

AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY



Józef Szala

OCENA TRWAŁOŚCI
ZMĘCZENIOWEJ ELEMENTÓW MASZYN
W WARUNKACH OBCIĄŻEŃ
LOSOWYCH I PROGRAMOWANYCH

Zeszyty Naukowe nr 79
MECHANIKA 22

BYDGOSZCZ - 1980

AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY



Józef Szala

OCENA TRWAŁOŚCI
ZMĘCZENIOWEJ ELEMENTÓW MASZYN
W WARUNKACH OBCIĄŻEŃ
LOSOWYCH I PROGRAMOWANYCH

Zeszyty Naukowe nr 79

MECHANIKA 22

BYDGOSZCZ. — 1980

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
doc. dr hab. Juliusz Skonieczny

REDAKTOR NAUKOWY
doc. dr hab. Hubert LATOŚ

OPINIODAWCY
Prof. dr hab. inż. Zbigniew Orłoś
Prof. dr hab. inż. Stanisław Oziemski

OPRACOWANIE REDAKCYJNE I TECHNICZNE
mgr Halina Koziolkiewicz, Alfons Grzenkiewicz

Wydano za zgodą Rektora
Akademii Techniczno-Rolniczej
w Bydgoszczy

**WYDAWNICTWO UCZELNIANE AKADEMII TECHNICZNO-ROLNICZEJ
W BYDGOSZCZY**

Wyd. I. Nakład 150+25. Ark. wyd. 9,8. Ark. druk. 10,75. Papier druk. kl. V, 70 g, 70×100
Oddano do druku 21.I.1980 r. Druk ukończono w lutym 1980 r.
Zam. nr 128/80 Cena 30 zł B-5/360
WSiP Zakł. Graf. w Bydgoszczy

SPIS TREŚCI

1. Wstęp	7
1.1. Wprowadzenie	7
1.2. Pojęcia podstawowe i definicje	10
2. Analiza dotychczasowego stanu wiedzy	19
2.1. Ocena trwałości zmęczeniowej	19
2.2. Opis obciążeń zmiennych	32
2.3. Hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych	39
2.4. Programowane badania zmęczeniowe	58
2.5. Ocena stanu wiedzy i wnioski dla badań własnych .	63
3. Warunki i wyniki badań zmęczeniowych	67
3.1. Celowość i zakres badań własnych	67
3.2. Opis przebiegu badań	68
3.3. Wyznaczenie krzywych zmęczeniowych	84
3.4. Badania wpływu sekwencji obciążeń na trwałość zmę- czeniową	86
3.5. Badania wpływu naprężeń mniejszych od granicy zmę- czenia na trwałość zmęczeniową	90
3.6. Badania wpływu liczby powtórzeń programu obciążeń na trwałość zmęczeniową	95
3.7. Badania wpływu ukształtowania programu i paramet- rów widma obciążeń na trwałość zmęczeniową	96
4. Analiza wyników badań	101
4.1. Analiza wyników badań w warunkach obciążeń stało- amplitudowych	101
4.2. Analiza czynników związanych z obciążeniem na trwałość zmęczeniową	103

4.3. Obliczenia trwałości zmęczeniowej oparte na re- lacjach między krzywymi zmęczeniowymi wyznacza- nymi w warunkach stałoamplitudowych i programo- wanych obciążeń	119
5. Wnioski	133
5.1. Wnioski teoretyczne	133
5.2. Wnioski praktyczne	136
5.3. Wnioski dotyczące dalszych badań	137
Literatura	139
Dodatek	157
D.1. Wyniki opracowania wykresu losowych naprężeń w ramie rowerowej metodą pełnych cykli /tab. D.1/	157
D.2. Zestawienie wyników badań zmęczeniowych /tab. D.2 - D.24/	158
D.3. Test analizy wariancji dla wielu średnich /tab. D.25 - D.30/	165
D.4. Test równoległości prostych regresji /tab. D.31 - D.32/	168
D.5. Test wolnego wyrazu w równaniu prostej regresji /tab. D.33 - D.34/	169
D.6. Widma obciążeń elementów pojazdów jednośladowych /tab. D.35/	172

Józef Szala

OCENA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ ELEMENTÓW MASZYN W WARUNKACH OBCIĄŻEŃ LOSOWYCH I PROGRAMOWANYCH

W pracy dokonano oceny dotychczasowego stanu wiedzy w zakresie metod wyznaczania trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń losowych i programowanych. Na podstawie tej oceny sformułowano cel i zakres badań własnych.

Celem pracy było opracowanie metody obliczeń trwałości zmęczeniowej opartej na wynikach programowanych badań zmęczeniowych.

Badania zmęczeniowe dotyczyły wpływu czynników związanych z programowanym obciążeniem na trwałość zmęczeniową. Badano wpływ: sekwencji obciążeń, naprężeń mniejszych od granicy zmęczenia, liczby cykli w okresie programu /liczby powtórzeń okresu programu/ oraz postaci i parametrów programu obciążeń na trwałość zmęczeniową. Badania przeprowadzono na próbkach okrągłych z karbem $\alpha_k = 1,65$ wykonanych ze stali 45, węzłach lutowanych $\alpha_k = 2,3$ wykonanych z rur stalowych /stal 10BX/, osiach wykonanych ze stali 10, nawęglanych i hartowanych powierzchniowo oraz ramach rowerowych wykonanych z rur stalowych /stal 10BX/ za pomocą spawania.

Stwierdzone zależności między parametrami krzywej zmęczeniowej i parametrami krzywej trwałości zmęczeniowej stanowiły podstawę opracowania metody obliczeń trwałości z pominięciem hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych. Porównanie wyników programowanych badań zmęczeniowych z wynikami obliczeń według proponowanej metody wykazało ich dobrą zgodność, wyższą niż w przypadku obliczeń z zastosowaniem hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych: Palmgre-na -Minera, Cortena -Dolana, Serensena i Freudenthala -Hellera.

1. WSTĘP

1.1. Wprowadzenie

Oólnym przypadkiem obciążenia elementów maszyn w warunkach eksploatacji jest obciążenie zmienne losowo [61, 79, 129]. Pierwsze próby obliczeń i badań elementów maszyn na zmęczenie w warunkach losowych obciążeń przypadają na początek lat 40-tych naszego stulecia. Próby te oparte były na metodach schematyzacji obciążeń losowych obciążeniami sinusoidalnymi o zmiennej amplitudzie [58, 217] oraz fenomenologicznych liniowych hipotezach kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych [148, 149]. Prace te w tym okresie prowadzone były dla potrzeb burzliwie rozwijającego się lotnictwa i w tej dziedzinie dominują dotąd [96]. Wysoki stopień wytężenia materiału w konstrukcjach lotniczych wynika z konieczności budowania układów o małej masie. W latach późniejszych poza wymienionymi względami technicznymi, także względy ekonomiczne /oszczędność materiałów i wysokie wymagania niezawodnościowe/ spowodowały rozwój metod obliczeń i badań zmęczeniowych w innych dziedzinach techniki, szczególnie w masowej motoryzacji i innych środkach transportu, w maszynach rolniczych /konieczna niezawodność w krótkich okresach agrotechnicznych/, maszynach roboczych itp.

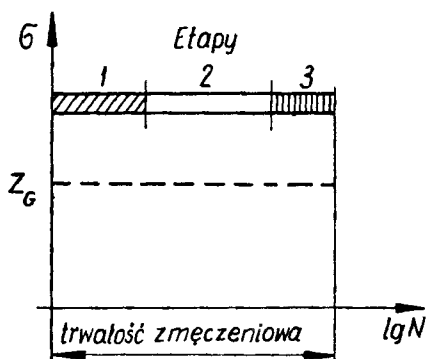
W Polsce, pierwszego omówienia metod programowanych badań zmęczeniowych dokonano w pracy [45], natomiast wyniki badań zmęczeniowych ram pojazdów jednośladowych, przedstawiono w pracy [163].

Szereg względów technicznych i ekonomicznych powoduje, że obecnie maszyny projektuje się na z góry założoną ograniczoną trwałość i optymalną niezawodność. Na niezawodność maszyn zasadniczy wpływ mają uszkodzenia elementów, w tym uszkodzenia zmęczeniowe. Jak wykazano w szeregu pracach /m.in. [99]/ uszkodzenia zmęczeniowe mimo, że nie najliczniejsze, są w świetle kryteriów bezpieczeństwa i kryteriów ekonomicznych najpoważ-

niejsze.

O istotności omawianego problemu świadczyć może rosnąca liczba publikacji w ostatnim dwudziestolecu. Z zestawienia przytoczonego w pracy [199] wynika, że w latach 1953 - 1967 ukazały się co najmniej 204 prace /w większości raporty laboratoriów badawczych nie publikowane w czasopiśmie naukowych/ z zakresu badań zmęczeniowych w warunkach obciążeń losowych i programowanych. Z wykazu literatury załączonego do opracowania [94] wynika, że w ostatnim dziesięcioleciu liczba prac na omawiany temat znacznie wzrosła. Wymieniony wykaz obejmuje 210 publikacji w czasopiśmie naukowych pochodzących z przełomu lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych.

Aktualność tematu podjętego w niniejszej pracy wynika także z wysokiej złożoności procesu zmęczenia materiałów, który nie został do tej pory jednoznacznie opisany oraz z konieczności poszukiwania w tej sytuacji możliwości przewidywania stopnia zmęczeniowych uszkodzeń elementów i układów. Brak jednoznacznego opisu procesu zmęczenia spowodował sformułowanie szeregu hipotez, z których nowsze można podzielić na: dyslokacyjne inicjacji pęknięć, energetyczne i statystyczne [41, 45, 82]. Złożone i różne przebiegi procesu zmęczenia materiałów zależne od warunków badań, posiadają jednakże pewne cechy wspólne. W sposób schematyczny przebieg procesu zmęczenia można podzielić na etapy: pojawienia się miejscowych odkształceń plastycznych i z nimi związanego cyklicznego umocnienia lub osłabienia materiału, nukleacji mikropęknięć i ich rozwoju oraz wzrostu pęknięć dostrzegalnych [114]. Podział ten przyjęto w dalszych rozważaniach zawartych w niniejszej pracy i w sposób schematyczny przedstawiono na rys. 1 [41].



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie etapów procesu zmęczenia

Udział poszczególnych etapów w całkowitej trwałości zmęczeniowej może być różny w zależności od szeregu czynników związanych z cechami materiałowymi i geometrycznymi badanego elementu oraz poziomu obciążeń. Obszar ograniczony krzywą zmęczeniową można podzielić w dalszym ciągu na strefy. Na przykład w badaniach żelaza armco [114] dokonano dalszego podziału na strefy: inkubacji poślizgów, pojawienia się wyraźnych śladów poślizgów, wstępnego rozwoju linii i pasm poślizgów. W etapie drugim obserwuje się strefy: pełnego rozwoju i łączenia się odcinkowych linii i pasm poślizgów /obszar przypuszczalnych nukleacji mikropęknięć/ oraz rozwijania się wiązek pasm poślizgów w dużej liczbie ziarn z możliwością występowania wyraźnych mikropęknięć /obszar krytycznych pasm poślizgów/, pełnego rozwoju krytycznych pasm poślizgów i rozwoju mikropęknięć. Rozwój pęknięcia zmęczeniowego aż do złomu zachodzi w trzecim etapie. Oznaki zmęczenia charakterystyczne dla pierwszych stref, obserwowano także poniżej granicy zmęczenia, zmiany te w warunkach obciążenia stałoaamplitudowego nie powodują złomu makroskopowego. Całość opisanych w skrócie zjawisk zmęczeniowych zwana jest procesem sumowania uszkodzeń zmęczeniowych, którego fenomenologiczne opisy zawarte są w hipotezach sumowania uszkodzeń. Hipotezy te stanowią podstawę obliczeń i niektórych badań trwałości zmęczeniowej elementów maszyn [103, 202].

W opisach fenomenologicznych dwa pierwsze etapy łączy się w jedną całość, rozpatrując proces zmęczenia do powstania dostrzegalnego pęknięcia i wzrost pęknięcia zmęczeniowego [74, 222].

Ocena trwałości zmęczeniowej elementów maszyn winna być poprzedzona rozpoznaniem obciążeń zewnętrznych na nie działających. Rozpatrując element lub układ /np. ramę pojazdu, kadłub samolotu/ niebezpiecznymi z punktu widzenia zmęczenia są obszary spiętrzenia naprężeń /zwane często słabymi ogniwami/. Mając na uwadze fakt, że pęknięcie zmęczeniowe bierze swój początek w mikroskopowych obszarach, na uwagę zasługują wszystkie czynniki konstrukcyjne, technologiczne i eksploatacyjne sprzyjające powstawaniu lokalnych spiętrzeń naprężeń, ponieważ one - a nie naprężenia nominalne - decydują o przebiegu procesu zmęczenia. Czynniki te dla zakresu nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej są szeroko omówione między innymi w pracach [36, 88, 115], natomiast dla zakresu ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej w pracach [72, 113, 135, 152, 153, 219].

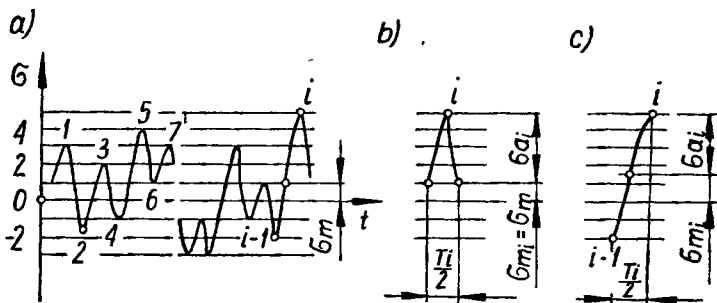
W związku z tym w prezentowanej pracy szczególnie zwrócono uwagę na wpływ obciążeń losowych i programowanych na trwałość zmęczeniową.

1.2. Pojęcia podstawowe i definicje

Stosowane w niniejszym opracowaniu pojęcia, definicje i oznaczenia związane są przede wszystkim z programowanymi badaniami zmęczeniowymi, w tym ze sposobami schematyzacji losowych obciążeń oraz opracowaniem widm i programów obciążeń.

Pod pojęciem programowane badania zmęczeniowe rozumie się badania, w których losowe eksploatacyjne obciążenia są zastępowane, na stanowisku badawczym, obciążeniami realizowanymi według z góry opracowanego programu w sposób zdeterminowany [100].

W celu omówienia podstawowych pojęć i oznaczeń z zakresu schematyzacji obciążeń losowych, na rys. 2 przedstawiono fragment realizacji procesu losowych naprężeń i przykład dwóch sposobów schematyzacji.



Rys. 2. Fragment realizacji procesu losowych naprężeń

Na rys. 2a oznaczono kolejnymi liczbami lokalne ekstrema realizacji, nieparzystymi liczbami - lokalne minima, parzystymi - lokalne maksima. Wartość średnią dla całego odcinka realizacji oznaczono przez σ_m .

Istnieje szereg sposobów schematyzacji losowych obciążeń, obciążeniami sinusoidalnymi. Przegląd tych sposobów przedsta-

wiony został w punkcie 2.2. Grupa sposobów oparta na zliczaniu lokalnych ekstremów prowadzi do cykli sinusoidalnych, których wartość średnia σ_{m_i} cyklu jest równa wartości średniej całej realizacji σ_m , natomiast wartość amplitudy σ_{a_i} jest równa różnicy wartości lokalnego ekstremum σ_i i wartości średniej dla realizacji σ_m /rys. 2b/.

$$\sigma_{m_i} = \sigma_m \quad (1)$$

$$\sigma_{a_i} = \sigma_i - \sigma_m$$

Podział wykresu losowych obciążeń na gałęzie zawarte między lokalnym minimum σ_{i-1} i następującym po nim lokalnym maksimum σ_i prowadzi do cyklu sinusoidalnego /rys. 2c/ o następujących parametrach

$$\sigma_{m_i} = \frac{\sigma_i + \sigma_{i-1}}{2}$$

$$\sigma_{a_i} = \frac{\sigma_i - \sigma_{i-1}}{2} \quad (2)$$

Przedstawione na rys. 2b i 2c fragmenty wykresu obejmują połowę okresu T_i cyklu sinusoidalnego.

Dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa wartości σ_{m_i} , σ_{a_i} , T_i /rys. 2c/ lub wartości σ_{a_i} i T_i /rys. 2b/ nazywana jest powszechnie widmem obciążeń [58, 87, 102]. Widmo to dogodnie jest przedstawiać w formie blokowej z założeniem stałości okresu T_i /rys. 3/. Takie widmo obciążeń powstaje w wyniku uporządkowania cykli sinusoidalnych według amplitud od największej do najmniejszej. Na rys. 3 oznaczono:

$\sigma_{a_{\max}}$ = σ_{a_1} - maksymalna amplituda naprężeń w widmie

$i = 1, 2, \dots, 8$ - numer poziomu naprężeń

k - liczba poziomów w widmie

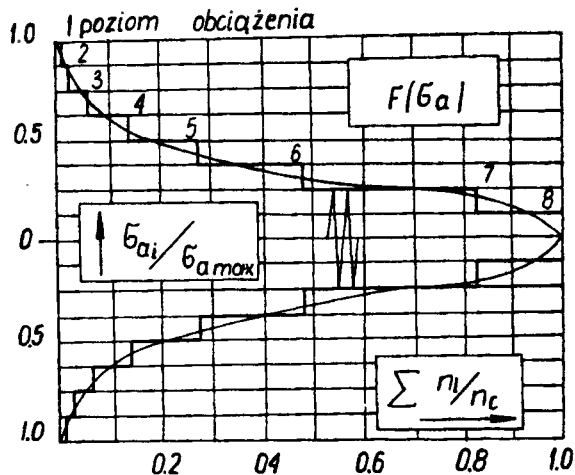
σ_{a_i} - amplituda naprężeń odpowiadająca i -temu poziomowi

n_i - liczba cykli odpowiadająca i -temu poziomowi

$$n_c = \sum_{i=1}^k n_i \quad - \text{łączna liczba cykli w widmie}$$

$$\alpha_i = \frac{n_i}{n_c} \quad - \text{względna liczba cykli odpowiadająca } i\text{-temu poziomowi}$$

$F(\sigma_a)$ - dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa, widmo ciągłe

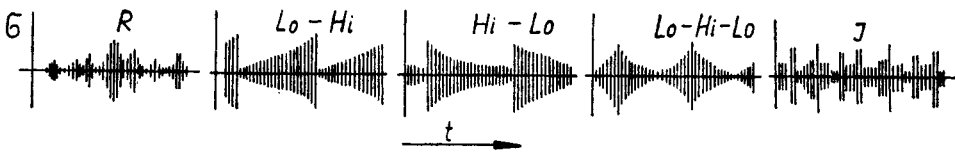


Rys. 3. Widmo obciążeń

Parametrem charakteryzującym postać geometryczną widma jest współczynnik wypełnienia widma [185]

$$\xi = \sum_{i=1}^k \frac{\sigma_{a_i}}{\sigma_{a_{max}}} \alpha_i \quad (3)$$

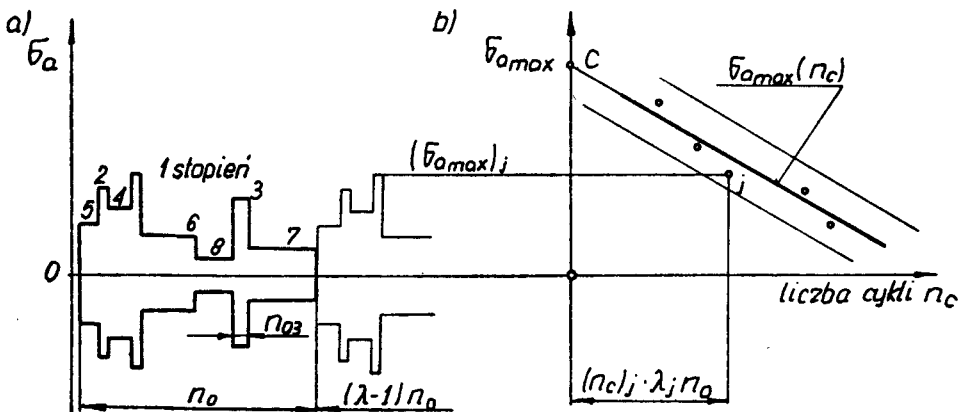
Realizacja obciążeń na stanowisku badawczym wymaga opracowania programu obciążeń. Programy opracowywane na podstawie widm obciążeń uwzględniają sekwencję poziomów obciążeń oraz zawierają ściśle określoną liczbę cykli w okresie programu. Na rys. 4 podano oznaczenia programów o różnej sekwencji poziomów obciążeń [178]:



Rys. 4. Programy obciążeń o różnej sekwencji poziomów obciążeń

- | | |
|--------------|--|
| R | - obciążenie losowe lub pseudolosowe /Random/ |
| Lo - Hi | - stopniowo rosnące /Low - High/ |
| Hi - Lo | - stopniowo malejące /High - Low/ |
| Lo - Hi - Lo | - stopniowo rosnące, następnie malejące /Low - High - Low/ |
| J | - nierównomiernie stopniowane /Irregular/ |

Podstawowe parametry blokowego programu obciążeń podano na rys. 5a:



Rys. 5. Program obciążeń z nierównomiernym stopniowaniem obciążeń J - a i schemat przedstawienia wyników badań - b

- $\sigma_{a_{\max}}$ = σ_{a_1} - maksymalna amplituda naprężeń w programie równa maksymalnej amplitudzie w widmie
 n_{o_i} - liczba cykli odpowiadająca i-temu poziomowi naprężeń
 $n_o = \sum_{i=1}^k n_{o_i}$ - liczba cykli w okresie programu
 $n_c = \lambda n_o$ - trwałość zmęczeniowa wyrażona liczbą cykli
 λ - liczba powtórzeń okresu programu do zniszczenia zmęczeniowego

Stosując w badaniach zmęczeniowych programy o zróżnicowanych wartościach $\sigma_{a_{\max j}}$, można wyznaczyć krzywą trwałości zmęczeniowej /Fatigue Life Curve/ $\sigma_{a_{\max}}(n_c)$ - rys. 5b [62]. Na osi rzędnych podane są wartości maksymalnych amplitud w programie, natomiast na osi odciętych - sumaryczne liczby cykli do zniszczenia zmęczeniowego. Wyniki programowanych badań zmęczeniowych aproksymuje się prostymi w układach współrzędnych semi- i bilogarytmicznym [60]. W niniejszej pracy przyjęto układ bilogarytmiczny, w którym krzywa trwałości zmęczeniowej opisana jest równaniem:

$$\sigma_{a_{\max}}^m \cdot n_c = \text{const.} \quad (4)$$

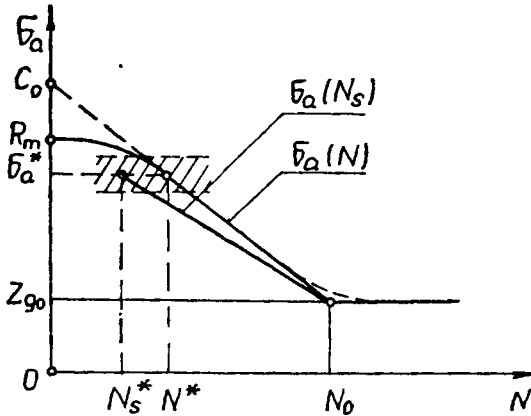
lub w zapisie prostej regresji w układzie bilogarytmicznym:

$$y = -bx + c \quad (5)$$

gdzie:

- $b = \frac{1}{m}$ - wartość bezwzględna współczynnika kierunkowego prostej regresji
 m - wykładnik potęgi w równaniu krzywej trwałości zmęczeniowej
 $y = \lg \sigma_{a_{\max}}$
 $x = \lg n_c$
 $c = \lg C$ - stała /wyraz wolny w równaniu prostej regresji/

Szczególnym przypadkiem krzywej trwałości zmęczeniowej $\sigma_{a \max}(n_c)$ dla $\xi = 1,0$ (wzór 3) jest krzywa zmęczeniowa /Wöhlera/ $\sigma_a(N)$, wyznaczona przy stałoamplitudowym obciążeniu /rys. 6/.



Rys. 6. Schematyczne przedstawienie krzywej zmęczeniowej /Wöhlera/ w bilogarytmicznym układzie współrzędnych

Na rys. 6 oznaczono:

- N^* - liczba cykli odpowiadająca granicy wytrzymałości zmęczeniowej w zakresie małej liczby cykli
- σ_a^* - amplituda naprężeń odpowiadająca N^*
- Z_G - granica zmęczenia
- N_0 - liczba cykli odpowiadająca punktowi załamania krzywej zmęczeniowej
- R_m - doraźna wytrzymałość na rozerwanie

Wykres $\sigma_a(N_s)$ odpowiada powstaniu dostrzegalnego pęknięcia, natomiast wykres $\sigma_a(N)$ - całkowitemu pęknięciu zmęczeniowemu.

Krzywa zmęczeniowa opisana jest równaniem

$$\sigma_a^{m_0} \cdot N = \text{const} \quad \text{dla } Z_G \leq \sigma_a \leq \sigma_a^* \quad (6)$$

$$N \rightarrow \infty \quad \text{dla } \sigma_a < Z_G$$

lub w zapisie prostej regresji w układzie bilogarytmicznym

dla

$$z_G \leq \delta_a \leq \delta_a^*$$

$$y_0 = -b_0 x_0 + c_0 \quad (7)$$

gdzie:

$$b_0 = \frac{1}{m_0} \quad - \text{wartość bezwzględna współczynnika kierunkowego prostej regresji}$$

$$m_0 \quad - \text{wykładnik potęgi w równaniu krzywej zmęczenia}$$

$$y_0 \quad = \lg \delta_a$$

$$x_0 \quad = \lg N$$

$$c_0 = \lg C_0 \quad - \text{stała /wyraz wolny w równaniu prostej regresji/}$$

Przyjmując jako kryterium zniszczenia zmęczeniowego pojawienie się dostrzegalnego pęknięcia zmęczeniowego należy do podanych wzorów w miejsce N wstawić N_s . W strefie przejściowej /w okolicy punktu N^* , δ^* / obserwuje się nieciągłość krzywej zmęczeniowej, która wynika ze zmiany charakteru rozwoju pęknięć zmęczeniowych i wielkości plastycznych odkształceń [6, 218].

Dla zakresu niskocyklicznej wytrzymałości zmęczeniowej i strefy przejściowej, dogodniej jest stosować zależność trwałości zmęczeniowej od odkształceń. Istnieje szereg zależności, które omówiono w pracy [116], na przykład wzór Morrow wykorzystany w dalszej części pracy, który ma postać:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_{pl}}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_s}{2} = \varepsilon_f' (2 N_f)^c + \frac{\sigma_f'}{E} (2 N_f)^b \quad (8)$$

gdzie:

$$\Delta \varepsilon \quad - \text{zakres odkształceń całkowitych}$$

$$\Delta \varepsilon_{pl} \quad - \text{zakres odkształceń plastycznych}$$

$$\Delta \varepsilon_s \quad - \text{zakres odkształceń sprężystych}$$

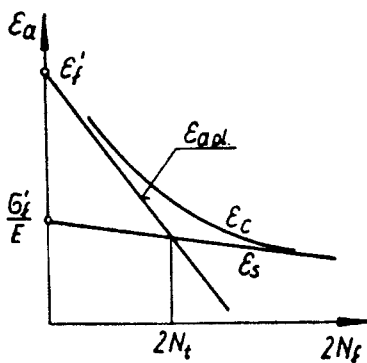
$$\varepsilon_f' \quad - \text{odkształcenia przy zerwaniu w pierwszym nawrocie } 2 N_f = 1$$

$$\sigma_f' \quad - \text{naprężenia przy zerwaniu w pierwszym nawrocie}$$

$$2 N_f \quad - \text{liczba nawrotów obciążenia /półcykli/}$$

$$b \text{ i } c \quad - \text{stałe}$$

Zależność (8) i wielkości w niej występujące zilustrowano na rys. 7.



Rys. 7. Schematyczne przedstawienie zależności odkształceń od liczby nawrotów obciążenia

Strefę w otoczeniu punktu przecięcia prostych ϵ_{pl} i ϵ_s oznaczono przez $2N_t$ i przyjęto umownie nazywać strefą przejściową od nisko do wysokocyklicznej wytrzymałości zmęczeniowej.

2. ANALIZA DOTYCHCZASOWEGO STANU WIEDZY

2.1. Ocena trwałości zmęczeniowej

Trwałość zmęczeniową elementów maszyn ocenia się na podstawie wyników badań lub obliczeń. W przypadku obciążeń stałoamplitudowych w zakresie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej, wykorzystywana jest zależność trwałości zmęczeniowej od wartości naprężeń zmęczeniowych (zależność 6) lub zależność trwałości zmęczeniowej od odkształceń (zależność 8). W przypadkach, gdy istnieją warunki przyspieszonej inicjacji pęknięcia zmęczeniowego w wyniku istnienia karbów lub wad wytwórczych spełniających rolę początkowego pęknięcia /np. w przypadku spoin [69] /, o trwałości zmęczeniowej decyduje trzeci etap procesu zmęczenia, a trwałość wyznacza się z zależności opisujących prędkość rozwoju pęknięć zmęczeniowych [67, 70, 116].

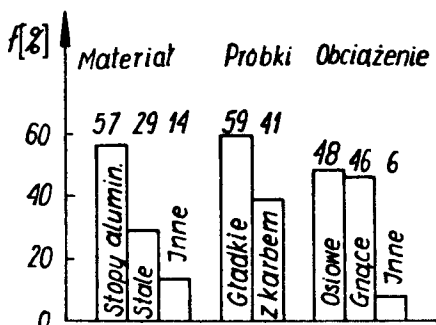
W warunkach obciążeń losowych lub programowanych, ocena trwałości zmęczeniowej jest bardziej złożona. Może być dokonana na podstawie wyników badań zmęczeniowych z obciążeniem losowym lub programowanym oraz obliczeń z wykorzystaniem hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych [81, 203]. W przypadkach, gdy o trwałości zmęczeniowej decyduje etap wzrostu pęknięcia, wykorzystuje się zależności do określania prędkości rozwoju pęknięć zmęczeniowych [71].

a. Badania trwałości zmęczeniowej

Badania trwałości zmęczeniowej można podzielić na grupy [199]: programowane - RPCA /randomized programmed constant amplitude/; z losowym następstwem pojedynczych cykli - ICR /individual cycles in random sequence/; z generowanym stacjonarnym obciążeniem losowym według zadanych charakterystyk statys-

tycznych - SRP /testing by analogous stationary random proces/; badanie w zakresie akustycznych częstotliwości - AC /acoustic fatigue test/ oraz badania propagacji pęknięć przy obciążeniu losowym - RCP /random load crack propagation test/.

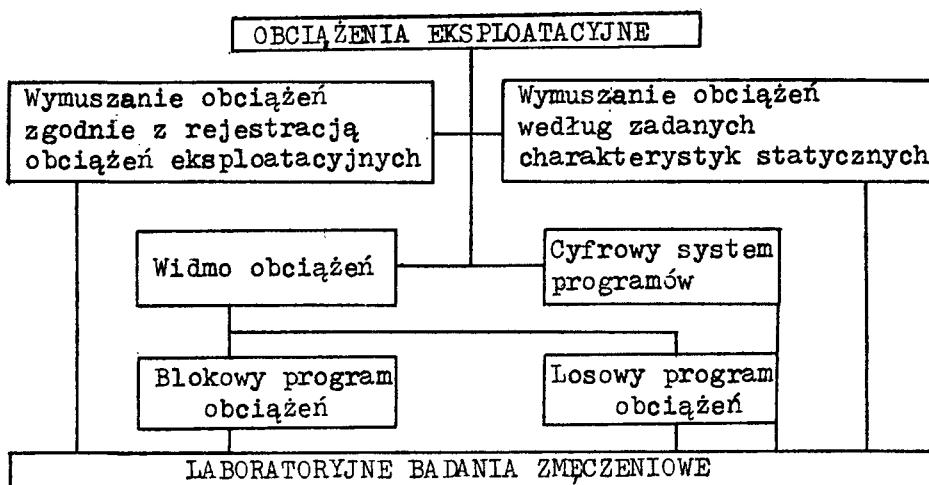
Ogólne warunki badań w wybranych grupach RPCA, ICR i SRP, opracowane w niniejszej pracy na podstawie literatury /około 80 publikacji/ przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Warunki badań RPCA, ICR i SRP /objaśnienia w tekście/

W opisie "inne materiały" ujęto stopy tytanu, miedzi i tworzywa niemetaliczne. Z przedstawionych na rys. 8 danych wynika, że większość badań przeprowadzono na próbkach lub elementach wykonanych ze stopów aluminium /głównie 7075-T6 i 2024-T3 prod. USA/ w warunkach obciążeń losowych i programowanych - rozciągających.

Wymienione badania przeprowadza się na specjalnych maszynach wytrzymałościowych z wykorzystaniem: rejestracji przebiegów obciążeń w warunkach eksploatacji na taśmach magnetycznych i perforowanych /np. metoda zamkniętej pętli [31] /, generatorów impulsów losowych i pseudolosowych oraz złożonych systemów sterowania z wykorzystaniem maszyn cyfrowych [31, 95, 109, 110]. Sposoby realizacji obciążeń zmiennych za pomocą wymienionych maszyn przedstawiono na rys. 9. Poza urządzeniami do sterowania obciążeniem, maszyny te wyposażone są we wskaźniki cyfrowe obciążeń, przemieszczeń lub odkształceń oraz odpowiednie rejestratory tych wielkości. Szeroki zakres obciążeń od 6 - 1000 kN /w specjalnych wykonaniach, do 12000 kN/, częstotliwości do 300 Hz /w specjalnych wykonaniach do 1000 Hz/ i przemieszczeń 20 - 400 mm [31, 95], świadczy o ich wysokiej uniwersalności.



