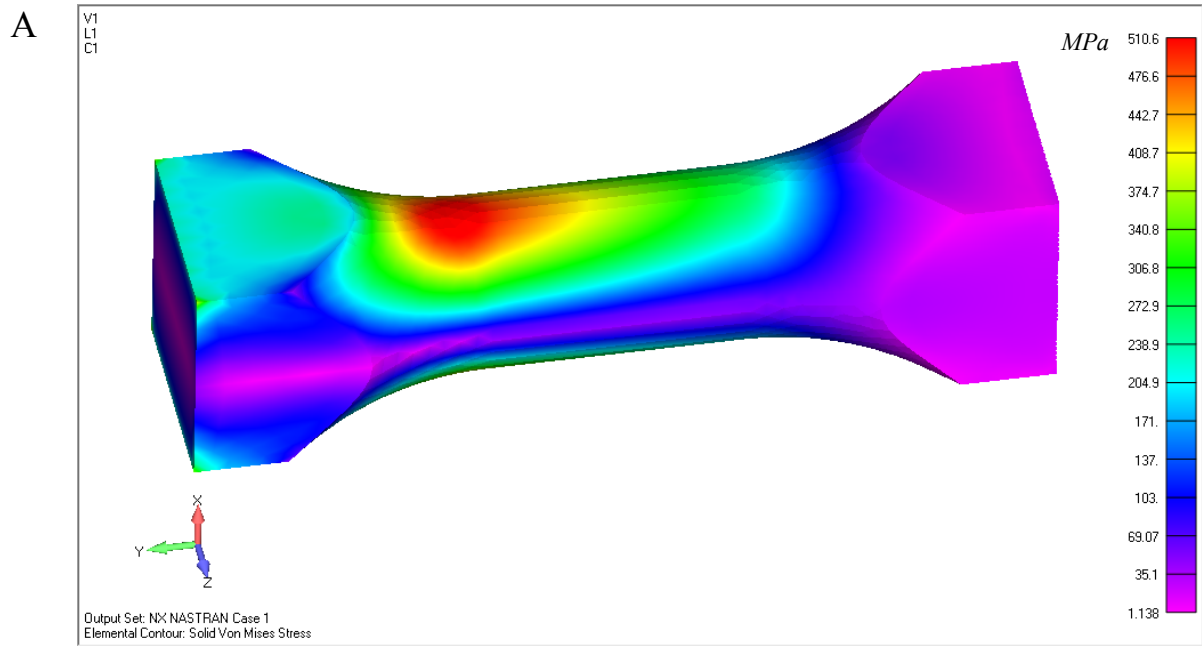
Tabela 9. Parametry obciążenia próbek

Stal C45			
<i>Kształt próbki</i>	<i>Wartość P_{max} [N]</i>	<i>Częstotliwość f [Hz]</i>	<i>Moment M_g [N·m]</i>
Okrągła	518	11	32,00
Okrągła	762	14	38,01
Kwadratowa	518	11	32,00
Kwadratowa	762	14	38,01
Stop aluminium 2024			
Okrągła	330	11	21,00
Okrągła	500	14	25,00
Kwadratowa	330	11	21,00
Kwadratowa	500	14	25,00

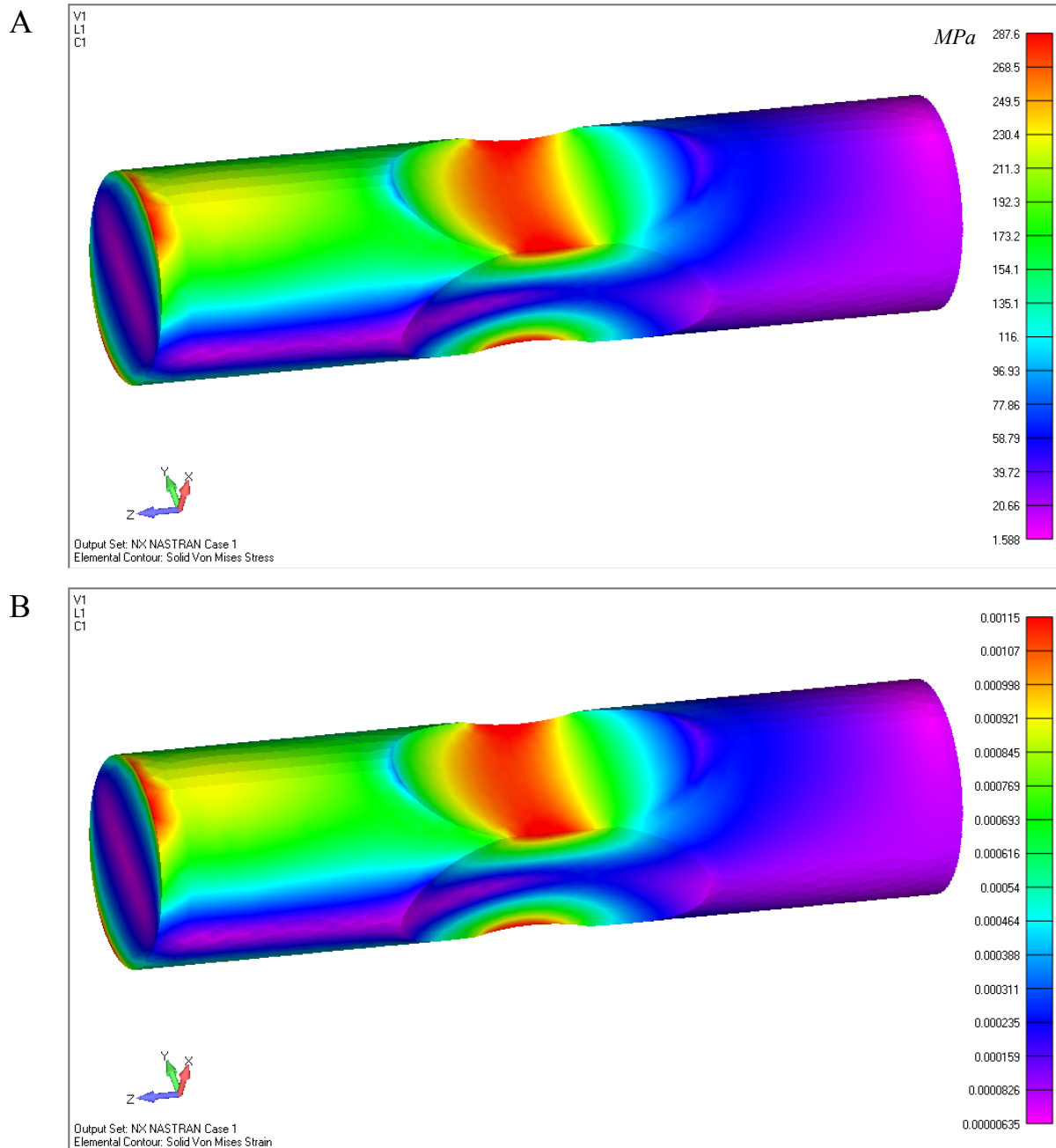
Program Femap w wyniku zdefiniowanych obciążeń przedstawia wyniki w formie graficznego rozkładu naprężeń i odkształceń na powierzchni całej próbki. Na podstawie map rozkładów naprężeń i odkształceń można zaobserwować miejsca występowania maksymalnych ich wartości. Przykładowe wyniki obliczeń numerycznych według hipotezy Hubera-Misesa uwzględniające kształt próbki, materiał i rodzaj obciążenia został przedstawiony dla stali C45 na rysunkach 21-24.



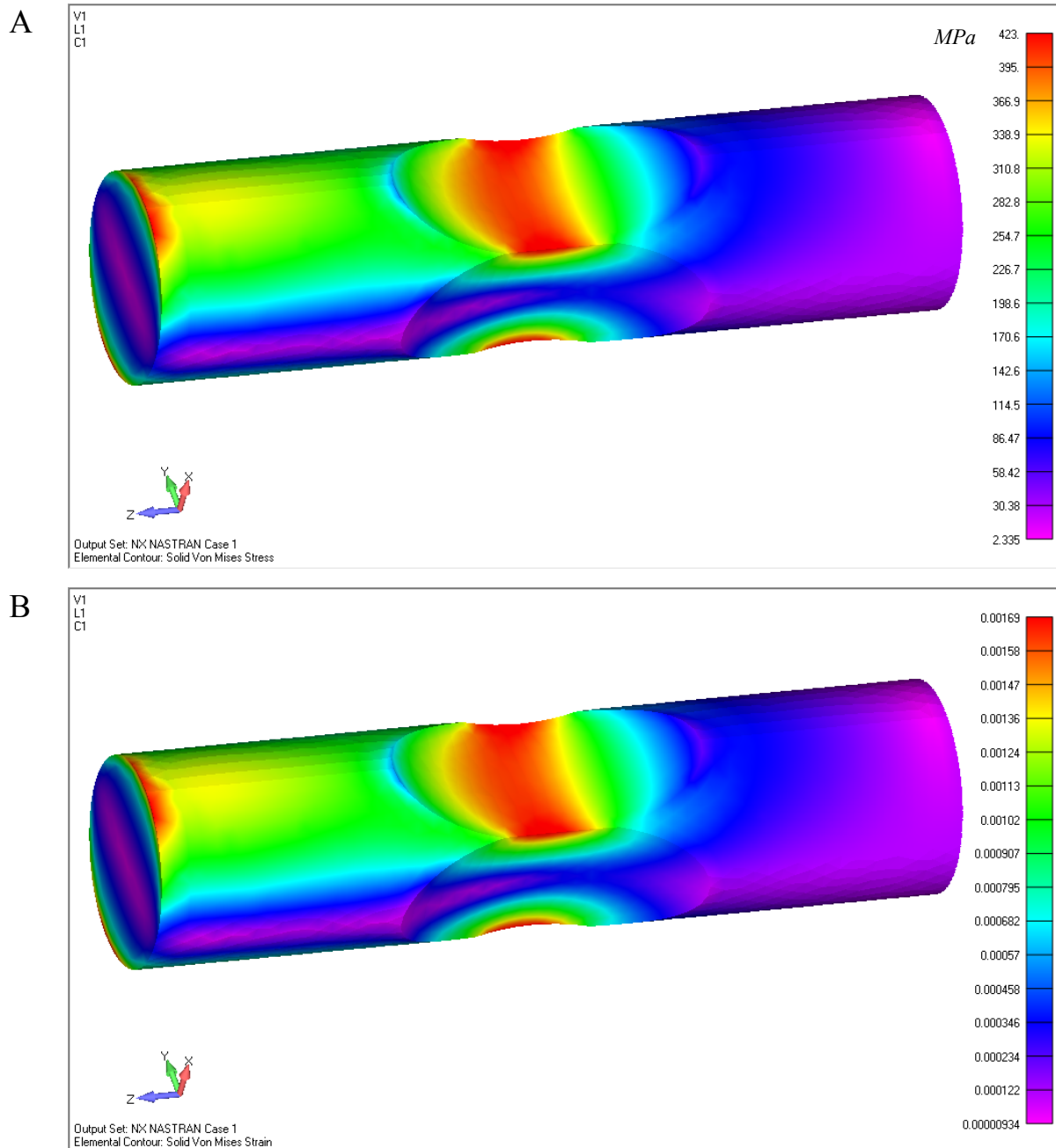
Rys. 21. Wyniki obliczeń (według Hubera-Misesa) stali C45 w modelu próbki o przekroju poprzecznym okrągłym przy obciążeniu $M_g = 32 \text{ N}\cdot\text{m}$ dla: A – naprężeń i B – odkształceń



Rys. 22. Wyniki obliczeń (według Hubera-Misesa) stali C45 w modelu próbki o przekroju poprzecznym okrągłym przy obciążeniu $M_g = 38,01 \text{ N}\cdot\text{m}$ dla: A – naprężeń i B – odkształceń

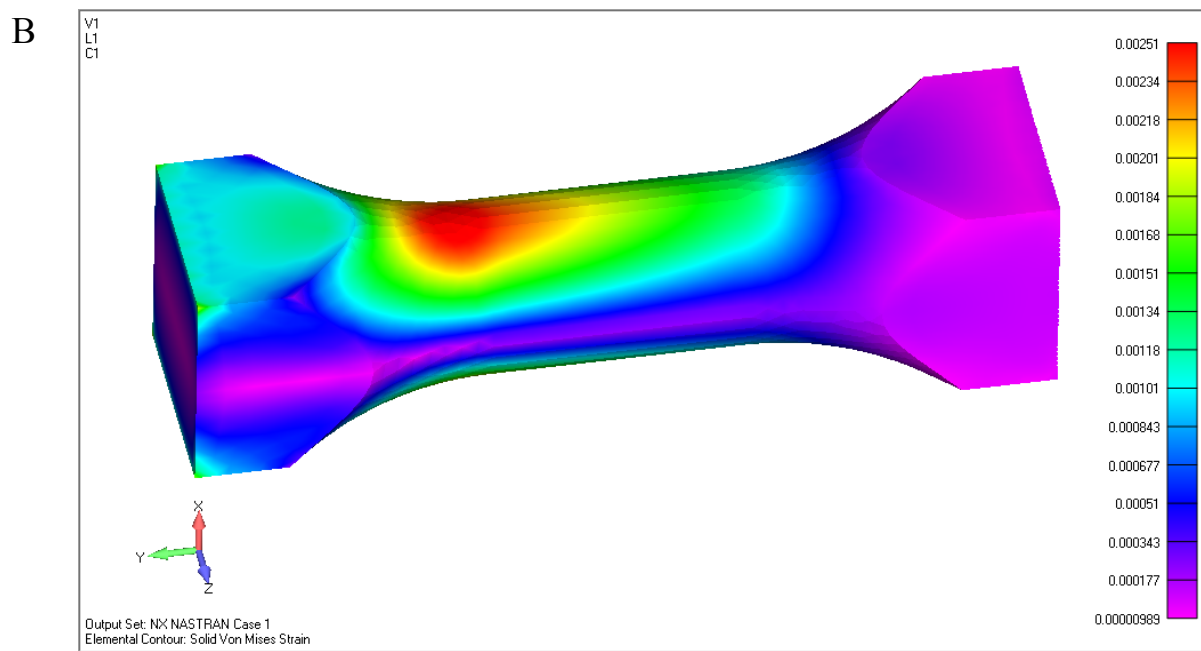
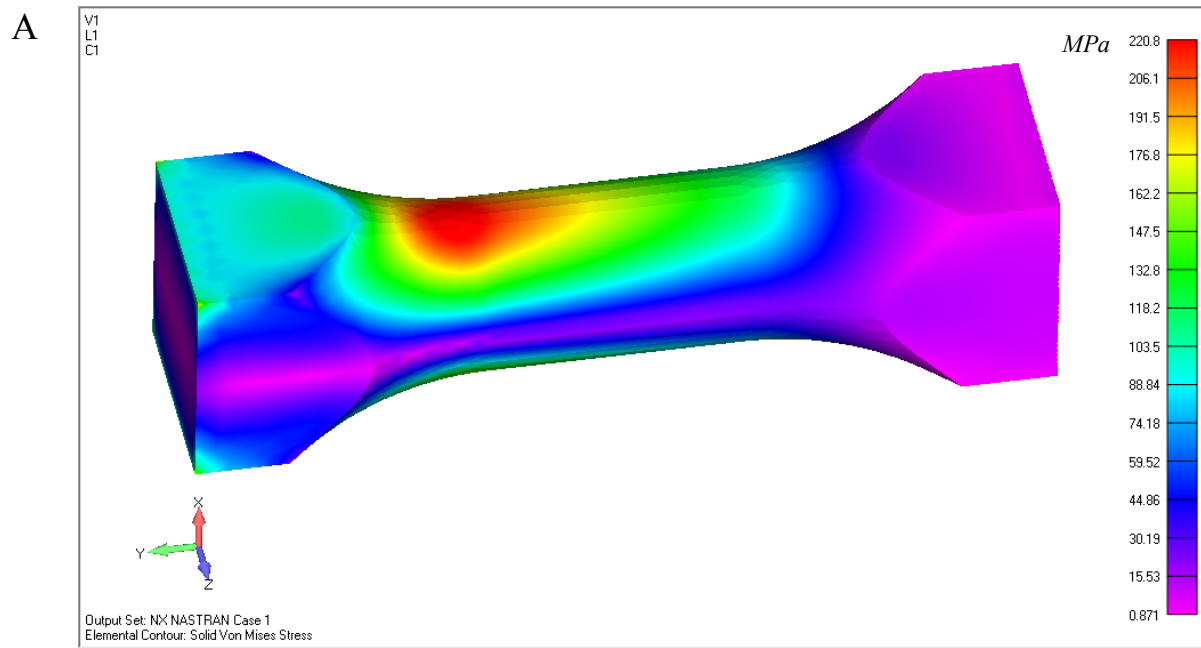


Rys. 23. Wyniki obliczeń (według Hubera-Misesa) stali C45 w modelu próbki o przekroju poprzecznym kwadratowym przy obciążeniu $M_g = 32 \text{ N}\cdot\text{m}$ dla: A – naprężeń i B – odkształceń

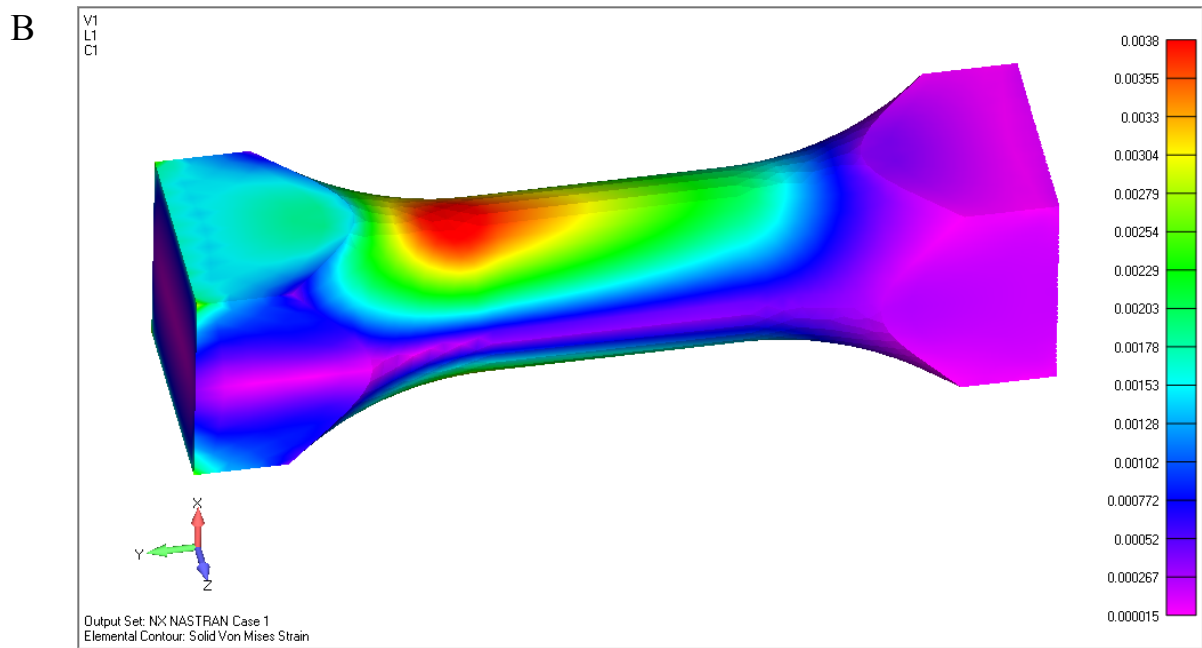
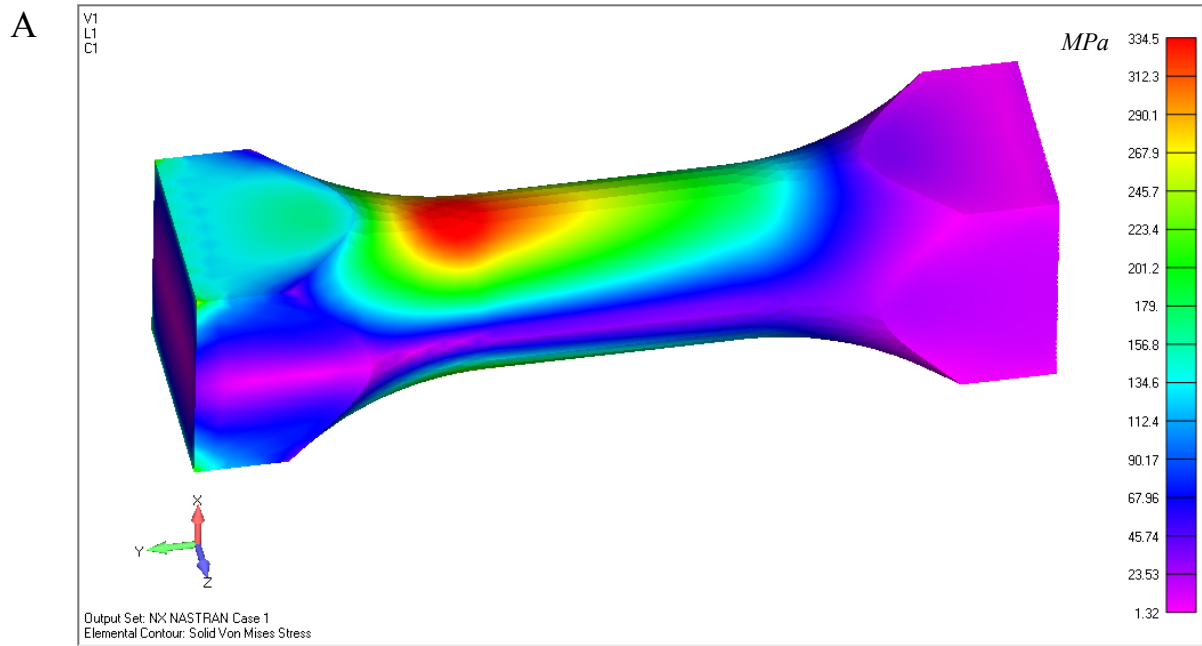


Rys. 24. Wyniki obliczeń (według Hubera-Misesa) stali C45 w modelu próbki o przekroju poprzecznym kwadratowym przy obciążeniu $M_g = 38,01 \text{ N}\cdot\text{m}$ dla: A – naprężeń i B – odkształceń

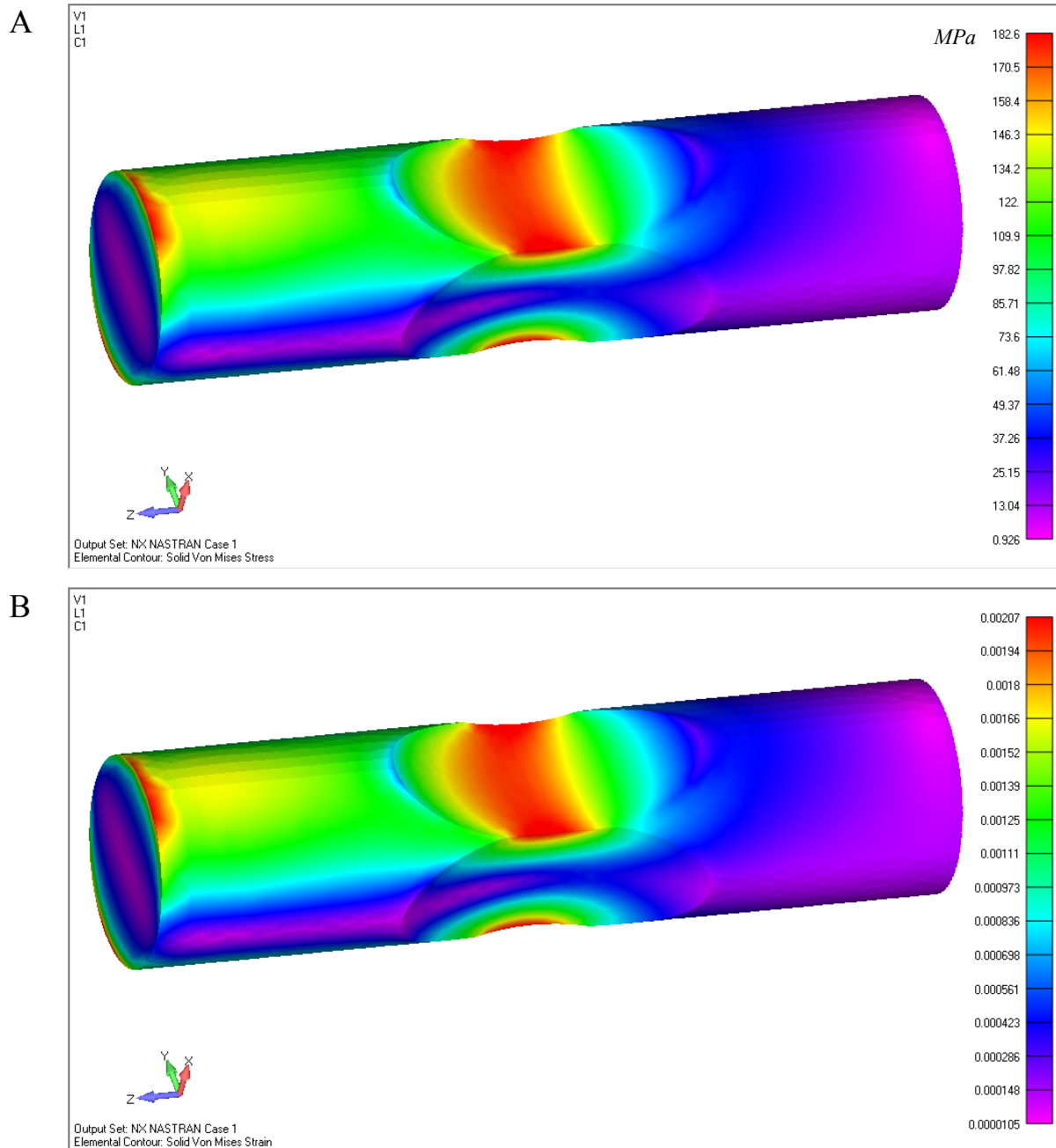
Natomiast dla stopu aluminium 2024 wyniki obliczeń numerycznych pokazano na rysunkach 25-29 dla próbek o przekroju poprzecznym okrągłym i prostokątnym.