Rys. 9. Sposoby realizacji obciążeń zmiennych w laboratoryjnych badaniach zmęczeniowych

W badaniach zmęczeniowych przy skręcaniu osiąga się momenty w zakresie 500 - 32000 kNm i maksymalny kąt obrotu 100° [109, 110]. Istnieje ponadto możliwość realizacji trzech postaci cyklu zmiennego obciążenia: sinusoidalnego, trójkątnego i prostokątnego. Wykonanie oddzielnych pulsatorów hydraulicznych umożliwia kompletowanie złożonych stanowisk badawczych /np. do badań samolotów, samochodów ciężarowych/. Zastosowane w takich stanowiskach pulsatory sterowane są urządzeniami wielokanałowymi, umożliwiającymi realizację złożonych obciążeń [131]. W pracach [94, 95] omówiono 6 różnych programów obciążeń blokowych /4 zgodne z rys. 4 i dwie odmiany programu Lo - Hi - Lo / oraz 9 różnych przebiegów losowych w tym losowe stacjonarne, quasistacjonarne, pseudolosowe, z losowym następstwem bloków i pojedynczych cykli sinusoidalnych.

Zastosowaniu generatorów przebiegów losowych w badaniach zmęczeniowych poświęcona jest praca [126], w której opisano układ czterokanałowego generatora i zestawu filtrów dolnoprzepustowych o częstotliwości granicznej 200 Hz, przeznaczonego do współpracy ze wzbudnikami elektrodynamicznymi. Podstawowe znaczenie w badaniach symulowanych ma prawidłowy dobór charakterystyk statystycznych. Sposoby symulacji losowych obciążeń

według zadanych charakterystyk teorii korelacyjnej omówione zostały w pracach [7, 8, 24, 52]. Po rozpatrzeniu 6 przypadków stacjonarnych i 2 przypadków niestacjonarnych przebiegów obciążeń losowych wykazano, że w badaniach zmęczeniowych w ogólnym przypadku, symulacji podlegają funkcje gęstości prawdopodobieństwa amplitud oraz funkcje gęstości widmowej. W niektórych przypadkach procesów stacjonarnych wystarczy symulacja funkcji gęstości prawdopodobieństwa.

Programowanym badaniom zmęczeniowym poświęcono punkt 2.4 niniejszej pracy.

b. Obliczenia trwałości zmęczeniowej

Do obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów maszyn w warunkach obciążeń losowych i programowanych w świetle dotychczas stosowanych metod należy znać: charakterystykę zmęczeniową wyznaczoną w warunkach stałoamplitudowego obciążenia /w szczególnym przypadku jest nią krzywa Wöhlera/, obciążenie zmienne w postaci funkcji gęstości prawdopodobieństwa parametrów cykli sinusoidalnych lub stopniowe widmo obciążeń oraz należy przyjąć hipotezę sumowania uszkodzeń zmęczeniowych.

Celem omówienia schematu obliczeń, przyjęto liniową hipotezę sumowania uszkodzeń zmęczeniowych Palmgren - Miner. Zgodnie z tą hipotezą jeden cykl obciążenia sinusoidalnego o parametrach σ_m , σ_a , f_T , powoduje uszkodzenie zmęczeniowe [91, 139, 213]

$$\frac{1}{N(\sigma_m, \sigma_a, f_T)} \quad (9)$$

gdzie:

$N(\sigma_m, \sigma_a, f_T)$ - zależność liczby cykli N do zmęczeniowego zniszczenia od parametrów cykli sinusoidalnych σ_m , σ_a , f_T .

Przyrost uszkodzenia zmęczeniowego dD_n po dn cyklach można wyznaczyć

$$dD_n = \frac{dn}{N(\bar{\sigma}_m, \bar{\sigma}_a, f_T)} \quad (10)$$

Znając funkcję gęstości prawdopodobieństwa $f(\bar{\sigma}_m, \bar{\sigma}_a, f_T)$ można napisać, że

$$dn = n_1 \text{tf}(\bar{\sigma}_m, \bar{\sigma}_a, f_T) d\bar{\sigma}_m d\bar{\sigma}_a df_T \quad (11)$$

dla parametrów cykli leżących w przedziale $(\bar{\sigma}_m, \bar{\sigma}_m + d\bar{\sigma}_m; \bar{\sigma}_a, \bar{\sigma}_a + d\bar{\sigma}_a; f_T, f_T + df_T)$.

W zależności (11) oznaczono:

n_1 - liczba cykli w jednostce czasu

t - czas w przyjętych jednostkach

Podstawiając wyrażenie (11) do (10) otrzymuje się

$$dD_n = \frac{1}{N(\bar{\sigma}_m, \bar{\sigma}_a, f_T)} n_1 \text{tf}(\bar{\sigma}_m, \bar{\sigma}_a, f_T) d\bar{\sigma}_m d\bar{\sigma}_a df_T \quad (12)$$

natomiast skumulowane uszkodzenie D_n wynosi

$$D_n = n_1 dt \int_{\bar{\sigma}_{m_d}}^{\bar{\sigma}_{m_g}} \int_{\bar{\sigma}_{a_d}}^{\bar{\sigma}_{a_g}} \int_{f_{T_d}}^{f_{T_g}} \frac{f(\bar{\sigma}_m, \bar{\sigma}_a, f_T)}{N(\bar{\sigma}_m, \bar{\sigma}_a, f_T)} d\bar{\sigma}_m d\bar{\sigma}_a df_T \quad (13)$$

Trwałość dla przyjętego uszkodzenia D wynosi

$$T_R = \frac{D}{n_1 \int_{\bar{\sigma}_{m_d}}^{\bar{\sigma}_{m_g}} \int_{\bar{\sigma}_{a_d}}^{\bar{\sigma}_{a_g}} \int_{f_{T_d}}^{f_{T_g}} \frac{f(\bar{\sigma}_m, \bar{\sigma}_a, f_T)}{N(\bar{\sigma}_m, \bar{\sigma}_a, f_T)} d\bar{\sigma}_m d\bar{\sigma}_a df_T} \quad (14)$$

Indeksem d i g oznaczono odpowiednio wartości dolnej i gór-

nej granicy całkowania. Według hipotezy Palmgrena - Minera, zniszczenie zmęczeniowe zachodzi dla $D = 1,0$, a zatem trwałość do zniszczenia zmęczeniowego w jednostkach czasu można obliczyć z zależności

$$T_R = \frac{1,0}{n_1 \int_{\sigma_{m_d}}^{\sigma_{m_g}} \int_{\sigma_{a_d}}^{\sigma_{a_g}} \int_{f_{T_d}}^{f_{T_g}} \frac{f(\sigma_m, \sigma_a, f_T)}{N(\sigma_m, \sigma_a, f_T)} d\sigma_m d\sigma_a df_T} \quad (15)$$

natomiast trwałość zmęczeniową wyrażoną liczbą cykli

$$n_c = \frac{1,0}{\int_{\sigma_{m_d}}^{\sigma_{m_g}} \int_{\sigma_{a_d}}^{\sigma_{a_g}} \int_{f_{T_d}}^{f_{T_g}} \frac{f(\sigma_m, \sigma_a, f_T)}{N(\sigma_m, \sigma_a, f_T)} d\sigma_m d\sigma_a df_T} \quad (16)$$

W przypadku, gdy $\sigma_m = \text{const.}$ lub $\sigma_m = 0$ oraz $f_T = \text{const.}$ zależność (16) przyjmuje postać spotykaną powszechnie w literaturze, między innymi w pracach [36, 182, 184, 187]

$$n_c = \frac{1,0}{\int_{\sigma_{a_d}}^{\sigma_{a_g}} \frac{f(\sigma_a)}{N(\sigma_a)} d\sigma_a} \quad (17)$$

gdzie:

$N(\sigma_a)$ - jest krzywą zmęczeniową /Wöhlera/ opisaną zależnością (6).

Podstawiając do zależności (17) zależność (6) po przekształceniach otrzymuje się zależność

$$n_c = \frac{N_1}{\int_{\sigma_{ad}}^{\sigma_{ag}} \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{a\max}} \right)^{m_o} f(\sigma_a) d\sigma_a} \quad (18)$$

Jeżeli naprężenia zmienne są szczególnym przypadkiem procesu losowego o wąskim widmie /wartość średnia, częstotliwość - są stałe, a amplituda jest funkcją losową/ to zależność (15) przyjmie postać [227]

$$T_R = \frac{C_o}{f_T \left(S_{\sigma}^2 \right)^{m_o} \Gamma \left(1 + \frac{m_o}{2} \right)} \quad (19)$$

gdzie:

$\Gamma(\cdot)$ - funkcja gamma

S_{σ}^2 - wariancja procesu $\sigma(t)$

Oddzielnego omówienia wymagają składniki zależności (15). Funkcje gęstości prawdopodobieństwa $f(\sigma_m, \sigma_a, f_T)$ omówione zostały w punkcie 2.2. Charakterystyka zmęczeniowa $N(\sigma_m, \sigma_a, f_T)$ została opisana w pracy [88, 226] oraz w opracowaniu autora [213]. W wymienionych pracach przyjęto, że częstotliwość f_T mieści się w granicach, w których jej wpływ na wytrzymałość zmęczeniową może być pominięty. W pracy [213] podano dwa przybliżone wzory opisujące charakterystykę zmęczeniową:

- pierwszy

$$N(\sigma_m, \sigma_a) = \frac{N_o Z_G^{m_o}}{(\sigma_a + \psi_{\sigma} \cdot \sigma_m)^{m_o}} \quad \text{dla } -\infty < R \leq 0 \quad (20)$$

$$N(\sigma_m, \sigma_a) = N_0 \left[\frac{Z_G (R_m + \sigma_a - \sigma_m)}{\sigma_a R_m (1 + \psi \sigma)} \right]^{m_0} \quad \text{dla } 0 < R \leq 1,0 \quad (20)$$

gdzie:

ψ_σ - współczynnik wrażliwości stali na asymetrię cyklu, który można wyrazić wzorem

$$\psi_\sigma = C N^{(m'_0 - m_0)} - 1 \quad (21)$$

m_0 - wykładnik potęgi w równaniu krzywej zmęczeniowej dla $R = -1,0$

m'_0 - wykładnik potęgi w równaniu krzywej zmęczeniowej dla $R = 0$

C - stała wyznaczona na podstawie wyników badań zmęczeniowych przy stałoaamplitudowym obciążeniu i $R = -1,0$ oraz $R = 0$

- drugi

$$N(\sigma_m, \sigma_a) = N_0 \left[\frac{Z_G}{a} \left(1 - \frac{\sigma_m}{R_m} \right) \right]^{m_0} \quad (22)$$

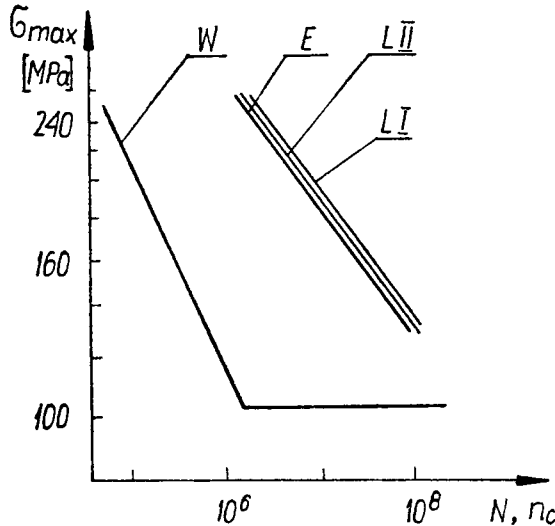
Omówione zagadnienia zilustrowano na rys. 10, na którym w górnej części (a) podano fragment wykresu powierzchni zmęczeniowej $N(\sigma_m, \sigma_a)$, natomiast w dolnej części (b) podano wykres funkcji prawdopodobieństwa $f(\sigma_m, \sigma_a)$. Przydatność podanych zależności potwierdzono wynikami badań autora [235]. Jeden z wykresów zaczerpnięty z wyżej wymienionej pracy przedstawiono na rys. 11, na którym oznaczono:

W - krzywa zmęczeniowa wyznaczona przy stałoaamplitudowym obciążeniu $R = -1,0$,

E - krzywa trwałości wyznaczona w programowanych badaniach zmęczeniowych,

LI - krzywa trwałości zmęczeniowej obliczona na podstawie zależności (20) i (21),

L II - krzywa trwałości zmęczeniowej obliczona na podstawie zależności (22).



Rys. 11. Krzywe trwałości zmęczeniowej:

- E - krzywa wyznaczona w programowanych badaniach zmęczeniowych,
- L I i L II - krzywe wyznaczone drogą obliczeń,
- W - krzywa zmęczeniowa /Wöhlera/

W badaniach i obliczeniach przyjęto rozkład parametrów σ_m i σ_a zgodnie z tab. D.1 zamieszczoną w dodatku.

Funkcje gęstości prawdopodobieństwa $f(\sigma_m, \sigma_a, f_T)$ i blokowe widma naprężeń, opracowywane są najczęściej na podstawie pomiarów odkształceń metodą tensometryczną. Pomiaru dokonuje się w zmęczeniowo słabych ogniwach w wyznaczonych kierunkach /np. metodą elementów skończonych, za pomocą kruchych pokryć, metodami elastooptyki lub obserwacji przebiegu pęknięć zmęczeniowych. Przykład badań za pomocą kruchych pokryć, w których zilustrowano zgodność przebiegu eksploatacyjnych pęknięć zmęczeniowych z przebiegiem /obrazem/ spękania kruchego pokrycia w różnych węzłach ram rowerów składanych, podano w jednej z wcześniejszych prac autora [211].

Taki sposób postępowania jest uproszczeniem rzeczywistości, ponieważ w słabych ogniwach występują w ogólnych przypadkach trójosiowe stany naprężenia inicjujące procesy zniszczenia zmęczeniowego. Znane są kryteria złomu zmęczeniowego i ich doś-

wiadczalna weryfikacja dla przypadku złożonego stanu naprężenia o składowych zmieniających się w sposób sinusoidalny [37]. Przewidywanie trwałości zmęczeniowej w warunkach losowych trójosiowych stanów naprężeń jest trudne i opracowane matematyczne modele obliczeniowe [1, 138, 140, 141] nie zostały doświadczalnie zweryfikowane. W pracy [1], jako kryterium złomu zmęczeniowego przyjęto kryterium energii odkształcenia postaciowego. W pracy [140] wykazano, że w zależności od przyjętego kryterium złomu zmęczeniowego, wyznaczona trwałość zmęczeniowa w warunkach symulowanego losowego złożonego stanu naprężeń różni się dla pięciu przyjętych kryteriów w skrajnym przypadku 300-krotnie. Wymienione obliczenia wykonano przyjmując podstawowe założenia teorii sprężystości, z wykorzystaniem hipotezy liniowego sumowania uszkodzeń zmęczeniowych, krzywej zmęczeniowej /Wöhlera/ oraz rozkładu zredukowanych naprężeń ze względu na wartość średnią i częstotliwość [101, 137] /do obliczeń trwałości zastosowano wzór 17/. Obliczenia wymagały wyznaczenia prawdopodobnego położenia płaszczyzny złomu zmęczeniowego [9].

Przy ograniczonym zastosowaniu omówionej metody do oceny trwałości zmęczeniowej elementów maszyn ma ona istotne znaczenie w procesie optymalizacji konstrukcji w świetle kryterium trwałości zmęczeniowej oraz w planowaniu kosztownych badań zmęczeniowych, umożliwiając przez wcześniejsze porównania szeregu wersji konstrukcyjnych na podstawie symulacji trwałości, ograniczenie zakresu tych badań.

Przedstawione metody obliczeń oparte były na zastosowaniu hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych, które jak to zostało omówione w punkcie 2.3 nie opisują dostatecznie dokładnie procesu zmęczenia dla wszystkich możliwych warunków badań. Podjęto zatem wysiłki opracowania metod obliczeń z wyłączeniem hipotez sumowania uszkodzeń. Niżej zostaną opisane dwie metody tego rodzaju.

Możliwość oceny trwałości zmęczeniowej drogą porównania charakterystyk statystycznych losowego procesu obciążeń z powierzchnią zmęczeniową otrzymaną przy analogicznym obciążeniu opisano w pracy [75]. Zasadnicza niedogodność tej metody polega na konieczności wyznaczania powierzchni zmęczeniowej dla określonych grup procesów losowych, charakteryzujących się podobnymi funkcjami gęstości widmowej. Jako kryterium podobieństwa przy-

jęto współczynnik szerokości widma. Brak do tej pory jakichkolwiek danych doświadczalnych /dla różnych cech materiałowych i geometrycznych próbek/ dotyczących tego rodzaju powierzchni uniemożliwia praktyczne stosowanie tej metody.

Między trwałością zmęczeniową wyznaczoną w programowanych badaniach zmęczeniowych i trwałością wyznaczoną w warunkach stałoamplitudowych obciążeń równych co do wartości maksymalnym obciążeniem w programie obciążeń, stwierdzono istnienie pewnych związków [59, 63]. Badania przeprowadzono na próbkach wykonanych ze stopu 2024-T3/AlCuMg/ w warunkach stałoamplitudowego i programowanego obciążenia w zakresie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej $/N \approx 5 \cdot 10^3 - 10^5$ cykli stałoamplitudowego obciążenia oraz $n_c \approx 10^6 - 10^8$ cykli obciążenia programowanego/. Szukano zależności

$$n_c = g(N) \quad (23)$$

którą wyznaczyć można z porównania wzorów na trwałość zmęczeniową przy stałoamplitudowych obciążeniach

$$\lg N = \lg D_0 - m_0 \lg \sigma_a \quad (24)$$

oraz w warunkach programowanych obciążeń

$$\lg n_c = \lg D - m \lg \sigma_{a_{\max}} \quad (25)$$

Dla warunku $\sigma_a = \sigma_{a_{\max}}$ otrzymuje się

$$\lg n_c = \lg A + \gamma \lg N \quad (26)$$

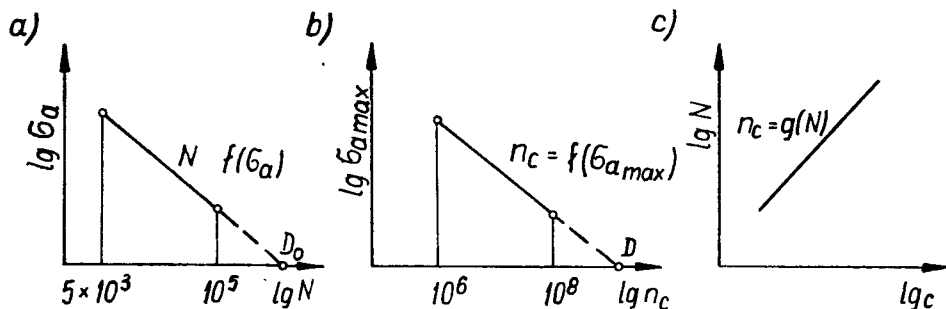
lub

$$n_c = A N^\gamma \quad (27)$$

gdzie:

$$\gamma = \frac{m}{m_0} \quad \text{i} \quad A = \frac{D}{D_0} \gamma$$

Ilustrację omówionej metody przedstawiono na rys. 12.



Rys. 12. Schematyczne przedstawienie: krzywej zmęczeniowej - a, krzywej trwałości zmęczeniowej - b i zależności pomiędzy trwałością odpowiadającą stałoaamplitudowemu i programowanemu obciążeniu - c

Z rezultatów badań przedstawionych w pracy [59] wynika, że zależności $N(\sigma_a)$ i $n_c(\sigma_{a_{max}})$ w układzie bilogarytmicznym są liniami łamanymi. Do rozważań zatem przyjęto jedynie takie zakresy /rys. 12a i b/, w których model regresji prostoliniowej jest adekwatny. Ponadto we wszystkich rozpatrywanych przypadkach zależności $N(\sigma_a)$ i $n_c(\sigma_{a_{max}})$ wykładnik potęgi $m_0 < m$.

Znając zależność (27) w łatwy sposób można wyznaczyć trwałość zmęczeniową w warunkach programowanych lub losowych obciążeń na podstawie wyników badań przy stałoaamplitudowym obciążeniu. W tym celu należy znać wartości stałych γ i A , które są zależne od warunków badań /materiał i postać geometryczna próbki lub elementu maszyny, rodzaj obciążenia, parametry widma obciążeń/. Dla próbek ze stopu aluminium 2024-T3, $\gamma = 1,16 - 1,18$ w zależności od wartości ξ . Brak danych dotyczących stałych γ i A ogranicza praktyczne stosowanie omawianej metody.

Omówione dotąd metody obliczeń trwałości zmęczeniowej mają częściowo deterministyczny charakter. Uwzględnienie losowego rozkładu wartości naprężeń i warunkowego rozkładu wytrzymałości zmęczeniowej umożliwiają metody statystyczne przedstawione w literaturze [61, 79, 130]. Podany w ogólnym zarysie sposób obliczeń polega na wyznaczeniu prawdopodobieństwa zniszczenia

zmęczeniowego w funkcji liczby cykli /przebiegu w km lub czasu w godzinach/. Zastosowanie wymienionego sposobu zilustrowano obliczeniami elementów pojazdów jednośladowych w pracy autora [211].

2.2. Opis obciążeń zmiennych

Obciążenia można podzielić w świetle kryterium trwałości zmęczeniowej na: stałoamplitudowe, programowane /RPCA lub ICR/ oraz losowe.

W tym punkcie omówione zostaną obciążenia losowe i programowane. Obciążenia stałoamplitudowe omówione zostały obszernie w pracach [20, 45, 186].

Rozpatrywanie obciążeń eksploatacyjnych jako procesy losowe, umożliwia stosowanie do ich opisu metod matematycznej teorii procesów losowych. Stacjonarność i ergodyczność, a często normalność procesów losowych, stanowią podstawowe założenia programowanych badań i obliczeń trwałości zmęczeniowej [40, 123]. Metodom badań procesów losowych poświęconych zostało szereg opracowań ogólnych [4, 47, 84, 111, 150, 175, 200]. Metody obliczeń statystycznych z wykorzystaniem EMC są omówione w pracy [26]. Zastosowaniom omawianej teorii do zagadnień technicznych, w tym do analizy obciążeń losowych, poświęcone zostały prace [19, 42, 76, 77, 129, 201]. W pracy [123] omówione zostały sposoby postępowania w przypadkach, gdy obciążenia eksploatacyjne są procesami niestacjonarnymi określonego rodzaju.

Z wymienionych prac wynika, że analiza obciążeń losowych oparta jest powszechnie na teorii korelacyjnej, umożliwiającej ocenę stacjonarności w szerokim sensie. Taki zakres analizy statystycznej można uznać za wystarczający, ponieważ w badaniach i obliczeniach trwałości zmęczeniowej istotna jest przede wszystkim stacjonarność obciążeń losowych z punktu widzenia wartości średniej i wariancji.

Znajomość charakteru losowych zmian obciążeń ma podstawowe znaczenie dla doboru odpowiedniej metody schematyzacji [53, 106, 124, 204, 205], która z kolei ma zasadniczy wpływ na wyznaczaną trwałość zmęczeniową. Z prac poświęconych analizie obciążeń eksploatacyjnych maszyn [40, 42, 122, 123, 129] wynika, że wymienione założenia dotyczące stacjonarności, ergodyczność-

ci i normalności, tylko w niektórych przypadkach są spełnione. W tych przypadkach, gdy nie są spełnione podane założenia, dąży się do takiego podziału procesu, aby można było traktować obciążenia eksploatacyjne jako proces odcinkami stacjonarny [123, 129]. Możliwość takiego podziału wykazano w badaniach statystycznych dużej liczby pomiarów eksploatacyjnych naprężeń /3 tysiące/ w elementach koparek, traktorów, trolejbusów, przyczep i samochodów [40]. Ponadto stwierdzono, że obciążenia losowe w większości przypadków są procesami losowymi o szerokim widmie.

Obliczenia i programowane badania zmęczeniowe wymagają modelowania obciążeń losowych, które polega na zastąpieniu losowych przebiegów przebiegami sinusoidalnymi. Jak wykazano w pracy [185], opieranie obliczeń na charakterystykach statystycznych losowych obciążeń /wartości średniej i wariancji/ prowadzi do poważnych błędów. Istnieje szereg sposobów modelowania obciążeń o charakterze losowym. Sposoby te można podzielić na dwie grupy. Pierwsza obejmuje sposoby, w których rozkłada się realizację losowego obciążenia na składowe harmoniczne. Sposób polegający na wyborze dominujących składowych harmonicznych pod względem amplitudy i częstotliwości zastosowany do opracowania programu obciążeń w badaniach stanowiskowych został opisany w pracy [92]. Dotyczył on procesów losowych o wąskim widmie. Próby wyboru dominujących składowych harmonicznych dla procesów losowych o szerokim widmie, charakterystycznych dla obciążeń pojazdów jednośladowych podjęte w pracy [204] nie dały pozytywnych rezultatów.

Drugą grupę stanowią sposoby polegające na zastąpieniu /schematyzacji/ losowych zmian obciążeń zbiorem pojedynczych cykli i półcykli sinusoidalnych [164]. Pierwsze sposoby schematyzacji oparte były na zliczaniu lokalnych ekstremów /Peak count method/ [58, 87] - rys. 2b. Sposób ten prowadzi do wyznaczenia rozkładu wartości amplitud przy założeniu stałej wartości średniej poszczególnych cykli sinusoidalnych obciążenia. Podstawy teoretyczne tego sposobu oparte są na teorii częstości przekroczeń przyjętego poziomu i rozkładach wartości szczytowych funkcji losowej. Dla obciążeń losowych o rozkładzie normalnym opisany został w pracach [123, 177]. Analiza teoretyczna i wyniki badań porównawczych z wykorzystaniem omawianego sposobu wykazały, że obciążenia sinusoidalne po schematy-

zacji są "intensywniejsze" niż obciążenie losowe, a wyznaczana trwałość zmęczeniowa średnio dwukrotnie mniejsza dla próbek ze stopu 2024-T3 [124] i próbek stalowych /C = 0,03%, Mn = 0,28% / [106].

Innym sposobem schematyzacji jest zastępowanie losowych obciążeń cyklami sinusoidalnymi zgodnie z rys. 2 c /range - mean count method/ [91, 217]. W pierwszym opisie tego sposobu [217] pomijano zmienność wartości średniej cykli sinusoidalnych przyjmując ją równą wartości średniej procesu losowych obciążeń /range count method/. W wyniku schematyzacji otrzymano podobnie jak w analizie lokalnych ekstremów, rozkład wartości amplitud przy stałej wartości średniej cykli. Ogólnie jednak, amplituda i wartość średnia są zmiennymi losowymi niezależnymi [123]. Sposób ten prowadzi zatem do dwuwymiarowej funkcji gęstości prawdopodobieństwa, przy czym rozkład amplitud przyjmuje się zazwyczaj jako rozkład Rayleigha [107, 108], rzadziej jako wykładniczy [40] czy normalny [119], natomiast rozkład wartości średnich jako normalny [123]. Wykorzystując sugestie zawarte w pracy [3], w opracowaniu autora [213] proponuje się rozkład beta dla amplitud i wartości średnich. W pierwszym przypadku funkcja gęstości prawdopodobieństwa ma postać

$$f(\sigma_m, \sigma_a) = \frac{n_1}{\sqrt{2\pi S_m^2}} \exp\left(-\frac{\sigma_m^2}{2 S_m^2}\right) \frac{C_a}{S_a^2} \exp\left(-\frac{\sigma_a^2}{2 S_a^2}\right) \quad (28)$$

gdzie:

- n_1 - liczba wartości szczytowych przypadająca na jednostkę czasu
- S_m^2 - wariancja wartości średnich cykli sinusoidalnych
- S_a - parametr rozkładu Rayleigha dla amplitud

natomiast w drugim

$$f(\sigma_m, \sigma_a) = \frac{(\sigma_m - \sigma_{m_{\min}})^{q_m - 1} (\sigma_{m_{\max}} - \sigma_{m_{\min}} - \sigma_m)^{r_m - 1}}{B(q_m, r_m) B(q_a, r_a) (\sigma_{m_{\max}} - \sigma_{m_{\min}})^{q_m + r_m - 1}} \cdot \frac{\sigma_a^{q_a - 1} (\sigma_{a_{\max}} - \sigma_a)^{r_a - 1}}{\sigma_{a_{\max}}^{q_a + r_a - 1}} \quad (29)$$

$$\text{dla } 0 \leq \sigma_a \leq \sigma_{m_{\max}}$$

$$\sigma_{m_{\min}} \leq \sigma_m \leq \sigma_{m_{\max}}$$

$$f(\sigma_m, \sigma_a) = 0$$

$$\text{dla } \sigma_a > \sigma_{a_{\max}}$$

$$\sigma_m > \sigma_{m_{\max}}$$

gdzie:

$B(q, r)$ - funkcja beta wyrażona funkcją gamma
 r i q - parametry rozkładu beta

Porównanie wyników badań w warunkach obciążeń losowych i programowanych opartych na omówionym sposobie schematyzacji wykazało, że trwałość zmęczeniowa próbek ze stopu aluminium 2024-T3, jest dwukrotnie wyższa dla obciążeń losowych o wąskim widmie, a niższa 2,5-krotnie, dla obciążeń losowych o szerokim widmie [124], natomiast dla próbek stalowych [106] trwałość zmęczeniowa dla obciążeń losowych o szerokim widmie jest 4-krotnie niższa w stosunku do trwałości wyznaczonej w warunkach obciążeń programowanych.

Wymienione sposoby schematyzacji losowych obciążeń stanowiły podstawę opracowania szeregu dalszych odmian [205], polegających na pomijaniu zmiennych wartości średnich oraz pomijaniu cykli sinusoidalnych nie mających wpływu na trwałość zmęczeniową. Omówione sposoby schematyzacji polegające na wyznaczaniu półcykli utworzonych z lokalnych maksimów lub gałęzi rosnących losowego obciążenia oparte są na założeniu, że przy dostatecz-

nie długim czasie trwania realizacji występują uzupełniające półcykle utworzone z lokalnych minimów lub gałęzi malejących o tych samych amplitudach i wartościach średnich, dając w sumie cały cykl. Należy zauważyć, że te składowe półcykle występują z reguły w różnym czasie, co jest jedną z podstawowych wad tych sposobów.

Wady tej nie posiadają współcześnie stosowane sposoby: pełnych cykli /full cycles count method/ [25, 38, 105, 177], par zakresów /range pair count method/ [43] oraz obwiedni /rain flow count method/ [43, 222]. Dwa pierwsze sposoby prowadzą do wyznaczania cykli sinusoidalnych w taki sposób, że otrzymuje się zamkniętą pętlę histerezy naprężeniowo - odkształceniowej, natomiast w trzecim sposobie otrzymuje się poza pełnymi cyklami sinusoidalnymi - półcykle. Wyznaczone w wymienionych sposobach cykle sinusoidalne charakteryzują się losowym rozkładem wartości amplitud i wartości średnich. W pracy autora [213] wykazano, że podobnie jak w sposobie wyznaczania półcykli z rozpiętości gałęzi, także w sposobie pełnych cykli łączny rozkład amplitud i wartości średnich może być opisany wzorami (28) i (29). Zależność wymienionych sposobów schematyzacji, a przede wszystkim duża czasochłonność, spowodowały opracowanie programów na EMC [102, 154, 231].

Programowane badania porównawcze węzłów konstrukcyjnych wykonanych ze stali 10BX z wykorzystaniem sposobów schematyzacji opartych na lokalnych ekstremach pełnych cykli i rozpiętości gałęzi wykazały, że trwałość zmęczeniowa kształtowała się, jak 1 : 3,5 : 25,7 [204, 205]. W badaniach spawanych ram traktorów opisanych w pracy [39] porównano wymienione wyżej sposoby z obciążeniem losowym otrzymując trwałość w stosunku, jak 1 : 6,6 : 18,0 : 8,8. Przedstawione wyniki badań wykazują, że przyjęcie nieodpowiedniego sposobu schematyzacji losowych obciążeń o szerokim widmie, prowadzi do błędów równych podanym proporcjom. Analiza wyników wymienionych badań [39, 106, 204] wykazała, że w świetle kryterium zgodności wyników badań w warunkach obciążeń losowych o szerokim widmie i programowanych, najodpowiedniejszą jest metoda pełnych cykli. Natomiast w obliczeniach i badaniach zmęczeniowych w zakresie niskocyklicznej wytrzymałości stosuje się schematyzację przebiegów losowych odkształceń sposobem obwiedni /rain flow/.

Schematyzacja obciążeń losowych prowadzi do wyznaczenia funkcji gęstości prawdopodobieństwa $f(\sigma_m, \sigma_a, f_T)$ /poza sposobem lokalnych ekstremów/. W badaniach i obliczeniach dogodniej jest jednak posługiwać się funkcją gęstości prawdopodobieństwa zredukowanych amplitud, ze względu na częstotliwość i wartości średnie poszczególnych cykli $f(\sigma_a)$. Łączny wpływ wymienionych czynników na sumowanie uszkodzeń zmęczeniowych jest złożony i nie podlega ściśle zasadzie superpozycji, polegającej w tym przypadku na prostym sumowaniu uszkodzeń spowodowanych wpływem poszczególnych czynników. W praktyce jednakże, dla przybliżonej oceny trwałości, zasada ta jest stosowana tym bardziej, że daje zadawalające zgodności z wynikami badań. W literaturze spotyka się metody wykreślne dla oceny stopnia uszkodzenia materiału przy jednoczesnym oddziaływaniu trzech czynników [27].

W większości prac między innymi [20, 66] przeważa przekonanie, że w zakresie 20 - 200 Hz wpływ częstotliwości na wytrzymałość zmęczeniową można pominąć. W zakresie niskich $f_T < 20$ Hz i wysokich częstotliwości $f_T > 200$ Hz wpływ częstotliwości w obliczeniach trwałości zmęczeniowej uwzględnia się przez obliczanie ekwiwalentnej amplitudy naprężeń [140, 141].

Analizując wpływ częstotliwości na wytrzymałość zmęczeniową stwierdza się, że jest on zależny od warunków badań, a przede wszystkim od rodzaju materiału i geometrycznej postaci próbek oraz poziomu naprężeń. Dla zakresu 20 - 200 Hz dla próbek stalowych i wykonanych ze stopu aluminium, gładkich i z karbem zawiera się w granicach około $\pm 5\%$ [83]. Obciążenie stałoaamplitudowe w porównaniu z obciążeniem losowym stwarza ekstremalne warunki z punktu widzenia wpływu częstotliwości na wytrzymałość zmęczeniową. Powyższe znalazło potwierdzenie w wynikach badań omówionych w pracy [112], w której wykazano, że dwukrotny wzrost szerokości pasma częstotliwości obciążeń losowych nie spowodował różnicy w wyznaczonej trwałości zmęczeniowej określonej liczbą cykli /według dowolnego sposobu schematyzacji/. W pracy [62] dla obciążeń losowych o szerokim widmie, proponuje się przyjmować do badań i obliczeń częstotliwość, dla której funkcja $G(f_T)$ przyjmuje wartość maksymalną.

Wpływ naprężeń średnich cykli sinusoidalnych na wytrzymałość zmęczeniową zależny jest podobnie, jak wpływ częstotliwości od warunków badań, przede wszystkim od rodzaju zmiennych obciążeń

/największy dla zginania, mniejszy dla rozciągania, najmniejszy dla skręcania/ [20] i od poziomu naprężeń zmiennych /rośnie w miarę wzrostu naprężeń/. Amplitudę zredukowaną cyklu można obliczyć wykorzystując współczynnik wrażliwości materiału na asymetrię cyklu [151], którego wartości dla zakresu nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej podane są w pracy [20], natomiast w zakresie ograniczonej wytrzymałości, współczynnik wrażliwości wyznaczyć można z wzoru (21) lub wykresów sporządzonych na podstawie wyników badań [102]. Do obliczeń można także wykorzystać zależności (20) i (22).

Bardziej ogólne zależności podane zostały w pracy [37]

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{a_z}}\right)^n + \left(k \frac{\sigma_m}{R_m}\right)^l = 1 \quad (30)$$

oraz w pracy [220]

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{a_z}} + p \frac{\sigma_m}{R_m} + (1-p) \left(\frac{\sigma_m}{R_m}\right)^2 = \quad (31)$$

gdzie:

k, l, n, p - stałe materiałowe

W pracy [223] podano różne zależności dla obciążeń jednostronnych i znakozmiennych

$$\left(\frac{\sigma_a}{Z_G}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{Z_G}\right)^2 = 1 \quad \text{dla } 0 < \sigma_m \leq 0,707 Z_G \quad (32)$$

oraz

$$\frac{\sigma_a}{Z_G} \cdot \frac{\sigma_m}{Z_G} = 0,5 \quad \text{dla } \sigma_m > 0,707 Z_G \quad (33)$$

Na podstawie badań w warunkach obciążeń wahadłowych $R = -1,0$ i odzerowo tętniących $R = 0$ dokonano korekcji wymienionych zależności odpowiednio:

$$\left(\frac{\sigma_a}{Z_G}\right)^{0,3} \left[\left(\frac{\sigma_a}{Z_G}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{Z_G}\right)^2 \right] = 1 \quad (34)$$

$$\text{dla } 0 \leq \sigma_m \leq 0,74 Z_G$$

oraz

$$\left(\frac{\sigma_a}{Z_G}\right)^{1,3} \cdot \frac{\sigma_m}{Z_G} = 0,5 \quad \text{dla } \sigma_m > 0,74 Z_G \quad (35)$$

Wykorzystanie omówionych zależności umożliwia wyznaczenie funkcji gęstości prawdopodobieństwa $f(\sigma_{a_z})$.

Przedstawiony opis obciążeń zmiennych wykazał, że ocena statystyczna obciążeń losowych jest podstawą badań i obliczeń trwałości zmęczeniowej. Ocena ta oparta na teorii korelacyjnej procesów losowych umożliwia wybór sposobu schematyzacji losowych obciążeń. Z analizy danych literaturowych wynika, że sposoby schematyzacji pełnych cykli i obwiedni są sposobami zalecanymi dla wąsko i szerokowidmowych obciążeń losowych. Rozkład wartości średnich i amplitud otrzymany ze schematyzacji obciążeń losowych o rozkładzie normalnym, opisany może być odpowiednio: rozkładem normalnym i Rayleigha lub rozkładami beta.

2.3. Hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych

Hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych można podzielić na liniowe, uogólnione, dwuetapowego przebiegu procesu zmęczenia, energetyczne, odkształceń plastycznych i inne [157, 181, 191]. Niżej omówione zostaną w skrócie niektóre ze znanych hipotez. Jako kryterium wyboru przyjęto możliwość zastosowania omówionych teorii do oceny trwałości zmęczeniowej w warunkach programowanych i losowych obciążeń.

W przypadku działania stałoamplitudowych naprężeń proces sumowania uszkodzeń zmęczeniowych może być opisany pewną funkcją

$$D_n = f(n) \quad (36)$$

dla której przyjmuje się /wyjątek stanowi hipoteza Orsetiego [157, 158, 159] /, że

$$D_0 = f(0) = 0 \quad \text{i} \quad D_N = f(N) = 1,0 \quad (37)$$

gdzie:

N - liczba cykli do zniszczenia zmęczeniowego /w zależności od przyjętego kryterium: do całkowitego pęknięcia lub pojawienia się dostrzegalnego pęknięcia zmęczeniowego/

n - liczba cykli naprężeń $n < N$

Proces sumowania uszkodzeń zmęczeniowych charakteryzuje się także prędkością

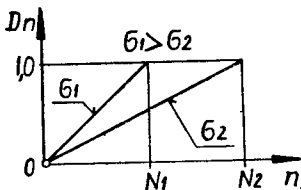
$$f'(n) = \frac{dD_n}{dn} \quad (38)$$

a. Hipotezy liniowe

W hipotezach liniowych zakłada się, że w przypadku stało-amplitudowego obciążenia, każdy cykl w jednakowym stopniu przyczynia się do zniszczenia tzn., że zniszczenie jest liniową funkcją liczby cykli /rys. 13/

$$D_n = \frac{n}{N} \quad (39)$$

oraz prędkość sumowania uszkodzeń $dD_n/dn = \text{const}$. Najpopularniejszymi hipotezami liniowymi są hipotezy: Palmgrena - Minera [148, 149], Wallgrena [225] oraz Serensena [185].



Rys. 13. Ilustracja graficzna hipotezy Palmgrena - Minera

W hipotezie Palmgrena - Minera zakłada się, że w przypadku wielostopniowego widma naprężeń, zniszczenie nastąpi, jeżeli spełni się warunek

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1,0 \quad (40)$$

lub

$$\int_{Z_G}^{\sigma_a \max} \frac{dn}{N(\sigma_a)} = 1,0 \quad (41)$$

Według tej hipotezy w procesie sumowania biorą udział jedynie poziomy naprężeń od 1 do k leżące powyżej granicy zmęczenia ($\sigma_i > Z_G$).

Weryfikacja doświadczalna hipotezy Palmgrena - Minera wykazała znaczną rozbieżność wyników badań z wynikami obliczeń zmęczeniowych próbek i elementów maszyn. Na 561 danych z badań w 258 przypadkach, co stanowi 46%, otrzymano sumę uszkodzeń /wzór 40/ mniejszą od 1,0, w pozostałych 303 /54%/ suma ta była większa od 1,0 [94, 133]. Rozrzut wyników badań wynosił od 0,1 do 10,0, a w sporadycznych przypadkach górna granica była przekroczona. Analizą zestawienia wyników badań dokonanej na podstawie literatury, zamieszczonego w jednej z prac autora [204] wskazuje, że różnice między wynikami badań i obliczeń zależą od: położenia widma naprężeń w stosunku do granicy zmęczenia, liczby stopni i postaci widma oraz cech geometrycznych i materiałowych próbki lub elementu maszyny. Mniejsza liczba stopni leżących całkowicie powyżej granicy zmęczenia powoduje, że różnice wyników obliczeń i badań są mniejsze.

Podobnie kształtuje się zgodność hipotezy Palmgrena - Minera dla kół zębatych [5], jest ona tym lepsza im większe wartości przyjmuje współczynnik wypełnienia widma oraz dla naprężeń w widmie w zakresach $\sigma_{\min} = (0,4 - 1,2) Z_G$ i $\sigma_{\max} = (1,4 - 2,0) Z_G$.

Celem analizy wpływu cech geometrycznych i materiałowych próbek i elementów maszyn oraz rodzaju obciążenia /osiowe, gnące /

na zgodność omawianej hipotezy z wynikami badań opracowano w niniejszej pracy na podstawie 75 publikacji tab. 1, w której

Tabela 1

Warunki i poglądowe wyniki doświadczalnej weryfikacji hipotezy Palmgrena - Minera

Próbki i elementy maszyn wykonane ze									
stali				stopów aluminium				inne mat.	
gładkie		z karbem		gładkie		z karbem		gl.	
Rodzaj obciążenia									
A	B	A	B	A	B	A	B	B	
Suma uszkodzeń $\sum n_i / N_i \geq 1,0$									
>	<	>	<	>	<	>	<	>	<
		14				14			
4	7	7				8			10
			1	3	4	7			
				4	4			1	3
								4	3
									3
A obciążenia osiowe (Axial)									
B obciążenia gnące (Bending)									

podano procentowy udział sum uszkodzeń mniejszych i większych od 1,0 dla różnych warunków badań. Z analizy danych zawartych w tab. 1 wynika, że udział wartości większych i mniejszych od jedności w ogólnej liczbie wyników badań jest w przybliżeniu równy oraz, że większość wyników zbliżona jest do 1,0. Obserwuje się także, że w przypadku próbek z karbem, elementów ze stali i stopów aluminium, przeważa $\sum n_i / N_i < 1,0$. Powyższe potwierdzają wyniki badań zawarte w pracy [50]. Wpływu pozostałych warunków badań nie obserwuje się, poza różnicą w badaniach próbek stalowych gładkich przy obciążeniu osiowym i gnącym.

Ponieważ w pozostałych przypadkach wpływ ten się nie potwierdza można uznać, że stwierdzenie na tej podstawie wpływu rodzaju obciążenia byłoby nieuzasadnione. W omawianej tab. 1 nie ujęto badań przy skręcaniu, ze względu na małą liczbę tego rodzaju badań.

Niżej zostaną omówione skrótowo wybrane wyniki badań dotyczących weryfikacji hipotezy Palmgrena - Minera.

W badaniach stalowych wałów /kilka gatunków stali po różnych zabiegach ulepszania powierzchniowego/ na skręcanie, wy-

kazano całkowitą zgodność hipotezy z wynikami badań [21]. Natomiast wniki badań próbek okrągłych ze stali 45 przy skręcaniu wskazują, że dla naprężeń maksymalnych w widmie, bliskich granicy zmęczenia i mniejszych wartości współczynnika wypełnienia, dokładność hipotezy maleje [120] ($\sum n_i/N_i = 0,26 - 0,74$), dla zmiennego $\tau_{a_{max}}$ i $0,18 - 0,26$ dla zmiennego ξ . Podobne tendencje można zauważyć analizując wyniki badań próbek z różnymi korbami wykonanych ze stopu: aluminium 2024-T3 i 7075-T6 omówione w pracy [22] ($\sum n_i/N_i = 0,2 - 1,38$). Wyraźny wpływ współczynnika asymetrii cyklu R na wartość sumy uszkodzeń wykazano w pracy [161]. Dla próbek wykonanych ze stali 45 poddanych programowanemu obciążeniu gnącemu /7 stopni obciążeń/ otrzymano wartość sumy $\sum n_i/N_i = 0,65 - 1,80$, przy małym zakresie zmienności współczynnika R odpowiednio od 0 - 0,11. Wpływowi temperatury na zgodność hipotezy Palmgre-na - Minera poświęcona została praca [117], w której badaniom w warunkach 2, 3 i 4 stopniowych programów poddano próbki ze stali żaroodpornej. Stwierdzono, że dla temperatury 873 K suma uszkodzeń zawarta była w przedziale 0,11 - 0,2, natomiast przy wzroście temperatury do 1023 K zaobserwowano wzrost sumy uszkodzeń do wartości 0,33 - 0,54. Odmienne wyniki otrzymano w badaniach żaroodpornych stali /EJ617, EJ867 i ŽS6K - prod. ZSRR/ w temperaturze 1073 - 1233 K w warunkach wielostopniowych widm [128], stwierdzono mianowicie zadawalającą zgodność wyników badań z hipotezą $\sum n_i/N_i \geq 1,0$ dla niższych oraz $\sum n_i/N_i < 1,0$ dla wyższych poziomów naprężeń.

Zgodność hipotezy Palmgre-na - Minera z wynikami badań próbek okrągłych ze stopu aluminium PA4 w warunkach dwustopniowych widm o małych wartościach współczynnika amplitudy $A_G = \sigma_a / \sigma_m = 0,0066$ i $0,050$ /zakres wibropełzania/ omówiono w pracy [97]. Dla trzech rodzajów widm obciążeń różniących się wartościami naprężeń i kolejnością ich realizacji otrzymano $\sum n_i/N_i = 1,205 - 1,837$. Badania tych samych próbek w warunkach obciążeń dwustopniowych o $A_G = 0,25$, $1,0$ i ∞ [98] wykazały, że $\sum n_i/N_i = 1,06 - 1,63$ dla obciążenia Lo - Hi oraz $\sum n_i/N_i = 0,382 - 2,55$ dla obciążenia Hi - Lo, w zależności od wartości współczynnika A_G . W wymienionych badaniach naprężenia obu stopni przekraczały granicę zmęczenia (σ_1 i $\sigma_2 > Z_G$). Na zakończenie przeglądu warunków doświadczalnej weryfikacji

hipotezy Palmgrena - Minera wymienić należy pracę [125], w której stwierdzono, że pokrycie powłoką poliuretanową spowodowało 6,5-krotną różnicę sum uszkodzeń dla dwustopniowego programu Hi - Lo ($\sum n_i/N_i = 1,05$) w stosunku do programu Lo - Hi ($\sum n_i/N_i = 6,5$), różnic tego rodzaju nie stwierdzono w przypadku badań próbek bez powłoki ($\sum n_i/N_i = 1,08 - 1,3$).

Celem zwiększenia dokładności obliczeń Wallgren [225] zaproponował przyjęcie hipotezy liniowej w postaci

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = a \quad (42)$$

Wartość współczynnika korekcyjnego a zależy od warunków badań i według Wallgrena mieści się w przedziale 0,5 - 3,0.

Serensen natomiast podał [185] sposób wyznaczania wartości współczynnika korekcyjnego a w zależności od współczynnika wypełnienia widma z uwzględnieniem niektórych poziomów naprężeń w widmie leżących poniżej granicy zmęczenia z zależności

$$a = \frac{\sigma_{a_{\max}} \cdot \xi - k Z_G}{\sigma_{a_{\max}} - k Z_G} \quad (43)$$

gdzie:

$k = 0,4 - 0,5$ - współczynnik uwzględniający wpływ naprężeń leżących poniżej granicy zmęczenia

Jak wynika z przytoczonych danych przyjęcie wartości a w hipotezie Wallgrena jest trudne, a błąd jaki można popełnić przyjmując skrajne przypadki jest 6-krotny. Obliczenie współczynnika a z zależności (43) daje w każdym przypadku wartość znacznie mniejszą od 1,0, co nie odpowiada przytoczonym danym doświadczalnym. Próbę modyfikacji hipotezy Palmgrena - Minera dla widm dwustopniowych o różnej sekwencji podjęto w pracy [49].

Bardziej ogólny przypadek modyfikacji hipotezy Palmgrena - Minera za pomocą funkcji indykacyjnej przedstawiono w pracach [132, 133]. W opisie widma obciążeń wykorzystano hipotezę Cortena - Dolana, co stwarza jednak konieczność przyjęcia dodatko-

wych parametrów w niej występujących. Trudność oceny wartości tych parametrów oraz złożoność funkcji indukcyjnych powoduje ograniczone zastosowanie tej metody. Dalsze próby modyfikacji polegały na uwzględnianiu wpływu naprężeń mniejszych od granicy zmęczenia przez przedłużenie gałęzi ograniczonej wytrzymałości krzywej zmęczeniowej w zakresie poniżej granicy zmęczenia [78].

Próbie zastosowania liniowej hipotezy do obliczeń z wykorzystaniem charakterystyk statystycznych losowych przebiegów naprężeń podjęto w pracy [228]. Obliczenia oparto na rozkładzie lokalnych ekstremów, który wynika z teorii przecięć przez losową funkcję $\sigma(t)$ przyjętego poziomu naprężeń. Brak doświadczalnej weryfikacji przedstawionej metody uniemożliwia dokonanie jej oceny. Prawdopodobnie posiada ona te same wady, w odniesieniu do losowych naprężeń o szerokim widmie, co obliczenia oparte na programach obciążeń opracowanych metodą lokalnych ekstremów, zachowując także wszelkie niedokładności hipotezy Palmgrena - Minera.

Przedstawione przykłady weryfikacji doświadczalnej wykazują, że hipoteza Palmgrena - Minera zawodzi dla naprężeń bliskich granicy zmęczenia, gdzie aproksymacja wyników badań prostą regresji jest niedokładna [215]. W tym zakresie Nishichara i Jamada [155] opisali kumulację uszkodzeń zmęczeniowych w postaci monotonicznie malejącej funkcji, charakteryzującej efekt zanikania sumowania uszkodzeń w sąsiedztwie granicy zmęczenia

$$D_n = \int_0^n \frac{1}{N} e^{-m\sigma(n-1)} dn \quad (44)$$

gdzie:

$m > 1$ - stała materiałowa

Próbie ilościowego ujęcia uszkodzenia zmęczeniowego i uwzględnienia wpływu sekwencji obciążeń na trwałość zmęczeniową, podjęto w pracy [134]. W hipotezie tej przyjęto liniowe sumowanie uszkodzeń, a wartość uszkodzenia zmęczeniowego uzależniono od ubytku wskaźnika przekroju próbki w czasie trwania procesu zmęczenia.

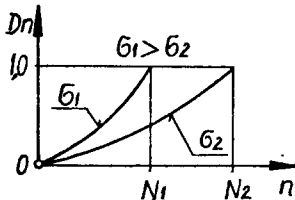
Zależność dla obliczenia trwałości zmęczeniowej z zastosowaniem liniowych hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych, podano w tab. 2 (wiersz 1).

b. Uogólnione hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych

Z hipotez uogólnionych najpopularniejszymi są hipotezy: Cortena - Dolana [30], Freudenthala - Hellera [55] i Serensena [183]. W hipotezach tych przyjmuje się, że wartość uszkodzenia zmęczeniowego zależna jest od wartości naprężeń i jej narastanie nie jest liniową funkcją liczby cykli. Corten i Dolan [30] opisali uszkodzenie zmęczeniowe funkcją wykładniczą /rys. 14/

$$D_{|n} = \left(\frac{n}{N} \right)^{b(\sigma)} \quad (45)$$

w której wartość wykładnika potęgi b zależna jest od amplitudy naprężeń.



Rys. 14. Ilustracja graficzna hipotezy Cortena - Dolana

Z podobnego założenia wyszli w swoich opracowaniach Freudenthal i Heller [55] oraz Serensen [183]. Schematy do obliczeń trwałości zmęczeniowej i wzory obliczeniowe według wymienionych hipotez podano w tab. 2, wiersz 2 - 4, wzory (46) do (48). Różnice w obliczeniach polegają na przyjęciu różnych wtórnych krzywych zmęczeniowych [194] o wykładnikach potęg i punktach początkowych odpowiednio: w hipotezie Cortena - Dolana b i (σ_{a1}, N_1) , Serensena q i (Z_G, N_0) oraz Freudenthala - Hellera d i (σ^*, N^*) .

W obliczeniach według hipotezy Cortena - Dolana uwzględnia się wszystkie poziomy naprężeń. Wartość wykładnika potęgi b może przyjmować wartości mniejsze lub większe od wykładnika

Schematy i wzory do obliczeń trwałości zmęczeniowej oparte na wybranych hipotezach kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych

Lp	Hipoteza	Schemat do obliczeń	Wzory obliczeniowe
1	2	3	4
1.	Palmgren - Minnera [148] Wallgren [225] Serensena 184		$n_c = \frac{a N_1}{\int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \left \frac{\sigma}{\sigma_{\max}} \right ^m \cdot f(\sigma) d\sigma} \quad (18a)$ Według hipotezy Palmgren - Minnera $a = 1,0$; $\sigma_{\min} = Z_G$; Według hipotezy Wallgren $a = 1,0,5 - 3,0$; $\sigma_{\min} = Z_G$; Według hipotezy Serensena $a = \frac{\sigma_{\max} \cdot 5 - k \cdot Z_G}{\sigma_{\max} - k \cdot Z_G} \quad (43)$ $\sigma_{\min} = k \cdot Z_G$ gdzie $0 < k \leq 1,0$
2.	Cortena - Dolana [30]		$n_c = \frac{N_1}{\int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \left \frac{\sigma}{\sigma_{\max}} \right ^b \cdot f(\sigma) d\sigma} \quad (46)$
3.	Serensena [183]		$n_c = \frac{N_1}{\int_{Z_G}^{\sigma_{\max}} \left \frac{\sigma}{\sigma_{\max}} \right ^q \cdot f(\sigma) d\sigma} \quad (47)$
4.	Freudenthala - Hellera [55]		$n_c = \frac{N^*}{\int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \left \frac{\sigma}{\sigma_{\max}} \right ^d \cdot f(\sigma) d\sigma} \quad (48)$

potęgi krzywej zmęczeniowej /Wöhlera/ $b \geq m_0$ w zależności od poziomu naprężeń i cech konstrukcyjnych badanego elementu. W pracy [89] zaleca się wartość $b = 0,8 m_0$, natomiast w pracach [33, 169, 170, 190] przyjęto wartość $b = (0,8 - 1,0) m_0$. Z pracy [86, 203] wynika, że wartość wykładnika potęgi b zależna jest od poziomu naprężeń w widmie i powinna być przyjmowana /według [86] / w zakresie:

$$b = (0,7 - 1,0) m_0 \quad \text{dla} \quad \sigma_{a_{\max}} / Z_G = 1,2 - 1,5$$

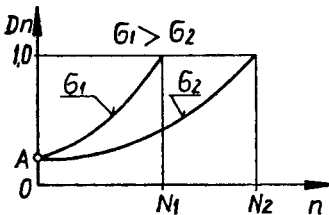
$$b = (1,0 - 1,6) m_0 \quad \text{dla} \quad \sigma_{a_{\max}} / Z_G = 2,5 - 3,0$$

Rozwinięciu tych zaleceń poświęcona jest praca [85], w której podano wykresy i nomogramy dla wyznaczania wartości wykładnika potęgi b .

Zalecenia dotyczące doboru wykładnika q w hipotezie Seren-sena zawarte w pracy [118] są następujące: dla stali węglowych $q = (1,5 - 1,6) m_0$, natomiast dla stali stopowych $q = (0,7 - 0,8) m_0$.

W obliczeniach opartych na hipotezie Freudenthala - Helle-ra należy przyjąć wartość naprężenia σ^* celem określenia punktu początkowego wtórnej krzywej zmęczeniowej σ^* , N^* oraz wartość wykładnika potęgi d . W pracy [55] podano następujące zalecenia: $N^* = 10^2 - 10^4$ oraz $d < m_0$.

Założenie wstępnego uszkodzenia zmęczeniowego na początku procesu zmęczenia oraz założenie proporcjonalności prędkości przyrostu zniszczenia zmęczeniowego w funkcji liczby cykli do istniejącej w danej chwili wartości zniszczenia, jest podstawą hipotezy przedstawionej w pracach [157, 158, 159] /rys. 15/



Rys. 15. Ilustracja graficzna hipotezy Orsetiego

Uszkodzenie zmęczeniowe opisano zależnością

$$D_n = A \exp kn$$

(49)

gdzie:

A i k - stałe materiałowe

la wielostopniowych widm naprężeń proponuje się wzór na trwałość zmęczeniową w postaci

$$n_c = \frac{N^*}{\sum_{i=1}^k \alpha_i 10^{-g \Delta_i}} \quad (50)$$

gdzie:

g - współczynnik zależny od widma naprężeń i rodzaju obciążenia

$$\Delta_i = \frac{\sigma_a^* - \sigma_{a_i}}{\sigma_a^*} \quad \text{- amplituda naprężeń odpowiadająca trwałości } N^*, \text{ którą przyjęto } N^* = 40000 \text{ cykli}$$

Weryfikację doświadczalną omówionej hipotezy przeprowadzono dla dwustopniowego widma naprężeń.

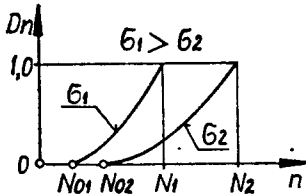
Analizę porównawczą hipotez Palmgren - Minera, Cortena - Dolana i Serensena z wynikami badań zmęczeniowych przeprowadzono w pracach [33, 190, 204]. W pracy [33] przyjęto biharmoniczne i udarowe widma obciążeń, w pracy [190] - charakterystyczne dla dźwignic, natomiast w pracy [204] - charakterystyczne dla układów nośnych pojazdów jednośladowych. Badaniom poddano próbki i węzły konstrukcyjne z różnych materiałów. Z prac tych wynika, że stosując do obliczeń wyżej wymienione hipotezy otrzymuje się

$$n_c^S < n_c^E \geq n_c^{CD} < n_c^{PM}$$

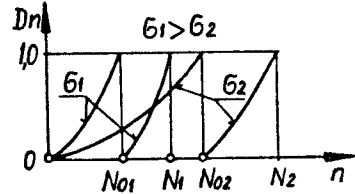
Indeksami S, CD i PM oznaczono trwałość wyznaczoną według poszczególnych hipotez natomiast indeksem E - trwałość wyznaczoną w badaniach zmęczeniowych.

c. Hipotezy sumowania uszkodzeń uwzględniające dwuetapowy przebieg procesu zmęczenia

Przykładem hipotez dwuetapowego przebiegu procesu zmęczenia są hipotezy: Freudenthala [54] /rys. 16/ i Bołotina [14, 15] /rys. 17/.



Rys. 16. Ilustracja graficzna hipotezy Freudenthala



Rys. 17. Ilustracja graficzna hipotezy Bołotina

Założeniem tych hipotez jest oddzielne sumowanie uszkodzeń dla etapu zarodkowania i etapu rozwoju pęknięcia zmęczeniowego. Dla stałoaamplitudowego obciążenia, uszkodzenia zmęczeniowe opisano wzorami:

dla hipotezy Freudenthala

$$\begin{aligned}
 D_n &= 0 & \text{dla } n \leq N_0 \\
 D_n &= \left(\frac{n - N_0}{N - N_0} \right)^b & \text{dla } n > N_0
 \end{aligned} \tag{51}$$

dla hipotezy Bołotina

$$\left. \begin{aligned}
 D_n &= \frac{n}{N_0} \\
 G_n &= 0
 \end{aligned} \right\} \text{dla } n \leq N_0 \tag{52}$$

$$G_n = \frac{n - N_0}{N - N_0} \quad \text{dla } n > N_0 \quad (52)$$

Podstawową trudnością w zastosowaniach wymienionych hipotez jest trudność w ocenie a priori udziału wymienionych etapów w całym procesie zmęczenia celem określenia N_0 .

d. Hipotezy odkształceniowe

W hipotezach odkształceniowych kumulację uszkodzeń zmęczeniowych uzależnia się od odkształceń plastycznych lub całkowitych sprężysto - plastycznych. Hipotezy te wykorzystuje się przede wszystkim do opisu procesu zmęczenia w zakresie małocyklicznej wytrzymałości zmęczeniowej. Najprostsza zależność doświadczalna podana przez Mansona i Coffina ma postać /podano za [116] s. 29/

$$N_f^b \Delta \mathcal{E}_{pl} = C \quad (53)$$

gdzie:

b i C - stałe materiałowe

Wykorzystując hipotezę Palmgren - Minera wzór (42) otrzymuje się dla wielostopniowego widma po przekształceniach

$$r_c = \frac{C \frac{1}{b}}{\sum_{i=1}^k \left(\Delta \mathcal{E}_{pl_i} \right)^{\frac{1}{b}} \alpha_i} \quad (54)$$

gdzie:

r_c - trwałość zmęczeniowa wyrażona liczbą półcykli

Podobną zależność można wyprowadzić dla odkształceń całkowitych opisanych wzorem (8).

W pracy [176] dla zakresu małowycyklicznej wytrzymałości zmęczeniowej i dla przypadku badań z przyjętym zakresem zmian odkształceń całkowitych podano, że kumulacja uszkodzeń może być opisana zależnością

$$\sum_0^{N_p} \left(\frac{\delta}{\varepsilon} \right)^2 = 1,0 \quad (55)$$

natomiast dla przyjętego zakresu obciążenia

$$\sum_0^{N_p} \left(\frac{\delta}{\varepsilon} \right)^2 + \sum_0^{N_p} \frac{(\delta - \delta')(\varepsilon - \delta)}{\varepsilon^2} = 1,0 \quad (56)$$

gdzie:

- δ i δ' - szerokość pętli histerezy w półcyklu rozciągania i ściskania
- ε - względne wydłużenie, wyznaczone na podstawie cyklicznych odkształceń
- N_p - liczba cykli do zniszczenia

Przykład praktycznego zastosowania hipotezy odkształceniowej z uwzględnieniem losowych naprężeń i odkształceń oraz wpływu czynników geometrycznych, średniego naprężenia i wstępnych odkształceń podano w pracy [222].

Uwzględnienie dwóch etapów procesu zniszczenia jest szczególnie istotne w zakresie niskocyklicznej wytrzymałości zmęczeniowej, w której o zmęczeniu decyduje zakres odkształceń plastycznych, a udział etapu rozwoju pęknięcia jest znaczny. Ponieważ ocena udziału etapów do powstania dostrzegalnego pęknięcia i rozwoju tego pęknięcia do całkowitego złomu zmęczeniowego jest trudna, niżej przytoczone zostaną niektóre prace, w których omówione zostało to zagadnienie. W pracy [194] omówiono badania próbek gładkich i z karbem wykonanych ze stopów AB i D16 /prod. ZSRR/, z których wynika, że w zależności od materiału i kształtu próbek oraz parametrów obciążeń, udział etapu rozwoju pęknięcia zmęczeniowego zawierał się w przedziale od 10 - 90 %. Dolna granica dotyczy niskich wartości naprężeń i

próbek gładkich. Podobnie w pracy [188] wykazano, że w 90 % badanych próbek okrągłych z karbem wykonanych ze stopu aluminium D16T i D1T - prod. ZSRR udział etapu rozwoju pęknięcia przekroczył 50 % całkowitej trwałości. Wymienione badania prowadzono przy zginaniu. W pracy [188] badania prowadzono ponadto z obciążeniem programowym o liczbie poziomów od 2 - 9, łącznie 18 wariantów programu obciążeń. W badaniach spawanych ram traktorowych z obciążeniem programowym [39] stwierdzono w skrajnym przypadku 85 % udział etapu rozwoju pęknięcia zmęczeniowego w całkowitej trwałości zmęczeniowej.

W omawianych pracach różnie oceniano początek etapu rozwoju pęknięcia, ściśle związanego z przyjętym kryterium dostrzegalnego pęknięcia zmęczeniowego. W badaniach próbek okrągłych [188, 194] było to pęknięcie o głębokości 0,1 - 0,5 mm, natomiast w przypadku spawanych ram traktorowych [39] pęknięcie o długości 25 mm. W pracy [222] zaleca się przyjęcie, jako dostrzegalnej - szczeliny o długości od $1/16 - 1/4''$. W pracy [146] na podstawie analizy różnych definicji dostrzegalnego pęknięcia, proponuje się uznać za początek rozwoju pęknięcia takie makropęknięcia, które istotnie wpływa na zmianę wartości naprężeń w rozważanym przekroju próbki elementu lub węzła konstrukcyjnego. Przyjęte kryterium ma zdecydowany wpływ na dokładność obliczeń trwałości zmęczeniowej.

Intensywny rozwój nauki o propagacji pęknięć zmęczeniowych dostarcza coraz doskonalszych metod obliczeń trwałości zmęczeniowej na etapie rozwoju pęknięcia z uwzględnieniem szeregu czynników. Stąd propozycje sumowania uszkodzeń zawarte w hipotezach dwuetapowych nie mają praktycznego znaczenia.

W pracy [74] przedstawiono i zweryfikowano doświadczalnie metodę obliczeń trwałości zmęczeniowej, która w pierwszym etapie jest oparta na hipotezie liniowej Palmgrena - Minera i odkształceniach w obszarach spiętrzenia naprężeń [189], w drugim zaś - na teorii propagacji pęknięć zmęczeniowych [71]. Badania przeprowadzono na próbkach stalowych /SAE 0030/ z dwoma rodzajami karbów, z obciążeniem osiowym, z zastosowaniem czterech różnych widm obciążeń. Uwzględnienie przebiegu cyklicznego odkształcenia w funkcji naprężeń /I etap/ oraz zjawisk zachodzących na czole pęknięcia związanych ze strefą odkształceń plastycznych /II etap/ wymagało obliczeń stopnia uszkodzenia metodą

"cykl po cyklu" /cycle-by-cycle life prediction method/. Stosunek ogólnej trwałości obliczonej według wyżej podanej metody do wyznaczonej doświadczalnie wynosił w zależności od warunków badań od 0,5 - 2,0. Przykład zastosowania metody "cykl po cyklu" do oceny okresu rozwoju pęknięcia zmęczeniowego przedstawiono w pracy [56]. Metoda ta możliwa do zastosowania w obliczeniach z wykorzystaniem EMC, w przypadkach długich realizacji losowych obciążeń stwarza pewne trudności /długi czas obliczeń i duże pamięci maszyn cyfrowych/.

Zmodyfikowaną postać hipotezy Palmgren - Minera w zastosowaniu do odkształceń podano w pracy [221]. Proces kumulacji opisano zależnością

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{b_i N_i} = 1,0 \quad (57)$$

gdzie:

b_i - współczynnik odchylenia od liniowej hipotezy, zależny od własności plastycznych materiału

Zależność b_i od poziomu naprężeń w widmie jest bliżej nieokreślona i w wymienionej pracy wyznaczona została jedynie dla widm dwustopniowych. Porównanie wyników obliczeń według hipotezy Palmgren - Minera i jej zmodyfikowanej postaci (57) wykazało, że rozrzut wyników obliczeń według pierwszej hipotezy wynosił dla próbek ze stali 45 od 0,7 - 6,0, dla próbek ze stali 1X13 od 0,33 - 4,1, natomiast według zmodyfikowanej hipotezy był znacznie mniejszy i wynosił dla wymienionych stali 0,80 - 1,26.

e. Inne hipotezy kumulacji uszkodzeń

Gatts w swej teorii [64] zauważył, że sumowanie uszkodzeń zmęczeniowych występuje w czasie działania zmiennych naprężeń przewyższających granicę zmęczenia i mniejszych od naprężeń niszczących oraz, że powstałe uszkodzenia obniżają wytrzymałość zmęczeniową i naprężenia niszczące. W zależności od kryterium, jako naprężenia niszczące uznano wytrzymałość doraźną lub gra-

nicę plastyczności.