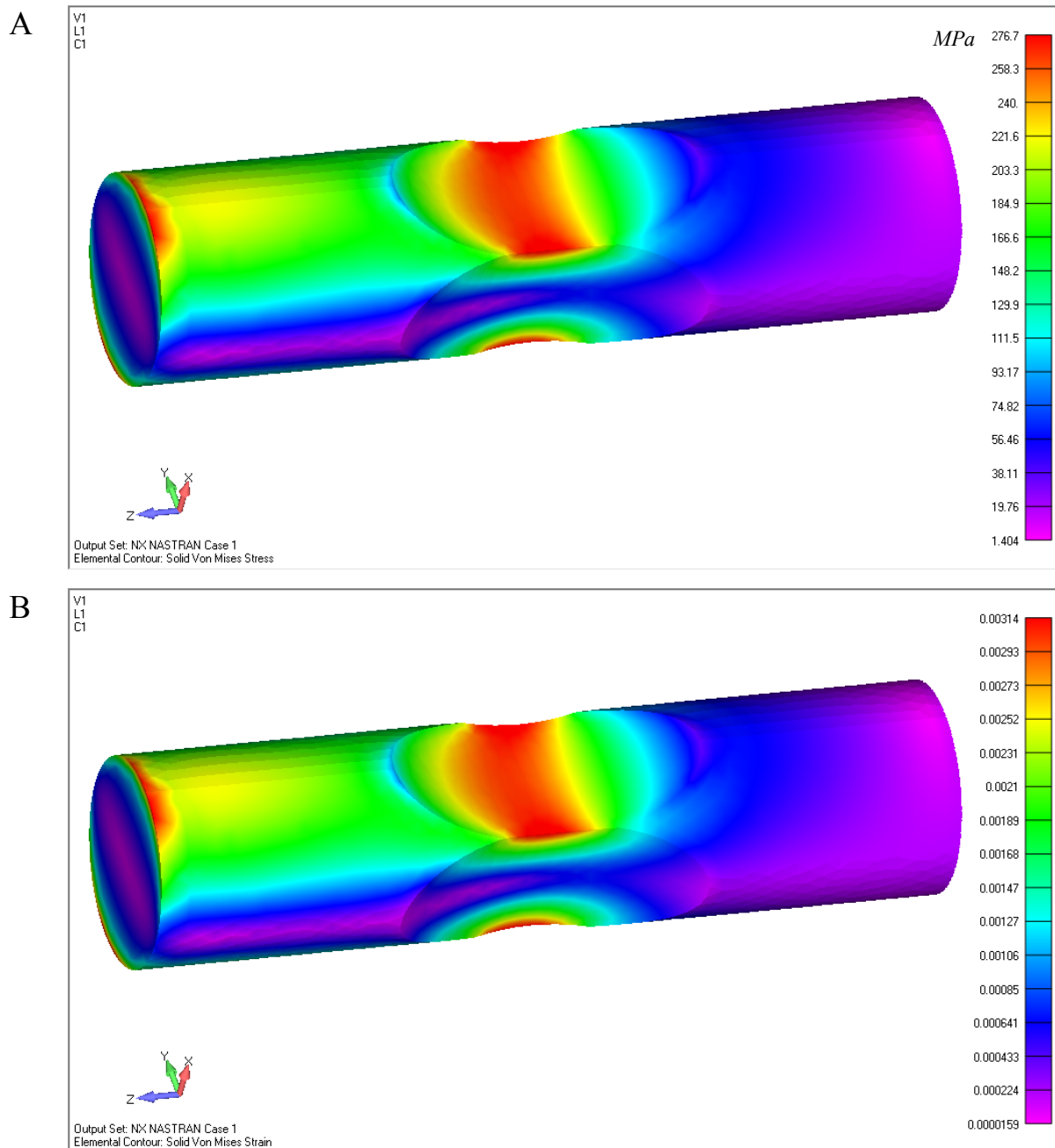
Rys. 25. Wyniki obliczeń (według Hubera-Misesa) stopu aluminium 2024 w modelu próbki o przekroju poprzecznym okrągłym przy obciążeniu $M_g = 21 \text{ N}\cdot\text{m}$ dla: A – naprężeń i B – odkształceń



Rys. 26. Wyniki obliczeń (według Hubera-Misesa) stopu aluminium 2024 w modelu próbki o przekroju poprzecznym okrągłym przy obciążeniu $M_g = 25 \text{ N}\cdot\text{m}$ dla: A – naprężeń i B – odkształceń



Rys. 27. Wyniki obliczeń (według Hubera-Misesa) stopu aluminium 2024 w modelu próbki o przekroju poprzecznym kwadratowym przy obciążeniu $M_g = 21 \text{ N}\cdot\text{m}$ dla: A – naprężeń i B – odkształceń



Rys. 28. Wyniki obliczeń (według Hubera-Misesa) stopu aluminium 2024 w modelu próbki o przekroju poprzecznym okrągłym przy obciążeniu $M_g = 25 \text{ N}\cdot\text{m}$ dla: A – naprężeń i B – odkształceń

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń numerycznych można zauważyć zmienny rozkład naprężeń i odkształceń na powierzchni próbek. Maksymalne naprężenia i odkształcenia występują w okolicy najmniejszego pola przekroju poprzecznego lub w okolicy karbu. Na podstawie obliczeń MES można określić miejsca i wartości występowania największych naprężeń i odkształceń lokalnych. Z analiz wynika również, że przy tych samych geometriach, próbki wykonane ze stali C45 posiadają większe naprężenia niż próbki ze stopu

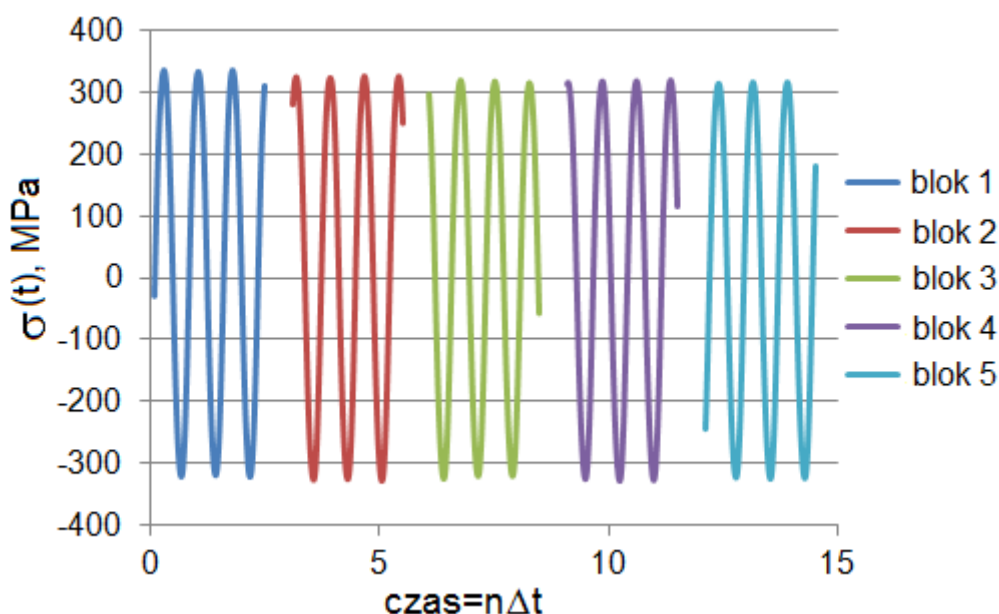
aluminium 2024. Na wytrzymałość badanych próbek wpływa zarówno rodzaj stosowanego materiału jak i geometria najbardziej osłabionego przekroju.

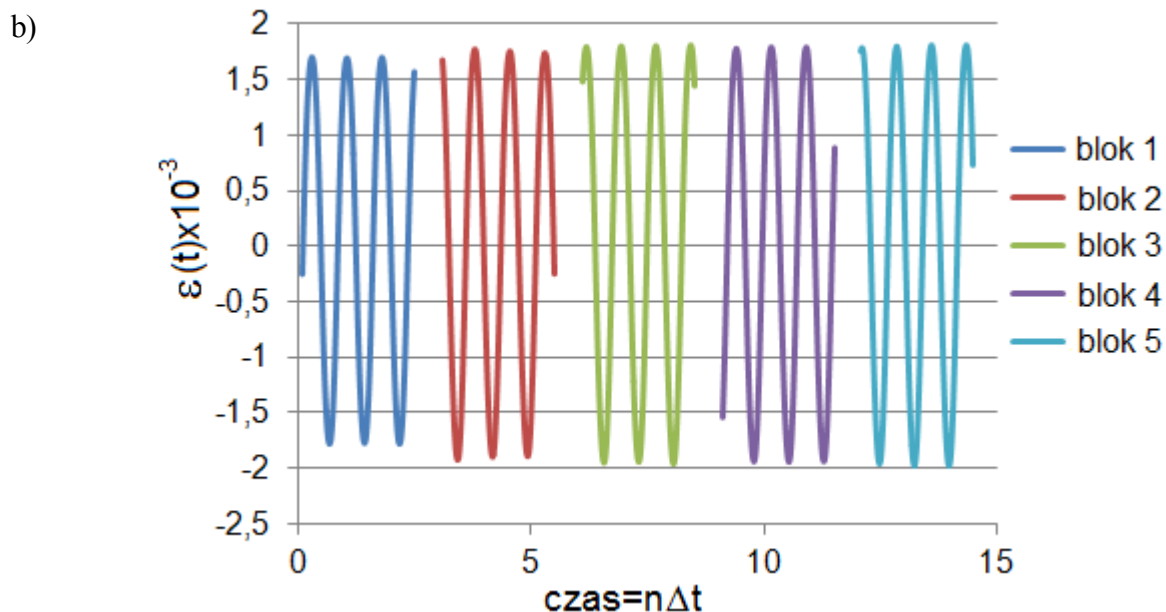
7. Wyniki badań zmęczeniowych

Badania zmęczeniowe przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego umożliwiły rejestracje przebiegów amplitudy naprężenia, odkształcenia i parametru energetycznego w funkcji czasu t . Przykładowe przebiegi rejestrowanych parametrów przedstawiono na rysunkach 29-33 dla stali C45 i na rysunkach 34-38 dla stopu aluminium 2024.

Na rysunku 29 został przedstawiony przykładowy przebieg a) naprężenia i b) odkształcenia w funkcji czasu t , zarejestrowane w trakcie badań próbki ze stali C45 o przekroju poprzecznym okrągłym. Przedstawione przebiegi zostały zarejestrowane w trakcie badań przy kontroli parametru energetycznego dla $W_a = 0,3 \text{ MJ/m}^3$, próbka uległa zniszczeniu po $N_f = 348100$ cykli. Pierwszy blok został zarejestrowany dla 1900 cykli, 2 blok zarejestrowano dla 34900 cykli, 3 blok dla 68300 cykli, 4 blok dla 178100 cykli oraz 5 blok dla 288400 cykli. Na przedstawionym rysunku 29 można zaobserwować, że z czasem naprężenie posiada coraz niższą wartość, a w tym samym czasie wartość odkształceń wzrasta. Tendencje te wynikają ze sterowania, które utrzymuje stałą wartość parametru energetycznego według modelu zaproponowanego przez Macha i współpracowników (rozdział 5.4).

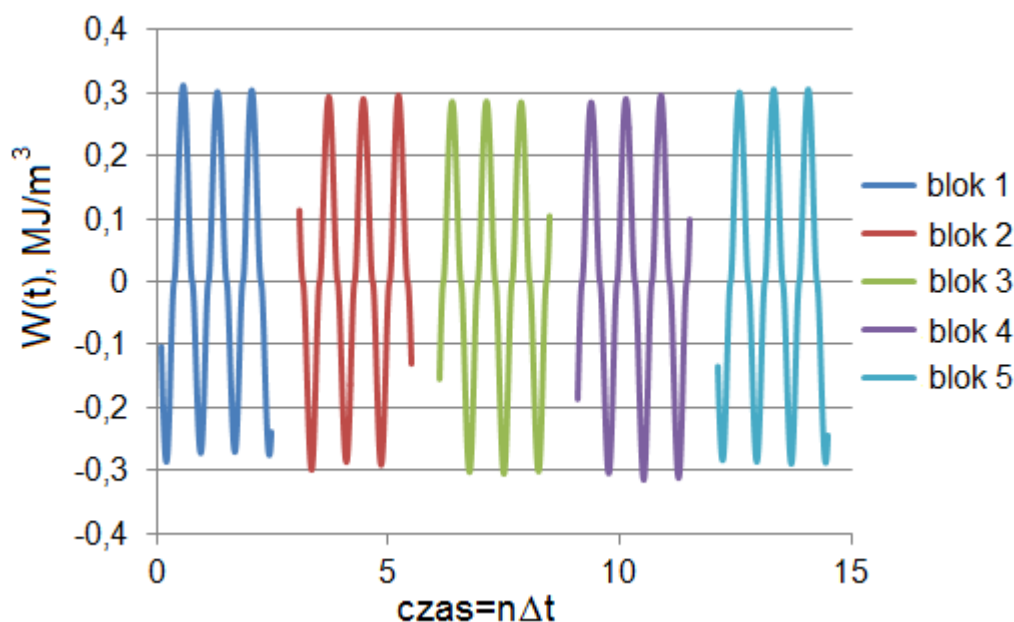
a)





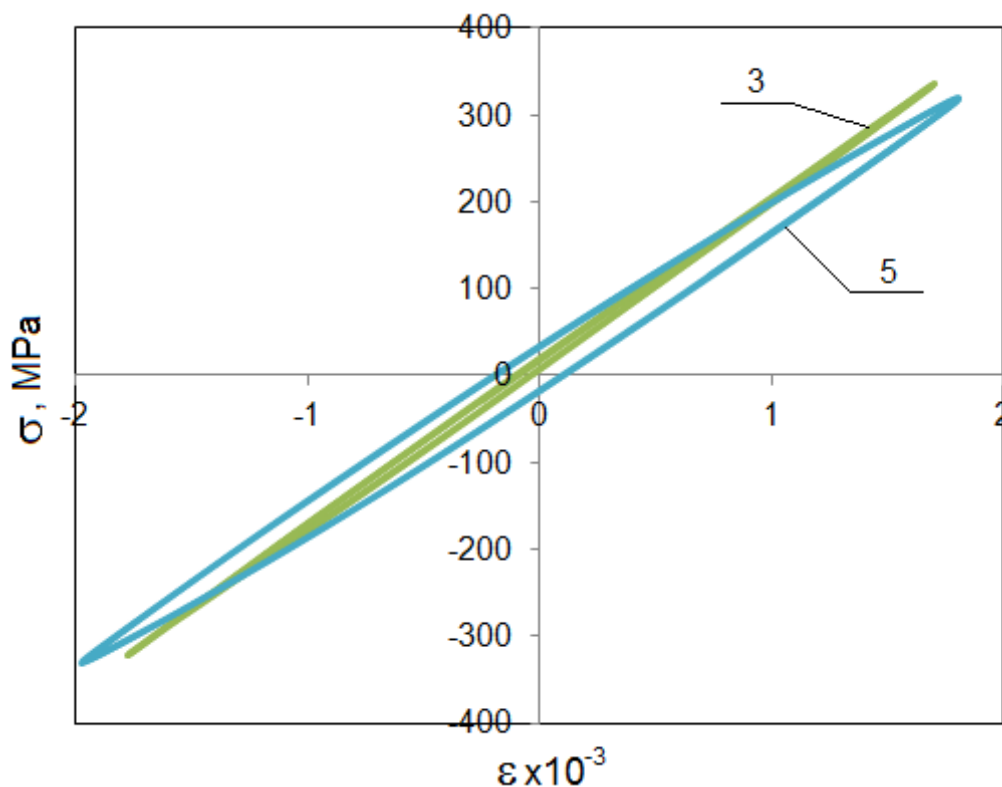
Rys. 29. Przykładowy przebieg a) naprężenia $\sigma(t)$, b) odkształcenia $\varepsilon(t)$, dla próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym okrągłym przy zginaniu w funkcji czasu $t = n\Delta t$, n – liczba wartości dyskretnych przebiegu, $\Delta t = 1,2987 \cdot 10^{-5}$ s – okres próbkowania

W trakcie badań rejestrowano przebieg amplitudy parametru energetycznego $W(t)$ przy zginaniu, który został przedstawiony na rysunku 30. Rys. 30 dotyczy próbki dla której przebiegi naprężenia i odkształcenia zostały przedstawione na rysunku 29, a opis bloków również posiada te same wartości liczby cykli. Badania dla przedstawionych przebiegów przeprowadzono przy zadanej amplitudzie parametru energetycznego $W_a = 0,3 \text{ MJ/m}^3$. Na podstawie prezentowanego przebiegu $W(t)$ można zauważyć nieznaczne fluktuacje parametru energetycznego $W(t)$, wynikające z cyklicznego obliczania tego parametru w układzie sterowania dla nowych wartości zmierzonego odkształcenia i wyliczonego naprężenia (rozdział 5.4). Błąd względny zakresu ΔW dla tego przykładu wynosi od 3% do 6%.



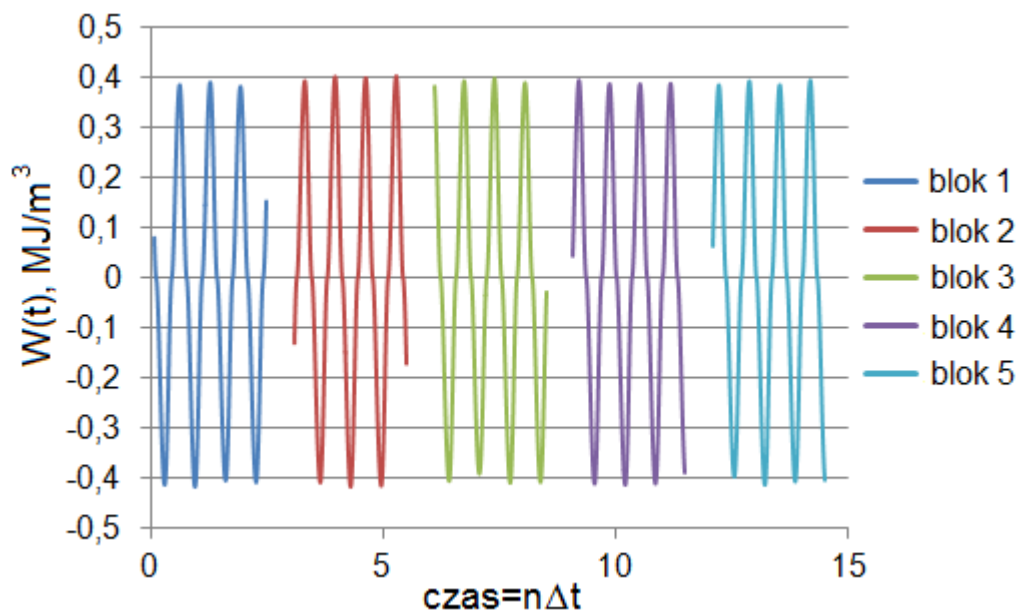
Rys. 30. Przykładowy przebieg parametru energetycznego $W(t)$ dla próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym okrągłym przy zginaniu w funkcji czasu $t = n\Delta t$, n – liczba wartości dyskretnych przebiegu, $\Delta t = 1,2987 \cdot 10^{-5}$ s – okres próbkowania

Rejestrowano również pętle histerezy ($\sigma - \epsilon$). Na rysunku 31 przedstawiono ewolucję pętli histerezy zarejestrowanych podczas badania próbki ze stali C45 o przekroju poprzecznym okrągłym. Przedstawione pętle zostały zapisane w trakcie rejestracji bloków przedstawionych na rys. 29 i 30 przebiegów naprężenia, odkształcenia i parametru energetycznego. Pętla 3 została zapisana w trakcie rejestracji bloku 3 (68300 cykli), a pętla 5 w trakcie rejestracji bloku 5 (288400 cykli). Można stwierdzić, że w trakcie badania zmęczeniowego wartości odkształcenia i naprężenia uległy zmianie. Wartość odkształcenia ϵ wzrosła, natomiast wartość naprężenia σ zmalała.



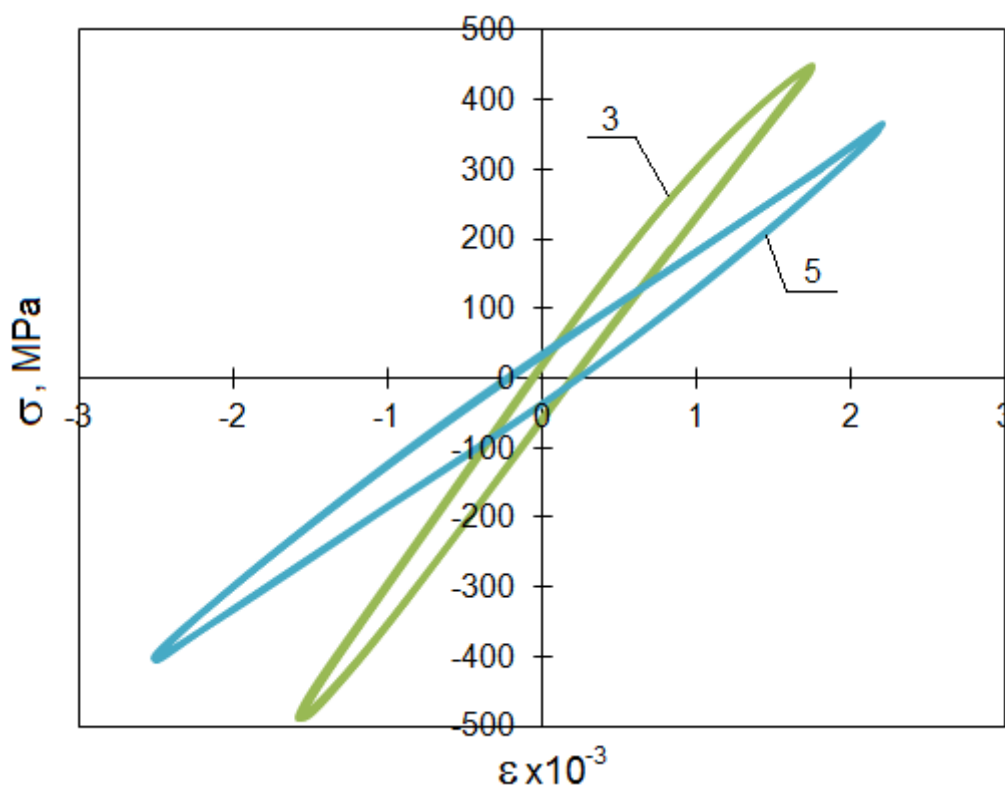
Rys. 31. Pętle histerezy (σ - ϵ) dla próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym okrągłym przy $W_a = 0,30 \text{ MJ/m}^3$

Na rysunku 32 został przedstawiony zarejestrowany w trakcie badań przebieg parametru energetycznego w funkcji czasu t przy cyklicznym zginaniu. Badania prowadzone były dla próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym kwadratowym. Próbka uległa zniszczeniu przy 39800 cyklach. Badania prowadzono przy kontrolowanej, stałej amplitudzie parametru energetycznego $W_a = 0,40 \text{ MJ/m}^3$. Pierwsze bloki przebiegów (1, 2) zostały zarejestrowane w zakresie od 0 do 2700 cykli, blok 3 zarejestrowano dla 13100 cykli, blok 4 dla 20100 oraz blok 5 dla 22100 cykli. Przedstawione na wykresie przebiegi parametru energetycznego wskazują na nieznaczne fluktuacje parametru energetycznego $W(t)$, błąd względny zakresu ΔW dla tego przykładu nie przekracza 3%.