Miarą uszkodzenia zmęczeniowego jest obniżenie się wytrzymałości materiału przy stałoaamplitudowym obciążeniu.

$$\frac{d\sigma_n}{dn} = -k_1 (\sigma - \sigma_e)^\xi \quad (58)$$

lub

$$\frac{d\sigma_e}{dn} = -k (\sigma - \sigma_e)^\xi \quad (59)$$

przy założeniu $\sigma_n = c \cdot \sigma_e$

gdzie:

- σ_n - naprężenie niszczące w bieżącej fazie zmęczenia
 σ_e - granica zmęczenia w bieżącej fazie zmęczenia
 k_1, k, ξ i c - stałe

Odpowiednie zależności dla obciążeń losowych mają postać (65)

$$\frac{d\sigma_e}{dn} = -k \int_{\sigma_d}^{\sigma_g} f(\sigma) (\sigma - \sigma_e)^2 d\sigma \quad (60)$$

lub

$$\frac{d\sigma_e}{dn} = -k (c - 2b\sigma_e + \sigma_e^2) \quad (61)$$

Po scałkowaniu zależności (61) i przekształceniach otrzymuje się wzór na trwałość w postaci

$$n_c = \frac{1}{k' \sqrt{c - b^2}} \left(\arctg \frac{b - \sigma_{eN}}{\sqrt{c - b^2}} - \arctg \frac{B - \sigma_{e0}}{\sqrt{c - b^2}} \right) \quad (62)$$

Stałe: k', c, b wyznacza się z odpowiednich wzorów w zależności od funkcji gęstości prawdopodobieństwa amplitud naprężeń $f(\sigma_a)$.

Omówiona wyżej teoria opracowana została dla obciążeń waha-
dłowych $R = -1,0$ i zweryfikowana badaniami próbek stalowych i
ze stopów aluminium.

Porównanie trwałości wyznaczonej doświadczalnie - n_c^E , z za-
stosowaniem hipotezy Gattsa - n_c^G i hipotezy Palmgrena - Mine-
ra - n_c^{PM} wykazało, że:

- dla próbek stalowych /5 różnych programów obciążeń/

$$n_c^E < n_c^G < n_c^{PM}, \text{ w stosunku, jak } 1,0 : 2,0 : 3,0$$

- dla próbek ze stopu aluminium /2 różne programy/

$$n_c^E > n_c^{PM} > n_c^G, \text{ w stosunku, jak } 1,0 : 0,75 : 0,5$$

- dla próbek stalowych w warunkach obciążenia losowego

$$n_c^{PM} < n_c^E < n_c^G, \text{ w stosunku, jak } 0,33 : 1,0 : 3,0$$

Jak widać z przytoczonych przykładów dokładność obliczeń
według hipotezy Gattsa jest zależna od warunków badań i nie
jest wyższa niż dokładność obliczeń z wykorzystaniem hipotezy
Palmgrena - Minera.

Na podobnych założeniach oparta jest hipoteza zwana Unified
Theory, przedstawiona w pracy [23]. Uszkodzenie zmęczeniowe wy-
rażone stopniem obniżenia się granicy zmęczenia opisane zosta-
ło następującym wzorem

$$\frac{d(\sigma_e/\sigma_o)}{dn} = \frac{1}{k} \left[c_1 - 2c_2 (\sigma_e/\sigma_o) + c_3 (\sigma_e/\sigma_o)^2 \right] \quad (63)$$

gdzie:

- σ_o - początkowa granica zmęczenia
 σ_e - granica zmęczenia materiału w bieżącej fa-
 zie zmęczenia
 c_1, c_2, c_3 - stałe

Hipoteza opmcowana została dla jednostopniowego i wielostopniowych widm obciążeń, których cykle sinusoidalne charakteryzują się tym samym współczynnikiem asymetrii cyklu $R = 0$. Założone zależności, w których występuje duża liczba stałych zależnych od rodzaju materiału i charakteru obciążeń, stwarzają poważne trudności w jej zastosowaniach. Ponadto fakt, że dotyczy ona tylko widm obciążeń o stałym współczynniku $R = 0$, znacznie zawęża zakres jej stosowania do obszaru rzadko występujących w praktyce obciążeń elementów maszyn.

Hipotezę sumowania uszkodzeń zmęczeniowych opartą na wykorzystaniu punktu załamania krzywej zmęczeniowej (N_0, Z_G) , omówiono w pracy [197]. Stopień uszkodzenia materiału ocenia się na podstawie wtórnych krzywych wyznaczonych przez punkt (N_0, Z_G) i punkty określone przez naprężenia na poszczególnych poziomach σ_i i odpowiadające tym poziomom liczby cykli w widmie obciążeń n_i . Uszkodzenie zmęczeniowe po n cyklach obciążenia stałoaamplitudowego wynosi

$$D_n = \frac{\lg N_0 - \lg N}{\lg N_0 - \lg n} \quad (64)$$

Weryfikacja doświadczalna w warunkach obrotowego zginania próbek stalowych z zastosowaniem dwustopniowego obciążenia wykazała dobrą zgodność wyników obliczeń trwałości zmęczeniowej z wynikami doświadczeń, lepszą niż w przypadku porównywanych hipotez: Palmgrena - Minera, Gattsa oraz Unified Theory. Bardzo złożone zależności dla widm wielostopniowych i brak weryfikacji doświadczalnej w tych warunkach, uniemożliwiają dokonanie bliższej oceny praktycznego zastosowania tej hipotezy.

Podobne założenie przyjęto w pracy [179], w której proponuje się metodę obliczeń opartą na wykorzystaniu krzywych zmęczeniowych sekwencyjnych /wtórnych krzywych Wöhlera/. Różnica w stosunku do pracy [197] polega na przyjęciu innego punktu, z którego prowadzone są krzywe sekwencyjne. Punktem tym jest punkt (N^*, σ^*) , przy czym zaproponowano $N^* = 10^4$ cykli. Obie metody uwzględniają sekwencję obciążeń, druga [179] także naprężenia mniejsze od granicy zmęczenia i przy wykorzystaniu EMC nadają się do obliczeń w warunkach losowych obciążeń metodą "cykl po

cyklu".

Poza wymienionymi grupami hipotez sformułowano także hipotezy statystyczne. Przykładem takich hipotez mogą być hipotezy omówione w pracach [10, 11, 12, 16, 17]. W hipotezach tych materiał traktowany jest jako dyskretny układ dowolnej liczby elementów. Hipotezy te jednak ze względu na brak dostatecznie szczegółowych opracowań mogą mieć znaczenie perspektywiczne.

2.4. Programowane badania zmęczeniowe

Zagadnienia ogólne związane z próbą zdefiniowania niektórych pojęć, określeniem zakresu zastosowań i znaczeniem programowanych badań, omówione zostały w pracach [100, 162, 209]. W pracach tych podkreślono konieczność spełnienia w programowanych badaniach zmęczeniowych określonych kryteriów fizycznych. W ocenie eksploatacyjnej trwałości zmęczeniowej powinny być przede wszystkim spełnione warunki zgodności miejsca inicjacji i przebiegu pęknięcia zmęczeniowego [59].

Podstawą opracowania programu obciążeń w programowanych badaniach jest widmo obciążeń. Opracowanie programu obciążeń wymaga: przyjęcia odpowiedniej sekwencji obciążeń, liczby cykli w okresie programu, oceny wpływu naprężeń o wartościach mniejszych od granicy zmęczenia, wpływu przeciążeń i przerw w obciążeniach oraz wpływu częstotliwości na sumowanie uszkodzeń zmęczeniowych. Podstawy programowanych badań zmęczeniowych sformułowane zostały w pracy [58], w której omówiono sposób schematyzacji losowych obciążeń metodą lokalnych ekstremów oraz przyjęto program obciążeń o okresie $n_0 = 10^6$ cykli, zawierający $k = 8$ poziomów obciążenia według sekwencji Lo - Hi - Lo. Aby uniknąć efektu wzmocnienia lub osłabienia materiału, obciążenie realizowano od średniego piątego poziomu /rys. 3/. Z małymi modyfikacjami przyjęto omówiony sposób w badaniach przedstawionych w pracy [34, 166]. Doskonalenie metod programowanych badań, wymagało podjęcia badań wpływu czynników związanych z obciążeniem zmiennym na trwałość zmęczeniową.

a. Wpływ sekwencji obciążeń na trwałość zmęczeniową

Dane literaturowe na temat wpływu sekwencji obciążeń na trwałość zmęczeniową nie są zgodne. W pracy [93] podano, że wyznaczona w programowanych badaniach trwałość zmęczeniowa jest 6-cio krotnie większa niż trwałość zmęczeniowa wyznaczona przy obciążeniu losowym. Czterokrotną różnicę w trwałości zmęczeniowej wyznaczonej według programów Lo - Hi i Hi - Lo, stwierdzono w pracy [136]. Z rezultatów przedstawionych w literaturze [178, 208, 212] wynika, że przy odpowiednim programowaniu obciążeń losowych /mała liczba cykli w okresie programu/, średnia prędkość narastania uszkodzeń zmęczeniowych w warunkach obciążeń programowanych i losowych różni się nieistotnie. Przeważająca jednak liczba danych wykazuje mały wpływ sekwencji obciążeń na trwałość, szczególnie w przypadku, gdy o trwałości decyduje etap procesu zmęczenia do pojawienia się pęknięcia [46]. Fakt ten potwierdza analiza danych literaturowych dotyczących wpływu sekwencji obciążeń na etapie rozwoju pęknięć zmęczeniowych [48, 68, 71, 73, 147, 196]. Dla ilustracji można przytoczyć wyniki badań prędkości rozwoju pęknięcia zmęczeniowego próbek ze stali 18G2AV z zastosowaniem programów Lo - Hi - Lo; Lo - Hi i Hi - Lo [68]. Z badań tych wynika, że względna trwałość w zależności od sekwencji obciążeń wynosiła odpowiednio, jak: 1,0 : 1,8 : 2,3. Różnice te spowodowane są przede wszystkim zjawiskiem opóźnienia, związanym ze strefą uplastycznienia materiału przed wierzchołkiem pęknięcia.

b. Wpływ naprężeń mniejszych od granicy zmęczenia na trwałość zmęczeniową

W klasycznych liniowych hipotezach sumowania uszkodzeń zmęczeniowych [148, 149, 225] zakładano, że uszkodzenia zmęczeniowe powstają w wyniku działania zmiennych obciążeń przewyższających granicę zmęczenia. Jak już wspomniano /p. 1.1/ obserwacje elektrooptyczne wykazały, że przy stałoamplitudowym obciążeniu mniejszym od granicy zmęczenia pojawiają się uszkodzenia zmęczeniowe [6, 116]. Wpływ ten jest tym bardziej

oczywisty w przypadku, gdy w widmie obciążeń występuje znaczna liczba cykli o wartościach przewyższających granicę zmęczenia, w wyniku których w trakcie trwania obciążenia realna wartość granicy zmęczenia maleje [23, 64]. Analiza wyników badań zawartych w literaturze wykazuje, że w zależności od warunków badań obserwuje się różny wpływ naprężeń zmiennych od granicy zmęczenia na trwałość zmęczeniową i ustalenie ściśle określonej granicy, jak to przyjęto w pracach [51, 185] ($\sigma_{\min} \approx 0,5 Z_G$) może prowadzić do poważnych błędów w ocenie trwałości.

Badania wpływu naprężeń mniejszych od granicy zmęczenia przeprowadzone na gładkich próbkach ze stali 45 przy obrotowym zginaniu [57] wykazały, że w miarę wzrostu naprężeń w widmie wpływ ten maleje. Podobnie wpływ naprężeń mniejszych od granicy zmęczenia maleje w miarę wzrostu współczynnika asymetrii cyklu R [171] /badano stalowe hartowane elementy łańcucha/. W badaniach próbek wykonanych ze stopów aluminium D16T i D1T [18] stwierdzono, że pominięcie nawet najniższych poziomów naprężeń ($\sigma_{\min} \approx 0,1 Z_G$) powoduje różnice w wyznaczanej trwałości, przy czym wpływ ten jest złożony. W zakresie $0 < \sigma_{\min} \leq 0,5 Z_G$ obserwowano nieznaczny spadek trwałości /dla stopu D1T/, w zakresie $0,5 Z_G < \sigma_{\min} \leq Z_G$ - nieznaczny wzrost, natomiast dla $\sigma_{\min} > Z_G$ intensywny wzrost trwałości mierzonej liczbą okresów programu λ zrealizowanych do pęknięcia zmęczeniowego.

W badaniach autora [210, 214] przeprowadzonych na próbkach z karbem wykonanych ze stali 45 i węzłach lutowanych wykonanych ze stali 10BX wykazano, że wpływ naprężeń mniejszych od granicy zmęczenia zależy od współczynnika wypełnienia widma i maleje w miarę wzrostu jego wartości oraz od naprężenia maksymalnego w widmie, malejąc także w miarę jego wzrostu.

W pracy [51] proponuje się uwzględnienie naprężeń mniejszych od granicy zmęczenia w zakresie $0,7 Z_G \leq \sigma_{\min} < Z_G$ jedynie w etapie rozwoju pęknięcia zmęczeniowego. Stwierdzenie to w świetle wyników badań przedstawionych w pracach [18, 57, 210, 214] wydaje się nieścisłe.

c. Wpływ liczby cykli w okresie programu na trwałość zmęczeniową

Przyczyną znacznych różnic między wynikami programowanych

badani i wynikami badań przy obciążeniu losowym może być przyjęta liczba cykli w okresie programu [178, 224]. W zależności od liczby cykli na poszczególnych poziomach programu i sekwencji obciążeń może nastąpić umocnienie lub osłabienie materiału, co wykazano dla widma dwustopniowego w szeregu pracach, między innymi [32]. W pracach [58, 166] zaleca się przyjmowanie liczby cykli w programie z takim wyliczeniem, aby do pęknięcia zmęczeniowego zrealizować co najmniej 10 okresów programu. Obserwacje poczynione w trakcie badań własnych [212] wskazują na bardziej złożone zależności trwałości zmęczeniowej od liczby cykli w okresie programu, a zatem i liczby powtórzeń okresu programu do pęknięcia zmęczeniowego. Podobnie wyniki badań [224] z zastosowaniem obciążeń biharmonicznych o różnych wartościach σ_{a1}/σ_{a2} przeprowadzono na próbkach płaskich z karbem $\alpha_k = 2,8$ ze stopu aluminium D16AT wykazały, że im mniejsza jest liczba n_0 cykli w okresie programu, tym różnice w trwałości zmęczeniowej wyznaczonej w warunkach obciążenia programowanego i losowego lub biharmonicznego są mniejsze.

Wpływowi udarowych przeciążeń na trwałość zmęczeniową kół zębatych w zmiennych warunkach programowanego obciążenia poświęcona została praca [165], w której wykazano możliwość występowania w określonych warunkach /liczba cykli przeciążenia i poziom naprężeń/ umocnienia materiału powodującego wzrost trwałości zmęczeniowej.

W wyżej omówionych pracach analizowano proces zmęczenia przyjmując jako kryterium zniszczenia pojawienie się dostrzegalnego pęknięcia zmęczeniowego lub całkowite pęknięcie zmęczeniowe bez uwzględnienia etapu rozwoju pęknięcia. W badaniach rozwoju pęknięcia zmęczeniowego omówionych w pracy [196] wykazano, że podobnie jak w poprzednio omówionych wynikach badań, liczba wielokrotnych przeciążeń może spowodować około 4-krotny wzrost trwałości zmęczeniowej. We wszystkich przypadkach programowanych obciążeń trwałość próbek z przeciążeniami przekracza trwałość próbek przy obciążeniu stałoaamplitudowym i rosła w miarę obniżania się liczby przeciążeń.

d. Inne zagadnienia programowanych badań

Często w warunkach eksploatacji zachodzi przypadek złożonego obciążenia elementów maszyn. Blokowy program obciążeń w takich przypadkach jest skomplikowany, zwłaszcza jeżeli składowe obciążenia zmieniają się w sposób losowy niezależnie. Przykład opracowania programu obciążeń w badaniach ram samochodowych, które obciążone są momentami działającymi w dwóch płaszczyznach do siebie prostopadłych, przedstawiono w pracach [29, 167]. Program obciążeń składa się z dwóch niezależnych "podprogramów" realizowanych według przyjętej sekwencji w płaszczyznach: głównej pojazdu i prostopadłej do niej.

W niektórych przypadkach przeprowadza się badania elementów maszyn w warunkach ekwiwalentnych w stosunku do programowanych - stałoamplitudowych obciążeń [172, 173, 198]. Amplitudy ekwiwalentne obliczane są z wykorzystaniem hipotez kumulacji, najczęściej hipotezy Palmgrena - Minera. Metoda ta jest znacznym przybliżeniem programowanych badań zawierającym w sobie wszystkie niedokładności hipotez omówione w p. 2.3 i w związku z tym może prowadzić do znacznych błędów.

Omówione zagadnienia opracowywania programów obciążeń dotyczyły widm obciążeń o zmiennych wartościach amplitud i stałych wartościach średnich najczęściej równych zeru. W ogólnym przypadku, widmo obciążeń może zawierać cykle sinusoidalne o zmiennych amplitudach i wartościach średnich. Przykłady opracowania programów obciążeń w tych warunkach podano w pracy [206]. Z możliwych 24 przypadków, analizie poddano 6 spełniających warunki takiej sekwencji obciążenia, aby zmniejszyć efekt umocnienia lub osłabienia materiału w badaniach zmęczeniowych.

Ocena eksploatacyjnej trwałości zmęczeniowej z uwzględnieniem losowych warunków eksploatacji [211] jest złożona. Analiza statystyczna wyników badań [207] trwałości zmęczeniowej ram rowerowych w warunkach eksploatacji i w warunkach programowanych badań wykazała, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o równości wartości średnich, trwałości zmęczeniowej wyznaczonej w wymienionych warunkach badań. Zaobserwowano jednakże znaczne różnice w rozrzucie wyników badań eksploatacyjnych i stanowiskowych. Stwierdzona zgodność przy trudnych do ścisłego

określenia warunkach eksploatacji, może być jednak przypadkowa.

2.5. Ocena stanu wiedzy i wnioski dla badań własnych

Analiza dotychczasowego stanu wiedzy dotyczącego oceny trwałości zmęczeniowej elementów maszyn w warunkach obciążeń losowych i programowanych wykazała, że problem ten jest jednym z podstawowych w konstruowaniu maszyn na określoną ograniczoną trwałość. Temat pracy jest ściśle związany z poszukiwaniem możliwości przewidywania stopnia zmęczeniowych uszkodzeń elementów i układów maszynowych na gruncie opisów fenomenologicznych i zależności statystycznych, co przy braku rozwiązania zasadniczego problemu istoty zmęczenia materiałów ma szczególne znaczenie w konstrukcji maszyn. W poszczególnych zagadnieniach związanych z problemem oceny trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń losowych i programowanych obserwuje się różną zgodność autorów omówionych prac.

Można uznać, że całkowita zgodność danych literaturowych dotyczy sposobów schematyzacji obciążeń losowych i opracowania widm obciążeń. Znane metody schematyzacji mogą mieć zastosowanie do opracowania losowych obciążeń szerokowidmowych, zarówno w zakresie nisko jak i wysokocyklicznej wytrzymałości zmęczeniowej. Stosowane mogą być do opracowań losowych przebiegów, naprężeń i odkształceń. Jedynie dla metody obliczeń "cykl po cyklu" znane opracowania statystyczne obciążeń losowych są niewystarczające.

Duża liczba znanych hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych stwarza pewne możliwości doboru metody obliczeń trwałości elementów maszyn dla określonych warunków badań. Założenia przyjmowane w poszczególnych hipotezach są często skrajnie sprzeczne, np. przyjęcie wstępnego uszkodzenia zmęczeniowego w hipotezie Orsetiego [157] w stosunku do nieuwzględnienia uszkodzeń zmęczeniowych do pewnej liczby cykli w hipotezie Freudenthala [54], skrajnie różne przebiegi wtórnych krzywych zmęczeniowych w hipotezie Cortena - Dolana [30] i Freudenthala - Hellera [55] w stosunku do hipotezy Serensena [182], nie uwzględnienie poziomów naprężeń mniejszych od granicy zmęcze-

nia w hipotezie Palmgren-a - Minera [148] i uwzględnienie wszystkich poziomów naprężeń w hipotezie Cortena - Dolana [30], itd. Fakt ten spowodowany jest opisem fenomenologicznym, w którym zjawiska fizyczne opisane są z większymi lub mniejszymi uproszczeniami. Badania zjawisk zmęczenia opisane szeroko w pracy [116] jasno wykazują zróżnicowanie odkształceń plastycznych w losowo zorientowanych ziarnach metali o różnych własnościach i ukształtowaniu w pierwszych fazach zmęczenia, w następnych zaś tworzące się pęknięcia zmęczeniowe przebiegają przez ziarna i po granicach ziarn w różnych kierunkach, a towarzysząca pękaniu strefa odkształceń plastycznych posiada różną szerokość. Obserwacje elektrooptyczne przełomów zmęczeniowych [116, 156] wykazują wyraźne prążki zmęczeniowe świadczące o zjawiskach plastycznych na czole pęknięcia, obok stref całkowicie kruchego pęknięcia. W tej sytuacji złożone opisy fenomenologiczne uwzględniające dużą liczbę czynników, dostarczają jednocześnie argumentów do wykazania ich niedokładności. Aktualnie, jak wynika z przedstawionego stanu wiedzy, obserwuje się obok opracowywania bardzo złożonych procedur obliczeniowych, jak np. metoda "cykl po cyklu", nawrót do najprostszej liniowej hipotezy kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych /około 90 % publikacji z tego zakresu jest poświęcona liniowej hipotezie/.

Zasygnalizowana złożoność procesu zmęczenia powoduje, że wyniki badań zmęczeniowych prowadzonych w podobnych warunkach różnią się kilkakrotnie, np. 4-krotnie w badaniach trwałości wałów na skręcanie w pracach [21] i [120], 5-krotnie w badaniach żaroodpornych stali w pracach [117] i [128], itd.

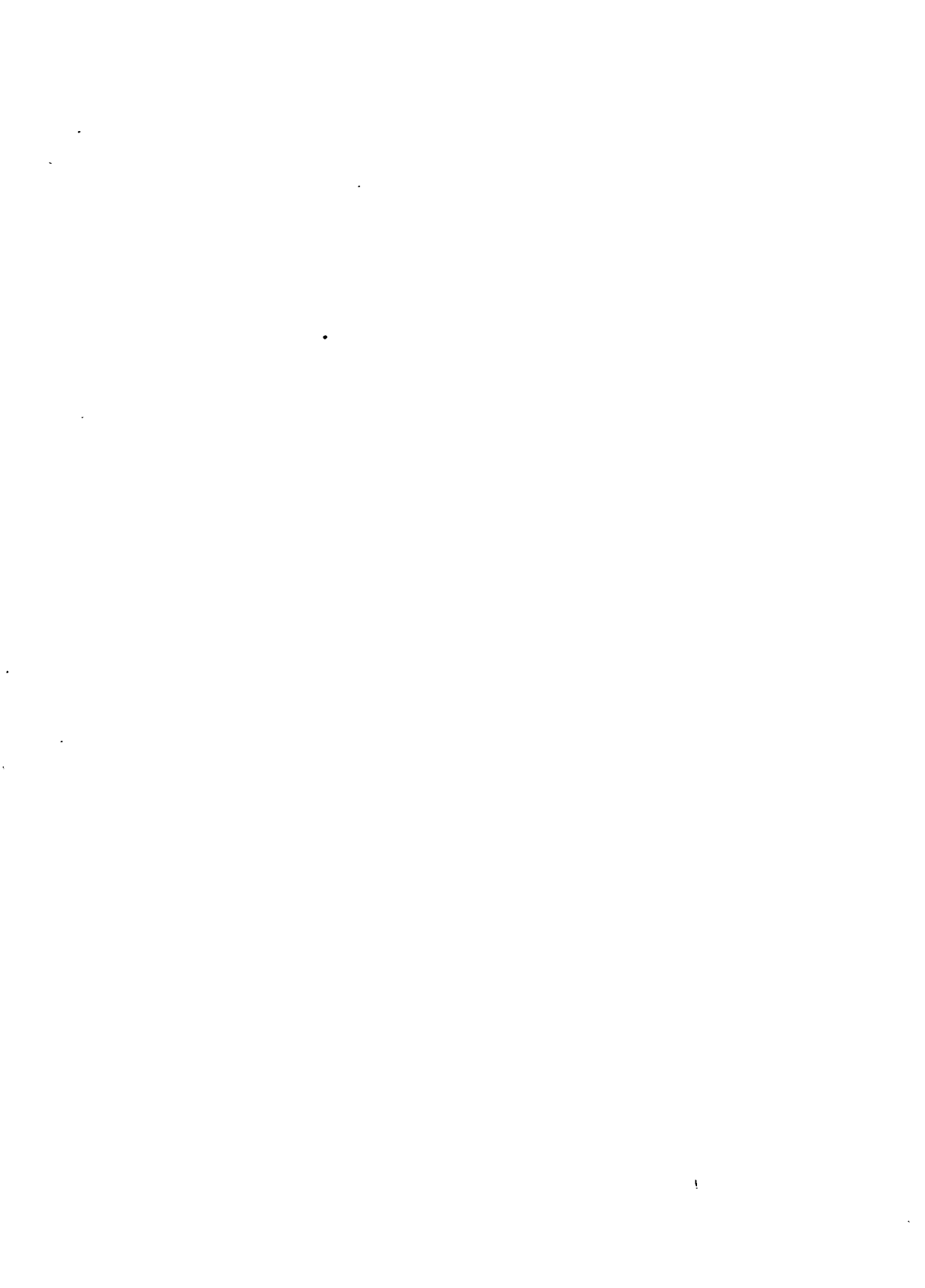
W związku z tym, poszczególne hipotezy, jak to wynika z przeprowadzonej analizy, opisują zadawalająco proces zmęczenia w metalach w ściśle określonych warunkach, natomiast w innych ich zastosowanie może prowadzić do znacznych błędów.

Metody obliczeniowe stosowane są przede wszystkim w pierwszym etapie konstruowania [36], w którym brakuje materialnych obiektów do przeprowadzenia badań stanowiskowych. Dlatego też, podstawową trudność w stosowaniu tych metod stwarza konieczność oceny a priori stałych występujących w poszczególnych hipotezach. Wynika stąd potrzeba, poza poszukiwaniami bardziej ogólnych hipotez, doskonalenia istniejących i wyznaczania dla nich zakresów zastosowań.

la podstawie przedstawionej analizy dotychczasowego stanu wiedzy można stwierdzić, że zagadnieniom obliczeń zmęczenia, w których nie wykorzystuje się hipotez sumowania uszkodzeń zmęczenia poświęcona jest znikoma liczba prac. Metody te oparte na związkach między trwałością wyznaczoną przy obciążeniu stałoaamplitudowym i losowym lub programowanym [59] oraz na wynikach programowanych badań zmęczenia lub badań przy obciążeniu losowym [75] nie doczekały się dotąd szerszego opracowania.

Rozpatrując zagadnienia w odniesieniu do przyjętych w opracowaniu etapów procesu zmęczenia: pierwszego - inicjacja makroskopowego pęknięcia zmęczenia i drugiego - rozwoju pęknięcia do wymiaru krytycznego, należy stwierdzić, że w ostatnim 10-leciu większość prac z zakresu badań zmęczenia w warunkach obciążeń losowych i programowanych poświęcona była zagadnieniom rozwoju pęknięć zmęczenia. Jednakże, jak wykazano w szeregu prac, między innymi [193, 194] w przypadku wysokocyklicznej wytrzymałości, w większości elementów maszyn /za wyjątkiem elementów ze znacznymi wadami technologicznymi/ udział tego etapu w całkowitej trwałości jest mały. A zatem doskonalenie metod badań i obliczeń elementów maszyn na zmęczenie, obejmujących proces zmęczenia w całości oraz do powstania dostrzegalnego pęknięcia zmęczenia należy uznać za ważne i w pełni uzasadnione.

W zakresie zagadnień dotyczących programowanych badań zmęczenia obserwuje się pewne różnice w ocenie wpływu czynników związanych z obciążeniem programowanym na zgodność wyników badań w warunkach obciążeń losowych i programowanych. Dotyczy to szczególnie oceny wpływu naprężeń mniejszych od granicy zmęczenia, liczby cykli w okresie programu i liczby jego powtórzeń do zniszczenia zmęczenia oraz sekwencji obciążeń na trwałość zmęczeniową. Wynika z tego potrzeba prowadzenia dalszych badań w tym zakresie.



3. WARUNKI I WYNIKI BADAŃ ZMĘCZENIOWYCH

3.1. Celowość i zakres badań własnych

Celem tej pracy jest opracowanie metody oceny trwałości zmęczeniowej elementów maszyn w warunkach obciążeń losowych i programowanych.

Osiągnięcie tego celu wymagało dokonania analizy dotychczasowego stanu wiedzy oraz przeprowadzenia uzupełniających badań własnych. Badania własne wykonano w warunkach stałoamplitudowych, losowych i programowanych obciążeń. Na podstawie analizy wyników tych badań opracowano metodę obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów maszyn, która może znaleźć praktyczne zastosowanie. Metoda ta oparta jest na związkach między parametrami krzywej zmęczeniowej wyznaczonej przy obciążeniu stałoamplitudowym i krzywej trwałości zmęczeniowej wyznaczonej przy obciążeniu losowym lub programowanym.

W zakresie opracowania zaleceń dla programowanych badań zmęczeniowych i obliczeń opartych na hipotezach sumowania uszkodzeń, dokonano oceny wpływu: sekwencji obciążeń, naprężeń niższych od granicy zmęczenia, liczby cykli w okresie programu i parametrów programu obciążeń na trwałość zmęczeniową.

Porównano wyniki badań trwałości zmęczeniowej z wynikami obliczeń według proponowanej metody oraz wynikami obliczeń z zastosowaniem wybranych hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych.

Przyjęcie do badań próbek ze stali 45, węzłów konstrukcyjnych układów nośnych pojazdów jednośladowych, osi i ram rowerowych, ma znaczenie praktyczne. Podobnie obciążenia stosowane w badaniach zmęczeniowych otrzymano z pomiarów eksploatacyjnych pojazdów jednośladowych. Znaczenie praktyczne wyboru obiektów badań wynika z masowego wytwarzania pojazdów jednośladowych /w kraju około 2 mln sztuk rocznie/.

Jak wynika z analizy danych literaturowych większość badań

przewodzona była na próbkach i elementach wykonanych ze stopów aluminium i stali stopowych /lotnictwo/. Zagadnieniom oceny trwałości zmęczeniowej w odniesieniu do różnych grup maszyn /poza lotnictwem/, poświęcono liczne prace, np. urządzeniom dźwigowym i maszynom roboczym [160, 190, 229], pojazdom mechanicznym [29, 42, 90, 112, 131], maszynom rolniczym [39, 40]. Dla niektórych grup maszyn istnieją normatywne widma obciążeń [71]. Na temat badań pojazdów jednośladowych ukazały się nieliczne prace o charakterze aplikacyjnym [121], w których brak szerszej analizy obciążeń eksploatacyjnych, omówienia metod badań stanowiskowych oraz podania charakterystyk zmęczeniowych elementów tych pojazdów. Przyjęcie zatem wymienionych warunków badań umożliwi wypełnienie istniejących braków oraz bezpośrednio zastosowanie osiągniętych rezultatów w praktyce.

Przyjęcie do badań węzłów konstrukcyjnych i ram rowerowych wykonanych ze stali o małej zawartości węgla, spawanych i lutowanych oraz elementów nawęglanych i powierzchniowo hartowanych, ma określone znaczenie poznawcze poszerzając wiedzę o zmęczeniu w zakresie przyjętych warunków badań.

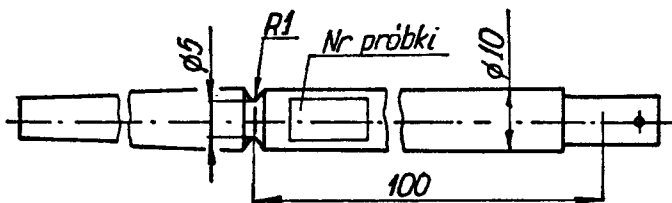
3.2. Opis przebiegu badań

a. Obiekty badań

Podstawowy zakres badań zrealizowano na próbkach okrągłych z karbem, natomiast badania weryfikacyjne na eliptycznym węźle lutowanym, okrągłym węźle lutowanym, osi oraz ramie roweru składanego.

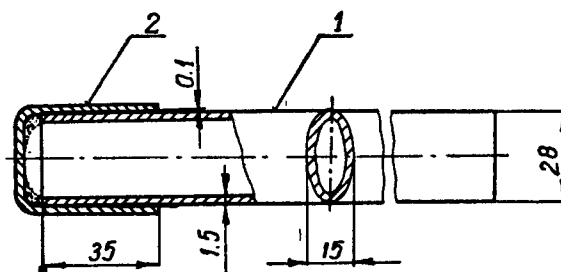
Wymiary próbek okrągłych z karbem przedstawiono na rys. 18. Do badań zmęczeniowych wykonano 400 próbek, które pobierano do prób w sposób losowy; próbki oznaczono numerami porządkowymi zgodnie z kolejnością wykonywanych prób. Karb wykonano dokładnym toczeniem zachowując parametr chropowatości powierzchni na dnie karbu $R_a = 1,25 \mu\text{m}$. Próbki wykonano z ciągnionych prętów ze stali 45 o zawartości w procentach: 0,43 C i 0,6 Mn. Wyznaczona w próbie rozciągania średnia wartość różnej wytrzymałości $R_m = 776 \text{ MPa}$, odchylenie standardowe

$s_R = 7,4$ MPa i średnia wartość umownej granicy plastyczności
 $R_{e 0,2} = 390$ MPa.