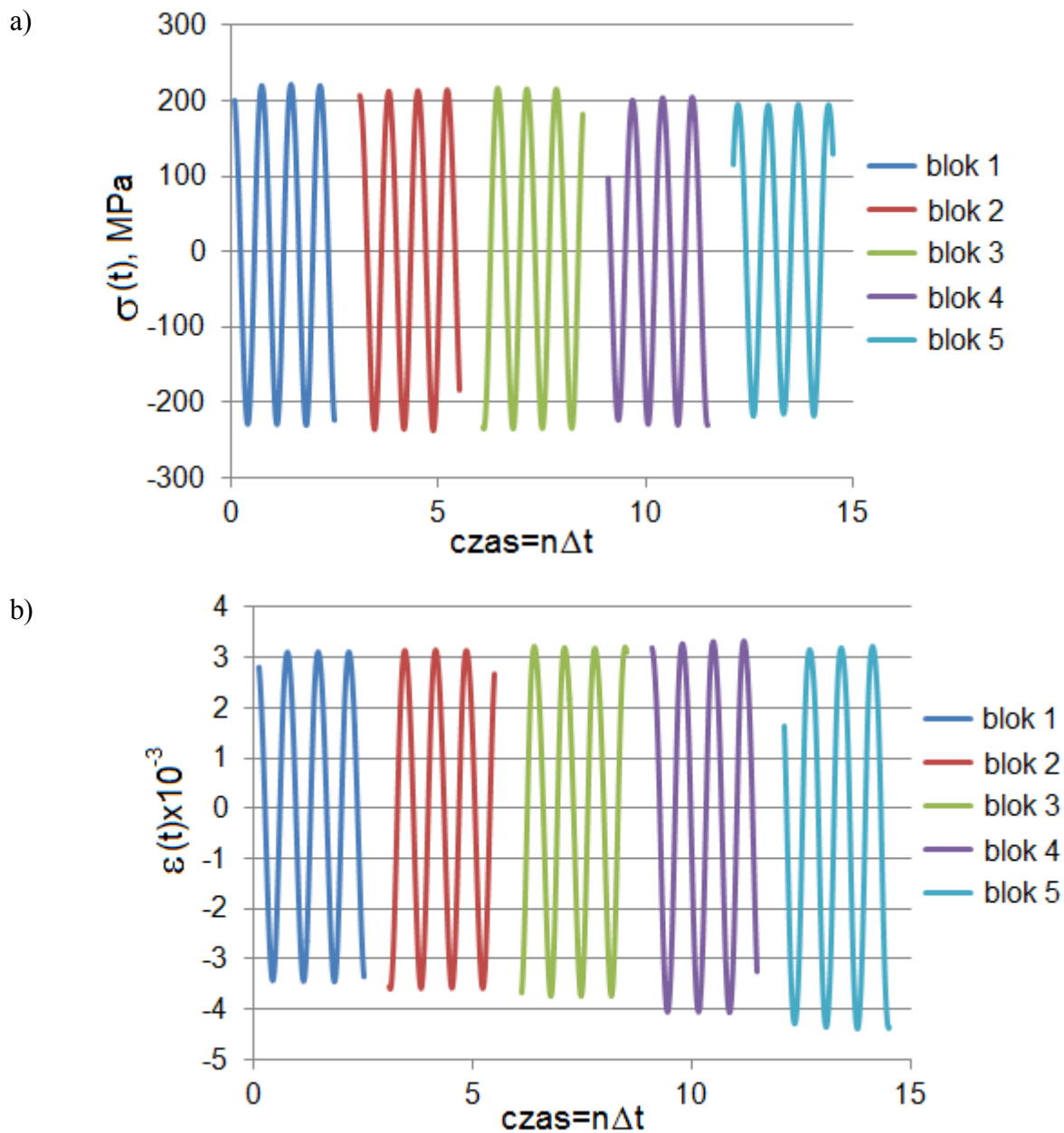
Rys. 32. Przykładowy przebieg parametru energetycznego $W(t)$ przy zginaniu w funkcji czasu $t = n\Delta t$, n – liczba wartości dyskretnych przebiegu, $\Delta t = 1,2987 \cdot 10^{-5}$ s – okres próbkowania dla próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym kwadratowym

Rysunek 33 przedstawia pętle histerezy zarejestrowane podczas badań z kontrolowaną amplitudą parametru energetycznego $W_a = 0,40 \text{ MJ/m}^3$. Pętla 3 została zarejestrowana dla 13100 cykli, natomiast pętla 5 po 22100 cykli. Przedstawione na rys. 33 pętle 3 i 5 zostały zapisane w trakcie rejestracji bloku 3 oraz 5 przebiegu parametru energetycznego na rysunek 32. Na podstawie zarejestrowanych pętli histerezy można zaobserwować, że w trakcie badań wzrasta wartość odkształcenia ϵ , a wartość naprężenia σ maleje, jak również obserwuje się nieznaczny wzrost szerokości pętli histerezy.



Rys. 33. Pętle histerezy (σ - ϵ) dla próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym kwadratowym przy $W_a = 0,40 \text{ MJ/m}^3$

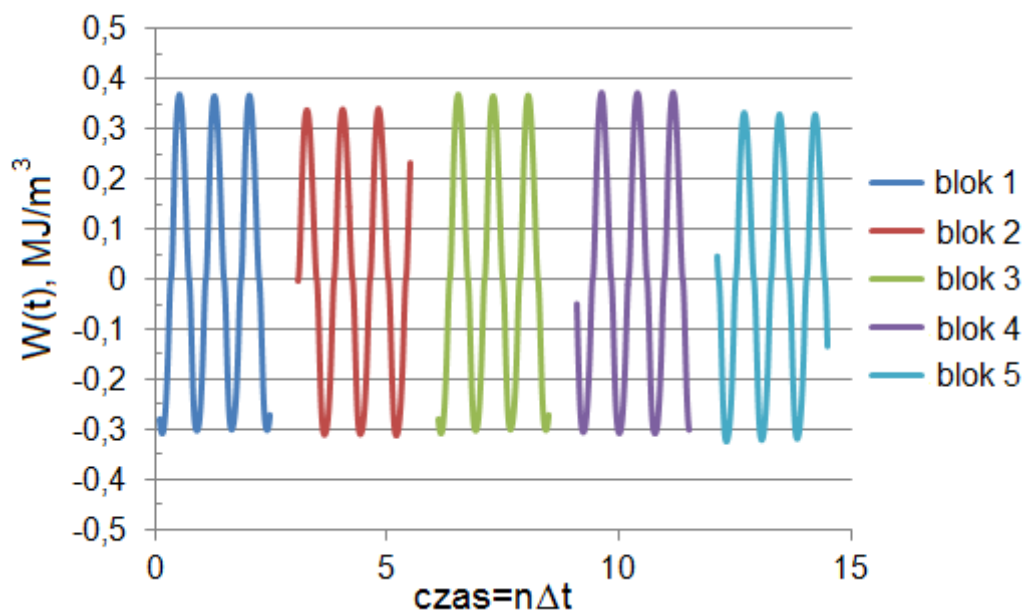
W trakcie badań stopu aluminium 2024 rejestrowano również przebiegi naprężenia, odkształcenia, parametru energetycznego oraz pętle histerezy. Na rysunku 34 został przedstawiony przebieg a) naprężenia, b) odkształcenia w funkcji czasu t . Przedstawione przebiegi amplitud zarejestrowano w trakcie badań próbek ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym. Badania prowadzono dla stałej amplitudy parametru energetycznego $W_a = 0,35 \text{ MJ/m}^3$, próbka uległa zniszczeniu dla 191900 cykli. Blok 1 został zarejestrowany dla 3600 cykli, blok 2 dla 5800 cykli, blok 3 dla 8100 cykli, blok 4 dla 26000 cykli i blok 5 dla 157200 cykli. Na przedstawionym rysunku 34 a) i b) obserwowane są takie same tendencje przebiegów amplitudy naprężenia i odkształcenia jak w przypadku przedstawionym dla stali C45. Wartość naprężenia σ w funkcji czasu maleje, natomiast wartość odkształcenia ϵ w funkcji czasu wzrasta. Wartość naprężenia maleje proporcjonalnie do wzrostu wartości odkształcenia.



Rys. 34. Przykładowy przebieg a) naprężenia $\sigma(t)$, b) odkształcenia $\epsilon(t)$, dla próbek ze stopu 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym przy zginaniu w funkcji czasu $t = n\Delta t$, n – liczba wartości dyskretnych przebiegu, $\Delta t = 1,2987 \cdot 10^{-5}$ s – okres próbkowania

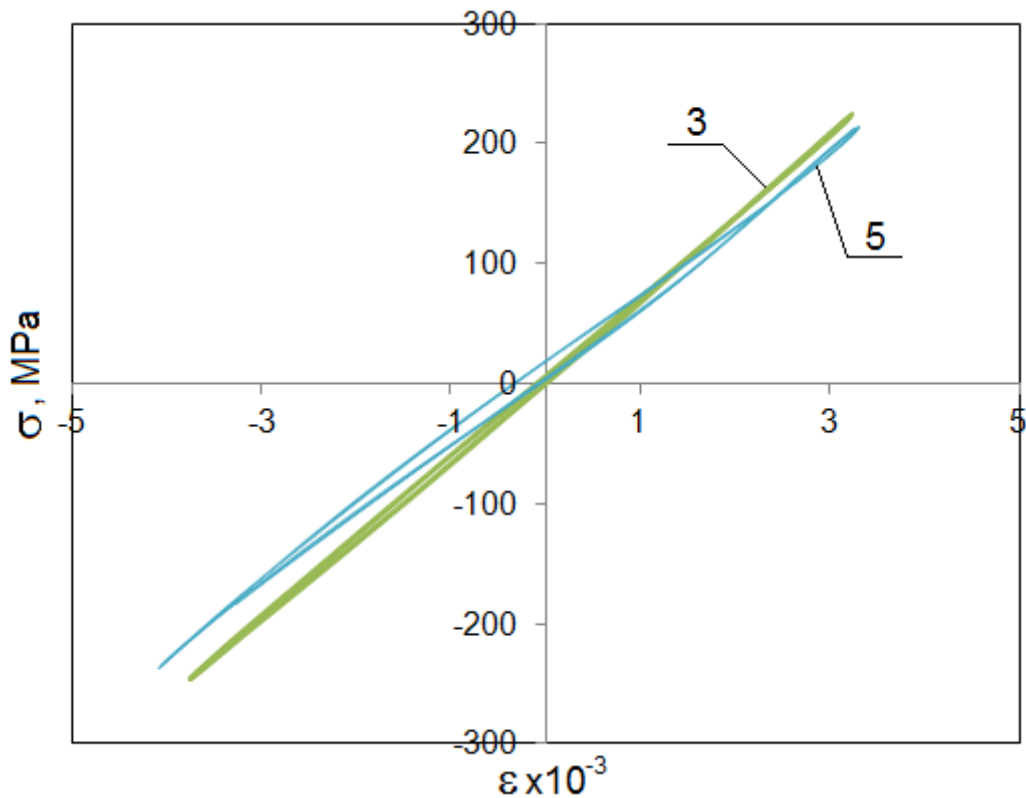
Na rysunku 35 został przedstawiony przebieg parametru energetycznego $W(t)$ w funkcji czasu zarejestrowane w trakcie badań próbki o przekroju poprzecznym okrągłym wykonanej ze stopu aluminium 2024. Przedstawione przebiegi parametru energetycznego zostały zapisane w trakcie rejestracji przebiegów naprężenia i odkształcenia, które zostały przedstawione na rysunku 34. Zarejestrowane przebiegi parametru energetycznego dla $W_a = 0,35 \text{ MJ/m}^3$

wskazują na znaczne fluktuacje wartości parametru energetycznego w szczególności dla dodatnich wartości.



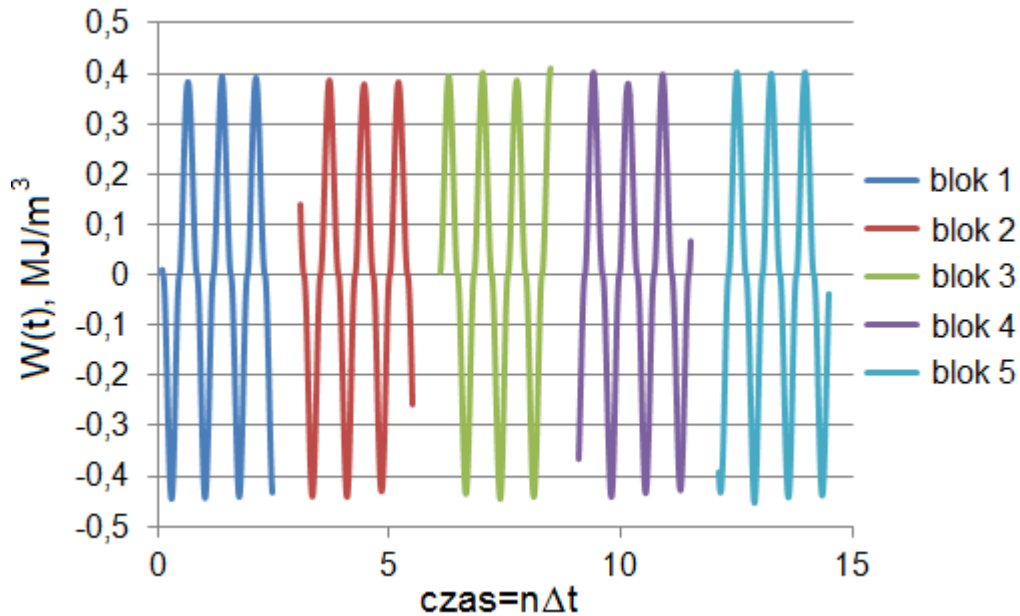
Rys. 35. Przykładowy przebieg parametru energetycznego $W(t)$ dla próbek ze stopu 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym przy zginaniu w funkcji czasu $t = n\Delta t$, n – liczba wartości dyskretnej przebiegu, $\Delta t = 1,2987 \cdot 10^{-5}$ s – okres próbkowania

Zmiany pętli histerezy zarejestrowanych dla próbek ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym w trakcie badań została przedstawiona na rysunku 36. Przedstawione na rys. 36 pętle histerezy 3 i 5 zostały zapisane w trakcie rejestracji bloku 3 i 5 podczas badań przebiegów naprężenia, odkształcenia i parametru energetycznego pokazane na rysunkach 34-35. Na podstawie przedstawionych wykresów pętli histerezy obserwuje się nieznaczne zmiany w wielkościach naprężenia i odkształcenia. Szerokość pętli histerezy również nieznacznie zwiększyła się, co świadczy o wzroście odkształceń plastycznych.



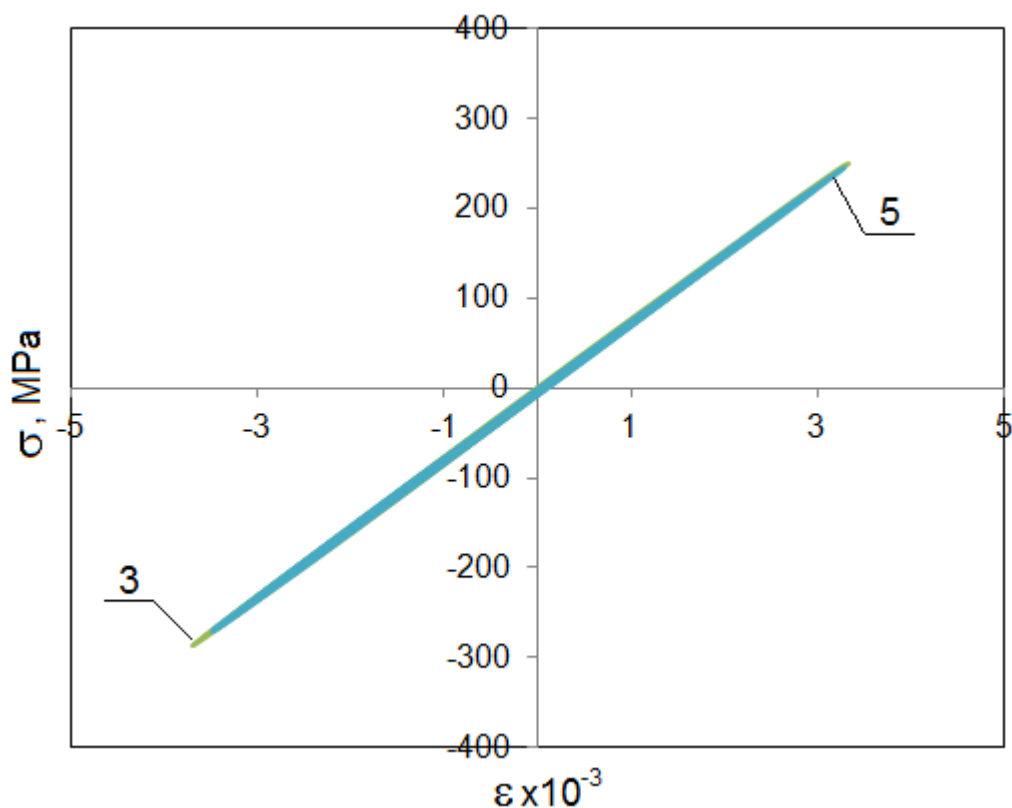
Rys. 36. Pętle histerezy (σ - ϵ) zarejestrowane dla próbek ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym dla $W_a = 0,35 \text{ MJ/m}^3$

Przebieg parametru energetycznego zarejestrowany w trakcie badań próbek ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym kwadratowym został przedstawiony na rysunku 37. Badania prowadzono przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego $W_a = 0,40 \text{ MJ/m}^3$. Blok 1 i 2 został zarejestrowany w zakresie od 0 do 1500 cykli, blok 3 dla 15200 cykli, blok 4 dla 36800 cykli, a blok 5 dla 80400 cykli. Przedstawione przebiegi parametru energetycznego zostały zarejestrowane dla próbki, która uległa zniszczeniu przy 115500 cykli. Na podstawie przedstawionych przebiegów parametru energetycznego można zauważyć dużą zgodność z utrzymywaniem przez program sterujący wartości dodatnich parametru energetycznego. W przypadku wartości ujemnej obserwuje się pewne fluktuacje, dla których błąd względny nie przekracza 10%. Na podstawie przebiegów parametru energetycznego dla badań stopu aluminium 2024 próbek o przekroju poprzecznym okrągłym (rysunek 35) i próbek o przekroju poprzecznym kwadratowym (rysunek 37) możemy stwierdzić fluktuacje dla wartości dodatnich i ujemnych parametru energetycznego. Przyczyny pojawiania się fluktuacji można upatrywać w programie sterującym pracą maszyny, którego głównym celem jest utrzymanie stałej wartości parametru energetycznego oraz przebiegu badań.



Rys. 37. Przykładowy przebieg parametru energetycznego $W(t)$ dla próbek ze stopu 2024 o przekroju poprzecznym kwadratowym przy zginaniu w funkcji czasu $t = n\Delta t$, n – liczba wartości dyskretnych przebiegu, $\Delta t = 1,2987 \cdot 10^{-5}$ s – okres próbkowania

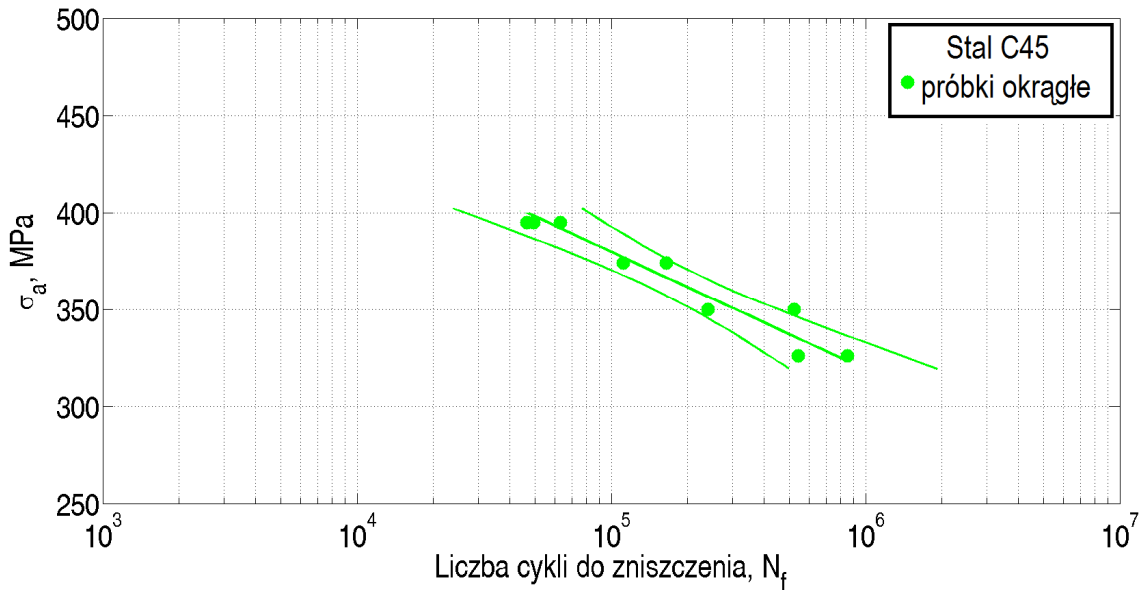
Na rysunku 38 zostały przedstawione pętle histerezy zarejestrowane w trakcie badań próbek ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym kwadratowym. Przedstawione na rys. 38 pętle zostały zarejestrowane w trakcie badań parametru energetycznego przedstawionego na rysunku 37. Pętla 3 zarejestrowana dla bloku 3 (15200 cykli), a pętla 5 dla bloku 5 (80400 cykli). Na podstawie przedstawionych pętli jest widoczna nieznaczna ewolucja naprężenia i odkształcenia pomimo tego, że pętle nachodzą na siebie. Obserwuje się nieznaczne zmniejszenie długości pętli 5, co związane jest z pojawieniem się odkształceń plastycznych, ponadto stwierdzono, że pętla zmienia szerokość. W nieznacznym stopniu wartość naprężenia i odkształcenia na rys. 38 maleje.



Rys. 38. Pętle histerezy (σ - ϵ) zarejestrowane dla próbek ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym kwadratowym dla $W_a = 0,4\text{MJ/m}^3$

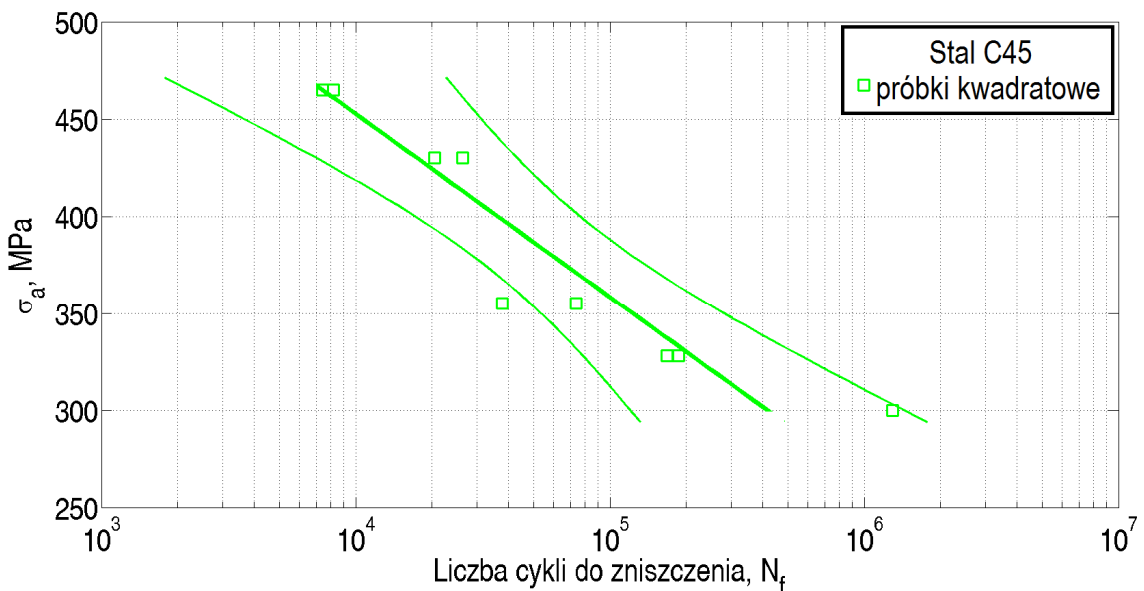
7.1. Wyniki badań zmęczeniowych przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego

W niniejszym rozdziale zostaną przedstawione wyniki badań zmęczeniowych dla zginania przeprowadzone przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego. Badania prowadzono dla próbek ze stali C45 i stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym (rys. 8) i kwadratowym (rys. 9). Wyniki badań zmęczeniowych oraz ich aproksymację przedstawiono na rysunkach 39 – 42 dla ograniczonej trwałości zmęczeniowej w skali pojedynczo logarytmicznej. Badania prowadzono na 4-5 poziomach naprężenia na każdym z poziomów zbadano minimum dwie próbki [79, 92, 95]. Aproksymacja wyników badań pozwoliła na uzyskanie naprężeniowych charakterystyk zmęczeniowych. Na rysunkach zostały również przedstawione pasma rozrzutu wyznaczone według normy [5]. Na rysunku 39 zostały przedstawione wyniki badań zmęczeniowych dla próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym okrągłym przy zginaniu oraz pasma rozrzutów. Materiał został poddany badaniom na czterech poziomach naprężenia $\sigma_a = 326, 350, 374, 395$ [MPa], na każdym z poziomów zostały zbadane od 2 do 3 próbek.



Rys. 39. Charakterystyka zmęczeniowa próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym okrągłym dla zginania przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego σ_a

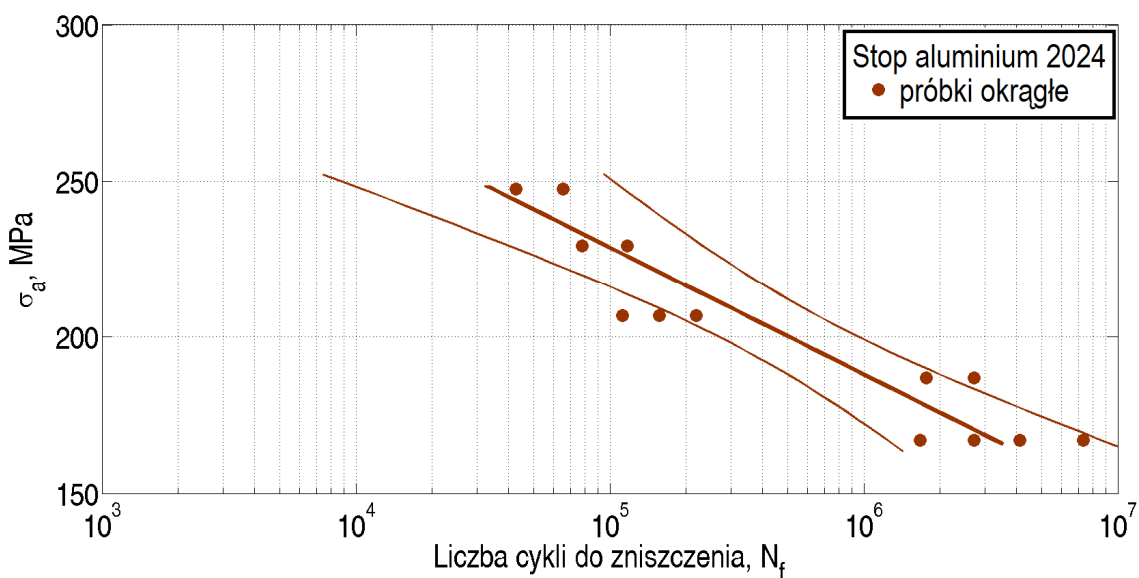
Na rysunku 40 zostały przedstawione wyniki badań zmęczeniowych próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym kwadratowym przy kontroli amplitudy momentu zginającego. Próbki zostały poddane badaniom na 5 poziomach naprężenia $\sigma_a = 300, 328, 355, 430, 465$ [MPa], na każdym z poziomów przebadano minimum 2 próbki. Wyniki badań zmęczeniowych aproksymowano i przedstawiono pasma rozrzutu.



Rys. 40. Charakterystyka zmęczeniowa próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym kwadratowym przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego σ_a dla zginania

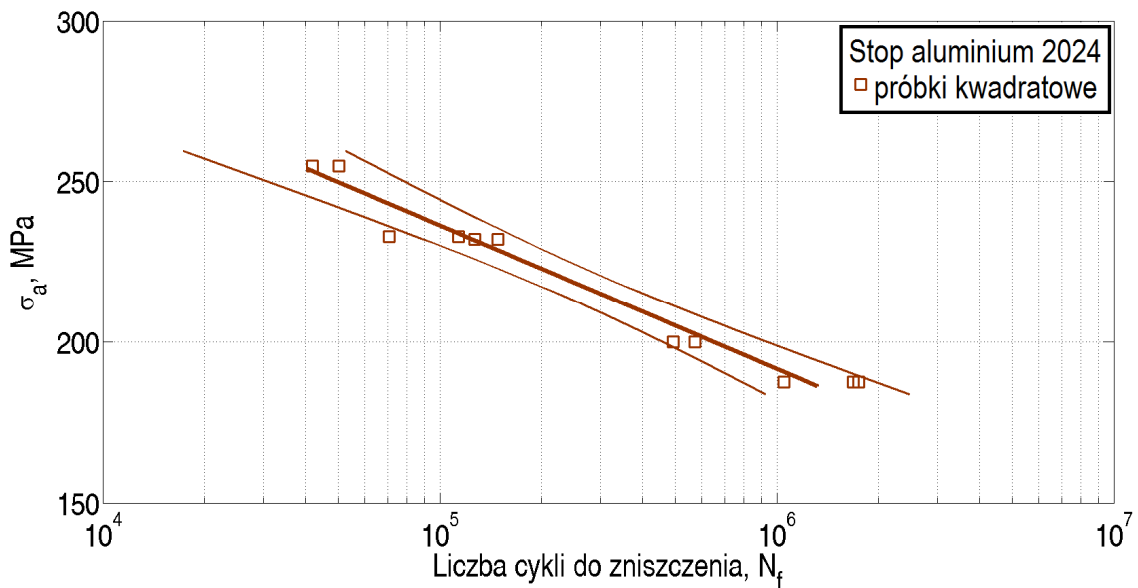
Badania zmęczeniowe z kontrolowaną amplitudą momentu zginającego przeprowadzono także dla próbek ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym i kwadratowym.

Wyniki badań zmęczeniowych próbek ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym przeprowadzone przy kontroli amplitudy momentu zginającego zostały przedstawione na rysunku 41. Próbki badano na pięciu poziomach naprężenia $\sigma_a = 167, 187, 207, 230, 248$ [MPa], na każdym z poziomów naprężeń zbadano od 2 do 4 próbek. Aproksymacja wyników badań pozwoliła na uzyskanie charakterystyki zmęczeniowej dla ograniczonej trwałości.



Rys. 41. Charakterystyka zmęczeniowa próbek ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego σ_a

Na rysunku 42 zostały przedstawione wyniki badań zmęczeniowych próbek ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym kwadratowym. Próbki zostały poddane badaniom z kontrolowaną amplitudą momentu zginającego. Badania przeprowadzono na pięciu poziomach naprężenia $\sigma_a = 187.5, 200, 232, 233, 255$ [MPa], na każdym z poziomów zbadano od 2 do 3 próbek. Na rys. 42 przedstawiono również linię aproksymacji wyników badań oraz pasma rozrzutów.

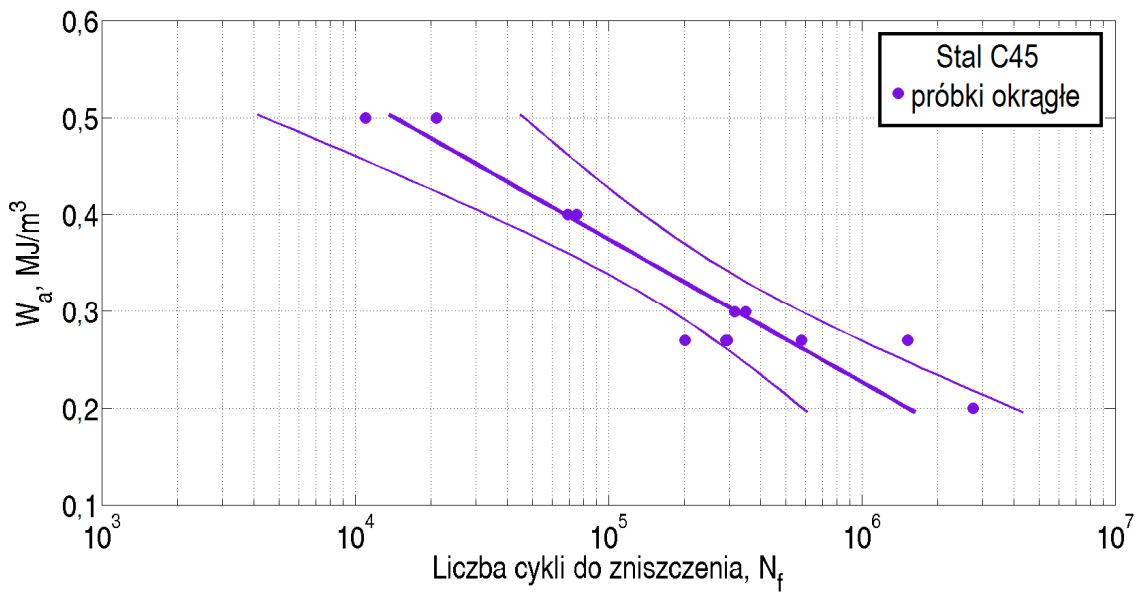


Rys. 42. Charakterystyka zmęczeniowa próbek ze stopu 2024 o przekroju poprzecznym kwadratowym przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego σ_a

7.2. Wyniki badań zmęczeniowych przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego

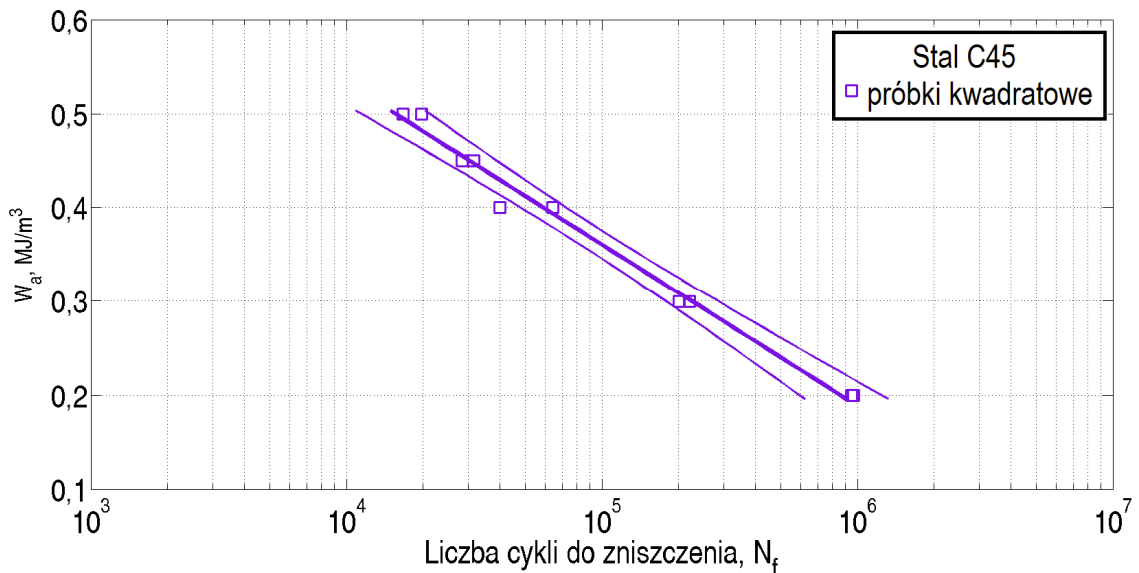
Badania zmęczeniowe przeprowadzono również z kontrolowaną amplitudą parametru energetycznego próbek ze stali C45 i stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym i kwadratowym. Wyniki badań zmęczeniowych próbek ze stali C45 przedstawione zostały na rysunkach 43-44, a próbek ze stopu 2024 na rysunkach 45-46. Badania zmęczeniowe z kontrolowaną amplitudą parametru energetycznego według modelu przedstawionego w rozdziale 5.4. zostały przeprowadzone dla ograniczonej trwałości zmęczeniowej [84]. Dla uzyskanych wyników badań zmęczeniowych wyznaczono linie aproksymacji, która jest charakterystyką energetyczną badanego materiału. Dla charakterystyk zmęczeniowych energetycznych przedstawione zostały również pasma rozrzutu wyznaczone według normy [5].

Wyniki badań zmęczeniowych przeprowadzone przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym okrągłym zostały przedstawione na rysunku 43. Materiał został poddany badaniom na 5 poziomach parametru energetycznego $W_a = 0,2; 0,27; 0,3; 0,4; 0,5$ [MJ/m³]. Na każdym z poziomów przebadano od 2 do 5 próbek. Na podstawie uzyskanych wyników badań wyznaczono linie aproksymacji oraz pasma rozrzutu, które zostały przedstawione na rys. 43.



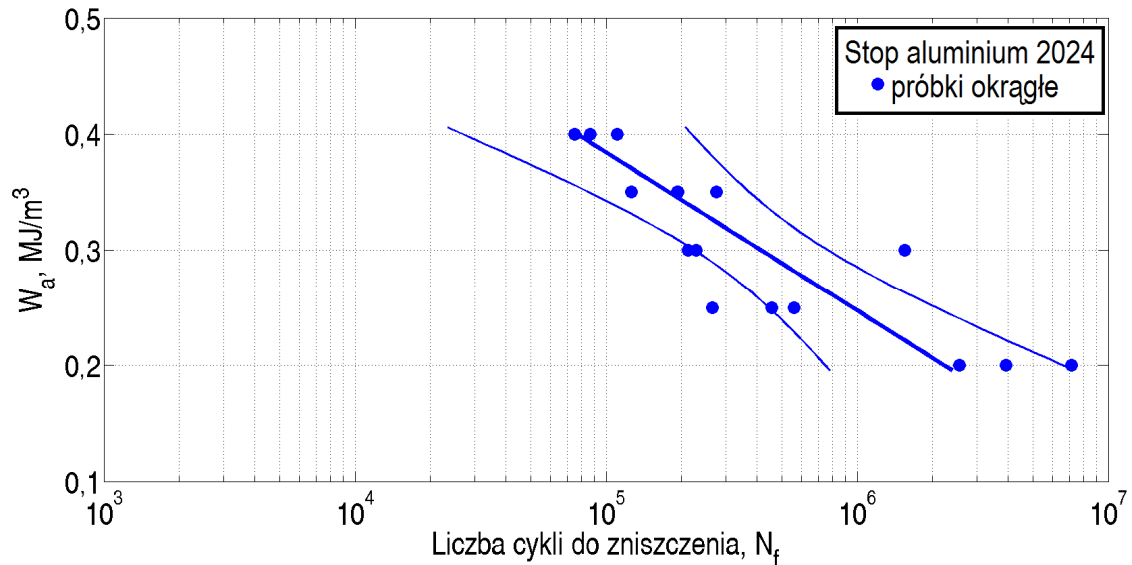
Rys. 43. Charakterystyka zmęczeniowa próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym okrągłym przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego W_a dla zginania

Na rysunku 44 zostały przedstawione wyniki badań zmęczeniowych wykonane przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym kwadratowym przy zginaniu. Badania wykonano dla pięciu poziomów parametru energetycznego $W_a = 0,2; 0,3; 0,4; 0,45; 0,5$ [MJ/m³], na każdym z poziomów zbadano po dwie próbki.



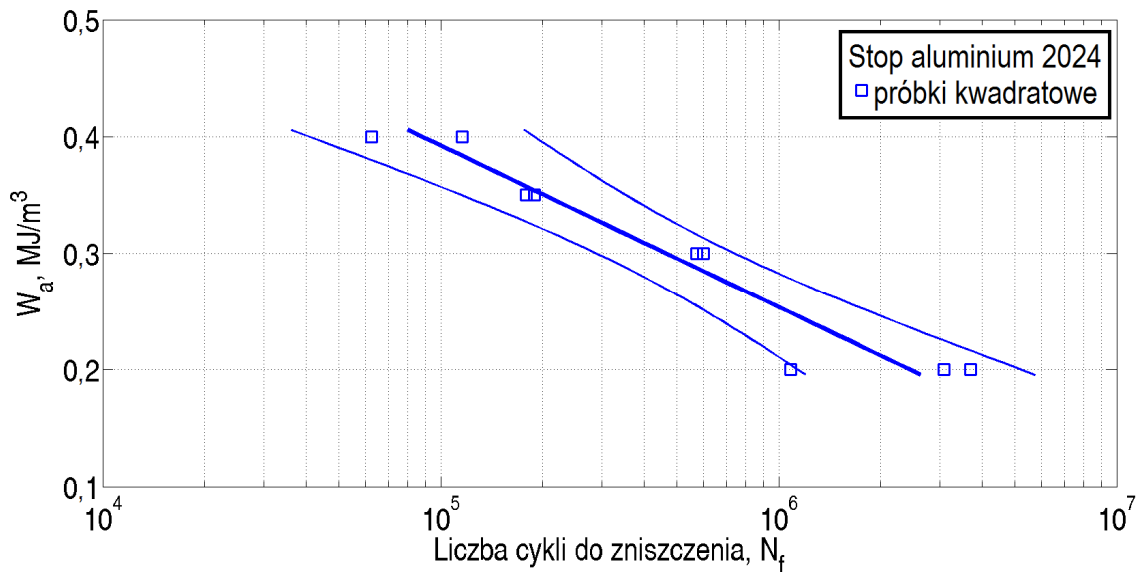
Rys. 44. Charakterystyka zmęczeniowa próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym kwadratowym przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego W_a dla zginania

Przeprowadzone zostały również badania zmęczeniowe próbek ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego poddanych zginaniu. Wyniki badań dla ograniczonej trwałości zostały przedstawione na rysunku 45. Badania przeprowadzono dla pięciu poziomów amplitudy parametru energetycznego $W_a = 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4$ [MJ/m³], na każdym z poziomów zbadano minimum trzy próbki. Dla przedstawionych wyników badań wykreślono linię aproksymacji oraz wyznaczono pasma rozrzutów.



Rys. 45. Charakterystyka zmęczeniowa próbek ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego W_a dla zginania

Na rysunku 46 zostały przedstawione wyniki badań zmęczeniowych próbek ze stopu 2024 o przekroju poprzecznym kwadratowym z kontrolowaną amplitudą parametru energetycznego dla zginania. Badania zmęczeniowe przeprowadzono na czterech poziomach amplitudy parametru energetycznego $W_a = 0,2; 0,3; 0,35; 0,4$ [MJ/m³], na każdym z poziomów zbadano minimum dwie próbki.



Rys. 46. Charakterystyka zmęczeniowa próbek ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym kwadratowym przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego W_a dla zginania

7.3. Opracowanie statystyczne wyników badań

Wyniki badań zmęczeniowych zostały poddane obliczeniom statystycznym. Do opisu wyników badań przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego i parametru energetycznego dla zginania zastosowano regresję liniową przedstawioną w zakresie współrzędnych pojedynczo logarytmicznym według normy ASTM [5]

$$\log N_f = B + A \cdot \sigma_a, \quad (73)$$

$$\log N_f = B + A \cdot W_a. \quad (74)$$

Dla powyższych równań (73), (74) zastosowano model przyjmujący postać

$$Y = B + AX, \quad (75)$$

gdzie: $Y = \log N_f$ natomiast $X = \sigma_a$ i $X = W_a$ odpowiednio w przypadku wyników badań z kontrolowaną amplitudą momentu zginającego równanie (73) oraz z kontrolowaną amplitudą parametru energetycznego równanie (74). Estymatory A i B zastosowana w postaci

$$\hat{A} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}, \quad (76)$$

$$\hat{B} = \bar{Y} - \hat{A}\bar{X}, \quad (77)$$

gdzie:

n – liczba zniszczonych próbek,

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad (78)$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i . \quad (79)$$

Wyliczono również współczynnik korelacji w celu weryfikacji dokładności dopasowania przyjętego modelu linowego do wyników badań, który wyliczono z poniższego wzoru

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} , \quad (80)$$

gdzie:

$$s_x^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 , \quad (81)$$

$$s_y^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 , \quad (82)$$

$$s_{xy} = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n X_i (Y_i - \bar{Y}) . \quad (83)$$

W tabeli 10 zostały przedstawione wyliczone współczynniki równania regresji A i B oraz współczynnik korelacji dla przedstawionych w rozdziale 7.1 i 7.2 wyników badań zmęczeniowych dla zginania. Na uwagę zasługują wartości współczynnika korelacji zbliżone do 1, które świadczą o dużej korelacji zastosowanego równania regresji do wyników badań zmęczeniowych.

Tabela 10. Współczynniki równania regresji A i B oraz korelacji r

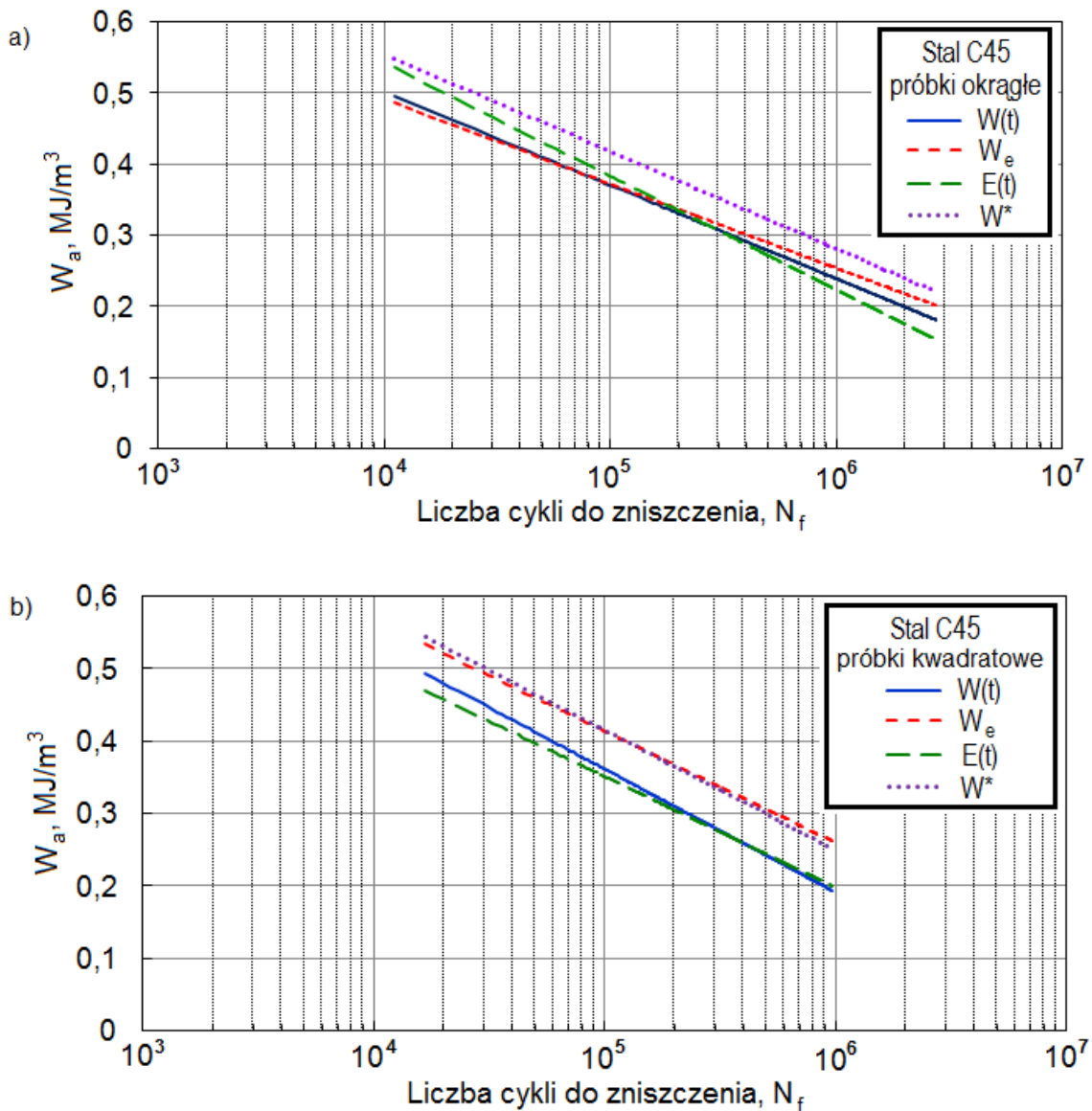
Material (rysunek)	Kontrolowana amplituda	Kształt próbki	A	B	r
Stal C45 (39)	momentu zginającego	okrągła	11,23	-0,02	0,97
Stal C45 (40)	momentu zginającego	kwadratowa	8,80	-0,01	0,93
Stal C45 (43)	parametru energetycznego	okrągła	7,53	-6,75	0,94
Stal C45 (44)	parametru energetycznego	kwadratowa	7,01	-5,02	0,93
Stop aluminium 2024 (41)	momentu zginającego	okrągła	10,61	-0,02	0,94
Stop aluminium 2024 (42)	momentu zginającego	kwadratowa	10,29	-0,02	0,98
Stop aluminium 2024 (45)	parametru energetycznego	okrągła	7,81	-7,31	0,87
Stop aluminium 2024 (46)	parametru energetycznego	kwadratowa	7,03	-7,22	0,96

7.4. Porównanie wyników badań doświadczalnych z wynikami obliczeniowymi

Uzyskane w trakcie badań przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego wyniki naprężeń i odkształceń umożliwiły obliczenie wartości parametru energetycznego dla innych wybranych modeli uwzględniających parametr energetyczny. Badania zmęczeniowe dla obu kształtów próbek ze stali C45 i stopu aluminium 2024 przeprowadzono przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego, który zaproponował Macha i współpracownicy (opisany w rozdziale 5.4). Do porównania tego modelu i weryfikacji wyników badań eksperymentalnych użyto modeli z parametrem energetycznym zaproponowanych przez Pawliczka, Lachowicz i model dla zakresu liniowo sprężystego, które to modele opisano w rozdziale 2.3 [87, 88].

Wyników obliczeń został przedstawione na rysunkach 47-48 oraz zestawione i przedstawione w załącznikach I-III.

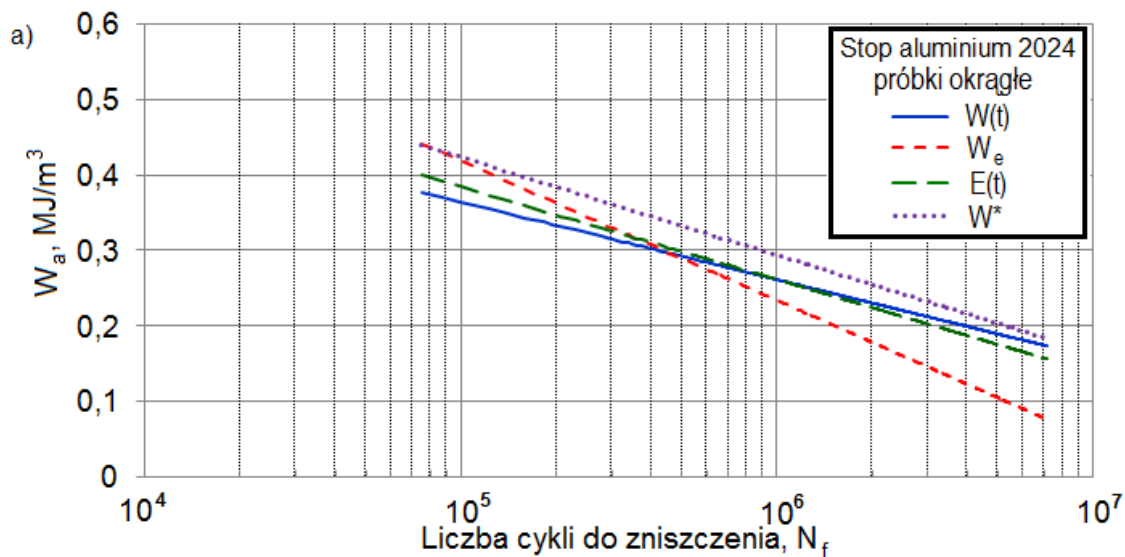
Na rysunku 47 została przedstawiona aproksymacja wyników badań doświadczalnych i obliczeniowych, próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym okrągłym a) i kwadratowym b). W przypadku próbek o przekroju poprzecznym okrągłym (rys. 47a) linia aproksymacji wyników badań $W(t)$ jest zbieżna z wynikami obliczeniowymi dla zakresu liniowo sprężystego W_e , a maksymalny błąd względny nie przekracza 5%. Porównując wyniki doświadczalne i obliczone według modelu Lachowicza $E(t)$ zauważono, że idealna zbieżność występuje dla wartości parametru energetycznego $W_a = 0,3 \text{ MJ/m}^3$, a następnie krzywe rozbiegają się zarówno dla wyższych jak i niższych wartości parametru energetycznego. Maksymalny błąd względny wynosi 8%. Wartości parametru energetycznego wyliczonego według modelu Pawliczka W^* nie pokrywają się z wynikami otrzymanymi z badań doświadczalnych. Wyniki badań doświadczalnych i obliczeniowych dla wybranych modeli przy kontrolowanym parametrze energetycznym próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym kwadratowym $W(t)$ zostały przedstawione na rys. 47b. Charakterystyka doświadczalna i obliczona według modelu Lachowicza $E(t)$ wykazują dużą zgodność. Dla wartości parametru W_a w zakresie od 0,2 do 0,3 charakterystyki są zgodne, a dla wyższych wartości parametru energetycznego charakterystyki rozchodzą się. Maksymalny błąd względny wynosi 6%. Charakterystyki obliczone według modelu Pawliczka W^* i modelu dla zakresu liniowo-sprężystego W_e wykazują wzajemną zgodność, lecz nie pokrywają się z charakterystyką otrzymaną z badań doświadczalnych (błąd względny zmienia się od 8 do 30%).