Rys. 18. Próbką okrągłą z karbem wykonana ze stali 45
 /współczynnik kształtu $\alpha_k = 1,65$ obliczono
 z wzoru Petersona [36] /

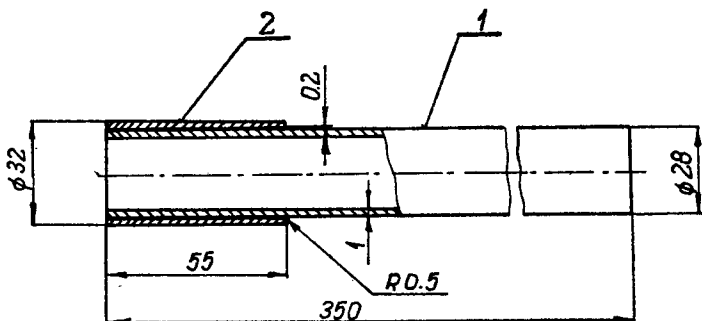
Węzły lutowane wykonano w dwóch wersjach. Pierwszą wersję stanowi węzeł, który składa się z rury o przekroju eliptycznym 1 lutowanej w łączniku 2 /rys. 19/, natomiast w drugiej wersji węzeł stanowi rura okrągła 1 osadzona w tulejce 2 /rys. 20/.



Rys. 19. Eliptyczny węzeł lutowany wykonany ze stali 10BX
 /współczynnik kształtu $\alpha_k = 2,3$ wyznaczono z
 wykresu [115] /

Materiały rur, tulejek i lutu w obu wersjach są jednakowe, różnice natomiast występują w sposobie wykonania złączy lutowanych. W eliptycznych węzłach lut występował w postaci proszku, natomiast w okrągłych - w postaci cienkiej folii. Rury 1 wykonane były ze stali 10BX o następującym składzie chemicznym w procentach: 0,13 C, /0,4 - 0,6/ Mn oraz maksymalnie 0,003 Si, 0,004 P i 0,0045 S. Łącznik i tulejkę wykonano z taśmy stalowej 08X o zawartości w procentach: /0,05 - 0,11/ C.

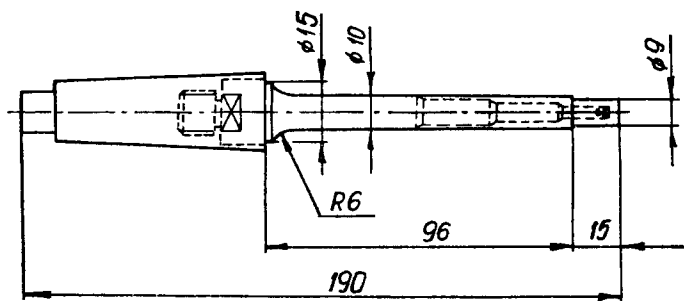
/0,25 - 0,5/ Mn oraz maksymalnie 0,004 Si, 0,004 P i 0,004 S.



Rys. 20. Okrągły węzeł lutowany wykonany ze stali 10BX /współczynnik kształtu $\alpha_k = 2,3$ wyznaczono z wykresu [115] /

Połączenia rur z łącznikiem i tulejką wykonano za pomocą lutu LM63 o temperaturze topnienia 1233 K. Wyznaczona w próbie rozciągania średnia wartość doraźnej wytrzymałości rur 1 wynosi $R_m = 363$ MPa i odchylenie standardowe $s_R = 11$ MPa.

Oś przedstawiona na rys. 21 wykonana została ze stali 10.

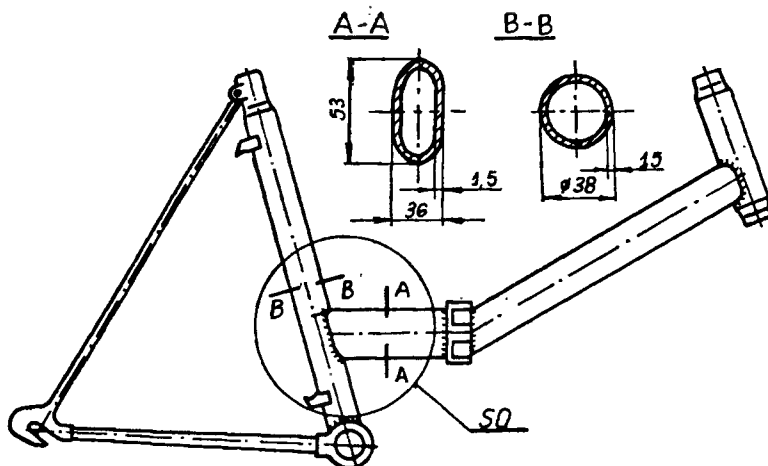


Rys. 21. Próbka okrągła /model osi/ wykonana ze stali 10, nawęglana i hartowana powierzchniowo /współczynnik kształtu $\alpha_k = 1,2$ obliczono z wzoru Petersona [36] /

Celem podniesienia własności mechanicznych osie nawęglono na głębokość 0,7 mm i hartowano powierzchniowo do twardości HRC 64. Skład chemiczny materiału osi jest następujący: 0,07 - 0,14 C; 0,35 - 0,65 Mn; 0,17 - 0,37 Si oraz maksymalnie

0,004 P i 0,004 S. Wyznaczona w próbie rozciągania średnia wartość wytrzymałości doraźnej dla próbek niehartowanych powierzchniowo wnosi $R_m = 531$ MPa i średnia wartość granicy plastyczności $R_{e 0,2} = 500$ MPa, po hartowaniu wartości te wynosiły $R_m = 751$ MPa i $R_{e 0,2} = 746$ MPa.

Ramy rowerów składanych typu "Wigry" /rys. 22/ zbudowane są z rur stalowych łączonych spoinami pachwinowymi.



Rys. 22. Rama roweru składanego typu 3250 "Wigry"

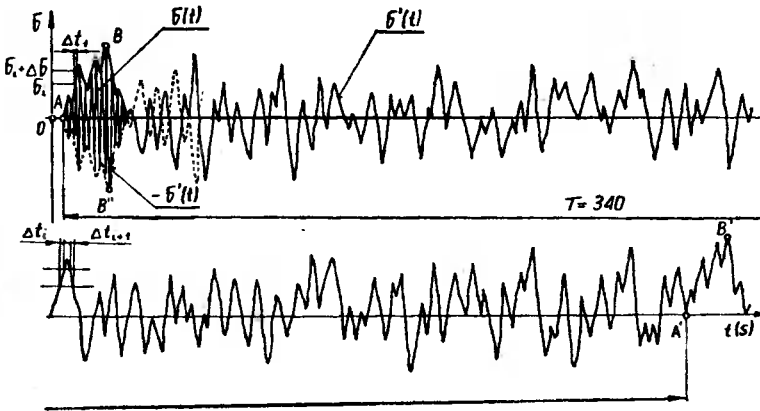
Rury wykonane są ze stali 10BX o następującym składzie chemicznym: /0,09 - 0,15/ C, /0,35 - 0,60/ Mn oraz maksymalnie 0,03 Si, 0,004 P i 0,004 S. Wszystkie spoiny były wykonane jako pachwinowe o grubości 2,5 mm. Spawanie odbywało się w osłonie CO_2 .

Wyznaczona w próbie rozciągania średnia wartość doraźnej wytrzymałości rur wynosiła $R_m = 473$ MPa i $R_{e 0,2} = 400$ MPa.

b. Obciążenia zmienne

Zmienne naprężenia $\sigma/t/$ w przekroju próbki okrągłej z korbem otrzymano w próbie obrotowego zginania, obciążając koniec próbki zamocowanej wysięgowo we wrzecionie stanowiska badawczego. Wykresy zmian naprężeń o charakterze pseudolos-

wym przedstawiono na rys. 23.



Rys. 23. Wykres zmian naprężeń o charakterze pseudolosowym

Losowym zmianom obciążenia próbki odpowiadają zmiany naprężeń wykreślone na rys. 23 linią grubą σ'/t , które z wykresem - σ''/t stanowią obwiednie wartości amplitud naprężeń σ/t w przekroju obracającej się próbki. Poszczególne wartości obwiedni powtarzają się po czasie $T = 340$ s /np. punkty A - A', B - B'. Przedstawiony na rys. 23 przebieg zmian naprężeń σ/t można opisać zależnością

$$\sigma/t/ = \sigma'/t/ \cdot \cos 2\pi \cdot n_r \cdot t \quad (65)$$

Prędkość obrotowa badanych próbek wynosiła $n_r = 25$ s⁻¹. Liczba cykli o amplitudzie σ_a wynosi 227

$$n / \sigma_a/ = T \cdot n_r \cdot f / \sigma_a/ \cdot d\sigma_a \quad (66)$$

gdzie:

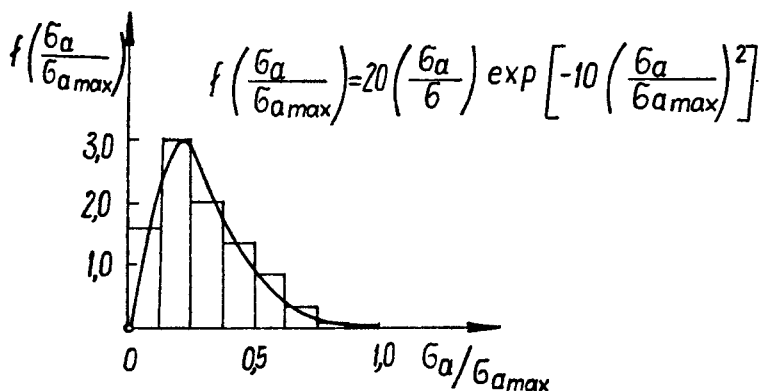
$f / \sigma_a/$ - funkcja gęstości prawdopodobieństwa obwiedni $\sigma'/t/$, zwana także funkcją gęstości prawdopodobieństwa pików /peak probability density function/

T - czas trwania realizacji losowych naprężeń

Jak wynika z metody obwiedni [4], funkcja gęstości prawdopodobieństwa $f / \sigma_a /$ ma rozkład Rayleigha o postaci

$$f / \sigma_a / = \frac{\sigma_a}{\alpha^2} \exp - \left[\frac{\sigma_a^2}{2\alpha^2} \right] \quad (67)$$

W omawianym przypadku dla względnych wartości amplitud $\sigma_a / \sigma_{a\max}$ wartość parametru $\alpha = 0,224$. Histogram i wykres funkcji gęstości prawdopodobieństwa podano na rys. 24.

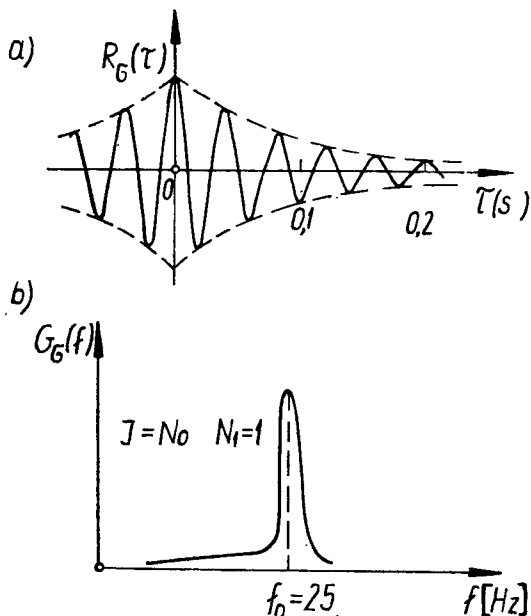


Rys. 24. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa amplitud losowych zmian naprężeń przedstawionych na rys. 23

Funkcję autokorelacji $R_G / \tau /$ i gęstości widmowej $G_G / f /$ zmian naprężeń $\sigma / t /$ przedstawiono na rys. 25.

Przebieg funkcji gęstości widmowej pozwala stwierdzić, że pseudolosowa zmiana naprężeń w próbce odpowiada, z punktu widzenia teorii procesów losowych, procesowi losowemu o wąskim widmie [4]. Rozpatrując przebieg procesu sumowania uszkodzeń zmęczeniowych zastosowane obciążenie pseudolosowe odpowiada zadowalająco obciążeniu losowemu o podobnych charakterystykach stochastycznych.

Przyjęta w badaniach próba obrotowego zginania umożliwia realizację losowych zmian amplitud naprężeń przy zachowaniu naprężeń średnich równych zeru. Przyjęcie wąskowidmowego procesu losowego obciążeń eliminuje konieczność wyboru odpowied-



Rys. 25. Funkcja korelacji - a oraz funkcja gęstości widmowej - b losowych zmian naprężeń przedstawionych na rys. 23

niego sposobu schematyzacji. Wszystkie sposoby schematyzacji omówione w punkcie 2.2 prowadzą do wyznaczenia identycznego widma obciążeń. Unika się dzięki temu poważnych niedokładności związanych z przybliżonym wyznaczeniem zastępczych, w stosunku do losowych zmian, cykli sinusoidalnych. Wykorzystanie generatora impulsów pseudolosowych o okresie powtarzalności $T = 340$ s daje możliwość dokładnego opracowania widma i oceny maksymalnej wartości naprężenia σ_{\max} /punkt B, rys. 23/ w czasie trwania próby zmęczeniowej. Dokładność odwzorowania rozkładu amplitud naprężeń w badaniach trwałości zmęczeniowej ma zasadnicze znaczenie. Wykładniczy charakter krzywych trwałości zmęczeniowej powoduje, że małe różnice w wartościach naprężeń powodują znaczne różnice w wartościach wyznaczonej trwałości zmęczeniowej.

W celu uproszczenia opracowania statystycznego, zakres zmian naprężeń od wartości maksymalnej /punkt B/ do wartości minimalnej /punkt B' / podzielono na 16 przedziałów klasowych o rozpiętości $\Delta\sigma$. Względną liczbę amplitud w poszczególnych przedziałach klasowych można obliczyć z wzoru

$$f_1 = \frac{n_1}{n_c} = \frac{\sum \Delta t_1}{T} \quad (67)$$

gdzi:

$$\sum \Delta t = \Delta t_1 + \dots + \Delta t_i + \dots + \Delta t_n - \text{oznacza sumaryczny czas "przebywania" funkcji } \sigma'/t/ \text{ w przedziale klasowym } / \sigma_{a_i}, \sigma_{a_i} + \Delta\sigma / \text{ w czasie } T$$

T - czas równy okresowi zmian obciążenia pseudolosowego /340 s/

Wyniki statystycznego opracowania wykresu pseudolosowych zmian naprężeń podano w tab. 3.

Tabela 3

Wyniki statystycznego opracowania wykresu pseudolosowych zmian naprężeń

Nr poziomu naprężeń i	1	2	3	4	5	6	7	8
Względna wartość naprężenia $\sigma_{a_i}/\sigma_{a_{max}}$	1,00	0,875	0,750	0,625	0,50	0,375	0,250	0,125
Względna liczba cykli $n_i/n_c = n_{o_i}/n_o$	0,006	0,012	0,038	0,081	0,138	0,205	0,305	0,170

Oznaczenia przyjęte w tab. 3 zgodne są z oznaczeniami przyjętymi na rys. 3. Opracowanie danych w układzie względnych wartości naprężeń i liczb cykli na poszczególnych poziomach naprężeń ułatwia wyznaczenie krzywych trwałości zmęczeniowej, jako funkcji naprężenia maksymalnego w widmie od sumarycznej liczby cykli do pęknięcia zmęczeniowego.

Jak podano w punkcie 2.4 opracowanie programu obciążeń w stanowiskowych badaniach wymaga przyjęcia postaci programu, wartości maksymalnej naprężenia $\sigma_{a_{max}}$ oraz liczby cykli w okresie programu n_o . Obliczenie wartości σ_{a_i} i n_{o_i} następuje przez pomnożenie poszczególnych wartości podanych w tab. 3 odpowiednio przez $\sigma_{a_{max}}$ i n_o . Obliczony na podstawie wzoru (3) dla przedstawionego widma obciążeń współczynnik wypełnienia $\xi = 0,34$.

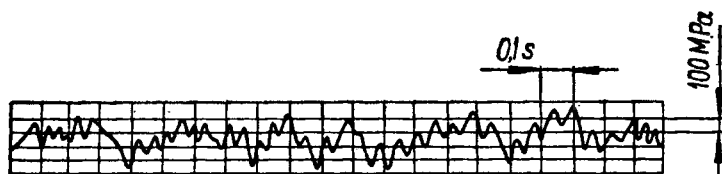
W przedstawionych w punkcie 3 badaniach zmęczeniowych wykorzystano ponadto widma obciążeń o współczynniku wypełnienia 0,56 i 0,77. Dane dla tych widm podano w tab. 4.

Tabela 4

Dane liczbowe widm obciążeń o współczynniku wypełnienia 0,56 i 0,77

Nr poziomu naprężeń i	1	2	3	4	5	6	7	8
Względna wartość naprężenia $\sigma_{ai}/\sigma_{a_{max}}$	1,00	0,875	0,750	0,625	0,50	0,375	0,250	0,125
Względna liczba cykli $n_i/n_c = n_{oi}/n_o$ dla ξ	0,56	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125
	0,77	0,170	0,305	0,205	0,138	0,081	0,038	0,012

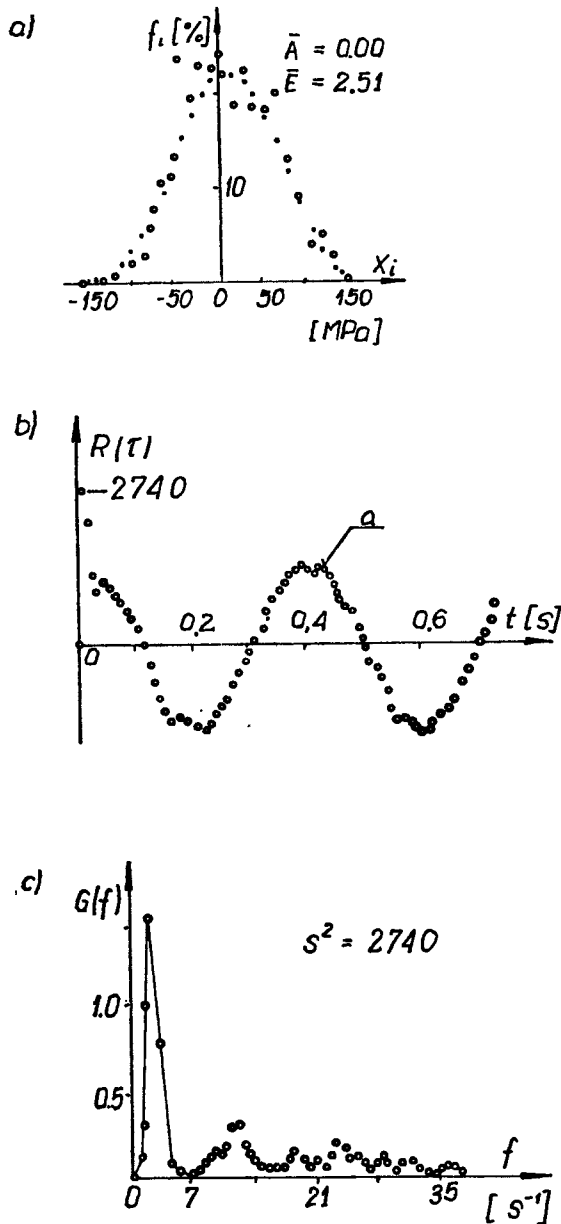
Szczegółowe badania statystyczne eksploatacyjnych obciążeń węzłów konstrukcyjnych i elementów pojazdów jednośladowych przeprowadzone w pracach [129, 234] wykazały, że obciążenia te mają złożony charakter i są procesami losowymi o szerokim widmie. Fragment wykresu naprężeń eksploatacyjnych w ramie roweru przedstawiono na rys. 26.



Rys. 26. Fragment wykresu naprężeń w ramie rowerowej

Złożoność tych obciążeń wynika z szeregu oddziaływań zewnętrznych, a przede wszystkim z oddziaływania nierówności na-

wierzchni dróg i oddziaływania napędu [201, 205]. Wybrane charakterystyki statystyczne: gęstość prawdopodobieństwa, funkcję autokorelacji i funkcję gęstości widmowej przedstawiono na rys. 27.



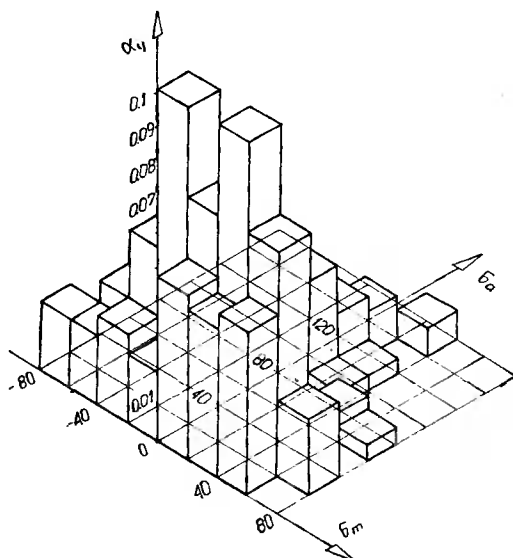
Rys. 27. Charakterystyki statystyczne eksploatacyjnych obciążeń ramy rowerowej:

- a - funkcja gęstości prawdopodobieństwa
- b - funkcja autokorelacji
- c - funkcja gęstości widmowej

Pobieżna ocena obciążenia losowego na podstawie podanych na rys. 27 wykresów wykazuje złożony charakter obciążeń, w którym oprócz losowego oddziaływania nawierzchni obserwuje się oddziaływanie napędu, zbliżone do okresowo zmiennego o małej częstotliwości [204].

Na podstawie ocen statystycznych eksploatacyjnych obciążeń pojazdów jednośladowych, do opracowania widm obciążeń badanych węzłów konstrukcyjnych i elementów wybrano metodę pełnych cykli [205].

Wyniki schematyzacji zamieszczono w dodatku, w tab. D.1, natomiast histogram na rys. 28.



Rys. 28. Histogram częstości występowania cykli sinusoidalnych o parametrach σ_m i σ_a

Na podstawie tych danych wykorzystując zależności (28) i (29) można wyznaczyć funkcje gęstości prawdopodobieństwa:
 - przy założeniu rozkładu normalnego dla σ_m i Rayleigha dla σ_a

$$f(\sigma_m, \sigma_a) = 81,7 \exp \left[- \frac{1/\sigma_m - 15,3/2}{2120} \right] \frac{\sigma_a}{40} \exp / - \frac{\sigma_a^2}{3200} / \quad (68)$$

- przy założeniu rozkładów beta dla σ_m i σ_a

$$f(\sigma_m, \sigma_a) = \frac{1/\sigma_m + 80/2,5/100 - \sigma_m/2,11 \quad \sigma_a^{0,5}/180 - \sigma_a/3,15}{279,38 \cdot 10^{18}} \quad (69)$$

dla $-80 \leq \sigma_m \leq 100$ MPa

$0 \leq \sigma_a \leq 180$ MPa

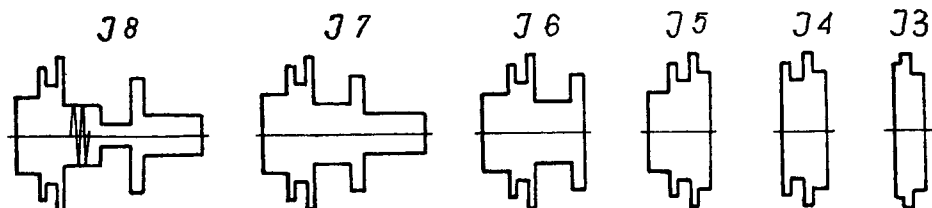
$f(\sigma_m, \sigma_a) = 0$ poza podanymi wyżej zakresami dla σ_m i σ_a

Rozkłady parametrów σ_m i σ_a opisane wzorami (68) i (69) stwarzają określone trudności w badaniach stanowiskowych i obliczeniach opartych na hipotezach sumowania uszkodzeń zmęczeniowych.

Wykorzystując dane zawarte w pracach [102, 232] obliczono amplitudy zredukowane.

Zestaw danych liczbowych dla widm obciążeń badanych węzłów konstrukcyjnych i elementów pojazdów jednośladowych podano w tab. 5. W ostatniej kolumnie tab. 5 podano wartości współczynników wypełnienia dla poszczególnych widm obciążeń.

W badaniach wpływu naprężeń mniejszych od granicy zmęczenia i wpływu postaci programu na trwałość zmęczeniową, stosowano programy obciążeń pochodne od podanych. Programy te tworzone przez dobór odpowiednio mniejszej liczby poziomów. W ten sposób powstała duża liczba programów o różnej liczbie poziomów naprężeń i różnych współczynnikach wypełnienia widma. Schematy postaci tych programów przedstawiono na rys. 29.



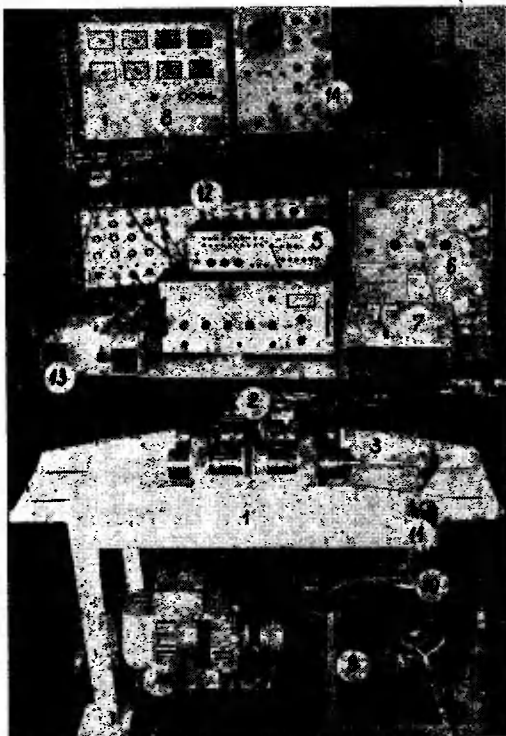
Rys. 29. Schematy programów obciążeń przyjęte do badań zmęczeniowych

Tabela 5
Dane liczbowe widm obciążeń węzłów konstrukcyjnych i elementów pojazdów jednośladowych

Lp.	Nr poziomu naprężeń i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ξ
1	Względna wartość naprężenia $\sigma_{ai} / \sigma_{amax}$	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	
2	Eliptycznego węzła lutowanego	0,003	0,003	0,01	0,013	0,036	0,072	0,113	0,236	0,457	0,057	0,29
3	Ramy roweru "Wigry"	0,002	0,000	0,001	0,0175	0,0608	0,1042	0,0722	0,2518	0,4293	0,0598	0,30
4	Względna liczba cykli dla okrągłego węzła lutowanego	0,00433	0,00433	0,00433	0,01735	0,0391	0,117	0,213	0,221	0,261	0,121	0,30
5	Względna wartość naprężenia $\sigma_{ai} / \sigma_{amax}$ dla osi	1,0	0,93	0,85	0,77	0,7	0,62	0,54	0,47	0,39	0,32	-
6	Względna liczba cykli n_i / n_c	0,012	0,012	0,028	0,088	0,094	0,152	0,205	0,124	0,214	0,04	0,56

c. Stanowiska badawcze

Stanowisko do badań próbek okrągłych z karbem i osi przedstawiono na rys. 30.



Rys. 30. Stanowisko do badań próbek okrągłych na obrotowe zginanie /objaśnienia w tekście/

Część mechaniczną stanowi urządzenie posiadające dwa wrzeciona 2. Na obu końcach wrzecion 2 wykonano gniazda stożkowe do mocowania części chwytowej badanych próbek 3. Układ obciążający składa się z generatora impulsów pseudolosowych 5, stabilizowanych zasilaczy 6, układu sterowania wzбудnikiem 7, urządzenia do programowania obciążeń sinusoidalnych 8 oraz wzбудnika elektromagnetycznego 9.

Pomiary obciążeń dokonywano metodą tensometrii oporowej. Tensometr oporowy czynny naklejono na płytce 10 łączącej ciągnięno 11 z rdzeniem wzbudnika. Układ pomiarowy składał się z mostków tensometrycznych 12, rejestratora szybkopiszącego 13 oraz oscyloskopu 14.

Napężenia zmienne w przekroju próbki 3 otrzymuje się w wy-

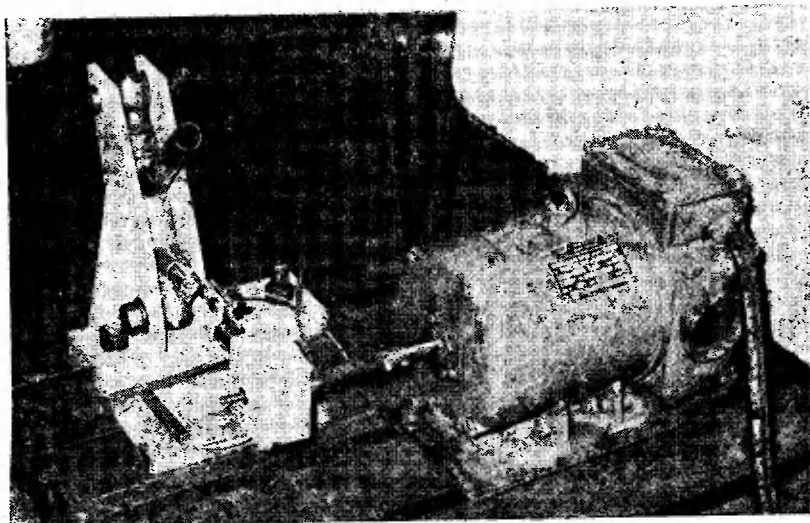
niku obciążenia końca próbki wysięgowej przez wzbudnik elektromagnetyczny 12 oraz przez szybki obrót próbki zamocowanej we wrzecionie 2. Zmiana losowa lub programowana naprężeń w przekroju próbki wynika z odpowiedniej zmiany obciążenia próbki.

Pseudolosową zmianę obciążenia realizuje automatycznie układ: generator impulsów pseudolosowych 5, dwa stabilizowane zasilacze 6, układ sterowania wzbudnikiem 7 oraz wzbudnik elektromagnetyczny 11. Programowane obciążenie realizowane jest także automatycznie przez układ, w którym generator impulsów pseudolosowych 5 zastąpiony jest urządzeniem do programowania obciążeń sinusoidalnych 8. Zmianę wartości obciążenia losowego i programowanego otrzymuje się przez ustalenie odpowiedniej wartości natężenia prądu potencjometrem urządzenia sterowania wzbudnikiem 7. Liczbę cykli zmian naprężeń w przekroju próbki, która równa jest liczbie obrotów wrzeciona wskazuje licznik cykli, natomiast częstotliwość zmian wskazuje wskaźnik chwilowej prędkości obrotowej. Licznik cykli oraz wskaźnik chwilowej prędkości obrotowej, umieszczone są w urządzeniu do programowania obciążeń sinusoidalnych 8.

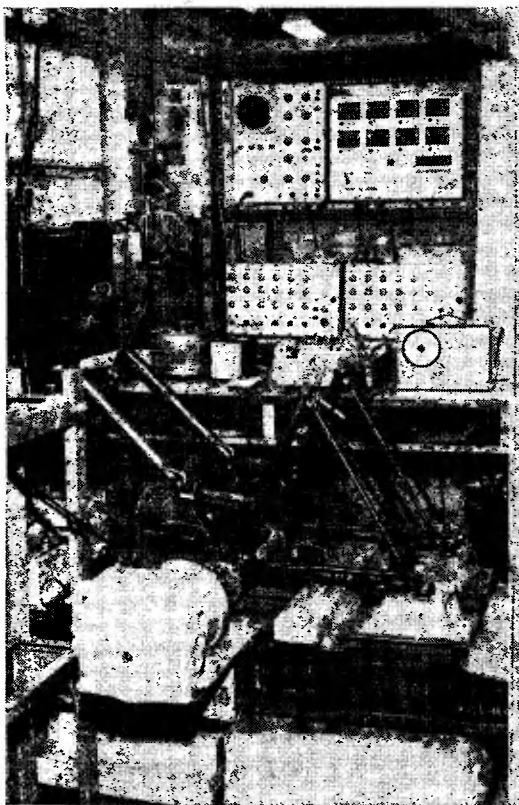
Budowę i zasadę działania generatora impulsów pseudolosowych oraz charakterystyki statystyczne generowanych przebiegów omówiono w pracy [168].

Stanowiska do badań węzłów konstrukcyjnych i elementów pojazdów jednośladowych różniły się jedynie częścią mechaniczną, natomiast układ elektroniczno - elektryczny wymuszenia obciążeń i pomiaru naprężeń był ten sam [230, 233], co w badaniach programowanych próbek okrągłych.

Stanowisko do badań węzłów lutowanych przedstawiono na rys. 31, natomiast stanowisko do badania ram rowerowych na rys. 32. Obciążenia w obu przypadkach wymuszane były za pomocą wibratorów bezwładnościowych działających na zasadzie wirowania mas niewyważonych. W badaniach węzłów wibrator mocowano na końcu rury węzła, natomiast w badaniach ram rowerowych na osi przekładni głównej roweru.