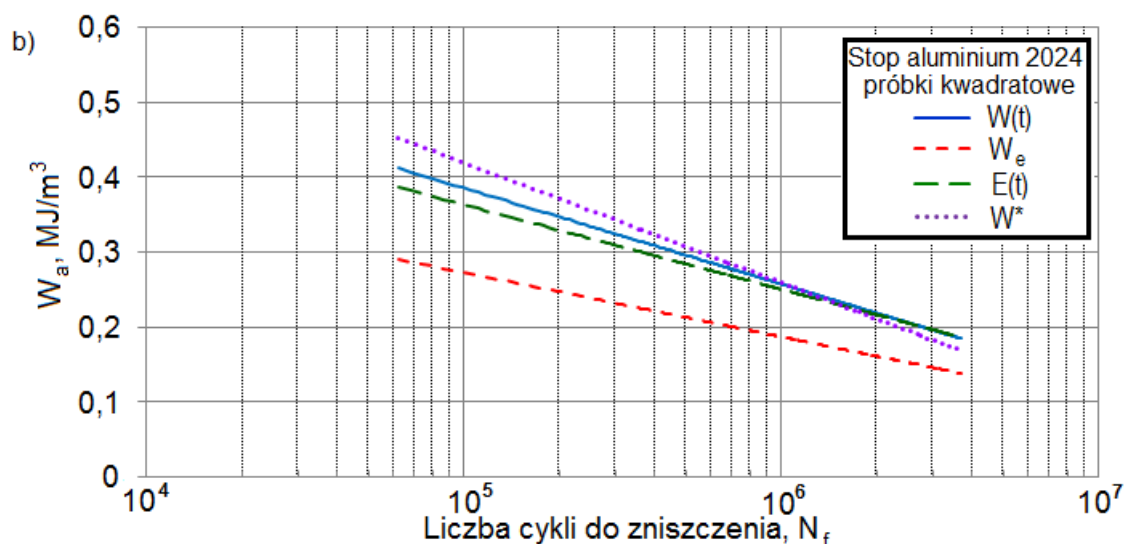


Rys. 47. Porównanie charakterystyki doświadczalnej $W(t)$ próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym okrągłym a) i kwadratowym b) z wyniki obliczonymi według modelu liniowo-sprężystego W_e , modelu Lachowicza $E(t)$ i modelu Pawliczka W^*

Aproksymacja wyników badań doświadczalnych dla stopu aluminium 2024 oraz wyników obliczeń dla wybranych modeli uwzględniających parametr energetyczny została przedstawiona na rysunku 48 próbek o przekroju poprzecznym okrągłym a) i kwadratowym b). W przypadku wyników badań dla próbek ze stopu 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym i wyników obliczonych (rys. 48a) możemy zaobserwować największą zbieżność z modelem parametru energetycznego Lachowicza. Największa zbieżność występuje dla zakresu parametru energetycznego W_a od 0,2 do 0,3 MJ/m³, a następnie wyniki rozbiegają się i dla wartości $W_a = 0,4$ MJ/m³ maksymalny błąd względny wynosi 5%. Wartości amplitudy

parametru energetycznego obliczone dla zakresu liniowo sprężystego są zbieżne z aproksymacją wyników badań doświadczalnych tylko dla wartości parametru energetycznego $W_a = 0,3 \text{ MJ/m}^3$, a następnie rozbiegają się i maksymalny błąd względny wynosi 35%. W przypadku obliczeń parametru energetycznego dla modelu Pawliczka W^* i wyników badań doświadczalnych $W(t)$ występuje zbieżność, na rys. 48a, dla wartości niższych od $W_a = 0,2 \text{ MJ/m}^3$, linie dążą do przecięcia się, błąd względny w zakresie od 5% do 20%. Na rysunku 48b zostały przedstawione linie aproksymacji wyników badań doświadczalnych i wyników obliczonych dla próbek ze stopu 2024 o przekroju poprzecznym kwadratowym. Dla tego przypadku największą zbieżność wyników badań zmęczeniowych z wynikami obliczonymi obserwuje się dla modelu Lachowicza, największy błąd względny wynosi 5% dla wartości parametru energetycznego $W_a = 0,4 \text{ MJ/m}^3$. Wyniki obliczeń dla modelu Pawliczka przecina się z wynikami badań dla $W_a = 0,25 \text{ MJ/m}^3$, największy błąd względny wynosi 13%. Aproksymacja wyników obliczeń dla zakresu liniowo sprężystego nie pokrywa się z aproksymacją wyników badań zmęczeniowych, błąd względny wynosi od 10% do 30%.





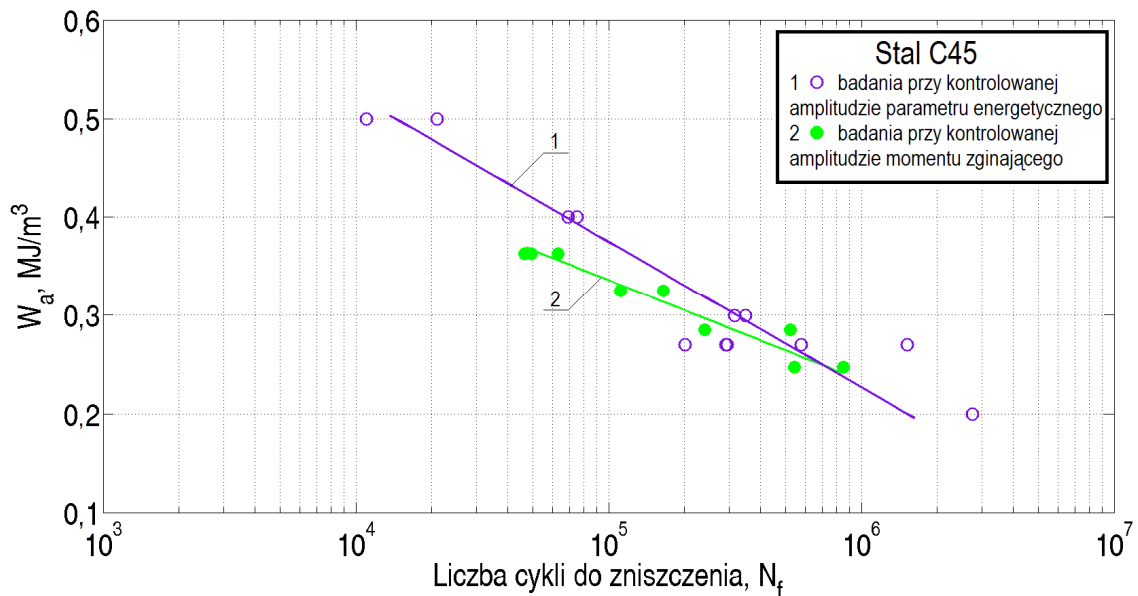
Rys. 48. Porównanie charakterystyki doświadczalnej $W(t)$ próbek ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym a) i kwadratowym b) z wyniki obliczonymi według modelu liniowo-sprężystego W_e , modelu Lachowicza $E(t)$ i modelu Pawliczka W^*

Na podstawie rysunków 47 i 48 możemy zaobserwować, że wyniki z użyciem modelu Machy i innych nie odbiegają od innych wyników, najlepsze dopasowanie występuje do aproksymacji wyników badań zmęczeniowych z wynikami obliczonymi dla modelu Lachowicza. Błąd względny pomiędzy aproksymacją tych wyników nie przekracza 8%.

8. Wpływ obciążenia próbki na trwałość zmęczeniową

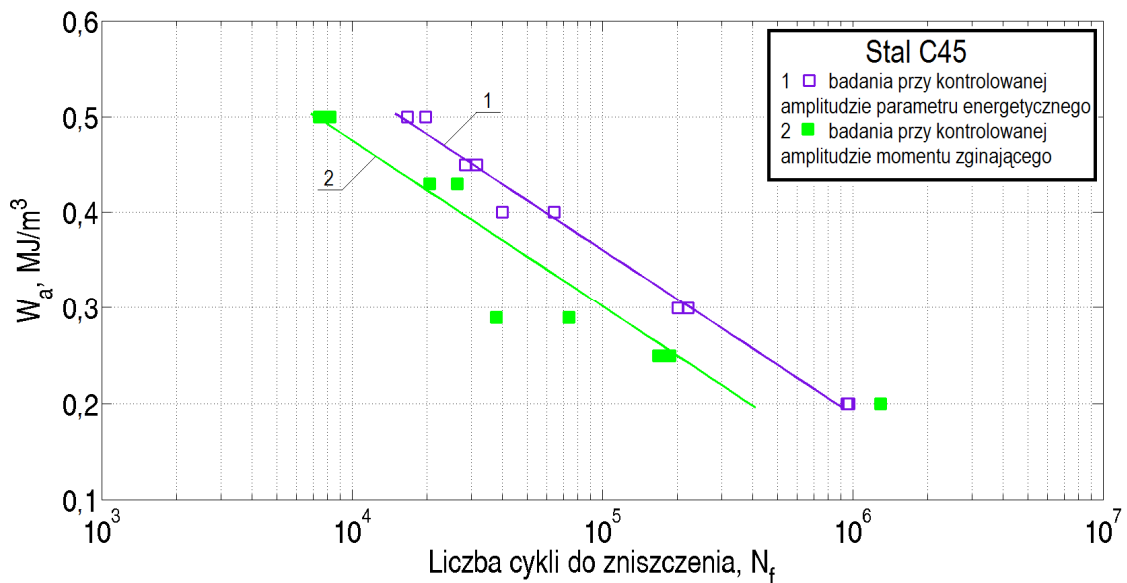
Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych dla próbek ze stali C45 i stopu aluminium 2024 poddanych zginaniu istnieje możliwość określenia wpływu obciążenia na trwałość zmęczeniową. Jako parametr obciążenia dla przeprowadzonych badań przyjęto amplitudę parametru energetycznego oraz amplitudę momentu zginającego. Posiadając wartości uzyskane w trakcie badań przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego M_g wyliczono wartości naprężenia $\sigma_a = M_g/W_x$. Na podstawie uzyskanych wartości naprężeń wyliczono wartości energii sprężystej, zgodnie z liniowo-sprężystym modelem ciała ($W_a = \sigma_a^2/2E$). Uzyskane na tej podstawie wartości parametru energetycznego oraz ich aproksymacja pozwoliły na uzyskanie i porównanie charakterystyk zmęczeniowych energetycznych. Na rysunkach 49 – 52 zostały przedstawione wyniki badań przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego oraz wyniki parametru energetycznego uzyskane na podstawie wyników badań przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego. Analizie wpływu obciążenia zostały poddane w niniejszej pracy wyniki badań zmęczeniowych uzyskane dla próbek ze stali C45 i stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym i kwadratowym [95].

Na rysunku 49 przedstawiono wyniki badań zmęczeniowych uzyskane przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego i wyniki badań uzyskane na podstawie kontrolowanej amplitudy momentu zginającego oraz ich aproksymacja dla próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym okrągłym. Uzyskane wyniki badań zmęczeniowych przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego zostały przeliczone na wartości parametru energetycznego otrzymując dla zakresu liniowo-sprężystego $W_a = 0,25; 0,28; 0,32; 0,36 \text{ MJ/m}^3$. Porównanie uzyskanych charakterystyk wskazuje, iż trwałość próbek (w zakresie od 10^4 do $7 \cdot 10^5$ liczby cykli do zniszczenia) przy kontrolowanym parametrze energetycznym jest wyższa niż trwałość próbek przy kontrolowanym momencie zginającym. Charakterystyki dążą do przecięcia się przy niskiej wartości parametru energetycznego (około $W_a = 0,25 \text{ MJ/m}^3$).



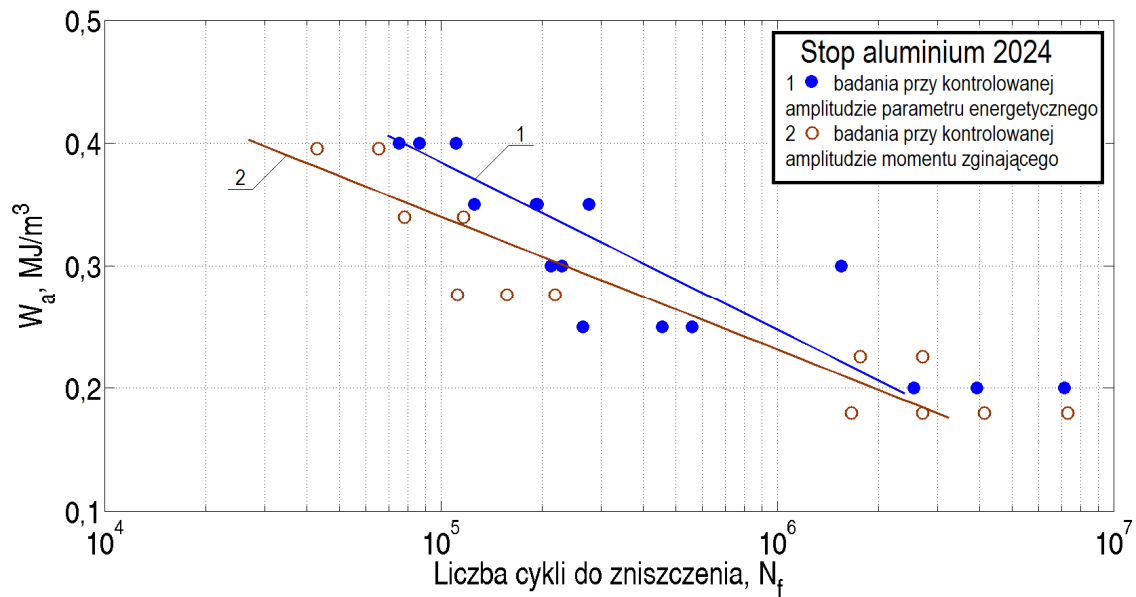
Rys. 49. Charakterystyka zmęczeniowa próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym okrągłym z kontrolowaną amplitudą momentu zginającego i parametru energetycznego

Wyniki badań uzyskane przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego i momencie zginającym oraz ich aproksymacja dla próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym kwadratowym zostały przedstawione na rysunku 50. W celu określenia wpływu obciążenia na trwałość zmęczeniową na podstawie wyników uzyskanych z badań przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego wyliczono wartość parametru energetycznego zgodnie z liniowo-sprężystym modelem ciała, a wyniki tych obliczeń i ich aproksymacja zostały przedstawione na rysunku 50. Na podstawie obliczeń uzyskano wartość parametru energetycznego $W_a = 0,2; 0,25; 0,29; 0,43; 0,5 \text{ MJ/m}^3$. Przedstawione charakterystyki wskazują, że trwałość próbek przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego jest wyższa niż przy kontrolowanym momencie zginającym. Charakterystyki nie pokrywają się i są równoległe względem siebie co pozwala na stwierdzenie, że istnieje wpływ obciążenia na trwałość zmęczeniową.



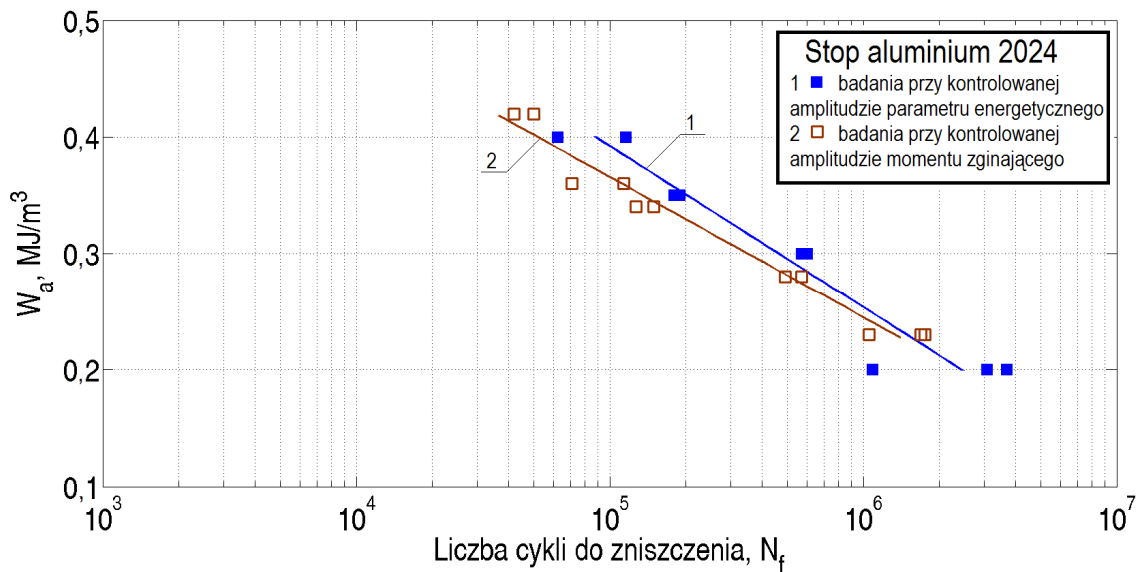
Rys. 50. Charakterystyka zmęczeniowa próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym kwadratowym z kontrolowaną amplitudą momentu zginającego i parametru energetycznego

Na rysunku 51 zostały przedstawione wyniki badań dla próbek ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego i kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego. Uzyskano następujące wartości parametru energetycznego przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego $W_a = 0,18; 0,23; 0,28; 0,34; 0,39$ MJ/m³. Na podstawie przedstawionych charakterystyk można stwierdzić iż trwałość próbek wykonanych przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego, dla zakresu od $3 \cdot 10^4$ do około $2 \cdot 10^6$, jest wyższa niż trwałość próbek przeprowadzonych przy kontroli amplitudy momentu zginającego. Charakterystyki dla wartości parametru energetycznego około $W_a = 0,2$ MJ/m³ dążą do przecięcia się.



Rys. 51. Charakterystyka zmęczeniowa próbek ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym z kontrolowaną amplitudą momentu zginającego i parametru energetycznego

Wyniki badań zmęczeniowych przeprowadzone przy kontroli amplitudy parametru energetycznego oraz kontroli momentu zginającego dla próbek ze stopu 2024 o przekroju poprzecznym kwadratowym zostały przedstawione na rysunku 52. Parametr energetyczny dla modelu ciała liniowo-sprężystego przy kontroli momentu zginającego posiada wartości $W_a = 0,23; 0,28; 0,34; 0,36; 0,42 \text{ MJ/m}^3$. Aproksymacja uzyskanych wyników badań zmęczeniowych pozwala na stwierdzenie iż trwałość próbek przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego jest wyższa niż trwałość próbek przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego (dla zakresu od $8 \cdot 10^4$ do 10^6), podobnie jak obserwowano na wcześniejszych rysunkach. Energetyczne charakterystyki zmęczeniowe dążą do przecięcia się dla $W_a = 0,22 \text{ MJ/m}^3$.

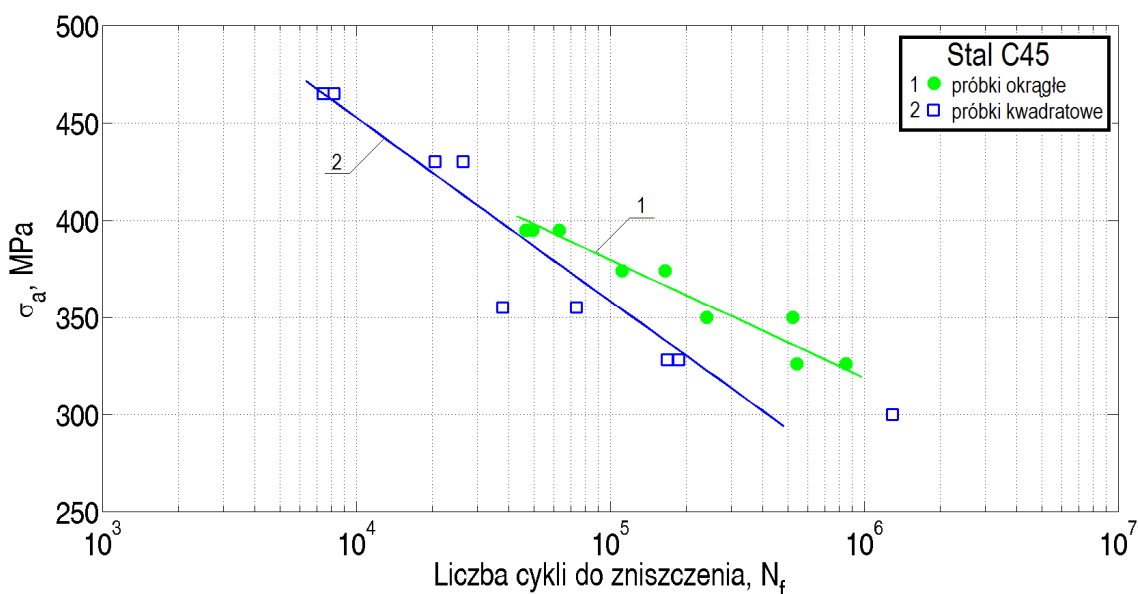


Rys. 52. Charakterystyka zmęczeniowa próbek ze stopu 2024 o przekroju poprzecznym kwadratowym z kontrolowaną amplitudą momentu zginającego i parametru energetycznego

Na podstawie przedstawionych charakterystyk można stwierdzić, że istnieje wpływ obciążenia na trwałość zmęczeniową. Aproksymacje wyników badań wskazują, że próbki posiadają wyższą trwałość w przypadku badań przeprowadzonych przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego. Charakterystyki zmęczeniowe dla próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym okrągłym i próbek ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym i kwadratowym dążą do przecięcia się przy niższych wartościach parametru energetycznego w zakresie od 0,2 do 0,25 MJ/m³. Przyczyną tendencji do zbiegania się przedstawionych charakterystyk jest różnica w sposobie uwzględniania odkształceń. W przypadku wyników badań przeprowadzonych przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego wartość odkształcenia jest uwzględniona, natomiast dla modelu ciała liniowo-sprężystego wyniki przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego nie uwzględniają wartości odkształcenia. Aproksymacja wyników badań dla próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym kwadratowym wykazuje równoległość charakterystyk.

9. Wpływ kształtu próbki na trwałość zmęczeniową

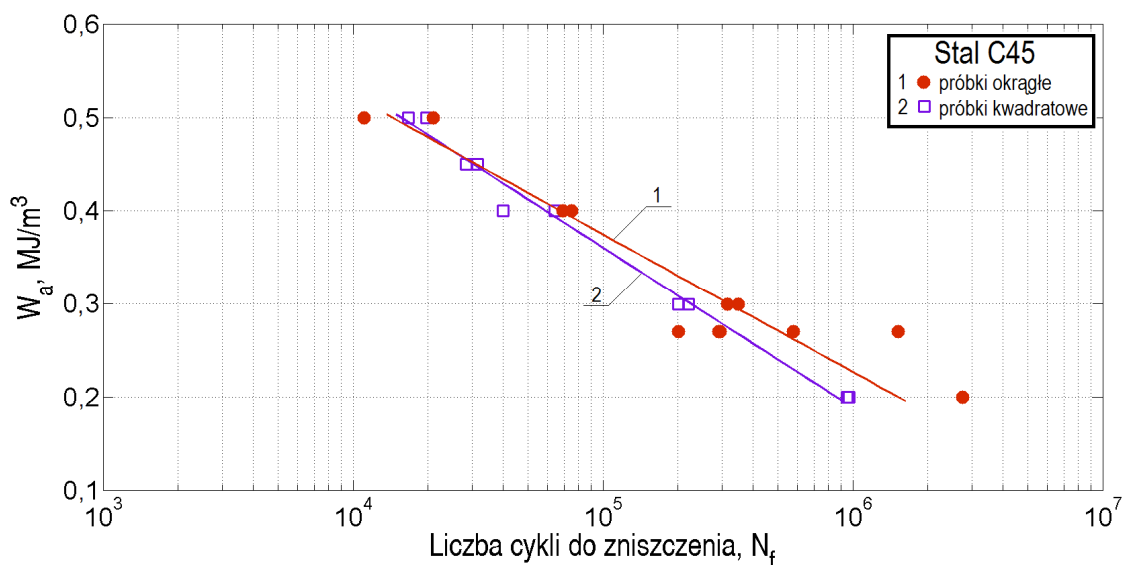
Badania przeprowadzone dla dwóch kształtów próbek (przekrój poprzeczny okrągły i kwadratowy) oraz dla różnych obciążeń pozwalają na określenie wpływu kształtu próbki na trwałość zmęczeniową. Analiza wpływu kształtu próbek zostanie przeprowadzona na podstawie wyników badań próbek, których kształt i rozmiar zostały przedstawione w rozdziale 5.2. Badania przeprowadzono dla próbek okrągłych i kwadratowych oraz na dwóch materiałach: stali C45 i stopie 2024 (rozdział 5.1.). Dla próbek zostały przeprowadzone badania przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego i parametru energetycznego. Aproksymacje wyników pozwoliły na przedstawienie charakterystyk zmęczeniowych naprężeniowych i energetycznych, które zostały przedstawione na rysunkach 53-56 [83, 91]. Na rysunku 53 zostały przedstawione wyniki badań zmęczeniowych próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym okrągłym i kwadratowym oraz ich aproksymacja przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego. Porównanie uzyskanych charakterystyk wskazuje iż trwałość próbek o przekroju poprzecznym kwadratowym jest niższa niż trwałość próbek o przekroju poprzecznym okrągłym. Charakterystyki przy wyższych wartościach naprężenia (powyżej 400 MPa) dążą do przecięcia się. Błąd względny pomiędzy wynikami dla próbek o przekroju poprzecznym okrągłym i kwadratowym wynosi 15%.