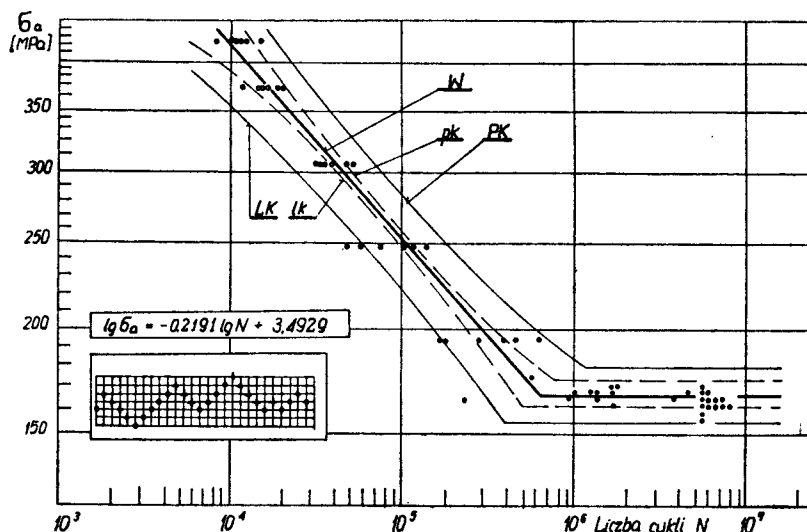
Rys. 31. Stanowisko do badań węzłów lutowanych



Rys. 32. Stanowisko do badań ram rowerowych

3.3. Wyznaczenie krzywych zmęczeniowych

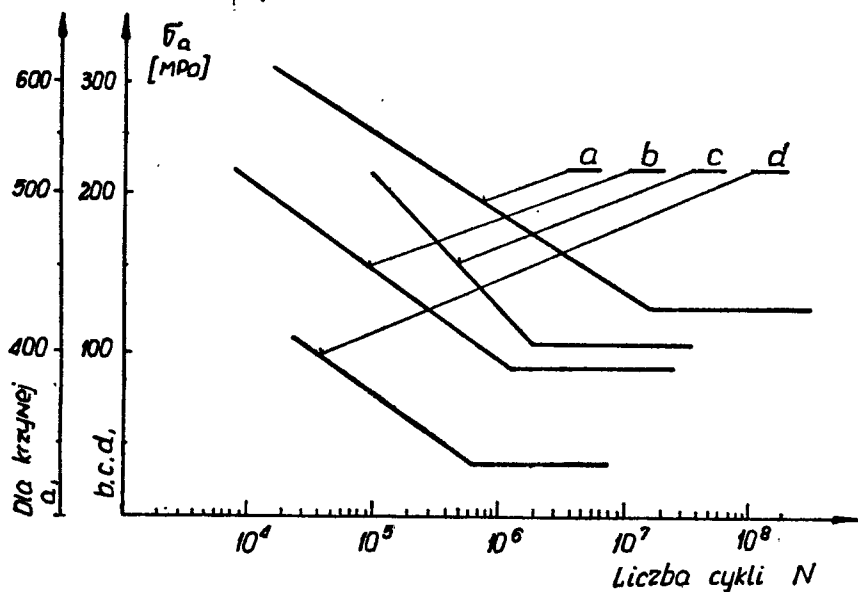
Krzywe zmęczeniowe ujmują podstawowe własności zmęczeniowe badanych próbek, węzłów konstrukcyjnych i elementów maszyn, stanowią także jeden z podstawowych elementów obliczeń opartych na hipotezach kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych. Krzywe te wyznaczano w zakresie ograniczonej i nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej. Tabelaryczne zestawienia wyników badań podano w dodatku do niniejszego opracowania /tab. D.2 i D.3/. Na podstawie danych zawartych w poszczególnych tabelach wykonano wykresy zmęczeniowe w układzie współrzędnych bilogarytmicznych. Krzywą zmęczeniową dla próbek okrągłych z karbem przedstawiono na rys. 33.



Rys. 33. Krzywa zmęczeniowa próbek okrągłych z karbem, wykonanych ze stali 45

Opracowanie wyników badań polegało na wyznaczeniu metodą najmniejszych kwadratów prostej regresji oraz przedziałów ufności dla średniej lk i pk i pojedynczych wyników LK i PK [44]. Wartość nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej wyznaczono metodą schodkową /staircase method/ [142], posługując się w wyznaczeniu wartości średniej i przedziałów ufności wzorami Dixona i Mooda. Metodę tę wybrano spośród znanych metod: brzegowej /boundary technique/ [143, 144] i pełnobazowych

stopniowych przeciążeń [127], ponieważ umożliwia dokładniejsze w porównaniu z pozostałymi statystyczne opracowanie wyników badań. Badania prowadzono do granicznej liczby cykli $N_G = 5 \cdot 10^6$ dla próbek ze stali 45 i osi wykonanych ze stali 10 nawęglanych i hartowanych powierzchniowo oraz $N_G = 2 \cdot 10^6$ dla pozostałych węzłów konstrukcyjnych i ram rowerowych [35]. Krzywe zmęczeniowe dla wybranych do badań węzłów konstrukcyjnych i elementów pojazdów jednośladowych przedstawiono na rys. 34.



Rys. 34. Krzywe zmęczeniowe: a - osi, b - eliptycznego węzła lutowanego, c - okrągłego węzła lutowanego, d - ramy roweru składanego typu 3250 "Wigry"

Wykres a odpowiada krzywej zmęczeniowej osi, b - eliptycznego węzła, c - okrągłego węzła oraz d odpowiada krzywej zmęczeniowej ramy rowerowej. Równania krzywych zmęczeniowych w zakresie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej oraz granice zmęczenia Z_{G_0} podano w tab. 6.

Ze względu na dużą czasochłonność i wysokie koszty badań dużej liczby kompletnych ram rowerowych, granicę zmęczenia wyznaczono metodą przyspieszoną. Ze znanych przyspieszonych metod Locati, Protta i metody z uwzględnieniem "treningu" materiału [80] oraz modyfikacji metody Locati polegających na

badaniu kilku próbek [13], badania dwóch próbek przy obciążeniu schodkowym - jedna przy rosnącym, druga przy malejącym [192] - - wybrano sposób przedstawiony w pracy [13]. Sposób ten w zastosowaniu do badań elementów pojazdów jednośladowych omówiono w pracy [104], w której także podano wartości parametrów obciążenia schodkowego i wyjściowych krzywych zmęczenia.

Tabela 6

Równania krzywych zmęczenia oraz wartości nieograniczonej wytrzymałości zmęceniowej

Ip.	Obiekt badań	Równania krzywej zmęceniowej $y = - \frac{1}{m_0} x + c_0$	Wartość Z_{go} [MPa]
1	2	3	4
1	Próbka okrągła	$y = - 0,2191x + 3,4929$	165,6
2	Oś	$y = - 0,052663x + 2,0127$	422,0
3	Eliptyczny węzeł	$y = - 0,16694x + 2,9925$	93,5
4	Okrągły węzeł	$y = - 0,24329x + 3,5473$	103,0
5	Rama rowerowa	$y = - 0,30882x + 3,4234$	43,0
<p>Objaśnienia:</p> <p>$y = \lg \sigma_a$</p> <p>$x = \lg N$</p> <p>m_0 - wykładnik potęgi w równaniu gałęzi ograniczonej wytrzymałości krzywej zmęceniowej</p>			

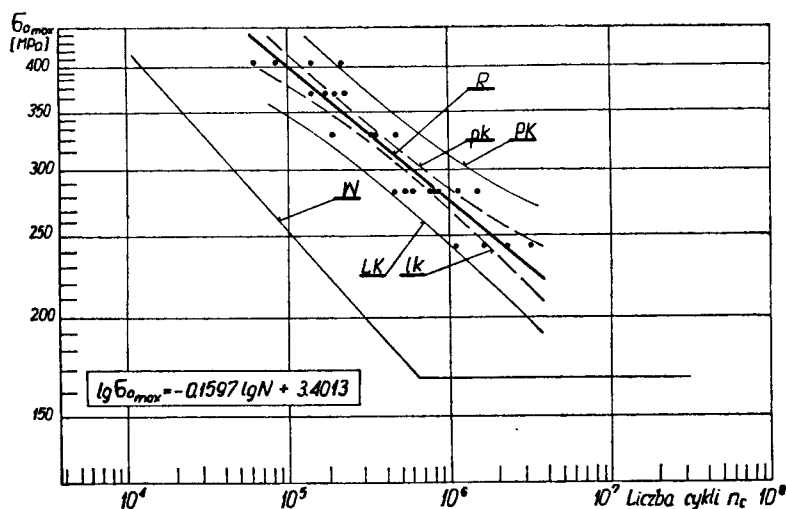
3.4. Badania wpływu sekwencji obciążeń na trwałość zmęceniową

Badania przeprowadzono na próbkach okrągłych z karbem w warunkach obciążeń pseudolosowych /R/ i programowanych /Lo - Hi; Hi - Lo; Lo - Hi - Lo; J - oznaczenia zgodne z rys. 4/.

Wszystkie programy odpowiadały widmu obciążeń opracowanemu na podstawie obciążenia pseudolosowego /tab. 3/. Aby wyznaczyć krzywe zmęczeniowe do badań przyjęto następujące wartości maksymalnego naprężenia w widmie $\sigma_{a\max} = 205, 245, 285, 325, 365$ oraz 405 MPa. Liczbę cykli n_0 w okresie programu przyjmowano w zależności od wartości $\sigma_{a\max}$ tak, aby uzyskać możliwie dużą liczbę powtórzeń programu do pęknięcia zmęczeniowego próbki. Zestawienie wyników badań dla poszczególnych programów podano w dodatku /tab. D.4 - D.8/.

Opracowanie wyników badań polegało na wyznaczeniu prostych regresji oraz przedziałów ufności na poziomie 0,95 dla średniej i pojedynczych wyników.

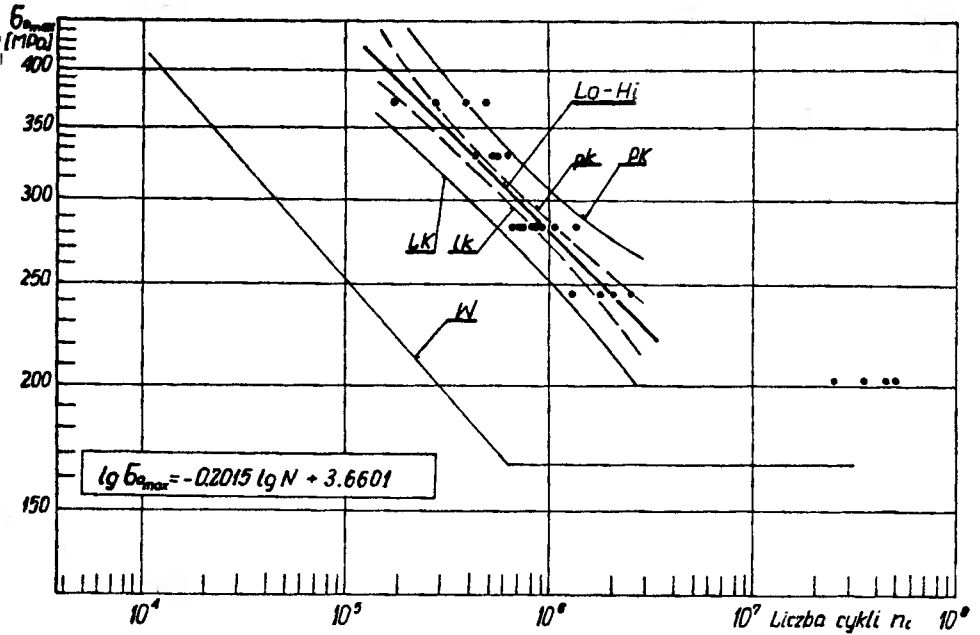
Krzywą zmęczeniową wyznaczoną przy obciążeniu pseudolosowym /R/ w zakresie naprężeń $\sigma_{a\max} = 245 - 405$ MPa przedstawiono na rys. 35.



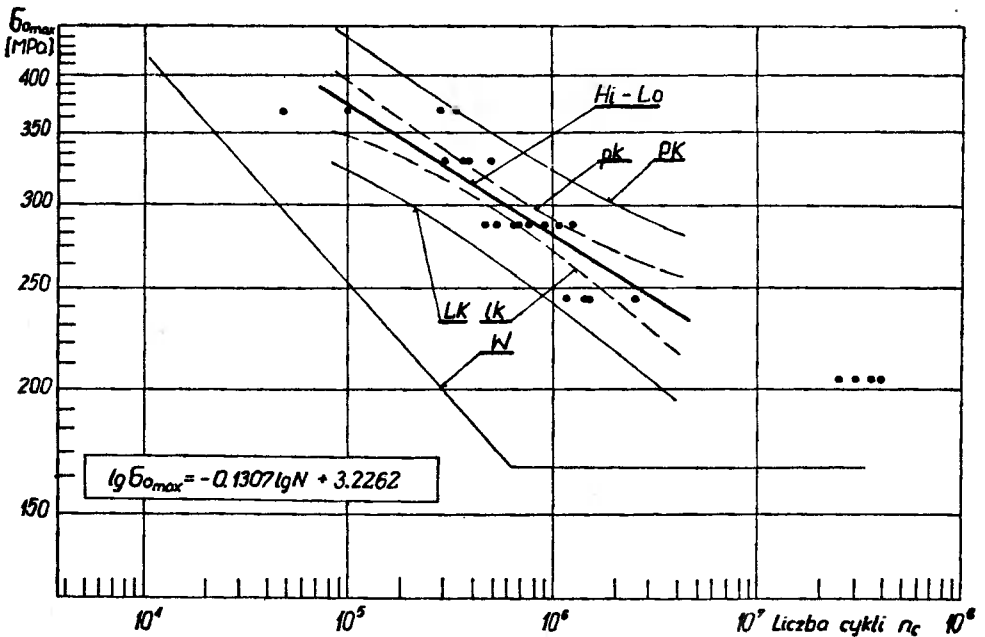
Rys. 35. Krzywa trwałości zmęczeniowej wyznaczona przy obciążeniu pseudolosowym /R/

Badań na poziomie 205 MPa zaniechano ze względu na długotrwałość próby zmęczeniowej /kilka miesięcy/.

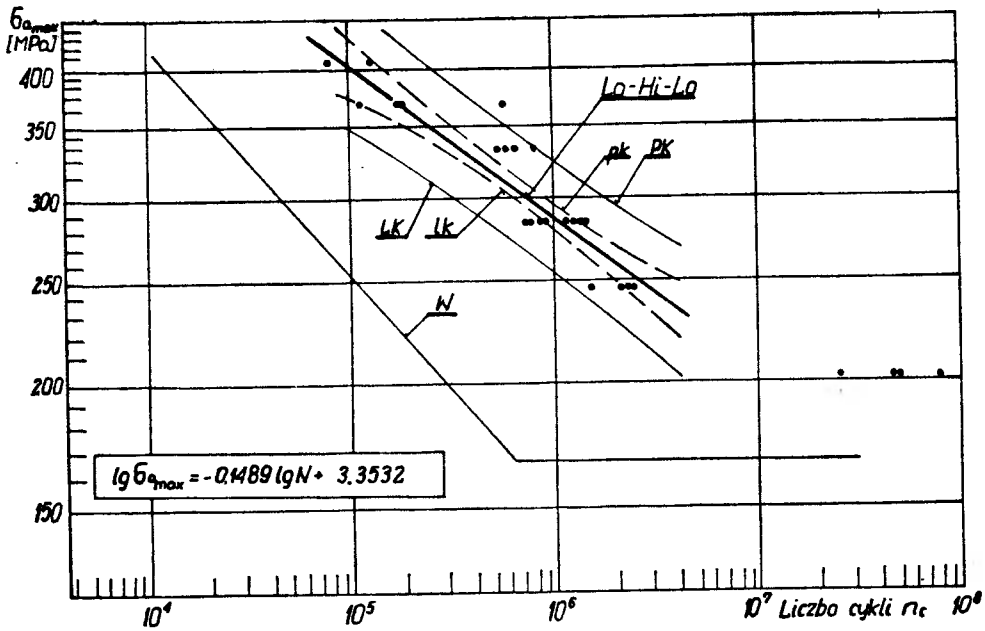
Na kolejnych rysunkach przedstawiono krzywe zmęczeniowe dla następujących programów: rys. 36 - program Lo - Hi, rys. 37 - program Hi - Lo, rys. 38 - program Lo - Hi - Lo oraz rys. 39 - program J.



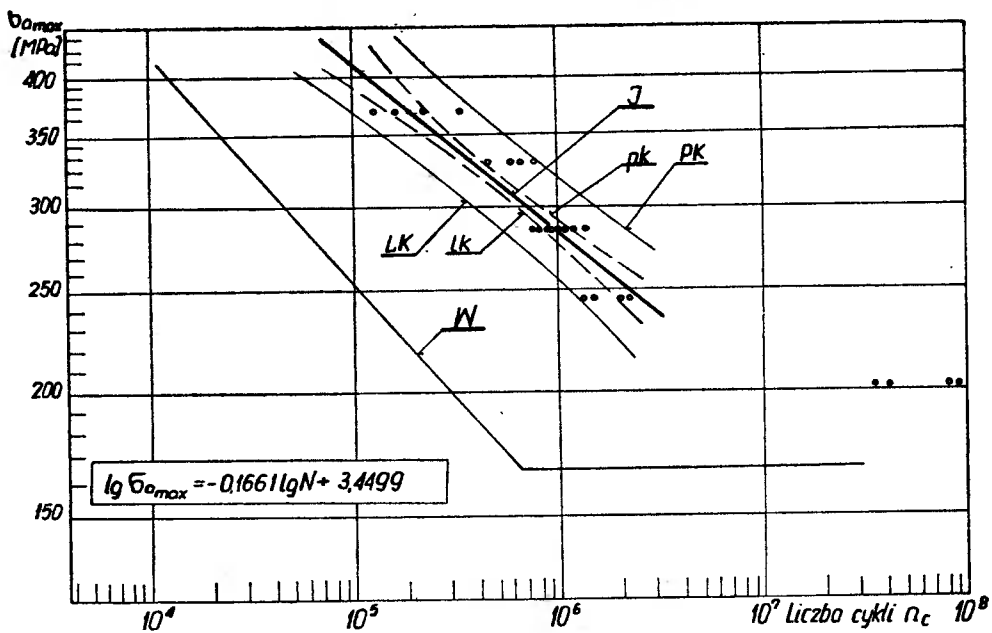
Rys. 36. Krzywa trwałości zmęczeniowej wyznaczona przy obciążeniu stopniowo rosnącym /Lo - Hi/



Rys. 37. Krzywa trwałości zmęczeniowej wyznaczona przy obciążeniu stopniowo malejącym /Hi - Lo/



Rys. 38. Krzywa trwałości zmęczeniowej wyznaczona przy obciążeniu stopniowo rosnącym, następnie malejącym /Lo - Hi - Lo/



Rys. 39. Krzywa trwałości zmęczeniowej wyznaczona przy obciążeniu stopniowanym nieregularnie /J/

Do analizy regresji przyjęto wyniki badań odpowiadające zakresowi naprężeń $\sigma_{a\max} = 245 - 405$ MPa. Przebiegu krzywych w zakresie $\sigma_{a\max} = 205 - 245$ MPa nie wyznaczono ze względu na znaczne odchylenie wyników badań na poziomie $\sigma_{a\max} = 205$ MPa od prostej regresji. Krzywe zmęczeniowe w tym zakresie zbliżają się asymptotycznie do linii nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej.

Równania krzywych trwałości zmęczeniowej dla poszczególnych programów obciążeń podano w tab. 7.

Tabela 7

Równania krzywych trwałości zmęczeniowej próbek okrągłych z karbem wyznaczonych w warunkach różnie ukształtowanych programów obciążeń

Lp.	Oznaczenie programu	Równanie krzywej trwałości $y = - \frac{1}{m_1} x + c$
1	2	3
1	R	$y = - 0,1592x + 3,4013$ (70)
2	Lo - Hi	$y = - 0,2015x + 3,6601$ (71)
3	Hi - Lo	$y = - 0,1307x + 3,2262$ (72)
4	Lo - Hi - Lo	$y = - 0,1489x + 3,3532$ (73)
5	J	$y = - 0,1661x + 3,4499$ (74)
Objaśnienia:		
$y = \lg \sigma_{a\max}$		
$x = \lg n_c$		
m_1 - wykładnik potęgi w równaniu krzywej trwałości zmęczeniowej		

3.5. Badania wpływu naprężeń mniejszych od granicy zmęczenia na trwałość zmęczeniową

Badania wpływu naprężeń o wartościach mniejszych od gra-

nicy zmęczenia przeprowadzono na próbkach okrągłych z karbem oraz zweryfikowano je badaniami eliptycznych węzłów lutowanych i osi. Przebieg badań był następujący. Początkowo wyznaczono trwałość zmęczeniową serii próbek w badaniach z programem zawierającym 7 poziomów naprężeń z 8 poziomów podanych w tab. 3. Pomięto 8 poziom odpowiadający bardzo małym wartościom amplitud $/0,125 Z_{g0}/$. Trwałość tę wyrażono liczbą powtórzeń okresu programu do pęknięcia zmęczeniowego próbki. Następne serie próbek badano z zastosowaniem 6-, 5-, 4- i 3- poziomowego programu. Każdy następny program z mniejszą liczbą poziomów otrzymano z poprzedniego programu drogą odrzucenia najniższego poziomu naprężeń.

Schematy i oznaczenie poszczególnych programów przyjęte w dalszych opisach przedstawione zostały na rys. 29.

Przyjmuje się, że odrzucone poziomy programu mają nieistotny wpływ na trwałość zmęczeniową, jeżeli liczba powtórzeń programu z pominiętymi poziomami λ_i będzie równa liczbie powtórzeń programu z pełną liczbą stopni λ . Badania próbek okrągłych z karbem przeprowadzono dla programów obciążeń o następujących parametrach:

$$a. \quad \sigma_{a_{\max}} = 325 \text{ MPa}, \quad / \quad \sigma_{a_{\max}} / Z_{g0} = 2,0 \quad /$$

$$n_o = 5 \cdot 10^4 \text{ cykli}, \quad \xi = 0,34$$

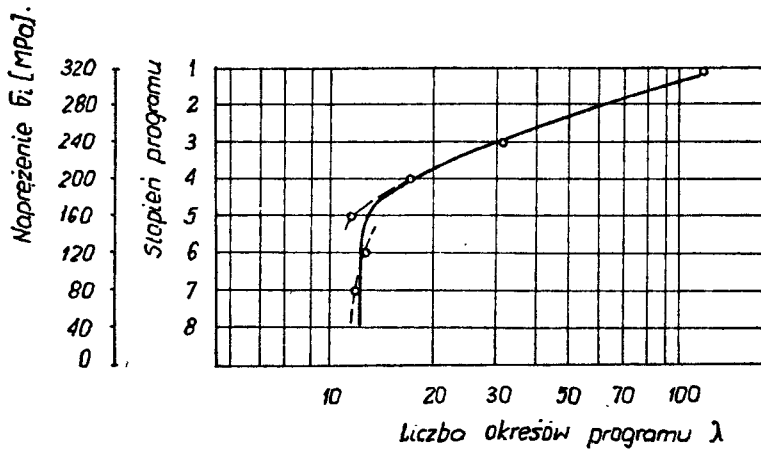
$$b. \quad \sigma_{a_{\max}} = 245 \text{ MPa}, \quad / \quad \sigma_{a_{\max}} / Z_{g0} = 1,45 \quad /$$

$$n_o = 10^5 \text{ cykli}, \quad \xi = 0,34$$

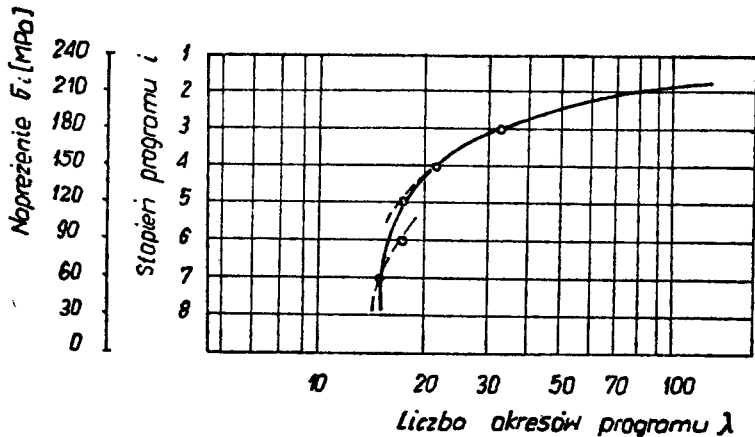
$$c. \quad \sigma_{a_{\max}} = 245 \text{ MPa}, \quad / \quad \sigma_{a_{\max}} / Z_{g0} = 1,45 \quad /$$

$$n_o = 10^4 \text{ cykli}, \quad \xi = 0,56$$

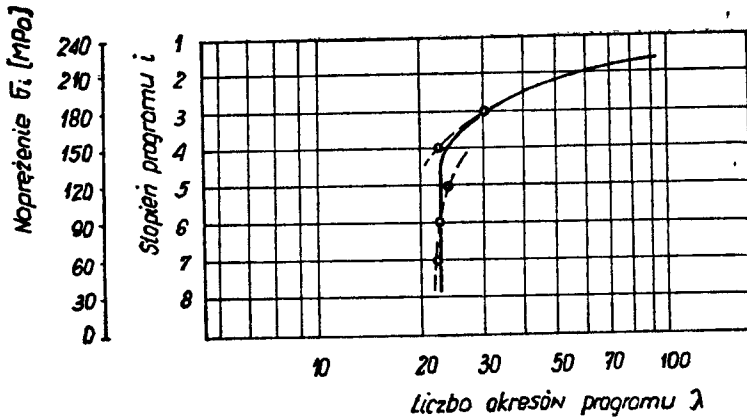
Zestawienie wyników badań podano w dodatku /tab. D.9 - D.11/. Na podstawie tych danych sporządzono wykresy. Wyniki badań dla programu a podano na rys. 40, dla programu b na rys. 41, wyniki badań dla programu c natomiast - na rys. 42.



Rys. 40. Wyniki badań /próbek okrągłych z karbem wykonanych ze stali 45/ wpływu naprężeń mniejszych od nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej na trwałość zmęczeniową dla początkowych parametrów programu $\sigma_{a\max} = 325$ MPa i $\xi = 0,34$



Rys. 41. Wyniki badań /próbek okrągłych z karbem wykonanych ze stali 45/ wpływu naprężeń mniejszych od nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej na trwałość zmęczeniową dla początkowych parametrów programu $\sigma_{a\max} = 245$ MPa i $\xi = 0,56$



Rys. 42. Wyniki badań /próbek okrągłych z karbem wykonanych ze stali 45/ wpływu naprężeń mniejszych od nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej na trwałość zmęczeniową dla początkowych parametrów programu $\sigma_{a_{max}} = 245 \text{ MPa}$ i $\xi = 0,56$

Podobne badania zrealizowano dla eliptycznego węzła lutowanego i dla osi. Początkowe parametry programów obciążeń były następujące:

a. dla eliptycznego węzła lutowanego

$$\sigma_{a_{max}} = 160 \text{ MPa} \quad / \quad \sigma_{a_{max}} / z_{g_0} = 1,74 \quad /$$

$$n_0 = 4,86 \cdot 10^4 \text{ cykli}, \quad \xi = 0,4$$

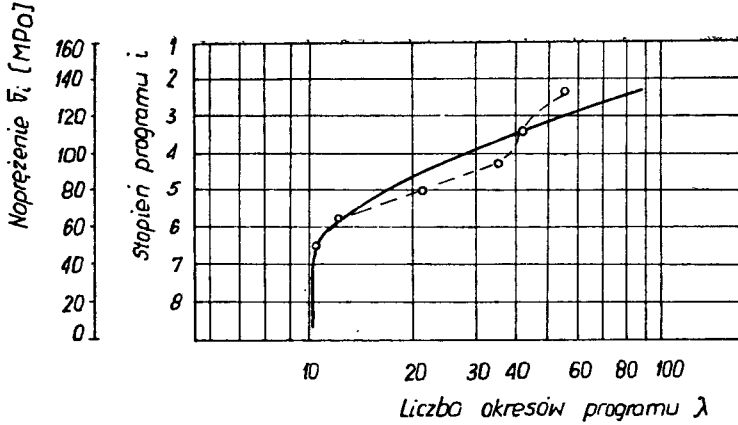
b. dla osi

$$\sigma_{a_{max}} = 513 \text{ MPa} \quad / \quad \sigma_{a_{max}} / z_{g_0} = 1,22 \quad /$$

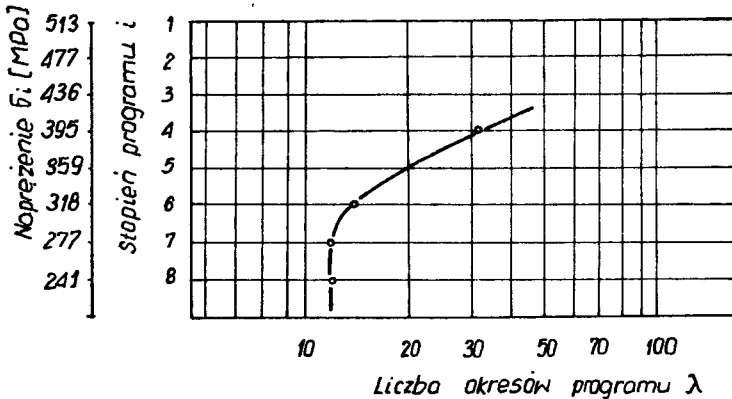
$$n_0 = 10^5 \text{ cykli}, \quad \xi = 0,56$$

Zestawienie wyników badań podano w dodatku /tab. D.12, D.13/, natomiast wykresy na rys. 43 i 44.

Liniami przerywanymi połączono punkty odpowiadające wartościom średnim λ_1 dla poszczególnych programów obliczonym z 3 lub 4 wyników.



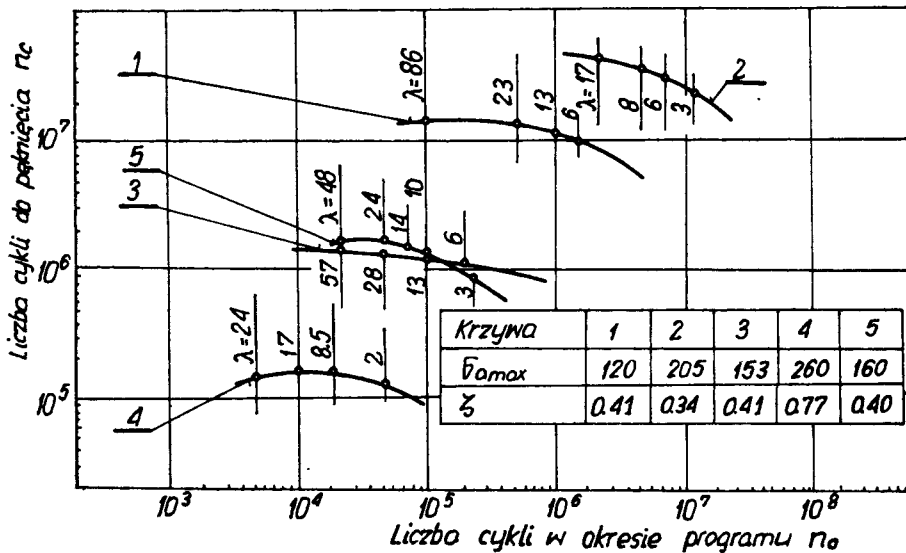
Rys. 43. Wyniki badań /eliptycznych węzłów lutowanych wykonanych ze stali 10BX/ wpływu naprężeń mniejszych od nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej na trwałość zmęczeniową dla początkowych parametrów programu $\sigma_{a_{max}} = 160$ MPa i $\xi = 0,4$



Rys. 44. Wyniki badań /próbek okrągłych - osi - wykonanych ze stali 10/ wpływu naprężeń mniejszych od nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej na trwałość zmęczeniową dla początkowych parametrów programu $\sigma_{a_{max}} = 513$ MPa i $\xi = 0,56$

3.6. Badania wpływu liczby powtórzeń programu obciążeń na trwałość zmęczeniową

W badaniach wpływu liczby okresów programu zrealizowanych do pęknięcia zmęczeniowego na trwałość zmęczeniową stosowano ośmiostopniowy program obciążeń /J/ /rys. 4/. Badania przeprowadzono przyjmując różne liczby cykli w okresie programu przy ustalonej wartości współczynnika wypełnienia i maksymalnego naprężenia w widmie. Przyjęcie różnych liczb cykli w okresie programu daje w konsekwencji różne liczby powtórzeń okresu programu do pęknięcia zmęczeniowego próbki.



Rys. 45. Wyniki badań wpływu liczby okresów programu zrealizowanych do pęknięcia zmęczeniowego na trwałość zmęczeniową, krzywe 1, 3 i 5 opracowano na podstawie wyników badań eliptycznych węzłów lutowanych, krzywe 2 i 4 opracowano na podstawie wyników badań próbek okrągłych z karbem wykonanych ze stali 45

W badaniach próbek okrągłych z karbem stosowano programy obciążeń o następujących parametrach:

a. $\bar{\sigma}_{\max} = 205 \text{ MPa}$, $\xi = 0,34$

$$b. \quad \sigma_{a_{\max}} = 260 \text{ MPa}, \quad \xi = 0,77$$

Wyniki badań wpływu liczby powtórzeń programu obciążeń na trwałość zmęczeniową próbek okrągłych z karbem podano w dodatku /tab. D.14 i D.15/.

W badaniach eliptycznych węzłów lutowanych stosowano następujące programy:

$$a. \quad \sigma_{a_{\max}} = 160 \text{ MPa}, \quad \xi = 0,40$$

$$b. \quad \sigma_{a_{\max}} = 153 \text{ MPa}, \quad \xi = 0,41$$

$$c. \quad \sigma_{a_{\max}} = 122 \text{ MPa}, \quad \xi = 0,41$$

Zestawienie wyników badań eliptycznych węzłów podano w dodatku /tab. D.16 - D.18/. Wykresy zmian trwałości zmęczeniowej od liczby cykli w okresie programu /liczby powtórzeń/ przedstawiono na rys. 45. Punkty poszczególnych wykresów oznaczają wartości średnie trwałości wyznaczone z badań 3 - 4 próbek lub eliptycznych węzłów lutowanych.

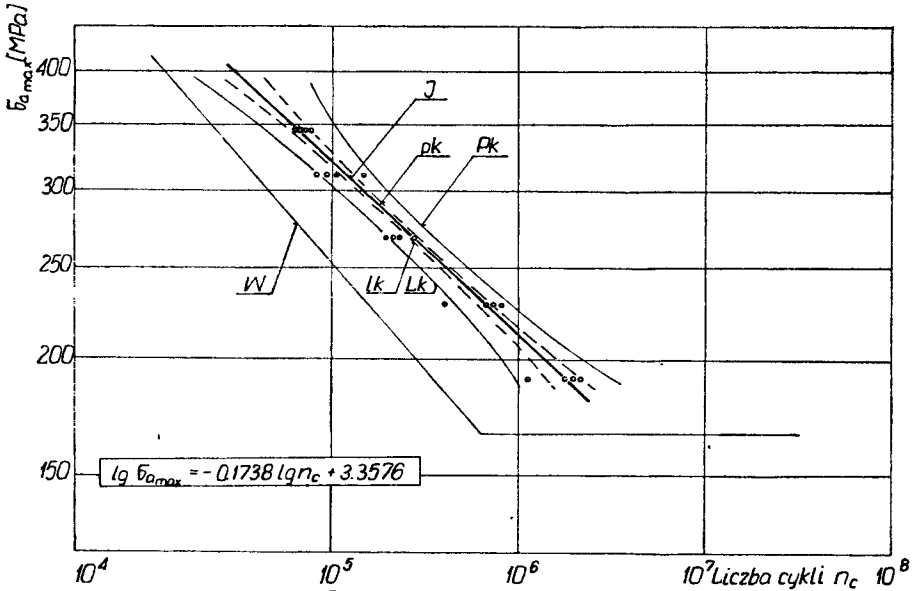
3.7. Badania wpływu ukształtowania programu i parametrów widma obciążeń na trwałość zmęczeniową

Badania wpływu ukształtowania programu i parametrów widma obciążeń przeprowadzono dwoma sposobami. Pierwszy polegał na przyjęciu różnych współczynników wypełnienia widma przy zachowaniu programu obciążeń o ośmiu poziomach naprężeń. W badaniach tych wyznaczono krzywe trwałości zmęczeniowej przyjmując zmienną wartość naprężenia maksymalnego w programie $\sigma_{a_{\max}}$.

Drugi sposób polegał na przeprowadzeniu badań z wykorzystaniem programów przedstawionych na rys. 29. Badania przeprowadzono na wybranych poziomach naprężeń maksymalnych w programie $\sigma_{a_{\max}}$, natomiast współczynnik wypełnienia widma zmieniał się w miarę zmniejszania się liczby poziomów w programie obciążeń.

Wyniki badań trwałości zmęczeniowej próbek okrągłych z kar-

tem dla programu obciążeń o współczynniku wypełnienia $\xi = 0,56$ podane zostały w tab. D.19 dodatku, natomiast w tab. D.20 dla współczynnika $\xi = 0,77$. Opracowane na podstawie tych danych krzywe trwałości zmęczeniowej przedstawione zostały na rys. 46 i 47.



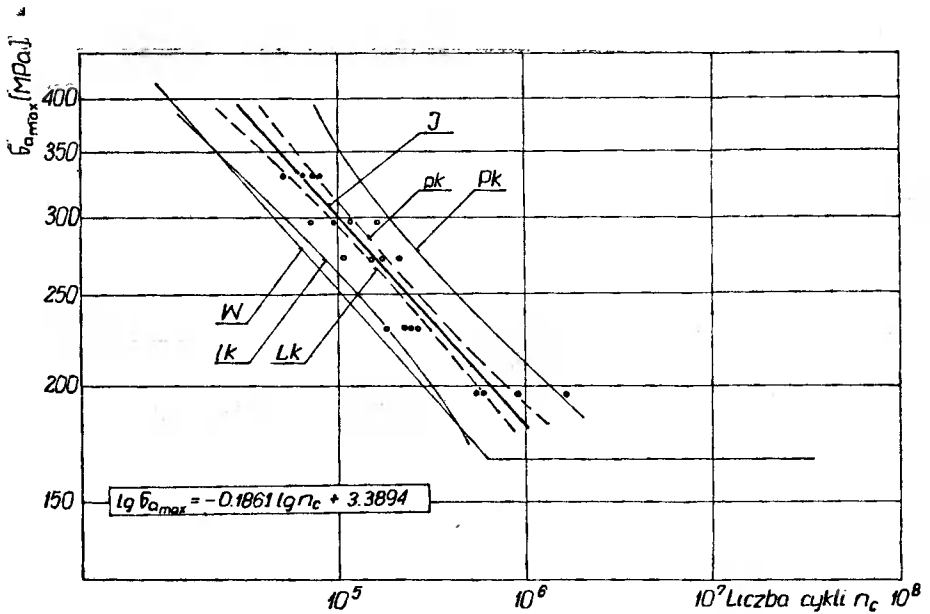
Rys. 46. Krzywa trwałości zmęczeniowej próbek okrągłych z karbem wykonanych ze stali 45 wyznaczona przy obciążeniu J o współczynniku wypełnienia widma $\xi = 0,56$

Prosta regresji odpowiadająca krzywej trwałości zmęczeniowej dla współczynnika wypełnienia $\xi = 0,56$ opisana jest równaniem

$$y = -0,17379x + 3,3576 \quad (75)$$

natomiast krzywa trwałości zmęczeniowej dla $\xi = 0,77$ opisana jest równaniem

$$y = -0,18613x + 3,3894 \quad (76)$$



Rys. 47. Krzywa trwałości zmęczeniowej próbek okrągłych z karbem wykonanych ze stali 45 wyznaczona przy obciążeniu J o współczynniku wypełnienia widma $\xi = 0,77$

Na rys. 48 podano średnie przebiegi prostych regresji odpowiadających krzywom trwałości zmęczeniowej dla okrągłego węzła lutowanego /krzywa a/, eliptycznego węzła lutowanego /krzywa b/ oraz rama roweru składanego typu "Wigry" /krzywa c/. Wymienione proste regresji opisane są równaniami:

- okrągły węzeł lutowany

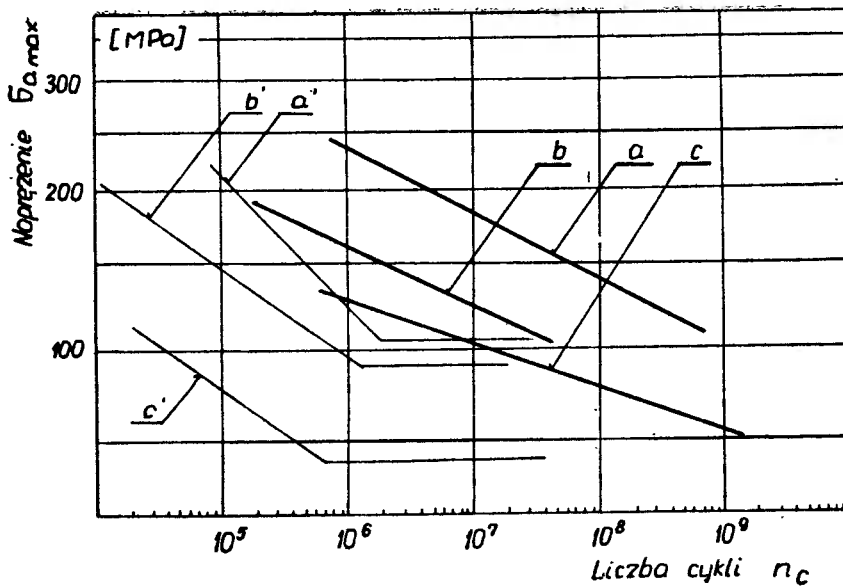
$$y = - 0,12331x + 3,0474 \quad (77)$$

- eliptyczny węzeł lutowany

$$y = - 0,11444x + 2,8888 \quad (78)$$

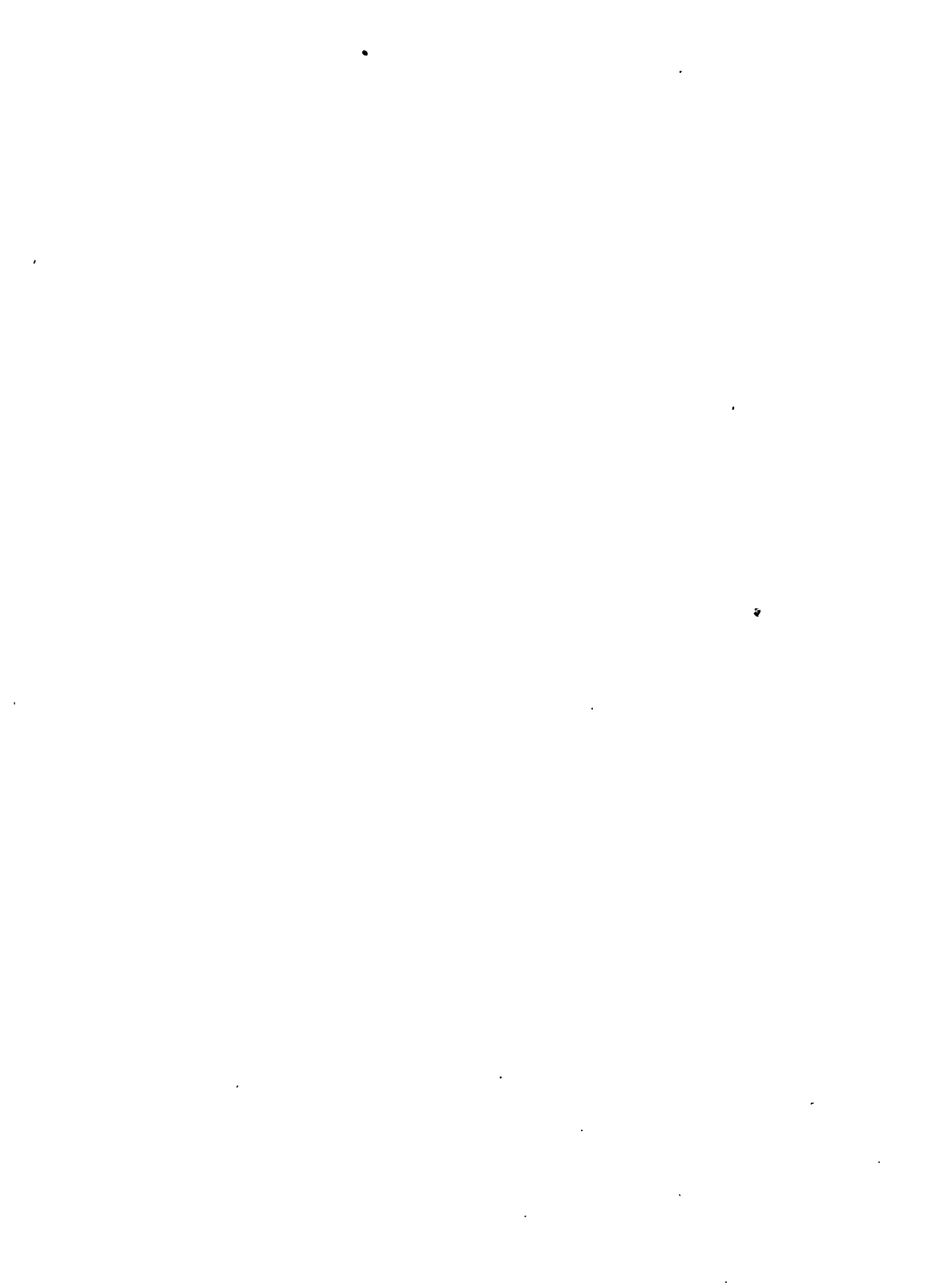
- rama roweru typu "Wigry"

$$y = - 0,11749x + 2,7876 \quad (79)$$



Rys. 48. Krzywe trwałości zmęczeniowej: a - okrągłego wężła lutowanego, b - eliptycznego wężła lutowanego, c - ramy roweru składanego typu 3250 "Wigry"; krzywe zmęczeniowe wymienionych obiektów badań oznaczono odpowiednio znakiem \prime /prim/

Wyniki badań trwałości zmęczeniowej próbek okrągłych z karbem i eliptycznych wężłów lutowanych z wykorzystaniem programów przedstawionych na rys. 29 podano w tab. D.21 - D.24.



4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

4.1. Analiza wyników badań w warunkach obciążeń stałoamplitudowych

Na wykresach krzywych zmęczeniowych przytaczanych w literaturze [6, 36, 116, 218] jest zaznaczony schematycznie zakres przejściowy z ograniczonej do nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej. Zakres ten nie jest uwzględniany w opisie krzywej zmęczeniowej /np. wzór 6 /. Trudność w wyznaczeniu przebiegu krzywej w tym zakresie spowodowana jest znacznym /naturalnym/ rozrzutem wyników badań zmęczeniowych. Badania adekwatności modelu regresji prostoliniowej [44] w odniesieniu do badań przy stałoamplitudowym i programowanym obciążeniu, przeprowadzone na 16 zbiorach danych w pracy [215] wykazały, że przyjmując wyniki badań z zakresu $Z_{g_0} \leq \sigma_a \leq 1,4 Z_{g_0}$ należało odrzucić hipotezę statystyczną o adekwatności modelu. Wstępna ocena wyników badań zmęczeniowych zawarta w pracach [59, 60, 63] potwierdza to spostrzeżenie. Rozważono zatem możliwość aproksymacji wyników badań w tym zakresie linią łamaną lub fragmentem krzywej. Wyznaczenie linii łamanej wymaga znajomości dla każdego składowego odcinka dwóch punktów lub punktu i współczynnika kierunkowego, co z uwagi na duży rozrzut wyników badań byłoby czasochłonne i obarczone dużym błędem. Spośród możliwych krzywych wybrano łuk okręgu, który jednoznacznie określony jest warunkami styczności do gałęzi nieograniczonej i ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej w punkcie $\sigma_a = 1,4 Z_{g_0}$ - punkty L, P - rys. 49.

Posługując się oznaczeniami podanymi na rys. 49, można opisać łuk okręgu równaniem

$$/y_0 - K/2 + /x_0 - H/2 = /K - D/2 \quad (80)$$

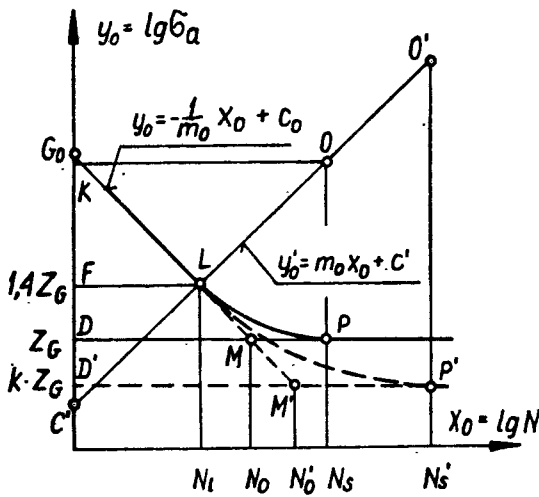
przy czym dla zakresu $G \leq x_0 \leq H$ przyjmuje się ten pierwiastek równania, który spełnia warunek $y_0 \leq F$. Współrzędne środka okręgu $/H, K/$ obliczyć można z zależności.

$$H = E + MP \quad (81)$$

$$K = m_0 \cdot H + c'$$

gdzie:

$$MP = LM = \sqrt{/E - G/^2 + /F - D/^2}$$



Rys. 49. Schematyczne przedstawienie krzywej zmęczenia w zakresie przejściowym z ograniczonej do nieograniczonej wytrzymałości zmęczenia

Po podstawieniu zależności (81) do równania (80) i przekształceniach otrzymuje się równanie krzywej zmęczenia w przejściowym zakresie o postaci.

$$\begin{aligned} & / \lg \sigma_a - m_0 \lg N_s + c' /^2 + / \lg N - \lg N_s /^2 = \\ & = / m_0 \cdot \lg N_s + c' - \lg Z_{E_0} /^2 \end{aligned} \quad (82)$$

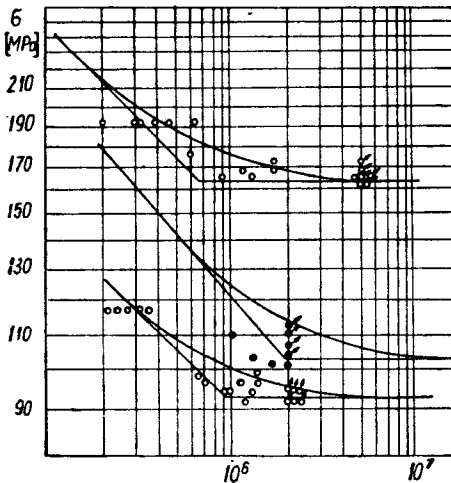
gdzie:

$$\lg N_s = N_0 + \sqrt{[\lg N_0 - m_0 / c - \lg 1,4 Z_{E_0} /^2] + / \lg 1,4 Z_{E_0} - \lg Z_{E_0} /^2}$$

$$c' = \lg 1,4 Z_{E_0} - m_0^2 / c - \lg 1,4 Z_{E_0} /$$

Wszystkie stałe występujące w podanym równaniu wyznacza się z parametrów krzywej zmęczenia opisanej w zakresie ograniczonej wytrzymałości zmęczenia równaniem (6).

Dla ilustracji omówionego zagadnienia na rys. 50 podano wyniki badań zmęzeniowych: a - próbek okrągłych z karbem wykonanych ze stali 45, b - węzłów lutowanych ze stali 10BX, c - osi wykonanych ze stali 10, nawęglanych i hartowanych powierzchniowo.



Rys. 50. Aproxymacja wyników badań zmęzeniowych w warunkach stałoamplitudowego obciążenia w strefie przejściowej łukiem okręgu: a - dla próbek okrągłych z karbem, b - dla okrągłego węzła lutowanego, c - dla eliptycznego węzła lutowanego

Z przytoczonych przykładów wynika, że aproxymacja wyników badań, o tak znacznym rozrzucie, łukiem okręgu jest uzasadniona.

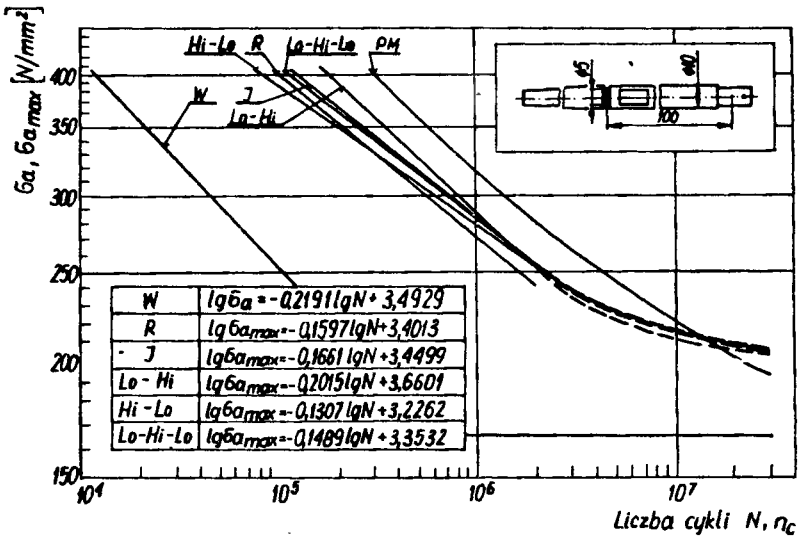
Wpływ naprężeń mniejszych od granicy zmęczenia na trwałość zmęzeniową obliczoną z zastosowaniem hipotez sumowania uwzględnia się przez przyjęcie we wzorze (82) w miejsce Z_{g_0} wartości $Z'_{g_0} = k \cdot Z_{g_0}$. Sumowanie uszkodzeń będzie odbywało się względem wykresu $\sigma_a - N$ wykreślonego linią przerywaną /rys. 49/.

4.2. Analiza czynników związanych z obciążeniem na trwałość zmęzeniową

a. Wpływ sekwencji obciążenia

Krzywe trwałości zmęzeniowej wyznaczone w badaniach zmę -

czeniowych w warunkach obciążenia losowego i programowanego przedstawione na rys. 34, 35, 36, 37 i 38 oraz w tab. 7, posiadają podobne przebiegi. Porównanie wartości współczynników kierunkowych i wyrazów wolnych w równaniach prostych regresji podanych w tab. 7, odpowiadających poszczególnym krzywym trwałości zmęczeniowej wykazuje małe różnice. Na rys. 51 przedstawiono wzajemne położenie prostych regresji oraz średnich wartości trwałości zmęczeniowej wyznaczonej w programowanych badaniach na poziomie wartości maksymalnego naprężenia w widmie równej 205 MPa.



Rys. 51. Wzajemne położenie krzywych trwałości zmęczeniowej wyznaczonych przy obciążeniach programowanych o różnej sekwencji poziomów naprężeń

Ocenę istotności wymienionych różnic można przeprowadzić na podstawie analizy statystycznej, obejmującej sprawdzenie hipotez o równości średnich wartości trwałości zmęczeniowej /test analizy wariancji dla wielu średnich/ oraz sprawdzenie hipotezy o równoległości prostych regresji odpowiadających badaniom przy obciążeniu losowym i programowanym /test równoległości/. Obliczenia zawarte w dodatku, punkt D.3 i D.4, oparto na pracy [44].

Test analizy wariancji dla wielu średnich przeprowadzono dla:

- wszystkich wyników badań trwałości zmęczeniowej i obciążeń na wszystkich poziomach łącznie, dla których wyznaczono proste regresji,
- wyników badań na średnim /z przyjętego zakresu/ poziomie naprężeń $\sigma_{a_{max}} = 285$ MPa,
- wyników badań na najniższym poziomie naprężeń $\sigma_{a_{max}} = 205$ MPa

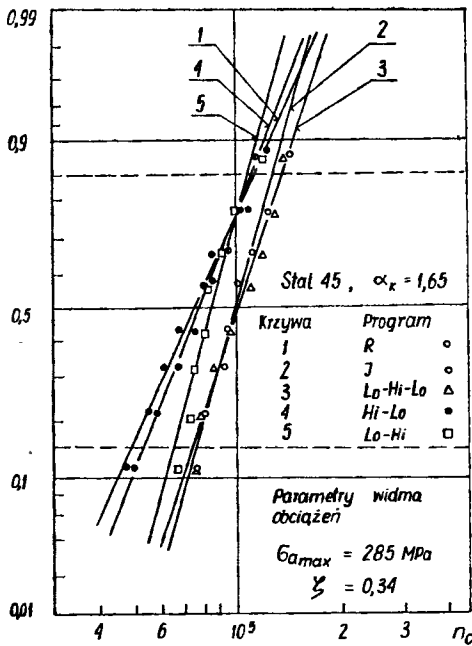
Wyniki badań trwałości zmęczeniowej na poziomie 205 MPa wyraźnie odbiegają od prostych regresji, stąd konieczność przeprowadzenia oddzielnej analizy statystycznej wyników na tym poziomie.

Przeprowadzona statystyczna analiza wykazała, że na poziomie ufności równym 0,95 nie ma podstaw do odrzucenia hipotez: o równości wartości średnich trwałości zmęczeniowej poszczególnych krzywych trwałości dla wyników na wszystkich poziomach łącznie, o równości wartości średnich na poziomach wartości maksymalnych w programie równych 285 i 205 MPa /dane zawarte w tab. D.25 - D.30/ oraz hipotezy o równoległości wyznaczonych prostych regresji odpowiadających poszczególnym krzywym trwałości /dane zawarte w tab. D.31 i D.32/.

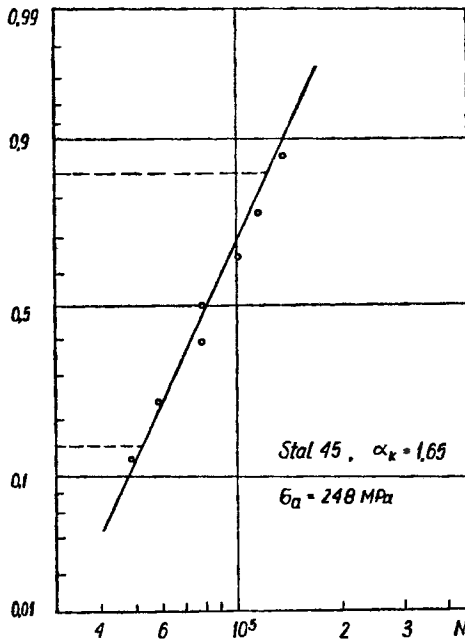
Dla ilustracji analizy statystycznej podano rozkłady trwałości zmęczeniowej wyznaczonej z zastosowaniem przyjętych programów obciążeń i przy obciążeniu pseudolosowym na średnim poziomie naprężeń $\sigma_{a_{max}} = 285$ MPa /rys. 52/. Porównanie wykresów z rys. 52 z wykresem przedstawiającym rozkład trwałości przy obciążeniu stałoamplitudowym /rys. 53/ wykazuje, że rozrzuty wyników badań są zbliżone. Podobne stwierdzenie dotyczące porównań rozrzutów wyników badań przy obciążeniach programowanych i losowych zawarte jest w pracy [28]. Natomiast w pracy [59] stwierdzono nieistotność różnic rozrzutów wyników badań przy obciążeniu stałoamplitudowym i programowanym.

Z przeprowadzonej analizy statystycznej wynika, że różnice w wyznaczonej trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń pseudolosowych i programowanych są nieistotne. Przytoczone stwierdzenie dotyczy całego zakresu naprężeń maksymalnych w widmie, przyjętego w badaniach.

Podobnie porównanie krzywych trwałości zmęczeniowej wyznaczonych z zastosowaniem różnie ukształtowanych programów świadczy o braku istotnego wpływu ukształtowania programu na trwa-



Rys. 52. Rozkład wyników badań trwałości zmęczeniowej wyznaczonej w warunkach obciążeń pseudolosowych /R/ i programowanych /Lo - Hi - Lo; Lo - Hi; Hi - Lo; J/



Rys. 53. Rozkład wyników badań trwałości zmęczeniowej wyznaczonej w warunkach stażoamplitudowych obciążeń

łość zmęczeniową. Krańcowe położenia zajmują krzywe wyznaczone z zastosowaniem programów Lo - Hi /stopniowo rosnących naprężeń/ i Hi - Lo /stopniowo malejących naprężeń/. Maksymalne różnice między wymienionymi krzywymi zachodzą przy wyższych wartościach naprężeń w programie.

Pewnych informacji dostarcza analiza wartości średnich krzywych trwałości zmęczeniowej. W górnym zakresie wartości naprężeń maksymalnych w programie, trwałość zmęczeniowa wyznaczona przy obciążeniu pseudolosowym jest około: 20, 23 i 80 % mniejsza oraz 20 % większa od trwałości wyznaczonej w programowanych badaniach zmęczeniowych z zastosowaniem programów /w kolejności odpowiadającej wymienionym wartościom/: Lo - Hi - Lo; J; Lo - Hi; Hi - Lo. Dla niższych wartości naprężeń maksymalnych w programie wymienione różnice trwałości maleją. Fakt ten można wytłumaczyć na gruncie teorii propagacji pęknięć zmęczeniowych. Jak wykazano w punkcie 2.3, w przypadku wysokich poziomów naprężeń udział etapu rozwoju pęknięć zmęczeniowych jest znaczny. Na rozwój pęknięcia zmęczeniowego może mieć istotny wpływ sekwencja obciążeń [68, 71, 196], co jest związane z kształtowaniem się strefy plastycznej na czole pęknięcia, powodujące większe lub mniejsze spowolnienie jego rozwoju. Otrzymane w górnym zakresie naprężeń różnice wyników programowanych badań z obciążeniem o różnej sekwencji, w przybliżeniu odpowiadają rezultatom osiągniętym w wymienionych pracach.

Wzajemne położenie prostych regresji przedstawione na rys. 51 oraz wartości współczynników kierunkowych i wartości wyrazów wolnych w równaniach prostych regresji podanych w tab. 7 świadczą o tym, że w całym zakresie wartości naprężeń maksymalnych w widmie /programie/ przyjętym do badań, najbardziej zbliżony przebieg do krzywej wyznaczonej przy obciążeniu pseudolosowym /R/ mają krzywe wyznaczone przy programowanym obciążeniu o nieregularnym następstwie stopni /J/ oraz stopniowo rosnącym i malejącym /Lo - Hi - Lo/.

Brak podstaw do odrzucenia hipotezy o równoległości prostych regresji, świadczy o tym, że współczynnik kierunkowy prostych regresji w sposób nieistotny zależy od sekwencji obciążeń. A zatem wartość współczynnika kierunkowego zależna jest podobnie jak dla krzywej zmęczeniowej od cech materiałowych i geometrycznych próbki. Spostrzeżenie to umożliwia wyznaczenie

liczbowych zależności pomiędzy krzywą zmęczeniową a krzywą trwałości zmęczeniowej dla ściśle określonego widma /określonego np. współczynnikiem wypełnienia ξ /.

Dla przyjętych w przedstawionym opracowaniu warunków badań stosunek wartości współczynnika kierunkowego prostej regresji odpowiadającej krzywej zmęczeniowej do wartości średniej współczynników kierunkowych prostych regresji odpowiadających krzywym trwałości zmęczeniowej wynosi około 1,34, natomiast odpowiedni stosunek wyrazów wolnych wynosi około 1,01. Znajomość podanych zależności umożliwia przewidywanie przebiegu krzywej trwałości zmęczeniowej dla określonego widma naprężeń w przypadku, gdy znana jest krzywa zmęczeniowa.

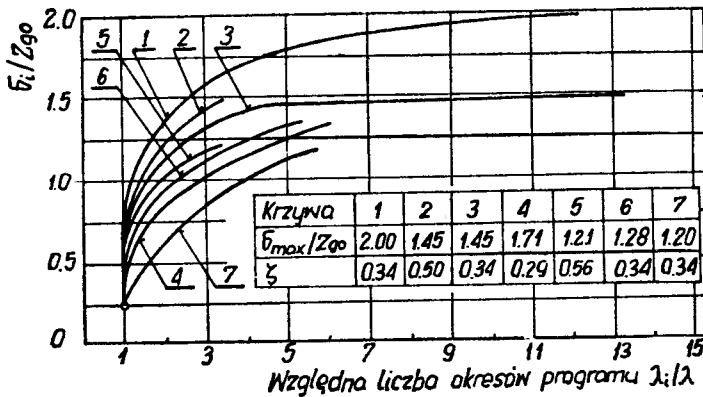
Spostrzeżenie to stało się podstawą do podjęcia badań celem wyznaczenia wymienionych zależności dla różnych parametrów widm obciążeń. Wyniki badań przedstawiono w punkcie 3.7.

Drugim spostrzeżeniem wynikającym z analizy wyników badań przedstawionych na rys. 35, 36, 37 i 38 jest wyraźne odchylenie wyników badań na poziomie $\sigma_{a_{max}} = 325$ MPa od prostych regresji w kierunku wyższych trwałości. Bliższa analiza warunków badań wykazała, że na tym poziomie realizowano średnio 10 powtórzeń programu do pęknięcia zmęczeniowego, gdy w pozostałych przypadkach realizowano tych powtórzeń znacznie więcej /do około 50/. Drugie spostrzeżenie było przyczyną podjęcia badań wpływu liczby powtórzeń okresu programu obciążeń, wynikającej z przyjęcia liczby cykli w okresie programu n_0 , na trwałość zmęczeniową. Wyniki tych badań podano w punkcie 3.5.

b. Wpływ naprężeń mniejszych od granicy zmęczenia na trwałość zmęczeniową

Analiza danych zawartych w tabelach wyników badań wpływu naprężeń mniejszych od granicy zmęczenia /tab. D.9 - D.13/ oraz na wykresach rys. 40 - 44 wykazuje, że naprężenia te mają wpływ na trwałość zmęczeniową. Porównanie wyników badań dla różnych parametrów widma obciążeń i różnych obiektów badań wykazuje, że wpływ ten jest zależny od parametrów widma oraz cech geometrycznych i materiałowych próbek. W celu uściślenia

analizy wyników badań na rys. 54 przedstawiono zbiorczy wykres zależności względnej liczby powtórzeń okresów programu obciążeń do pęknięcia zmęczeniowego λ_1/λ od wartości kolejno pomijanych poziomów naprężeń. Taki układ umożliwia porównanie krzywych wyznaczonych w różnych warunkach badań. Dla pełniejszego obrazu na wykresie naniesione zostały także odpowiednio opracowane wyniki badań z pracy [57] /linie 6 i 7/. Badania te przeprowadzono na gładkich próbkach okrągłych ze stali 45 przy obrotowym zginaniu.



Rys. 54. Wykresy wpływu naprężeń mniejszych od nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej na trwałość zmęczeniową : 1, 2, 3 - krzywe z badań próbek okrągłych z karbem, wykonanych ze stali 45, 4 - krzywa z badań eliptycznego węzła lutowanego, 5 - krzywa z badań osi, 6 i 7 - krzywe z badań próbek okrągłych gładkich wykonanych ze stali 45 opracowane na podstawie badań zawartych w pracy [27]

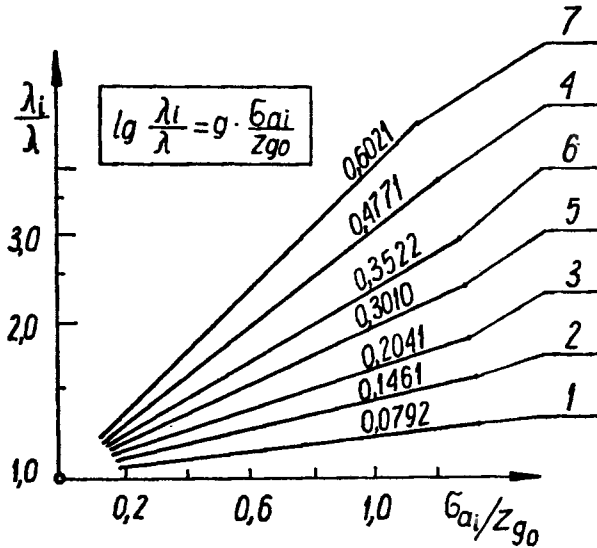
Krzywe 1, 2 i 3 odpowiadają wynikom badań próbek okrągłych z karbem, krzywa 4 - eliptycznym węzłem lutowanym oraz krzywa 5 wynikiem badań osi. Charakter wykresów wskazuje na możliwość aproksymacji wyników badań krzywymi o równaniu

$$\lg \frac{\lambda_1}{\lambda} = g \cdot \frac{\sigma_{a1}}{z_{g0}} \quad (83)$$

gdzie:

g - współczynnik

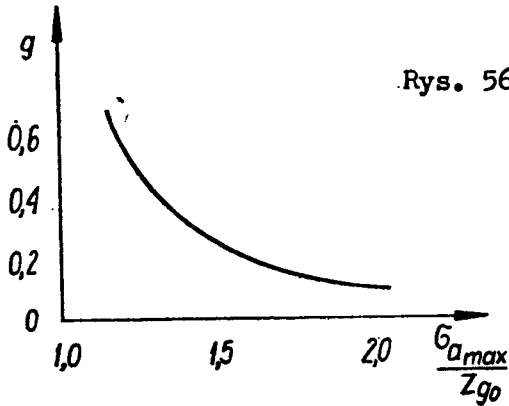
A zatem wykresy z rys. 54 przyjmą postać, jak na rys. 55. Oznaczenia wykresów na rys. 54 i 55 są zgodne.