Rys. 53. Charakterystyka zmęczeniowa stali C45 wykonana z kontrolowaną amplitudą momentu zginającego próbek o przekroju poprzecznym 1 – okrągłym, 2 – kwadratowym

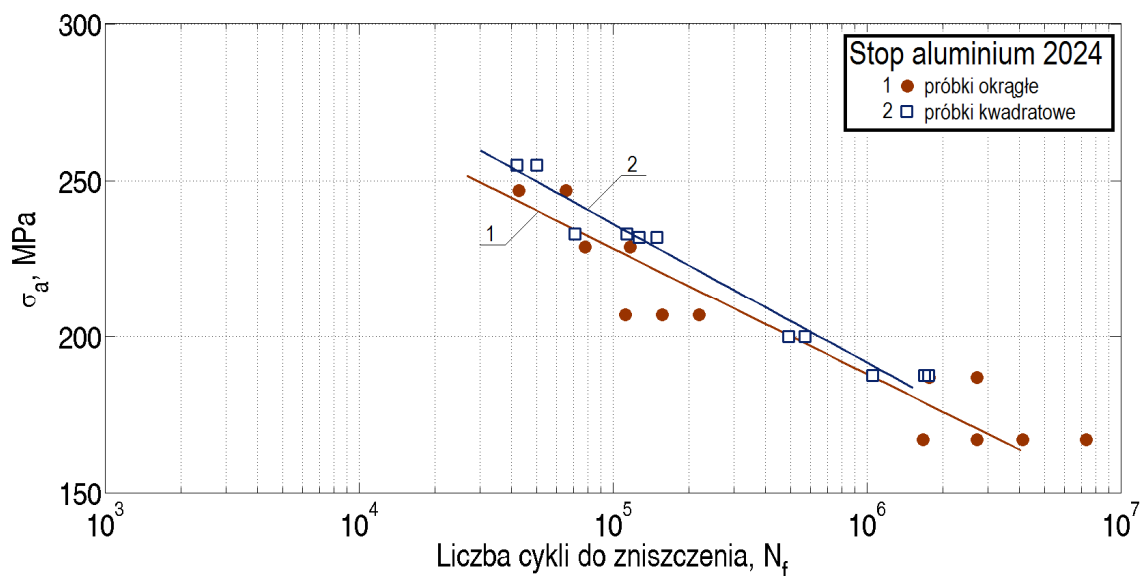
Wyniki badań zmęczeniowych przeprowadzone przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego dla próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym okrągłym i kwadratowym

zostały przedstawione na rysunku 54. Na podstawie wyników badań wykreślono linie aproksymacji (charakterystyki) dla próbek okrągłych i kwadratowych. Przedstawione na rys. 54 charakterystyki pozwalają na określenie wpływu kształtu na trwałość zmęczeniową przy zginaniu. Trwałość próbek o przekroju poprzecznym kwadratowym jest nieznacznie niższa niż trwałość próbek o przekroju poprzecznym okrągłym. Można stwierdzić, że charakterystyki mają tendencję do zbiegania się przy wyższych wartościach parametru W_a , a maksymalny błąd względny wynosi 19%.



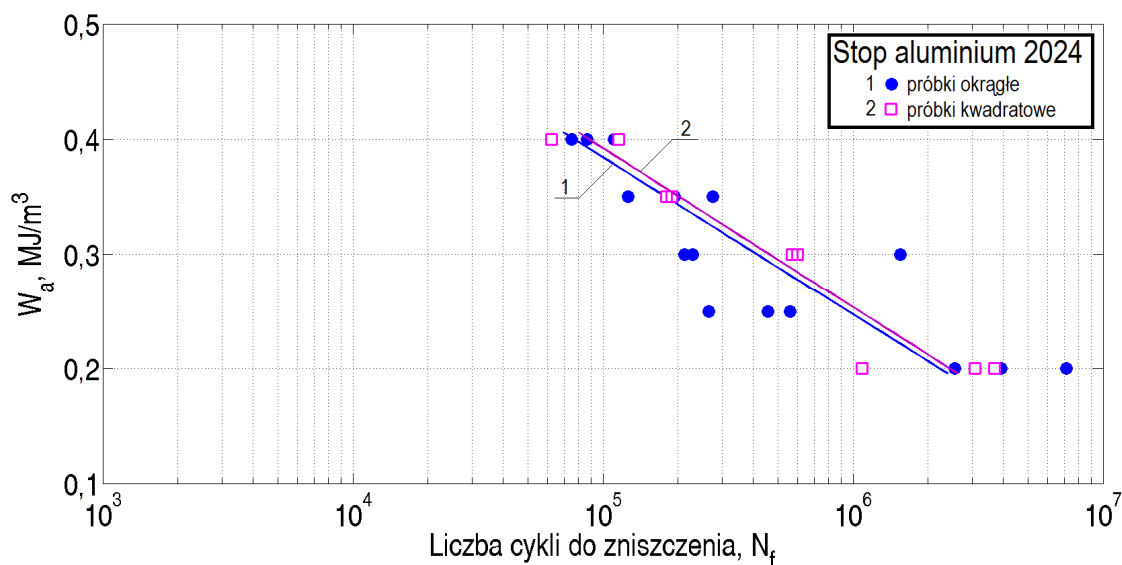
Rys. 54. Charakterystyka zmęczeniowa stali C45 wykonana przy zginaniu z kontrolowaną amplitudą parametru energetycznego próbek o przekroju poprzecznym 1 – okrągłym, 2 – kwadratowym

Na rysunku 55 zostały przedstawione wyniki badań zmęczeniowych próbek ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym i kwadratowym wykonane przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego. Na podstawie uzyskanych wyników badań wykreślone zostały charakterystyki zmęczeniowe naprężeniowe przedstawione na rys. 55. Porównanie uzyskanych charakterystyk wskazuje iż trwałość próbek o przekroju poprzecznym kwadratowym jest wyższa niż trwałość próbek o przekroju poprzecznym okrągłym. Charakterystyki przy niższych wartościach naprężeń dążą do przecięcia się.



Rys. 55. Charakterystyka zmęczeniowa stopu aluminium 2024 wykonana z kontrolowaną amplitudą momentu zginającego próbek o przekroju poprzecznym 1 – okrągłym, 2 – kwadratowym

Wyniki badań próbek ze stopu 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym i kwadratowym wykonanych przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego przy zginaniu zostały przedstawione na rys. 56. Trwałość próbek o przekroju poprzecznym kwadratowym jest nieznacznie wyższa niż trwałość próbek o przekroju poprzecznym okrągłym. Charakterystyki zmęczeniowe przebiegają równolegle względem siebie. Błąd względny pomiędzy charakterystykami nie przekracza 5%.



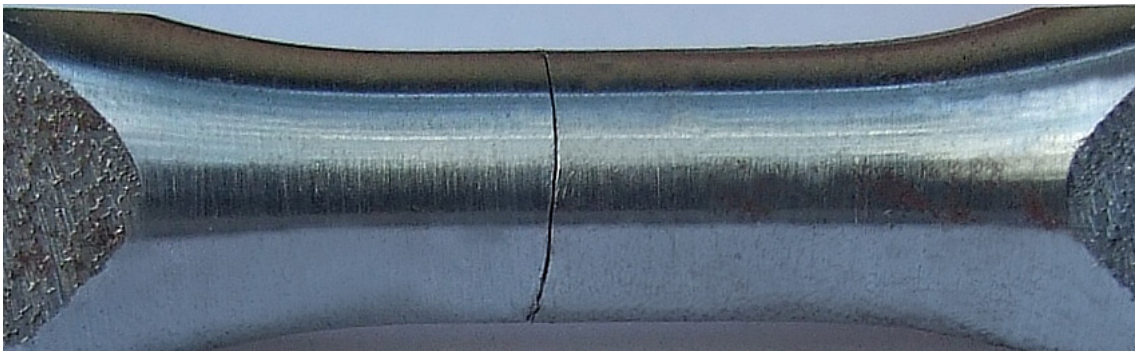
Rys. 56. Charakterystyka zmęczeniowa stali C45 wykonana przy zginaniu z kontrolowaną amplitudą parametru energetycznego próbek o przekroju poprzecznym 1 – okrągłym, 2 – kwadratowym

Na podstawie zaprezentowanych charakterystyk zmęczeniowych naprężeniowych i energetycznych dla stali C45 można stwierdzić, że występuje wpływ kształtu próbki na trwałość zmęczeniową. W przypadku stali C45 wpływ kształtu jest w szczególności widoczny dla niższych wartości naprężeń i parametru energetycznego, gdzie wykresy rozbiegają się. Przedstawione wyniki badań dla stopu aluminium 2024 wskazują, że trwałość próbek o przekroju poprzecznym kwadratowym jest wyższa niż próbek o przekroju poprzecznym okrągłym zarówno przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego jak i parametru energetycznego. Charakterystyki energetyczne dla stopu 2024 wykazują równoległość, a wyliczona wartość błędu względnego jest niewielka. Na podstawie czego można stwierdzić, że dla próbek ze stopu 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym i kwadratowym przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego wpływ kształtu próbki jest nieznaczny.

10. Analiza pęknięć zmęczeniowych

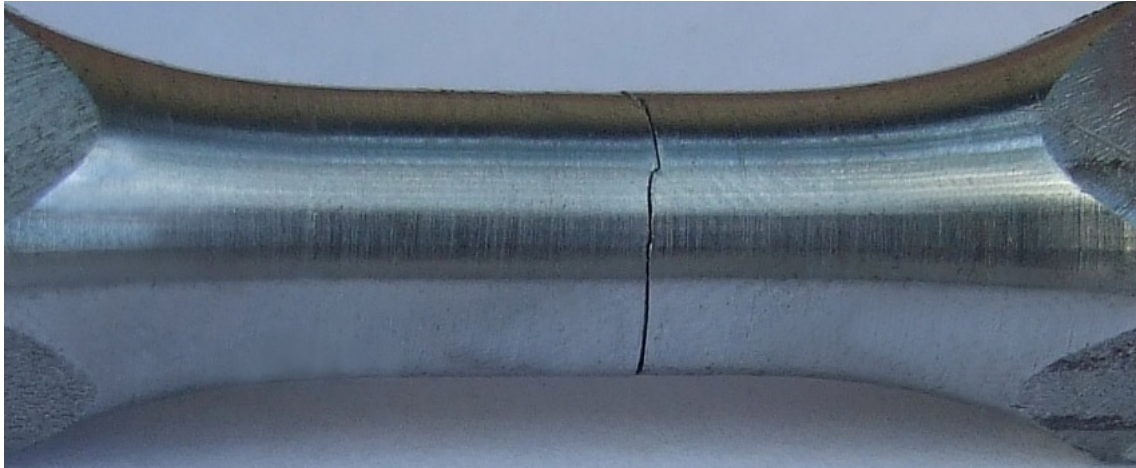
W niniejszym rozdziale zostaną przedstawione przykładowe pęknięcia zmęczeniowe próbek poddanych badaniom przy zginaniu. Ścieżki pęknięć zostały uzyskane w trakcie badań prowadzonych przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego oraz parametru energetycznego. Próbki poddane badaniom były wykonane ze stali C45 i stopu aluminium 2024 (rozdział 5.1), posiadały 2 różne kształty przedstawione na rysunkach 8 i 9 (rozdział 5.2).

Przykładowe ścieżki pęknięć dla próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym okrągłym i kwadratowym zostały przedstawione na rysunkach 57 – 60. Na rysunku 57 zostało przedstawione zdjęcie pęknięcia zmęczeniowego (płaszczyzny złomu) uzyskane dla próbki ze stali C45 o przekroju poprzecznym okrągłym. Pokazaną na rys. 57 ścieżkę pęknięcia uzyskano dla badań przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego $M_g = 36,7 \text{ N}\cdot\text{m}$, co odpowiada naprężeniu $\sigma_a = 374 \text{ MPa}$ do inicjacji. Próbka uległa zniszczeniu po 165000 cyklach. Przedstawione pęknięcie rozwijało się w płaszczyźnie prostopadłej do największych naprężeń normalnych.



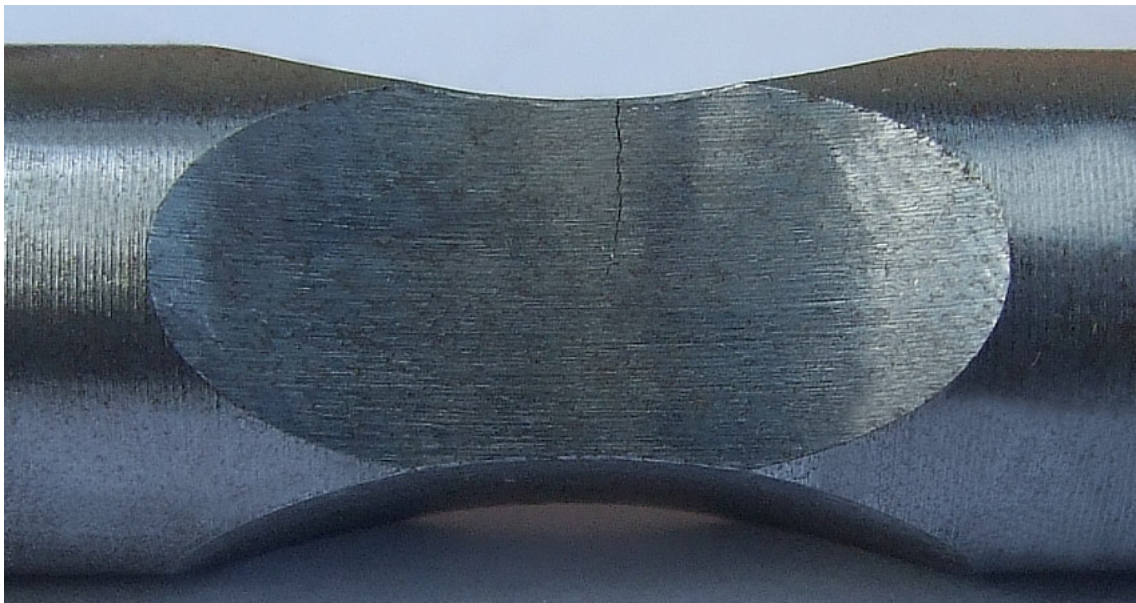
Rys. 57. Pęknięcie zmęczeniowe próbki ze stali C45 o przekroju poprzecznym okrągłym z kontrolowaną amplitudą momentu zginającego $M_g = 36,7 \text{ N}\cdot\text{m}$

Przykładowe pęknięcie uzyskane dla próbki ze stali C45 o przekroju poprzecznym okrągłym dla badań przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego zostało przedstawione na rysunku 58. Badania próbki prowadzono dla amplitudy parametru energetycznego $W_a = 0,27 \text{ MJ/m}^3$, przedstawioną ścieżkę pęknięcia uzyskano po 295200 cyklach. Pęknięcie rozwijało się w płaszczyźnie prostopadłej do największych naprężeń normalnych.



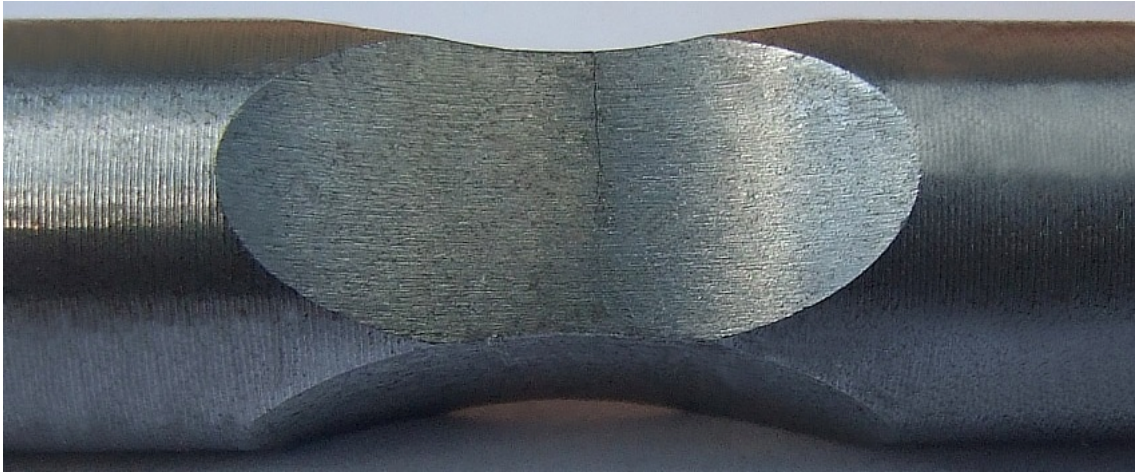
Rys. 58. Pęknięcie zmęczeniowe próbki ze stali C45 o przekroju poprzecznym okrągłym uzyskane przy zginaniu z kontrolowaną amplitudą parametru energetycznego $W_a = 0,27$ MJ/m³

Na rysunku 59 przedstawiono ścieżkę pęknięcia uzyskaną w trakcie badań przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego dla próbki ze stali C45 o przekroju poprzecznym kwadratowym. Dla przedstawionej próbki badania prowadzono przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego $M_g = 35$ N·m ($\sigma_a = 355$ MPa), a złom uzyskano dla 73800 cykli. Uzyskane pęknięcie zmęczeniowe rozwijało się w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku naprężeń normalnych.



Rys. 59. Pęknięcie zmęczeniowe próbki ze C45 o przekroju poprzecznym kwadratowym z kontrolowaną amplitudą momentu zginającego $M_g = 35$ N·m

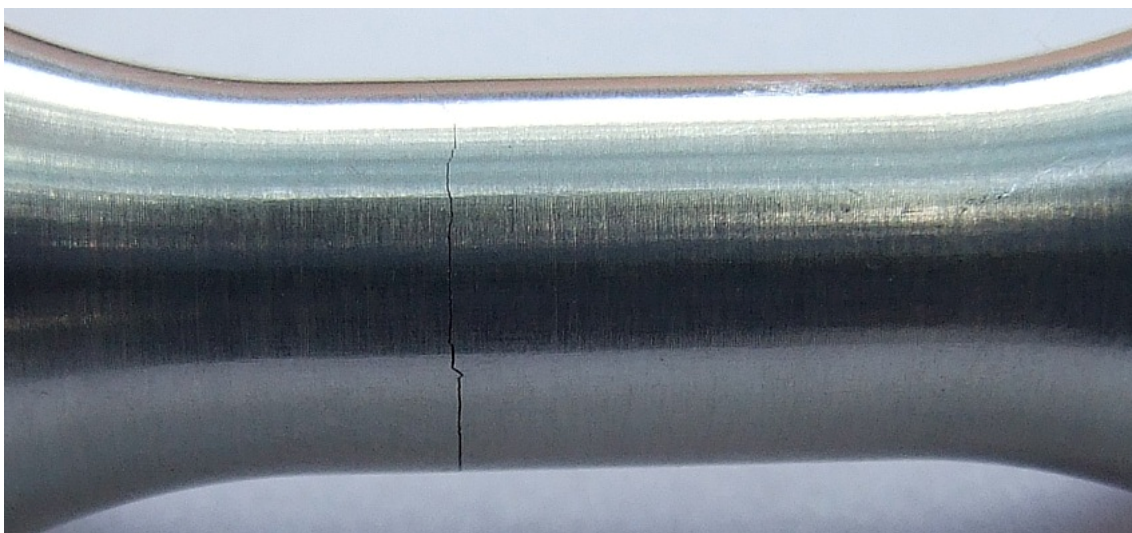
Na rysunku 60 przedstawiono ścieżkę pęknięcia uzyskaną w trakcie badań zginania przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego próbki ze stali C45 o przekroju poprzecznym kwadratowym. Złom zmęczeniowy uzyskano dla 31500 cykli w trakcie badań prowadzonych przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego $W_a = 0,45 \text{ MJ/m}^3$. Pęknięcie rozwija się prostopadle do kierunku naprężeń normalnych.



Rys. 60. Pęknięcie zmęczeniowe próbki ze stali C45 o przekroju poprzecznym kwadratowym uzyskane przy zginaniu z kontrolowaną amplitudą parametru energetycznego $W_a = 0,45 \text{ MJ/m}^3$

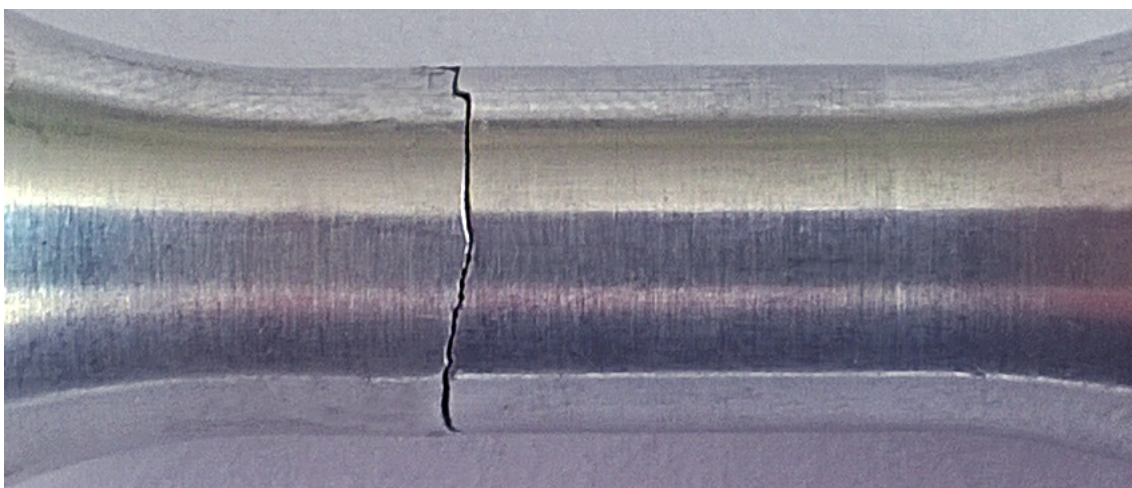
Na rysunkach 61 – 64 zostały przedstawione przykładowe ścieżki pęknięcia uzyskane dla stopu aluminium 2024 w trakcie badań prowadzonych przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego i parametru energetycznego próbek o przekroju poprzecznym okrągłym i kwadratowym [93, 94].

Na rysunku 61 została przedstawiona ścieżka pęknięcia dla próbek ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym. Ścieżkę pęknięć uzyskano dla badań przeprowadzonych przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego $M_g = 16,38 \text{ N}\cdot\text{m}$, co odpowiada $\sigma_a = 167 \text{ MPa}$. Przedstawioną płaszczyznę złomu uzyskano dla 4120000 cykli, pęknięcie zmęczeniowe rozwijało się w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku naprężeń normalnych



Rys. 61. Położenie płaszczyzny złomu dla próbki ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym z kontrolowaną amplitudą momentu zginającego $M_g = 16,38 \text{ N}\cdot\text{m}$

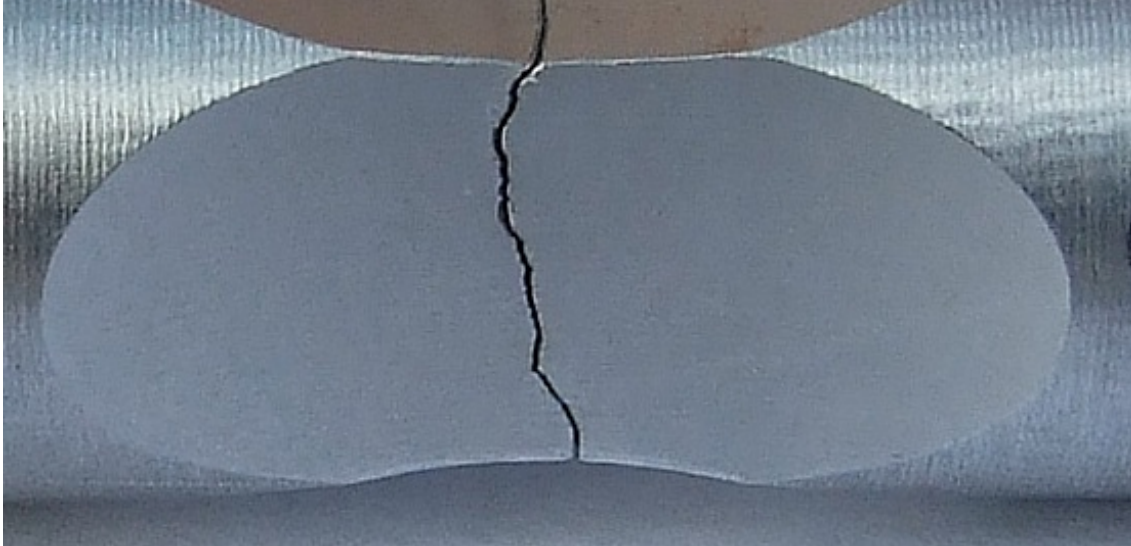
Płaszczyznę złomu przedstawioną na rysunku 62, uzyskano dla badań przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego dla próbki ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym. Badania prowadzono przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego $W_a = 0,25 \text{ MJ/m}^3$, a przedstawiona ścieżka pęknięcia została uzyskana dla 264500 cykli. Pęknięcie zmęczeniowe rozwijało się w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku naprężeń normalnych.



Rys. 62. Położenie płaszczyzny złomu dla próbki ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym uzyskane przy zginaniu z kontrolowaną amplitudą parametru energetycznego $W_a = 0,25 \text{ MJ/m}^3$

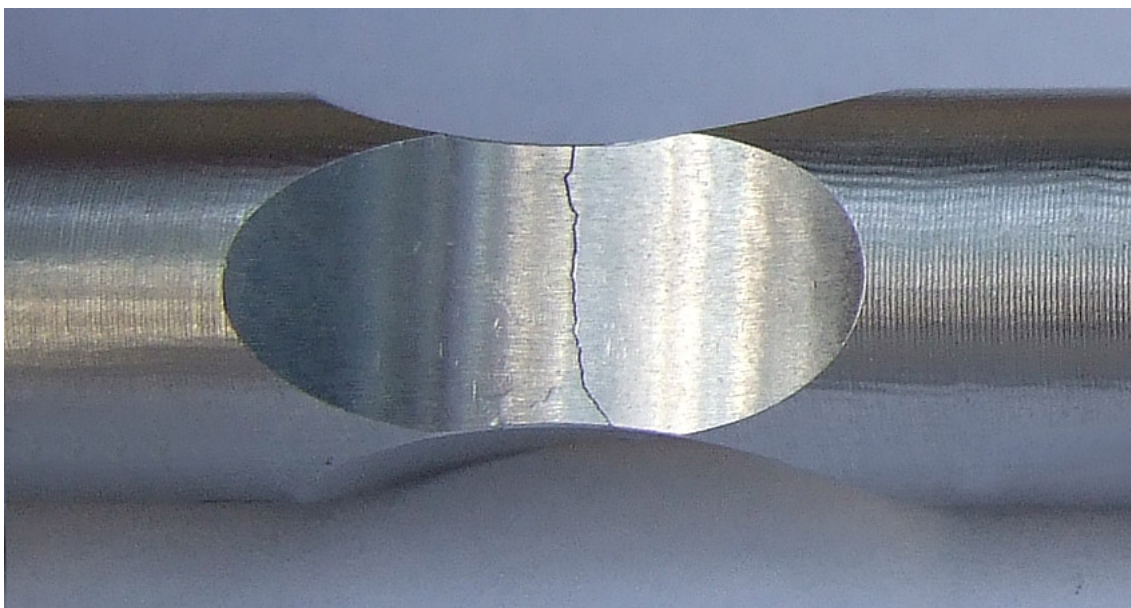
Na rysunku 63 przedstawiono położenie płaszczyzny pęknięcia uzyskane w trakcie badań przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego dla próbki ze stopu aluminium 2024 o

przekroju poprzecznym kwadratowym. Badania prowadzono dla $M_g = 22,92 \text{ N}\cdot\text{m}$, co odpowiada $\sigma_a = 232 \text{ MPa}$. Przedstawioną płaszczyznę pęknięcia uzyskano dla 127100 cykli. Na rys. 63 obserwuje się nieregularne pęknięcie, które rozwija się pod kątem $\beta = 15^\circ$, odchylając się od kierunku prostopadłego do największych naprężeń normalnych.



Rys. 63. Położenie płaszczyzny pęknięcia dla próbki ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym kwadratowym uzyskane przy zginaniu z kontrolowaną amplitudą momentu zginającego $M_g = 22,92 \text{ N}\cdot\text{m}$

Na rysunku 64 przedstawiono położenie płaszczyzny pęknięcia dla próbki ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym kwadratowym uzyskane w trakcie badań przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego $W_a = 0,4 \text{ MJ/m}^3$. Przedstawione położenie płaszczyzny pęknięcia uzyskano dla 115500 cykli. Inicjacja pęknięcia nastąpiła u góry próbki i płaszczyzna pęknięcia rozwijała się pod kątem około 10° prostopadle do największych naprężeń normalnych.



Rys. 64. Położenie płaszczyzny pęknięcia dla próbki ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym kwadratowym uzyskane przy zginaniu z kontrolowaną amplitudą parametru energetycznego $W_a = 0,4 \text{ MJ/m}^3$

10.1. Analiza złomów zmęczeniowych

Przeprowadzone badania zmęczeniowe pozwoliły na uzyskanie obrazów przełomów zmęczeniowych. Na rysunkach 65 – 70 zostały przedstawione zdjęcia złomów zmęczeniowych otrzymane dla zginania próbek ze stali C45 i stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym i kwadratowym uzyskane przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego i parametru energetycznego.

Przykładowe obrazy przełomów zmęczeniowych uzyskane w trakcie badań próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym okrągłym zostały przedstawione na rysunku 65a przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego, b) parametru energetycznego. Obraz przełomu dla badań z kontrolowaną amplitudą momentu zginającego (rys. 65a) $M_g = 31,99 \text{ N}\cdot\text{m}$ ($\sigma_a = 326 \text{ MPa}$) uzyskano po 542300 cykli. Przełom zmęczeniowy przedstawiony na rys. 65b uzyskano przy kontroli parametru energetycznego $W_a = 0,3 \text{ MJ/m}^3$ dla 348100 cykli. Na przedstawionych powierzchniach złomu zmęczeniowego obserwuje się dwie strefy: zmęczeniową oraz doraźną. W przedstawionych przypadkach nie jest widoczne ognisko przełomu, kierunki propagacji szczeliny zmęczeniowej oraz linie czoła szczeliny zmęczeniowej.

a)



b)



Rys. 65. Przelomy zmęczeniowe stali C45 uzyskane przy zginaniu z kontrolowaną amplitudą a) momentu zginającego, b) parametru energetycznego próbek o przekroju poprzecznym okrągłym

Na rysunku 66 zostały przedstawione obrazy złomów zmęczeniowych uzyskane dla stali C45 próbek o przekroju poprzecznym kwadratowym podczas badań przy kontrolowanej amplitudzie a) momentu zginającego, b) parametru energetycznego. Przedstawiony na rysunku 66a złom zmęczeniowy uzyskano podczas badań przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego $M_g = 35,07 \text{ N}\cdot\text{m}$ ($\sigma_a = 355 \text{ MPa}$) po 73800 cykli. Złom zmęczeniowy pokazany na rys. 66b dla badań przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego $W_a = 0,3 \text{ MJ/m}^3$ po 201000 cykli. Na przedstawionych obrazach złomów zmęczeniowych dla próbek o przekroju poprzecznym kwadratowym widoczna jest strefa zmęczeniowa oraz strefa doraźna. Na przedstawionym rysunku 66 widoczne są również pasma poślizgu.

a)



b)



Rys. 66. Przelomy zmęczeniowe stali C45 uzyskane przy zginaniu z kontrolowaną amplitudą a) momentu zginającego, b) parametru energetycznego próbek o przekroju poprzecznym kwadratowym

Obrazy przelomów zmęczeniowych uzyskane dla próbek o przekroju poprzecznym okrągłym ze stopu aluminium 2024 zostały przedstawione na rysunku 67. Obraz złomu zmęczeniowego uzyskano podczas badań przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego (rys. 67a) dla $M_g=16,38 \text{ N}\cdot\text{m}$ ($\sigma_a = 167 \text{ MPa}$) po 2712300 cykli. Złom zmęczeniowy przedstawiony na rys. 67b uzyskano przy kontroli parametru energetycznego wynoszącego $W_a= 0,25 \text{ MJ/m}^3$ po 455700 cykli. Przedstawione przelomy zmęczeniowe uzyskane dla stopu aluminium 2024 obrazują strefę zmęczeniową oraz strefę doraźną. Zaprezentowane na rysunku 67 przelomy zmęczeniowe posiadają wygładzoną, błyszczącą powierzchnię zmęczeniową, na której widoczne jest ognisko pęknięcia oraz kierunki propagacji szczeliny zmęczeniowej. Strefa doraźna posiada powierzchnię matową.

a)



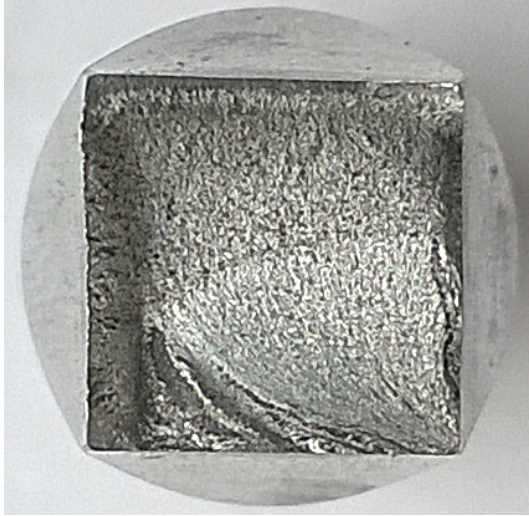
b)



Rys. 67. Przełomy zmęczeniowe stopu aluminium 2024 uzyskane przy zginaniu z kontrolowaną amplitudą a) momentu zginającego, b) parametru energetycznego próbek o przekroju poprzecznym okrągłym

Na rysunku 68 zostały przedstawione przełomy zmęczeniowe uzyskane dla próbek ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym kwadratowym, które uzyskano przy kontrolowanej amplitudzie a) momentu zginającego, b) parametru energetycznego. Złom zmęczeniowy przedstawiony na rysunku 68a uzyskano dla $M_g = 22,92 \text{ N}\cdot\text{m}$ ($\sigma_a = 232 \text{ MPa}$) po 148700 cyklach. Na rys. 68b przedstawiony został złom zmęczeniowy uzyskany przy kontroli amplitudy parametru energetycznego dla $W_a = 0,35 \text{ MJ/m}^3$ po 188900 cyklach. Na przedstawionym rysunku 68 obserwuje się strefę zmęczeniową oraz doraźną. W strefie zmęczeniowej widoczne jest ognisko pęknięcia oraz linie propagacji szczeliny zmęczeniowej. Strefa doraźna posiada matową powierzchnię.

a)



b)



Rys. 68. Przelomy zmęczeniowe stopu aluminium 2024 uzyskane przy zginaniu z kontrolowaną amplitudą a) momentu zginającego, b) parametru energetycznego próbek o przekroju poprzecznym kwadratowym

11. Wnioski

Na podstawie przedstawionych pozycji literaturowych, uzyskanych wyników badań eksperymentalnych, obliczeniowych i numerycznych sformułowano następujące wnioski:

1. Istnieje możliwość prowadzenia zmęczeniowych badań doświadczalnych zarówno przy sterowaniu parametrem naprężeniowym jak i energetycznym.
2. Istnieje duża grupa modeli naprężeniowych, odkształceniowych i energetycznych służąca do opisu badań zmęczeniowych. Modele naprężeniowe i odkształceniowe są powszechnie stosowane do opisu i analizy badań zmęczeniowych. Istnieje wiele propozycji opisu parametru energetycznego, natomiast badania prowadzone przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego dotychczas były prowadzone jedynie dla rozciągania.
3. Badania zmęczeniowe z kontrolowaną amplitudą parametru energetycznego pozwalają na bezpośrednie wyznaczenie nowej charakterystyki materiału, którą można zastosować do szacowania trwałości dla kryteriów energetycznych.
4. Przeprowadzone obliczenia numeryczne pozwoliły na analizę rozkładu naprężeń i odkształceń na powierzchni próbek. Maksymalne naprężenia i odkształcenia występują w okolicy najmniejszego pola przekroju poprzecznego lub w przekroju najbardziej osłabionym.
5. Trwałość próbek przy kontrolowanym parametrze energetycznym jest wyższa niż trwałość próbek przy kontrolowanym naprężeniu dla obu materiałów i obu kształtów próbek. Charakterystyki mają tendencję do zbiegania się dla mniejszych wartości parametrów, które wynikają z uwzględnienia odkształcenia w parametrze energetycznym.
6. Zaprezentowane charakterystyki pokazują, że występuje wpływ kształtu próbek na trwałość zmęczeniową. W przypadku stali C45 próbki o przekroju poprzecznym okrągłym posiadają wyższe trwałości niż próbki o przekroju poprzecznym kwadratowym. W przypadku stopu aluminium 2024 tendencja jest odwrotna.
7. Weryfikacja wyników badań z wybranymi modelami parametru energetycznego wskazuje dużą zgodność z modelem parametru energetycznego Lachowicza.
8. Pęknięcia zmęczeniowe rozwijały się w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku naprężeń normalnych w przypadku próbek okrągłych zarówno dla stali C45 jak i stopu aluminium 2024. W przypadku próbek kwadratowych pęknięcia zmęczeniowe

rozwijały się pod kątem nie większym niż 15° prostopadle do największych naprężeń normalnych.

Literatura

1. Achtelik H.: Wytrzymałość zmęczeniowa żeliwa przy obciążeniu zginająco- skręcającym zmiennym synchronicznie o różnym współczynniku asymetrii cyklu zmęczeniowego. WSI Opole 1991, Praca doktorska, Raport nr 19/91
2. Achtelik H., Marciniak Z., Macha E., Marcisz E., Rozumek D.: Stanowisko do badań zmęczeniowych materiałów z kontrolowanym parametrem energetycznym przy zginaniu i skręcaniu. Przegląd Mechaniczny, Warszawa, 12/2013, s. 34-38
3. Achtelik H., Marciniak Z., Macha E., Marcisz E., Rozumek D.: Stanowisko do badań zmęczeniowych materiałów z kontrolowanym parametrem energetycznym przy zginaniu i skręcaniu. XXVI Konferencja Naukowa Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych, Zakopane 2013, Materiały Konferencyjne, Red. J. Szpytko, Kraków 2013, s. 13-14, CD, s. 1-8
4. ASTM E 606-80. Standard [in:] Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01. Philadelphia, 1989, pp. 601–611
5. ASTM E 739-80. Standard practice for: Statistical analysis of linearized stress-life (S-N) and strain-life (ϵ -N) fatigue data [in:] Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01. Philadelphia, 1989, pp. 667–673
6. ASTM E 739-91, Standard practice for statistical analysis of linearized stress-life (S-N) and strain-life (ϵ - N) fatigue data, in: Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03,01, Philadelphia 1999, pp. 614-620
7. Basquin O. The experimental law of endurance tests, Proc. American Society for Testing and Materials, vol. 10, part II, 1910, pp. 625-630
8. Beanantine J.A., Socie D.F.: Observation of cracking behaviour in tension and torsion and low cycle fatigue, ASTM Conference on Low Cycle Fatigue Directions for the Future Balton Loading, N.Y., 1985
9. Benedetti M., Fontanari V., Scardi P., Ricardo C.L.A. Bandini M.: Reverse bending fatigue of shot peened 7075-T651 aluminium alloy: The role of residual stress relaxation. International Journal of Fatigue, Vol. 31, 2009, pp. 1225-1236
10. Bergmann J., Seeger T.: On the influence of cyclic stress-strain curves, damage parameters and various evaluation concepts on the life prediction by the local approach. Proc. 2nd European Coll. on Fracture, Darmstadt, Germany, 1979, VDII-Report of progress, Vol. 18, No. 6

11. Będkowski W., Łagoda T., Słowik J.: Strain-Controlled tests for determining the changes in the fatigue parameters of materials. *Materials Science*, Vol. 43, No.4, 2007, pp. 492-498
12. Brown M.W., Miller K.J.: A theory for fatigue failure under multiaxial stress – strain condition, *Proc. Inst. Mech. Engrs.* Vol. 187, No. 65, 1973, pp. 475-755
13. Brzózka J.: *Regulatory i układy automatyki*, Mikom, Warszawa 2002
14. Chen X., Xu s., Huang D.: A critical plane-strain energy density criterion for multiaxial low-cycle fatigue under non-proportional loading, *Fatigue Fract. Engng Mater. Stuct.* 22, 1999, pp. 679-686
15. Chu C.C., Gao A., Abel., Wu.: Evaluation of low cycle fatigue under nonpeoportional loading, *Fourth Int. Conf. on Biaxial/Multiaxial Fatigue*, St Germain en Laye (France), May 31 – June 3, 1994, Vol. 1, pp. 283-292
16. Ciao T., De W., Hao X.: Investigation of cyclic hysteresis energy in fatigue failure process, *Int. J. Fatigue*, Vol. 11, 1989, pp. 353-359
17. Coffin L.F.: A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal. *Trans. ASME* 76, 1954, pp. 931-950
18. Crossland G.: Effect of large hydrostatic pressure on the torsional fatigue strength of an alloy steel. *Proc. Conf. on the Fatigue of Metals the Institution of Mechanical Engineering*, London, 1956, pp. 138-149
19. Dang Van K., Cailletaud G., Flavenot J.F., Le Douaron A., Lieurade H.P.: Criterion for high cycle fatigue failure under multiaxial loading, *Baxial and Multiaxial Fatigue*, EGF 3, Eds M. W. Brown and K.J. Miller, *Mechanical Engineering Publications*, London 1989, pp. 459-478
20. De-Guang S., De-Jun W.: A new multiaxial fatigue damage model based on the critical plane approach, *Int. J. Fatigue*, Vol. 20, No. 3, 1998, pp. 241-245
21. Dengo C., Meneghetti G., Dabala M.: Experimental analysis of bending fatigue strength of plain and notched case-hardened gear steel. *International Journal of Fatigue*, Vol. 80, 2015, pp. 145-161
22. Dobrzański L. A.: *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 2002, s. 113-209
23. Ellyin F.: A criterion for fatigue under multiaxial states of stress, *Mechanics Researcg Communications*, Vol. 1, 1974, pp. 219-224
24. Ellyin F., Gołoś K.: Multiaxial fatigue damage criterion, *J. Enging. Mater. Technol.* ASME, Vol. 110, 1988, pp. 63-68

25. Ellyin F., Kujawski D.: A multiaxial fatigue criterion including mean-stress effect, *Advances in Multiaxial Fatigue*, ASTM STTP 1191, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1993, pp. 55-66
26. Faszyńska S., Rozumek D.: Wpływ karbu na zmiany wartości współczynnika intensywności naprężenia podczas wzrostu pęknięć zmęczeniowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, Seria: Mechanika* z. 106, Nr kol. 356/2015, ss. 47
27. Findley W.N.: Combined Stress Fatigue Strength of 78S-T61 Aluminium Alloy with Superimposed Mean Stresses and Corrections for Yielding. NACA-TN-2924, Washington, 1953, pp. 90
28. Findlay W.N., Coleman J.J., Hanley B.C.: Theory for combined bending and torsion fatigue with date fir SAE 4340 steel,. *The Institution of Mechanical Engineers Proceedings, Inter. Conf. on Fatigue of Metals*, London, England, September 1956, pp. 150-157
29. Gasiak G., Pawliczek R.: Application of an energy model for fatigue life prediction of construction steels under bending, torsion and synchronous bending and torsion. *International Journal of Fatigue* 25, 2003, pp. 1-8
30. Garud Y.S.: A new approach to the evaluation of fatigue under multiaxial loadings. *Trans. ASME*, 1981 JEMT 103, pp. 118-125
31. Gerber W.: Bestimmung der zulossige Spannungen in eisen Constructionen. *Z. Bayer Arch. Ing. Ver.*, 1974, Vol. 6
32. Glinka G., Molski K: A method of elastic-plastic stress and strain calculation at a notch root. *Mat. Sci. and Engng.*, Vol. 50, No. 2, 1981, pp. 93-100
33. Glinka G., Shen G., Plumtree A.: A multiaxial fatigue strain energy density parameter related to the critical fracture plane, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 18, 1995, pp. 37-64
34. Gołoś K.: An energy based multiaxial fatigue criterion. *Engineering Transactions*, Vol. 36, No 1, 1988, pp. 55-63
35. Gołoś K., Eshtewi S.: Multiaxial fatigue and mean stress effect of St5 medium carbon steel. *5th Int. Conf. on Biaxial/Multiaxial Fatigue and Fracture*, Cracow (Poland), 1997, Vol. 1, pp. 25-34
36. Goodman J.: *Mechanics Applied to Engineering*. 9th et., New York, Langmans, Green and Co., 1994

37. Goss C.: Niskocyklowa trwałość zmęczeniowa stali o podwyższonej wytrzymałości w ujęciu energetycznym. *Mechanika Teoretyczna i Stosowana*, Vol. 21, Nr 2/3, 1983, s. 341-360
38. Gough H.J.: Engineering steel under combined cyclic and static stresses, *The Engineer*, 1949, Oct. 28, pp. 497-500, 1949, Nov. 4, pp. 510-514, 1949, Nov. 11, pp. 540-543, 1949, Nov.18, pp. 570-573
39. Gough H.J., Pollard H.V.: The effect of specimen form on the resistance of metals to combined alternating stresses, *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 135, 1935, pp. 549-57
40. Halford G.R.: The energy required for fatigue, *Mat. -wiss. U. Werkstofftech*, Nr 22, 1991, pp. 3-18
41. Hansel M., Engel M., Geiger M.: FEM simulation of mixed-mode fatigue crack growth in metal forming tools, *Mixed-Mode Fatigue and fracture, ESIS14*, H.P. Rossmannith and K.J. Miller, Eds., 1993, Mechanical Publications, London, pp. 3-21
42. Hartman A., Schijve J.: The effects of environment and load frequency on the crack propagation law for macro fatigue crack growth in aluminium alloys. *NLR-TR 68001,U*, 1968
43. Hoffman H., Seeger T.: Stress-strain analysis and life predictions of a notched shaft under multiaxial loading, *Multiaxial Fatigue: Analysis and Experiments, AE-14*, G. E Leese and D. Socie, Eds., Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, USA 1989, pp. 81-99
44. Htoo A. T., Miyashita Y., Otsuka Y., Mutoh Y., Sakurai S.: Variation of local stress ratio and its effect on notch fatigue behavior of 2024-T4 aluminum alloy. *International Journal of Fatigue*, Vol. 88, 2016, pp. 19-28
45. Inglis N.P.: Hysteresis and fatigue of Wöhler rotating cantilever specimen. *Matallurgist*, 1927, pp. 23-27
46. ISO 6336. Calculation of load capacity of spur and helical gears, 2006
47. Itoh T., Sakane M., Ohnami M., Socie D.: Nonproportional low cycle fatigue criterion for type 304 stainless steel, *J. of Engineering Materials and Technology*, Vol. 117, 1995, pp. 285-292
48. Johnson H., Paris P.: Sub-critical flaw growth. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 1, 1968, s. 3-45
49. Karolczuk A., Macha E.: Critical planes in multiaxial fatigue of materials, monograph. *Fortschritt-Berichte VDI, Mechanik/Bruchmechanik, reihe 18, nr. 298*. Düsseldorf: VDI Verlag, 2005, p. 204

50. Kasprzyczak L., Macha E.: *Mechatroniczne systemy maszyn wytrzymałościowych*, Wydawnictwo Politechniki Opolskiej, Opole 2010
51. Kliman V.: Fatigue life estimation under random loading using the energy criteria, *Int. J. Fatigue*, Vol. 7, 1985, pp. 39-44
52. Kocańda S.: *Zmęczeniowe Niszczenie Metali*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1978, s. 312-317
53. Kocańda S., Kocańda A. *Niskocyklowa wytrzymałość zmęczeniowa metali*, PWN, Warszawa 1989, s. 495
54. Kocańda S., Szala J. *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*, PWN, Warszawa 1997
55. Kotik H., Ipin J. P.: Frequency effect in short-beam shear fatigue of a glass fiber reinforced polyester composite. *International Journal of Fatigue*, Vol. 90, 2016, pp. 116-124
56. Kubiński W.: *Materiałoznawstwo*. Wydawnictwo AGH, Nauki techniczne – Inżynieria Materiałowa, 2012, s. 41-73
57. Kuźnik J.: *Regulatory i układy regulacji*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002
58. Lachowicz C.T.: Calculation of the elastic–plastic strain energy density under cyclic and random loading. *Int. J. Fatigue*, 23, 2001, pp. 643–652
59. Lee S.B.: A criterion for fully reversed out-of-phase torsion and bending. *Multiaxial Fatigue*, ASTM STP 853, American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1985, pp. 553-568
60. Lee S. B.: In: *Multiaxial Fatigue*, ASTM STP 853, Philadelphia, 1985, pp. 74-83
61. Lee Y.L., Chiang Y.J.: In: *J. Testing and Evaluation*, JTEVA, 1991, Vol. 19, pp. 322-331
62. Lefebvre D., Neale K.W., Ellyin F.: A criterion for low-cycle fatigue failure under biaxial states of stress, *J. Engng. Mater. Technol. ASME*, Vol. 103, 1988, pp. 1-6
63. Leis B. N.: An energy-based fatigue and creep-fatigue damage parameter, *JPVT ASME*, Vol. 99, 1977, pp. 524-533
64. Lin H.: *Multiaxial plasticity and fatigue life predictions of anisotropic Al. -6061-T6*, PhD thesis, Mechanical Engineering Department, Northeastern University, Boston
65. Liu K.C.: A method based on virtual strain-energy parameters for multiaxial fatigue life prediction, *Advances in Multiaxial Fatigue*, ASTM STP 1191, D. L. McDowell and R. Elli, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1993, pp. 78-84
66. Lohr R.D., Ellison E.G.: A simply theory for low cycle multiaxial fatigue, *Fatigue of Engineering Materials and Structures*, Vol. 3, 1980, pp. 1-17

67. Łagoda T., Macha E.: Generalization of energy-based multiaxial fatigue criteria to random loading. *Multiaxial Fatigue and Deformation: Testing and Prediction*, ASTM STP 1387, S. Kalluri and P.J. Bonacuse, Eds, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2000, pp. 173-190
68. Łagoda T., Macha E., Będkowski W.: A critical plane approach based on energy concepts. Application to biaxial random tension-compression high-cycle fatigue regime. *Int. J. Fatigue*, 1999, Vol. 21, pp. 431-443
69. Macha E.: Modele matematyczne trwałości zmęczeniowej materiałów w warunkach losowego złożonego stanu naprężenia, *Prace Naukowe Instytutu Materiałoznawstwa Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, Monografie 13*, Wrocław 1979, s. 99
70. Macha E.: *Biaxial Multiaxial Fatigue*. Mechanical Engineering Publications, London 1989, p. 425
71. Macha E.: Generalization of fatigue criteria for multiaxial sinusoidal loadings in the range of random loadings, *Biaxial and Multiaxial Fatigue, EGF 3*, Eds. M. W. Brown and K. J. Miller, Mechanical Engineering Publications, London 1989, pp. 425-436
72. Macha E., A review of energy – based multiaxial fatigue failure criteria, *The Archive of Mechanical Engineering*, Vol XLVIII, No 1, 2001, pp.71 – 101
73. Macha E., Słowik J.: Sposób wyznaczania energetycznej charakterystyki zmęczeniowej materiałów konstrukcyjnych. Patent nr PL 207619 UPRP, Warszawa 2010
74. Macha E., Słowik J., Pawliczek R.: Energy based characterization of fatigue behavior of cyclically unstable materials, *Solid State Phenomena*, Vols. 147-149, 2009, pp. 512-517
75. Macha E., Sonsino M.: Energy criteria of multiaxial fatigue failure. *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.*, 1999, Vol. 22, pp. 1053-1070
76. Manson S.S.: Behaviour of materials under conditions of thermal stress. *NACA TN-2933*, 1953
77. Manson S.S.: Inversion of the strain-life and strain-stress relationships for use in metal fatigue analysis. *Fatigue Fract. Engng. Mat. Struct.*, 1979, Vol. 1, pp. 37-57
78. Marciniak Z., Macha E.: Trwałość zmęczeniowa stali konstrukcyjnych przy nieproporcjonalnym zginaniu ze skręcaniem. Wieloosiowe zmęczenie losowe elementów maszyn i konstrukcji, Część XIV, *Oficyna wydawnicza Politechnika Opolska*, s. 19-58
79. Marcisz E.: Porównanie charakterystyk zmęczeniowych dla zginania stali C45 i stopu aluminium 2024. *Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, Seria: Mechanika z. 104, Nr 353/2014*, s. 117-120

80. Marcisz E.: Porównanie wyników badań zmęczeniowych przy zginaniu stopu aluminium 2024 i stali C45 z kontrolowanym parametrem energetycznym. Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, Seria : Mechanika, z. 102, Nr 349/2013, s 99-102
81. Marcisz E.: Przegląd i analiza ważniejszych kryteriów zmęczeniowych. Młodzi naukowcy dla Polskiej nauki Część VII, Nauki inżynieryjne tom IV, Wydawnictwo CREATIVETIME, s. 67 – 72
82. Marcisz E.: Przegląd i porównanie modeli energetycznych stosowanych w opisie badań zmęczeniowych. Nowe trendy w naukach inżynieryjnych 3 pod redakcją: dr inż. M. Kuczera, Tom III, Wydawnictwo CREATIVETIME, s. 70 – 80
83. Marcisz E.: Wpływ kształtu próbki na trwałość zmęczeniową przy zginaniu stopu aluminium 2024. Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, Seria: Mechanika z.105, Nr 354/2015, s. 143-146
84. Marcisz E., Marciniak Z., Rozumek D., Macha E.: Energetyczna charakterystyka zmęczeniowa stali C45 przy wahadłowym zginaniu. XIV Konferencja Mechaniki Pękania, Kielce 2013, s. 77-78, CD, s. 262–270
85. Marcisz E., Marciniak Z., Rozumek D., Macha E.: Energy fatigue characteristic of C45 steel subjected to cyclic bending. Key Engineering Materials, Vol. 298, 2014, pp. 147-152
86. Marcisz E., Marciniak Z., Rozumek D., Macha E.: Fatigue characteristics of aluminium alloy 2024 under cyclic bending with the controlled energy parameter. Key Engineering Materials, Vols. 592-593, 2014, pp. 684-687
87. Marcisz E., Rozumek D.: Comparison of the experimental results of the calculation for various models of the energy parameter. Solid State Phenomena, Vol. 250, pp. 127-132
88. Marcisz E., Rozumek D.: Porównanie wyników doświadczalnych z obliczeniowymi dla różnych modeli parametru energetycznego. XV Konferencja Mechaniki Pękania, Kielce 2015, s. 75-76
89. Marcisz E., Rozumek D.: The influence of the specimen shape on the fatigue life under bending. Solid State Phenomena, Vol. 251, 2016, pp. 35-40
90. Marcisz E., Rozumek D.: The influence of PID controller setting on the course of stress, strain and Energy parameter at the fatigue test stand. 10 International Conference Mechatronic Systems and Materials, Opole 2014 pp. 124-125
91. Marcisz E., Rozumek D.: Wpływ kształtu próbki na trwałość zmęczeniową badań wykonanych przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego, Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, Seria: Mechanika z.106, Nr 356/2015, s. 69

92. Marcisz E., Rozumek D., Marciniak Z.: Comparison of C45 steel fatigue characteristics carried out at controlled stress and energy parameter, subjected to fully reversed bending. *Solid State Phenomena*, Vol. 224, 2015, pp. 33-38
93. Marcisz E., Rozumek D., Marciniak Z.: Influence of control parameters on the crack paths in the aluminium alloy 2024 under bending. *The 5th International Conference on Crack Paths 2015*, Ferrara 2015, pp. 66
94. Marcisz E., Rozumek D., Marciniak Z.: Influence of control parameters on the crack paths in the aluminium alloy 2024 under bending. *Frattura ed Integrità Strutturale/Fracture and Structural Integrity 2015*, Vol. 9(34), pp. 436-443
95. Marcisz E., Rozumek D., Marciniak Z.: Porównanie charakterystyk zmęczeniowych wykonanych przy kontrolowanym naprężeniu i parametrze energetycznym poddanych wahadłowemu zginaniu stali C45. *Materiały XXV Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania*. Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz 2014, s. 98-99
96. Marin J.: Interpretation of fatigue strengths for combined stresses. *Proc. Int. Conf. of Fatigue of Metals*, 1956, pp.184-194
97. Matake T.: An explanation on fatigue limit under combined stress, *Bulletin of JSME*, Vol. 20, No. 141, March 1977, pp. 257-263
98. McDramid D. L.: *Failure Criteria and Cumulative Damage in Fatigue under Multiaxial Stress Conditions*, Ph. Thesis, The City University, London 1972
99. McDiarmid D.L.: Fatigue behaviour under out-of-phase bending and torsion. *The Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society*, March 1981, pp. 118-122
100. McDiarmid D.L.: The effect of mean stress and stress concentration of fatigue under combined bending and twisting. *Fatigue Fract. Engng. Mat. Struct.*, 1985, Vol. 8, No 1, pp. 1-12
101. McDiarmid D.L.: Fatigue under out-of-phase bending and torsion. *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* Vol. 9, No. 6, 1987, pp. 457-475
102. McDiarmid D.L.: The effect of mean stress on biaxial fatigue where the stresses are out-of-phase and at different frequencies, *Biaxial and Multiaxial Fatigue*, EGF 3, Eds. M.W. Brown and K. J. Miller, Mechanical Engineering Publications, London 1989, pp. 605-619
103. McDiarmid D.L.: Mean stress effect in biaxial fatigue where the stresses are out-of-phase and at different frequencies, *Fatigue Under Biaxial and Multiaxial Loading*, ESIS

- 10, Eds K Kussmual, D. McDramid and D. Socie, Mechanical Engineering Publications, London 1991, pp. 321-335
104. McDiarmid D.L.: Multiaxial fatigue life prediction using a shear stress based critical plane failure criterion, VTT Symposium 130, Eds J. Solin, G. Marquis, A. Silijander, S. Sipila, Fatigue Design Vol. 2, 1992, pp. 21-34
105. Mediratta S.R., Ramaswamy V., Rao P.R.: On the estimation of the cyclic plastic strain energy of dual-phase steels. International Journal of Fatigue. Vol. 10, 1988, pp. 13-19
106. Molski K., Glinka G.: A method of elastic-plastic stress and strain calculation at a notch root, Mat. Sci. and Engng., Vol.50, 1981, pp. 93-100
107. Morrow J.: Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals, International Friction, Damping and Cyclic Plasticity, ASTM STP, 378, 1965
108. Morrow J.: Fatigue Design Handbook Advances in Engineering. 1968, Vol. 4. Warrendale (PA): Society of Automotive Engineers, pp. 91
109. Mroziński S., Boroński D. Charakterystyki zmęczeniowe metali w ujęciu energetycznym. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej 217, Warszawa 2007, s. 31-97
110. Mroziński S., Topoliński T.: New energy model of fatigue damage accumulation and its verification for 45-steel. J. Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 37, 1999, pp. 223-240
111. Nitta A., Ogata T., Kuwabara K.: Fracture mechanisms and life assessment under high-strain biaxial cyclic loading of type 304 stainless steel, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. Vol. 12, No. 2, 1989, pp. 77-92
112. Ostash O. P., Chepil R. V., Vira V. V.: Fatigue crack initiation and propagation at different stress ratio values of uniaxial pulsating loading. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2010, Vol. 34, pp. 430-437
113. Palin-Luc T., Lasserre S.: An energy based criterion for high cycle multiaxial fatigue, Eur. J. Mech., A/Solids, Vol. 2, 1998, pp.73-84
114. Papadopoulos I.V.: A New criterion of fatigue strength for out-of-phase bending and torsion of hard metal, Int. J. Fatigue, Vol. 16, 1994, pp. 377-384
115. Park J., Nelson D.: Evaluation of an energy-based approach and a critical plane approach for predicting constant amplitude multiaxial fatigue life. Int. J. Fatigue, Vol. 22, No. 1, 2000, pp. 23-39
116. PN-EN ISO 3928:2008 Spiekane materiały metaliczne, z wyjątkiem węglików spiekanych -- Próbki do badań zmęczeniowych

117. Prażmowski M., Paul H., Rozumek D., Marcisz E.: Influence of the microstructure near the interface of the fatigue life of explosively welded (carbon steel)/Zr clads. *Key Engineering Materials*, Vols. 592-593, 2014, pp. 704-707
118. Ramberg W., Osgood W.R. Description of stress-strain curves by three parameters. Technical Note No. 902, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington DC, 1943
119. Rolowic R., Tipton S.M.: An energy based critical plane approach to multiaxial fatigue analysis, *Fatigue and Fracture Mechanics: Twenty-Ninth Volume*, ASTM STP 1332, T.L. Panontin and S.D. Sheppard, Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1999, pp. 599-613
120. Rozumek D., Hepner M., Marcisz E.: Fatigue Crack Growth in Titanium Alloy after Hardening and Ageing, *Key Engineering Materials*, Vol. 598, 2014, pp. 213-218
121. Rozumek D., Marciniak Z., Lachowicz C. T.: The energy approach in the calculation of fatigue lives under non-proportional bending with torsion, *Int. J. of Fatigue*, Vol. 32, No. 8, 2010, pp. 1343 – 1350
122. Rozumek D., Pawliczek R.: Opis rozwoju pęknięć i zmęczenia materiałów w ujęciu energetycznym. *Studia i Monografie*, z. 165, Wydawnictwo Politechniki Opolskiej, Opole 2004
123. Sakai T. et al. Standard evaluation method of fatigue reliability for metallic materials-standard regression method of S–N curves, JSMS-SD-11-07, The Society of Materials Science, Japan (JSMS); 2007
124. Sakai T., Lian B., Takeda M., Shiozawa K., Oguma N., Ochi Y., Nakajima M., Nakamura T.: Statistical duplex S–N characteristics of high carbon chromium bearing steel in rotating bending in very high cycle regime. *International Journal of Fatigue*, Vol. 32, 2010, pp. 497-507
125. Sempuch J.: Kryterium wytrzymałości zmęczeniowej stali konstrukcyjnej 25CrMo4 w warunkach złożonego stanu naprężenia, ATR Bydgoszcz, Rozprawa nr 51, Bydgoszcz, 1992, s. 74
126. Sines G.: Failure of materials under combined repeated stresses with superimposed static stresses. 1955, NACA-TN-3495, Washington, pp. 69
127. Smith K., Watson P., Topper T.: A stress-strain function for the fatigue of metals. *Journal of Materials*, Vol. 5, 1970, pp.767-776
128. Socie D.: Multiaxial fatigue damage models. *J. Engng. Mater. Techn.*, 1987, Vol. 109, pp. 293-298

129. Socie D.F., Waill L.A., Dittmer D. F.: Biaxial fatigue of Inconel 718 including mean stress effects, *Multiaxial Fatigue*, ASTM STP 853, Eds. K.J. Miller and M.W. Brown, American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1985, pp. 463-481
130. Socie D., Shield T.: Mean effect in biaxial fatigue of Inconel 718. *Jour. Engng. Mater. Techn.*, July 1984, Vol. 106, pp. 227-232
131. Socie D., Waill L., Dittmar D.: Biaxial fatigue of Inconel 718 including mean stress effect. ASTM STP 853, 1985, Philadelphia, pp. 463-481
132. Sonsino C. M.: Multiaxial fatigue of welded joints under in-phase and out-of-phase local strain and stresses. Fourth Inter. Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue, St.Germain en Laye, Society Francaise de Metallurgie et da Materiaux, France, Paris, 1994, pp. 527-541
133. Sonsino C. M.: Multiaxial fatigue of welded joints under in-phase and out-of-phase local strain and stresses. *Int. J. Fatigue*, Vol. 17, 1995, pp. 55-70
134. Sonsino C. M., Grubisic V.: Multiaxial fatigue behaviour of sintered steels under combined in and out-of-phase bending and torsion, *Biaxial and Multiaxial Fatigue*, EGF 3, Eds. M.W. Brown and K.J. Miller, Mechanical Engineering Publications, London 1989, pp. 335-353
135. Sonsino C. M., Grubisic V.: Multiaxial fatigue behaviour of sintered steels under combined in and out-of-phase bending and torsion, *Werkstofftech.* Vol. 18, 1987, pp. 55-70
136. Sonsino C. M., Küppers M.: Critical plane approach for the assessment of the fatigue behaviour of welded aluminium under multiaxial spectrum loading. 6th Int. Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue and Fracture, Ed. M. de Freitas, Instituto Superior Tecnico, Portugal, Lisboa, pp. 373-380
137. Sonsino C. M., Küppers M.: Fatigue behaviour of welded aluminium under multiaxial loading, 6th Inter. Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue and Fracture, Ed. M. de Freitas, Instituto Superior Tecnico, Vol. 1, Portugal, Lisboa, 2001, pp. 87-64
138. Ström K. J., Hgglund T.: Automatic tuning of PID controllers, *Instrument Society of America*, 1988
139. Szala J.: Hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych. *Wydawnictwo Uczelniane ATR Bydgoszcz*, 1998, s. 175
140. Weibull W.: A statistical distribution function of wide applicability. *J Appl. Mech.*, Vol. 18, 1951, pp. 293-297

141. Varvani – Farahani A.: A New Energy – critical plane parameter for fatigue life assessment of various metallic materials subjected to in-phase and out-of-phase multiaxial fatigue loading Conditions, *Int. J. Fatigue* 22, 2000, pp. 295-305
142. Varvani-Farahani A., Topper T.H.: A new multiaxial fatigue life and crack-growth rate model for various in- phase and out-of-phase strain pats, *Multiaxial Fatigue and Deformation: Testing and Prediction*, ASTM STP 1387, S. Kalluri and P.J. Bonacude, Eds., American Society for Testing Materials, West Conshohockem, PA, 2000, pp. 305-322
143. Vidal C., Infante V., Vilaça P.: Fatigue behaviour at elevated temperature of friction stir channeling solid plates of AA5083-H111 aluminium alloy. *International Journal of Fatigue*, Vol. 62, 2014, pp. 86-92
144. Vidal E., Kenmeuge B., Roberto J.L., Bahuaud J.: Fatigue life prediction of components using multiaxial criteria, *Multiaxial Fatigue and Design*, ESIS21, Eds A. Pineau, G. Cailletteud and T. C. Lindley, Mechanical Engineering Publications, London 1996, pp. 365-378
145. Zamrik S.Y., Frishmuth R.E.: The effects of out-of-phase biaxial-strain cycling on low-cycle fatigue. *Experimental Mechanics*, 1973, pp. 204-208
146. Zhai T., Xu Y.G., Martin J.W., Wilkinson A.J., Briggs G.A.D.: A self-aligning four-point bend testing rig and sample geometry effect in four-point bend fatigue. *International Journal of Fatigue*, Vol. 21, 1999, pp. 889-894
147. Zhu M. L., Liu L. L., Xuan F. Z.: Effect of frequency on very high cycle fatigue behavior of low strength Cr-Ni-Mo-V steel welded joint. *International Journal of Fatigue*, Vol. 77, 2015, pp. 166-173

Załączniki

Tabela Z-1. Wyniki eksperymentalne i obliczeniowe uzyskana dla próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym okrągłym przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego

Numer próbki	M_g [N·m]	Liczba cykli do zniszczenia, N_f	Naprężenie $\sigma_a = M_g/W_x$ [MPa]	Parametr energetyczny $W_a = \sigma_a^2/2E$ [MJ/m ³]
1	31,99	542300	326	0,25
2	31,99	850800	326	0,25
3	34,34	523000	350	0,28
4	34,34	240500	350	0,28
5	36,7	165000	374	0,32
6	36,7	111100	374	0,32
7	38,76	49500	395	0,36
8	38,76	63000	395	0,36
9	38,76	46700	395	0,36

Tabela Z-2. Wyniki eksperymentalne i obliczeniowe uzyskana dla próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym kwadratowym przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego

Numer próbki	M_g [N·m]	Liczba cykli do zniszczenia, N_f	Naprężenie $\sigma_a = M_g/W_x$ [MPa]	Parametr energetyczny $W_a = \sigma_a^2/2E$ [MJ/m ³]
1	29,64	1294500	300	0,2
2	32,4	186000	328	0,25
3	32,4	168000	328	0,25
4	35,07	73800	355	0,29
5	35,07	37800	355	0,29
6	42,48	26400	430	0,43
7	42,48	20400	430	0,43
8	45,93	7400	465	0,5
9	45,93	8200	465	0,5

Tabela Z-3. Wyniki eksperymentalne i obliczeniowe uzyskana dla próbek ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego

Numer próbki	M_g [N·m]	Liczba cykli do zniszczenia, N_f	Napężenie $\sigma_a = M_g/W_x$ [MPa]	Parametr energetyczny $W_a = \sigma_a^2/2E$ [MJ/m ³]
1	16,38	1666000	167	0,18
2	16,38	4120000	167	0,18
3	16,38	7306700	167	0,18
4	16,38	2712300	167	0,18
5	18,35	1762800	187	0,23
6	18,35	2712300	187	0,23
7	20,31	112300	207	0,28
8	20,31	218600	207	0,28
9	20,31	157000	207	0,28
10	22,57	116800	230	0,34
11	22,57	78000	230	0,34
12	24,34	42800	248	0,39
13	24,34	65400	248	0,39

Tabela Z-4. Wyniki eksperymentalne i obliczeniowe uzyskana dla próbek ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym kwadratowym przy kontrolowanej amplitudzie momentu zginającego

Numer próbki	M_g [N·m]	Liczba cykli do zniszczenia, N_f	Naprężenie $\sigma_a = M_g/W_x$ [MPa]	Parametr energetyczny $W_a = \sigma_a^2/2E$ [MJ/m ³]
1	18,52	1752900	187,5	0,23
2	18,52	1050900	187,5	0,23
3	18,52	1687000	187,5	0,23
4	19,76	493200	200	0,28
5	19,76	572500	200	0,28
6	22,92	148700	232	0,34
7	22,92	127100	232	0,34
8	23	113400	233	0,36
9	23	70800	233	0,36
10	25,19	41800	255	0,42
11	25,19	50300	255	0,42

Tabela Z-5. Wyniki eksperymentalne i obliczeniowe uzyskana dla próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym okrągłym przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego dla zginania

Numer próbki	Parametr energetyczny kontrolowany W_a [MJ/m ³]	Liczba cykli do zniszczenia, N_f	Parametr energetyczny wyliczony wg. modelu Pawliczka	Parametr energetyczny wyliczony wg. modelu Lachowicza	Parametr energetyczny wyliczony wg. modelu dla zakresu liniowo-sprężystego
1	0,2	2756300	0,2	0,2	0,21
2	0,27	290000	0,32	0,25	0,28
3	0,27	577400	0,32	0,25	0,28
4	0,27	295200	0,32	0,25	0,28
5	0,27	1514200	0,32	0,25	0,28
6	0,27	201000	0,32	0,25	0,28
7	0,3	315200	0,36	0,29	0,31
8	0,3	348100	0,36	0,29	0,31
9	0,4	75100	0,45	0,47	0,41
10	0,4	69200	0,45	0,47	0,41
11	0,5	11100	0,54	0,52	0,48
12	0,5	21000	0,54	0,52	0,48

Tabela Z-6. Wyniki eksperymentalne i obliczeniowe uzyskana dla próbek ze stali C45 o przekroju poprzecznym kwadratowym przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego dla zginania

Numer próbki	Parametr energetyczny kontrolowany W_a [MJ/m ³]	Liczba cykli do zniszczenia, N_f	Parametr energetyczny wyliczony wg. modelu Pawliczka	Parametr energetyczny wyliczony wg. modelu Lachowicza	Parametr energetyczny wyliczony wg. modelu dla zakresu liniowo-sprężystego
1	0,2	965000	0,25	0,21	0,28
2	0,2	947800	0,25	0,21	0,28
3	0,3	201000	0,37	0,29	0,34
4	0,3	220000	0,37	0,29	0,34
5	0,4	64200	0,45	0,38	0,46
6	0,4	39800	0,45	0,38	0,46
7	0,45	28300	0,5	0,42	0,5
8	0,45	31500	0,5	0,42	0,5
9	0,5	16700	0,55	0,48	0,54
10	0,5	19700	0,55	0,48	0,54

Tabela Z-7. Wyniki eksperymentalne i obliczeniowe uzyskana dla próbek ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym okrągłym przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego dla zginania

Numer próbki	Parametr energetyczny kontrolowany W_a [MJ/m ³]	Liczba cykli do zniszczenia, N_f	Parametr energetyczny wyliczony wg. modelu Pawliczka	Parametr energetyczny wyliczony wg. modelu Lachowicza	Parametr energetyczny wyliczony wg. modelu dla zakresu liniowo-sprężystego
1	0,2	7131800	0,22	0,2	0,15
2	0,2	2547600	0,22	0,2	0,15
3	0,2	3917200	0,22	0,2	0,15
4	0,25	264500	0,27	0,26	0,17
5	0,25	559600	0,27	0,26	0,17
6	0,25	455700	0,27	0,26	0,17
7	0,3	228500	0,34	0,29	0,27
8	0,3	212500	0,34	0,29	0,27
9	0,3	1548900	0,34	0,29	0,27
10	0,35	191900	0,41	0,33	0,41
11	0,35	125900	0,41	0,33	0,41
12	0,35	275500	0,41	0,33	0,41
13	0,35	193700	0,41	0,33	0,41
14	0,4	110800	0,47	0,47	0,51
15	0,4	75100	0,47	0,47	0,51
16	0,4	86200	0,47	0,47	0,51

Tabela Z-8. Wyniki eksperymentalne i obliczeniowe uzyskana dla próbek ze stopu aluminium 2024 o przekroju poprzecznym kwadratowym przy kontrolowanej amplitudzie parametru energetycznego dla zginania

Numer próbki	Parametr energetyczny kontrolowany W_a [MJ/m ³]	Liczba cykli do zniszczenia, N_f	Parametr energetyczny wyliczony wg. modelu Pawliczka	Parametr energetyczny wyliczony wg. modelu Lachowicza	Parametr energetyczny wyliczony wg. modelu dla zakresu liniowo-sprężystego
1	0,2	3691000	0,19	0,19	0,16
2	0,2	3076400	0,19	0,19	0,16
3	0,2	1085300	0,19	0,19	0,16
4	0,3	571300	0,3	0,31	0,19
5	0,3	598500	0,3	0,31	0,19
6	0,35	188900	0,39	0,34	0,24
7	0,35	179200	0,39	0,34	0,24
8	0,4	62300	0,43	0,36	0,3
9	0,4	115500	0,43	0,36	0,3