Rys. 55. Wykresy wpływu naprężeń mniejszych od granicy zmęczenia na trwałość zmęczeniową w układzie semilogarytmicznym /oznaczenia linii zgodne z oznaczeniami podanymi na rys. 54/

Porównując krzywe odpowiadające próbkom ze stali 45 /krzywe 1, 2, 3, 6, 7/ stwierdzić można, że wpływ naprężeń mniejszych od granicy zmęczenia rośnie w miarę zmniejszania się wartości maksymalnego naprężenia w widmie / $\sigma_{a_{max}}$ / i współczynnika wypełnienia widma / ξ /. Zależność współczynnika g od wartości maksymalnego naprężenia w widmie przedstawiono na rys. 56.

Podobne porównanie krzywych wyznaczonych przy zbliżonych parametrach widma /krzywa 3 z 4 i 1 z 5/ wykazuje, że większy wpływ na trwałość zmęczeniową mają naprężenia niższe od granicy zmęczenia w badaniach próbek wykonanych ze stali 10BX.



Rys. 56. Zależność współczynnika g od względnej wartości maksymalnego naprężenia w widmie dla próbek okrągłych z karbem wykonanych ze stali 45

Przedstawione wyniki badań umożliwiają uogólnienie danych zawartych w literaturze [18, 57, 185], dotyczących wpływu naprężeń mniejszych od granicy zmęczenia, w aspekcie parametrów widma obciążeń i cech materiałowych próbek i elementów maszyn. Stwierdzić można jakościową i ilościową zgodność poszczególnych danych literaturowych z osiągniętymi rezultatami. Pewne kontrowersje budzi pogląd przedstawiony w pracy [51] ograniczający wpływ naprężeń mniejszych od granicy zmęczenia jedynie do etapu rozwoju pęknięć zmęczeniowych. Stwierdzenie to wydaje się dyskusyjne. Dla programów o dużej intensywności obciążeń /duża wartość maksymalnego naprężenia $\sigma_{a_{max}} \geq 1,5 Z_{g_0}$ i współczynnika $\xi \geq 0,5$ / etap ten, jak wykazano w punkcie 2.3, jest stosunkowo długi, a wpływ naprężeń mniejszych od granicy zmęczenia - mały. W badaniach z zastosowaniem programów o małej intensywności obciążeń / $\sigma_{a_{max}} < 1,5 Z_{g_0}$ i $\xi < 0,5$ / obserwuje się zjawiska przeciwne. Jak wykazano np. w pracy [216] etap rozwoju pęknięcia zmęczeniowego stanowił w skrajnym przypadku 35% całkowitej trwałości, natomiast wpływ naprężeń mniejszych od granicy zmęczenia w tych warunkach znaczny. Badania te przeprowadzono na stalowych próbkach okrągłych z nawierceniem ϕ 0,6 mm w próbie obrotowego zginania.

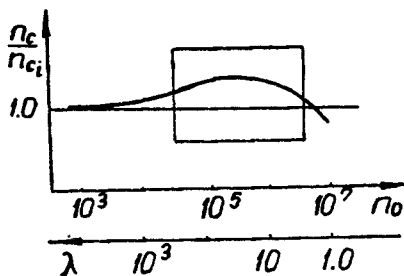
Dalszych badań wymaga wyjaśnienie nieciągłości wykresów /linie przerywane/ na rys. 40, 41, 42, 43 przy pomijaniu naprężeń o wartościach zbliżonych do granicy zmęczenia. Podobny efekt zauważono w pracy [18]. Nieciągłość ta może być spowodowana jakościowymi zmianami w procesie zmęczenia w wa-

runkach programowanych obciążeń zawierających jedynie poziomy naprężeń powyżej granicy zmęczenia w stosunku do programów zawierających ponadto poziomy poniżej granicy zmęczenia. Zbyt mała liczba danych uniemożliwia w tym miejscu bliższą ocenę tego zagadnienia.

c. Wpływ liczby powtórzeń okresu programu na trwałość zmęczeniową

Stosowanie w badaniach zmęczeniowych programów obciążeń o małej liczbie cykli w okresie programu n_0 , co prowadzi w konsekwencji do dużej liczby powtórzeń, zbliża warunki stanowiskowych obciążeń do obciążeń eksploatacyjnych o charakterze losowym. W szeregu przypadkach stosowanie małej liczby cykli n_0 napotyka na trudności w realizacji programu obciążeń na stanowisku badawczym /bardzo mała liczba cykli, szczególnie na najwyższych poziomach obciążeń/ spowodowane utrudnionym sterowaniem urządzeniami wymuszającymi obciążenia, co wynika najczęściej z bezwładności układów mechanicznych. Z wielu względów technicznych, a także ekonomicznych programy o większej liczbie cykli n_0 są dogodniejsze.

Analiza danych zawartych w dodatku D.16 - D.18 oraz na wykresach - rys. 45 wskazuje, że w miarę wzrostu liczby powtórzeń okresu programu trwałość zmęczeniowa rośnie osiągając maksimum dla $\lambda \approx 10$, następnie maleje. Prawdopodobny przebieg wykresów przedstawiono na rys. 57.



Rys. 57. Wykres ilustrujący wpływ liczby powtórzeń okresu programu do pęknięcia zmęczeniowego na trwałość zmęczeniową

Prostokątem zakreślono obszar, w którym mieszczą się prezentowane wyniki. W miarę zwiększenia liczby powtórzeń do nieskończoności wykresy dążą do trwałości zmęczeniowej wyzna-

czonej przy obciążeniu losowym. O powyższym świadczyć może fakt, że w większości przypadków trwałość zmęczeniowa wyznaczona w warunkach obciążeń programowanych jest większa od trwałości uzyskanej w warunkach obciążeń pseudolosowych /rys. 51 i 52/.

Realizowanie mniejszej od 10 liczby powtórzeń okresu programu nie jest zalecane ze względu na małą dokładność w ocenie trwałości zmęczeniowej.

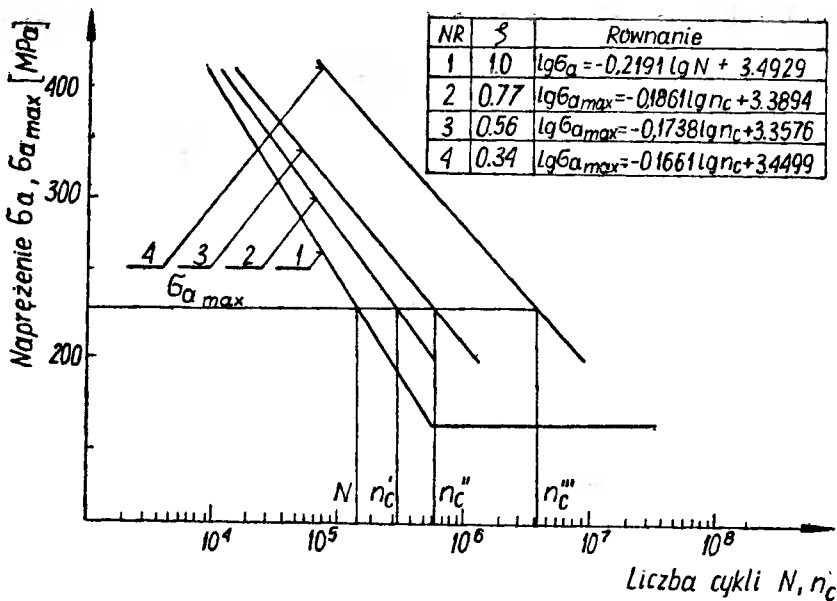
Można zatem stwierdzić, że jeżeli istnieją techniczne możliwości, należy przyjmować do badań programy obciążeń o jak najmniejszej liczbie cykli, aby uzyskać największą liczbę powtórzeń okresu programu do pęknięcia zmęczeniowego. W innych przypadkach należy uwzględnić możliwość otrzymania wyższej trwałości w warunkach obciążeń programowanych.

Z analizy danych literaturowych przedstawionej w punkcie 2.4 wynika, że bezpośrednią przyczyną wzrostu trwałości zmęczeniowej próbek w badaniach z blokowymi programami obciążeń jest umocnienie materiału spowodowane działaniem sinusoidalnych naprężeń o określonych amplitudach i określonych liczbach cykli [145]. Analiza wyników badań wskazuje, że zjawiska te w mniejszym stopniu występują w warunkach obciążeń losowych.

d. Wpływ postaci i parametrów widma obciążeń na trwałość zmęczeniową

Z analizy danych zawartych w tab. D.19 i D.20 wynika, że zgodnie z przewidywaniem trwałość zmęczeniowa maleje w miarę wzrostu współczynnika wypełnienia widma. A zatem krzywe trwałości zbliżają się do krzywej zmęczeniowej. Dla porównania na rys. 58 przedstawiono przebiegi krzywych trwałości zmęczeniowej wyznaczonych w badaniach programowanych z obciążeniem, o różnych wartościach współczynnika ξ . Zestawienie równań tych krzywych podane na rys. 58 wykazuje zbliżone wartości wyrazów wolnych. Spostrzeżenie tego rodzaju poczynione zostało już w punkcie 4.2.a.

Wyraz wolny w równaniu prostej regresji jest wytrzymałością zmęczeniową materiału przy liczbie cykli równej 1,0 w przypadku, gdyby materiał zachował niezmiennione własności zmęczeniowe takie, jakie posiada w zakresie ograniczonej wytrzymałości.



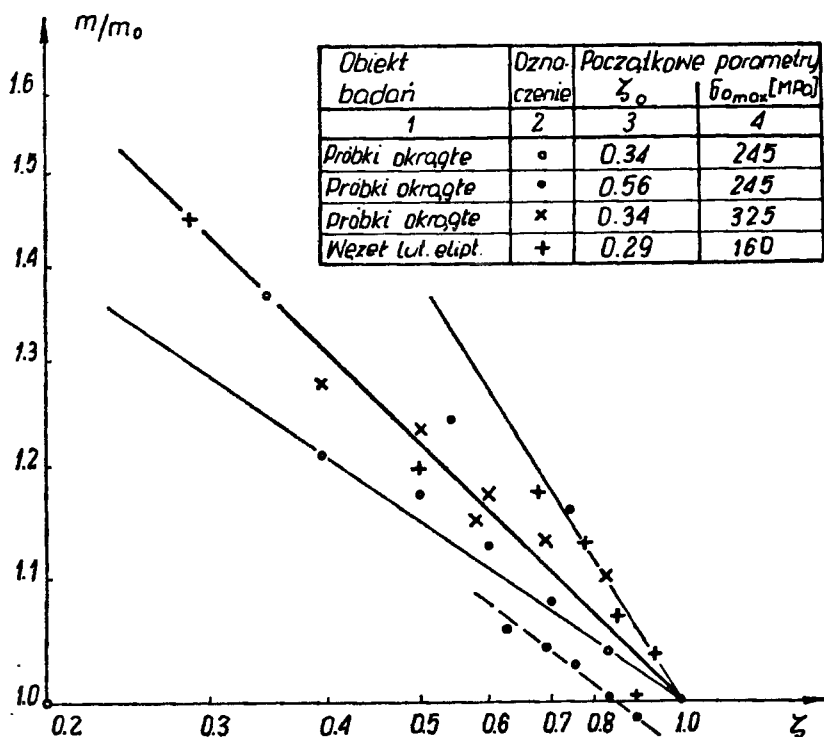
Rys. 58. Wzajemne położenie krzywych trwałości zmęczeniowej próbek okrągłych z karbem wykonanych ze stali 45 wyznaczonych w badaniach z programami obciążeń o różnych współczynnikach wypełnienia widma , 1 - krzywa zmęczeniowa - $\xi = 1,0$, krzywa 2 - $\xi = 0,77$, krzywa 3 - $\xi = 0,56$, krzywa 4 - $\xi = 0,34$

Poza zakresem ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej przedstawiony model materiału odbiega znacznie od materiałów rzeczywistych i nie może być stosowany do analizy wytrzymałości zmęczeniowej w zakresie małej liczby cykli oraz w zakresie nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej. Można zatem postawić hipotezę, że wyrazy wolne krzywych trwałości zmęczeniowej wyznaczone dla różnych współczynników wypełnienia widma są takie same. W dodatku, w punkcie D.4 /tab. D.33 i D.34/ przeprowadzono odpowiednią analizę statystyczną [2]. Analiza dotyczy krzywych przedstawionych na rys. 58 oraz krzywych zmęczeniowych i krzywych trwałości dla eliptycznego węzła lutowanego, okrągłego węzła lutowanego oraz ramy rowerowej typu "Wigry". Jak wynika z porównania obliczonej statystyki z wartością graniczną /tab. D.33 kol. 7 i 8/ nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o równości wyrazów wolnych badanych prostych regresji, odpowiadających krzywym zmęczeniowym i krzywym trwałości zmęc-

zeniowej dla poszczególnych obiektów badań.

Na podstawie danych zawartych w tabelach wyników badań trwałości zmęczeniowej, można dokonać analizy stosunku wartości współczynnika kierunkowego prostej regresji $1/m$ odpowiadającej trwałości zmęczeniowej wyznaczonej w programowanych badaniach do wartości współczynnika kierunkowego prostej regresji $1/m_0$ odpowiadającej trwałości wyznaczonej przy stałoamplitudowym obciążeniu, w zależności od współczynnika wypełnienia widma ξ .

Obliczone na tej podstawie wartości przedstawiono w układzie bilogarytmicznym na rys. 59. Na wykresie przedstawiono wartości obliczone dla całych krzywych trwałości zmęczeniowej oraz wartości obliczane dla wybranych poziomów naprężeń i różnie ukształtowanych programów /tab. D.22 - D.24/.



Rys. 59. Zależność stosunku wartości wykładników potęg w równaniach krzywej trwałości zmęczeniowej - m i krzywej zmęczeniowej - m_0 , od wartości współczynnika wypełnienia widma ξ

W drugiej grupie wyników badań obserwuje się dość znaczny rozrzut szczególnie dla ξ bliskiego 1,0. Rozrzut ten spowodowany jest poza wpływem naturalnych czynników związanych z niejednorodnością cech geometrycznych i materiałowych badanych obiektów, znacznym zróżnicowaniem postaci programów obciążeń zawierających różne liczby poziomów obciążeń /od 3 - 8/ przy zbliżonych wartościach współczynnika ξ .

Obserwuje się wyraźny spadek oszacowanej trwałości zmęczeniowej wyznaczonej w programowanych badaniach z mniejszą liczbą poziomów w stosunku do programowanych badań z większą liczbą poziomów naprężeń przy zachowaniu tych samych parametrów programu / $\sigma_{a_{max}}$ i ξ /. Powyższe stwierdzenie świadczy o tym, że w przypadku uproszczenia programu obciążeń przez pominięcie poziomów nieistotnie wpływających na kumulację uszkodzeń zmęczeniowych, początkowa liczba poziomów powinna być taka, aby po uproszczeniu pozostało co najmniej 5 poziomów. Wyznaczona prosta przechodzi przez punkt /1, 1/ układu, ponieważ dla współczynnika $\xi = 1,0$ wartość stosunku m_0/m jest równa także 1,0. A zatem seria wyników badań próbek okrągłych dla programu o $\sigma_{a_{max}} = 245$ MPa i początkowej wartości $\xi = 0,56$ wyznaczona na podstawie danych z tab. D.22 /linia przerywana na wykresie/ zawiera błąd systematyczny w ocenie trwałości zmęczeniowej i powinna być odrzucona. Błąd ten spowodowany był najprawdopodobniej błędem popełnionym przy wzorcowaniu układu pomiarowego.

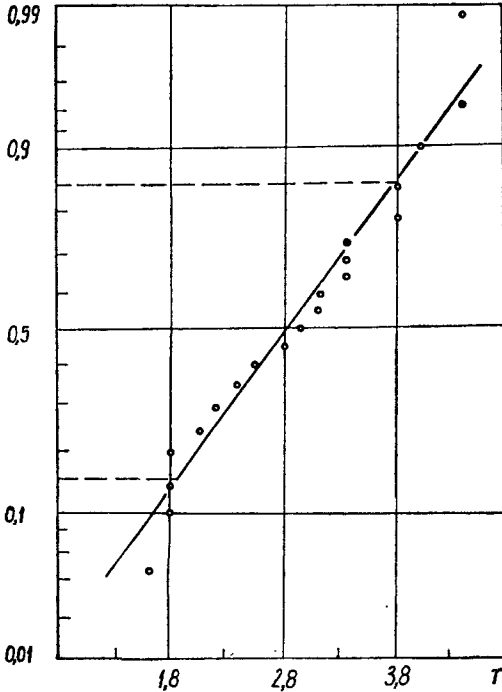
Prostą przechodzącą przez wyznaczony zbiór punktów i spełniającą warunek przejścia przez punkt /1, 1/ opisuje równanie:

$$\frac{m}{m_0} = \frac{1}{\xi^r} \quad (84)$$

Wykładnik potęgi r wyznaczony dla skrajnych punktów naniesionych na wykresie zawiera się w granicach /0,16 - 0,44/ dla linii ciągłej, na wykresie $r = 0,28$. Pełny rozkład wartości r podano na rys. 60, z którego wynika, że rozkład normalny zadawalająco aproksymuje rozkład wyników z badań.

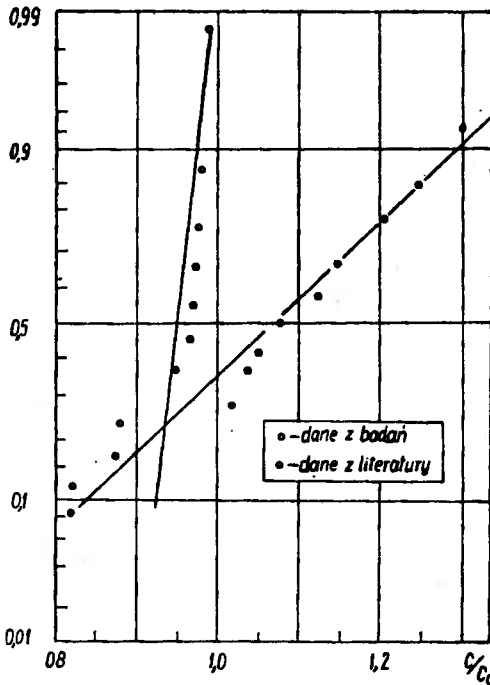
Celem dodatkowego sprawdzenia rozważań, poddano analizie wyniki badań zawarte w literaturze [59, 174]. Do analizy wykorzystano krzywe zmęczeniowe σ/N i krzywe trwałości $\sigma_{a_{max}}/n_c$

wyznaczone w wymienionych pracach. Brak danych źródłowych /protokóły z badań/ powoduje, że przedstawiona analiza ma charakter przybliżony.



Rys. 60. Rozkład wartości wykładnika potęgi r

Wartości stosunku wykładników potęg m/m_0 i wyrazów wolnych c/c_0 podano w tab. 8. Z tabeli tej wynika, że wartości m/m_0 mieszczą się w zakresie wartości uzyskanych z badań w niniejszej pracy /rys. 59/, podobnie wartości c/c_0 zbliżone są do 1,0 dla stali, natomiast nieznacznie przekraczają 1,0 dla stopów aluminium. Łączny rozkład tych wartości na tle wartości podanych w dodatku w tab. D.34, podano na rys. 61. Przytoczone dane w 3 wierszu tab. 8 dotyczące badań z zastosowaniem widm o różnej asymetrii cykli R świadczą o nieznacznym wpływie średnich naprężeń na wartość c/c_0 .



Rys. 61. Rozkład wartości c/c_0 /porównanie wyników z badań z danymi literaturowymi/

Tabela 8

Zestawienie wartości m/m_0 i c/c_0 opracowane na podstawie danych literaturowych

Lp.	Materiał i warunki badań	Zmienny parametr	m/m_0	c/c_0	Źródło
1	2	3	4	5	6
1	Stal /Cr-V/, $\alpha_k = 3,5$	$R_m = 1100$ MPa	1,66	1,05	(59)
2	Rozciąganie - ściskanie,	$R_m = 900$ MPa	1,66	1,02	(59)
3	$R = - 0,4$	$R_m = 750$ MPa	1,66	1,04	(59)
4	Stal /Cr-Ni/, $R_m = 900$ MPa,	$\alpha_k = 1,20$	1,08	1,09	(59)
5		$\alpha_k = 1,85$	1,62	0,88	
6	$R = - 1,0$	$\alpha_k = 2,7$	1,95	0,81	
7	Stop aluminium 2024-ST,	$R = - 0,1$	1,30	1,21	(59)
8	zginanie, $\alpha_k = 2,0$,	$R = - 0,4$	1,30	1,25	
9	$R_m = 400$ MPa, $R_e = 250$ MPa	$R = - 1,0$	1,30	1,30	

cd. Tab. 8.

1	2	3	4	5	6
10	Stale: St 35, 18G2AV, 10HAV3	złącze spawane doczołowe	1,1	1,12	(174)
11	Stal 15G2ANNb, program Lo - Hi - Lo	złącze spawane krzyżowe	1,1	1,15	

4.3. Obliczenia trwałości zmęczeniowej oparte na relacjach między krzywymi zmęczeniowymi wyznaczanymi w warunkach stałoamplitudowych i programowanych obciążeń

a. Założenia metody obliczeń

Z analizy przedstawionej w punkcie 2.3 wynika, że źródłem niedokładności obliczeń zmęczeniowych opartych na hipotezach kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych jest niewłaściwy dobór parametrów w nich występujących.

Stwierdzone w punkcie 4.2 zależności występujące między krzywymi trwałości zmęczeniowej a krzywymi zmęczeniowymi dla danego obiektu, wyznaczonymi w różnych warunkach obciążenia, pozwalają na wyznaczenie trwałości zmęczeniowej z pominięciem hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych.

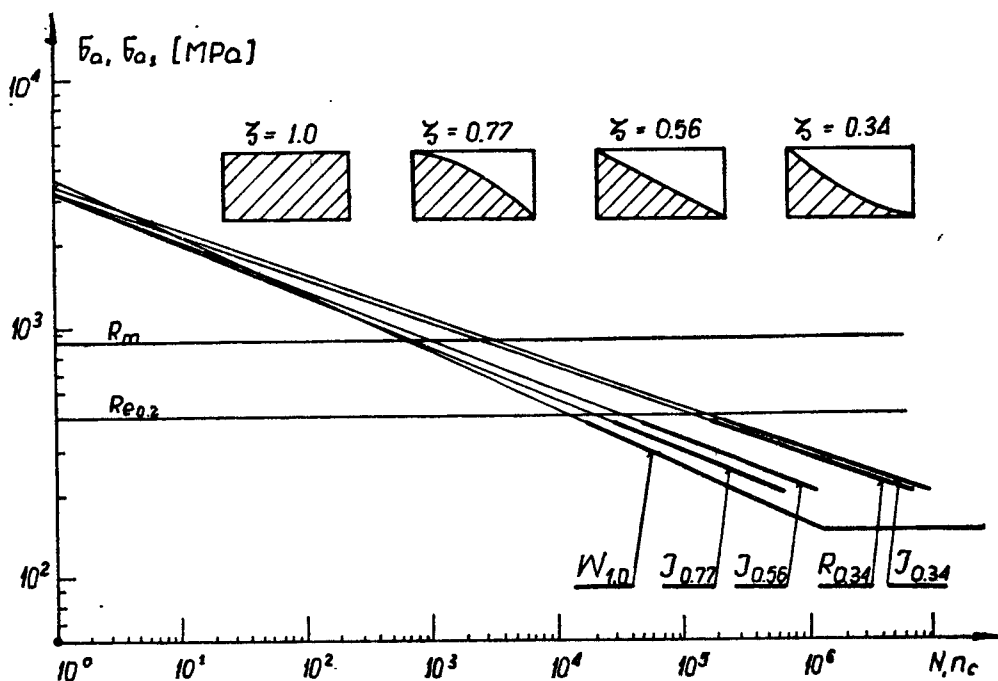
Obliczenia te oparte są na następujących założeniach:

- proces kumulacji jakościowo jest niezależny od widma obciążeń,
- kumulacja uszkodzeń zmęczeniowych ilościowo zależy od parametrów widma obciążeń /maksymalnego obciążenia w widmie i współczynnika wypełnienia widma/,
- obciążenie stałoamplitudowe jest szczególnym przypadkiem widma obciążeń o współczynniku wypełnienia 1,0, a zatem krzywa zmęczeniowa jest szczególnym przypadkiem krzywej trwałości zmęczeniowej,
- przy dążeniu liczby cykli w widmie obciążeń /dla danego elementu lub próbki/do jedności, krzywe trwałości zmęczeniowej przecinają się w tym samym punkcie, ponieważ traci sens postać widma,

- trwałość zmęczeniową elementu maszyny lub próbki dla różnych widm obciążeń o tym samym maksymalnym obciążeniu, zależy głównie od współczynnika wypełnienia widma.

Dwa pierwsze założenia są założeniami przyjętymi w większości omówionych hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych. W świetle wyników badań procesu zmęczenia, szczególnie w etapie rozwoju pęknięcia zmęczeniowego /zjawiska w obszarze czoła pęknięcia/ założenia te mogą budzić pewne zastrzeżenia.

Na rys. 62 przedstawiono ilustrację graficzną podanych założeń na przykładzie badań próbek okrągłych z karbem, wykonanych ze stali 45.

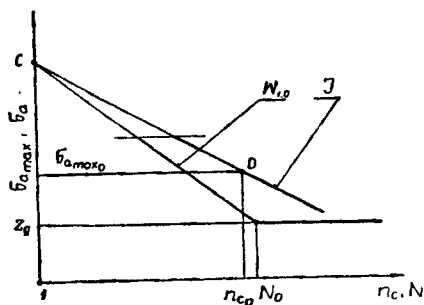


Rys. 62. Wykres ilustrujący zależność pomiędzy parametrami krzywej zmęczeniowej m_0 i c_0 i parametrami krzywych trwałości zmęczeniowej m i c

Przyjmując zatem podane założenia można wyznaczyć krzywą trwałości zmęczeniowej na podstawie znajomości krzywej zmęczeniowej lub dowolnej innej krzywej trwałości zmęczeniowej i do-

wolnego punktu należącego do wyznaczonej krzywej trwałości /rys. 63/.

Rys. 63. Schemat wyznaczania krzywych trwałości zmęczeniowej na podstawie znajomości krzywej zmęczeniowej i jednego punktu krzywej trwałości



Fakt ten ma duże znaczenie dla skrócenia czasu badań, ponieważ wymaga przeprowadzenia programowanych badań zmęczeniowych /które są czasochłonne/ jedynie celem wyznaczenia jednego punktu krzywej /kilka prób zmęczeniowych na jednym poziomie obciążenia maksymalnych w widmie/.

b. Ogólny schemat obliczeń

Równanie prostej regresji odpowiadającej krzywej trwałości zmęczeniowej wyznaczonej dla obliczanego elementu lub węzła konstrukcyjnego i ściśle określonych widmem obciążeń warunków obciążenia można zapisać w postaci (zależność 5):

$$\lg \sigma_{a_{\max}} = - \frac{1}{m} \lg n_c + c \quad (85)$$

Własności zmęczeniowe obliczanego elementu w zakresie ograniczonej wytrzymałości opisuje równanie krzywej zmęczeniowej (zależność 7)

$$\lg \sigma_a = - \frac{1}{m_0} \lg N + c_0 \quad (86)$$

Dla przyjętej wartości naprężenia maksymalnego w widmie $\sigma_{a_{\max}} = \sigma_a$ i założenia, że $c = c_0$ otrzymuje się po przekształceniach zależność na trwałość zmęczeniową

$$\lg n_c = \frac{m_i}{m_0} \cdot \lg N \quad (87)$$

Podstawiając zależność (84) do (87) otrzymuje się zależność na trwałość zmęczeniową w postaci

$$\lg n_c = \frac{1}{\xi^r} \cdot \lg N \quad (88)$$

Wartość wykładnika potęgi r zgodnie z wynikami podanymi w punkcie 4.2.a zawiera się w granicach od 0,16 do 0,44, przeciętnie 0,28 /rys. 60/

Z równania krzywej zmęczeniowej (6) wyznaczyć można wartość N , która równa się

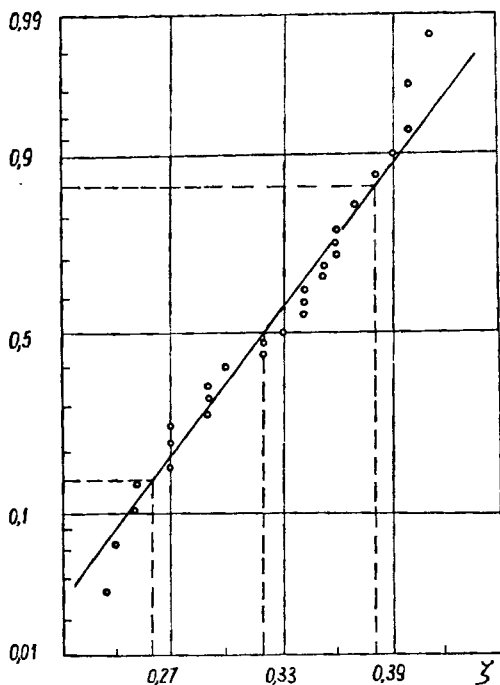
$$\sigma_a^{m_0} \cdot N = C_0^{m_0} \cdot 1, \quad N = \left(\frac{C_0}{\sigma_a} \right)^{m_0} \quad (89)$$

Podstawiając zależność (89) do wzoru (88) po przekształceniach otrzymuje się

$$\lg n_c = \frac{m_0}{\xi^r} \lg \frac{C_0}{\sigma_{a_{\max}}} \quad (90)$$

Wzór (90) opisuje krzywą trwałości, którą wyznaczyć można znając parametry krzywej zmęczeniowej m_0 i C_0 oraz współczynnik wypełnienia widma ξ . Jednakże wzór ten może być stosowany jedynie dla wartości $\sigma_{a_{\max}} \geq 1,4 Z_{E_0}$, natomiast dla zakresu $Z_{E_0} \leq \sigma_{a_{\max}} < 1,4 Z_{E_0}$ należy stosować wzór (88). Podane zakresy stosowania wzorów (88) i (90) wynikają z opisu krzywej zmęczeniowej z uwzględnieniem zakresu przejściowego z ograniczonej do nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej /punkt 4.1/. Proponowana metoda wykazuje istotne zalety w stosunku do metod opartych na hipotezach kumulacji uszkodzeń

zmęceńowych. Zalety te polegają przede wszystkim na tym, że unik się konieczności doboru hipotezy odpowiedniej do warunków badań, co jak wykazała analiza przedstawiona w punkcie 2.3 jest bardzo skomplikowane, nie jest także konieczne posiadanie danych dotyczących całego widma /liczby cykli na poszczególnych stopniach naprężeń lub funkcji gęstości prawdopodobieństwa $f(\xi)$ /, a wystarczy znać jedynie jeden parametr - współczynnik wypełnienia widma. Współczynnik ten jest łatwy do określenia dla typowych elementów maszyn i może być przedstawiony w formie tabel lub wykresów, mieści się np. dla elementów układów nośnych pojazdów jednośladowych w granicach 0,24 - 0,4. Zestawienie danych dla pojazdów jednośladowych opracowane na podstawie pracy [233] zostało podane w dodatku /tab. D.35/, natomiast rozkład wartości ξ na rys. 64.



Rys. 64. Rozkład wartości współczynnika wypełnienia widma dla układów nośnych pojazdów jednośladowych

Zależność (90) ma postać znacznie prostszą niż całkowite wyrażenia dla wyznaczenia trwałości zmęczeniowej wynikające z zastosowania hipotez sumowania uszkodzeń. Fakt ten ma istotne znaczenie w obliczeniach inżynierskich.

c. Porównanie wyników badań i obliczeń trwałości zmęczeniowej

Proponowaną metodę obliczeń, która w dalszym ciągu oznaczona będzie literą A, można zweryfikować na podstawie wyników programowanych badań zmęczeniowych. Interesujące jest także porównanie wyników obliczeń według proponowanej metody A z wynikami obliczeń z zastosowaniem wybranych hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych: Palmgrena - Minera FM, Serensena S, Cortena - Dolana CD i Freudenthala - Hellera FH. Jak zaznaczono /punkt 2.3/ na dokładność obliczeń znaczny wpływ ma dobór parametrów występujących w poszczególnych hipotezach. Parametry te, dane dotyczące własności zmęczeniowych badanych obiektów i wartość współczynników wypełnienia widma podano w tab. 9. Doboru parametrów występujących w hipotezach CD i FH dokonano na podstawie pracy [235], która poświęcona była m.in. wyznaczeniu zakresów zastosowań wybranych hipotez oraz wyznaczeniu wymienionych parametrów. Ponadto w ocenie wykładnika potęgi b w hipotezie CD kierowano się zaleceniami zawartymi w pracy [86], natomiast w ocenie wykładnika potęgi d w hipotezie FH kierowano się zaleceniami zawartymi w pracy [55]. Do wyznaczenia trwałości zmęczeniowej zastosowano: dla hipotezy CD zależność (46), natomiast dla hipotezy FH zależność (48). Obliczenia według hipotezy PM przeprowadzono stosując jej pierwotną formę, to znaczy przyjmując $a = 1,0$ i sumując uszkodzenia od naprężeń $\sigma_{ai} \geq Z_g$ [148, 180]. Trwałość zmęczeniową wyznaczono z zależności (18). Do obliczeń współczynnika a według zależności (43). W hipotezie Serensena przyjmowano współczynnik k kierując się wykresami podanymi na rys. 55 oraz zaleceniami podanymi w pracach [33] i [185]. Wartość wykładnika potęgi r w metodzie A przyjęto na podstawie wykresu podanego na rys. 60. Taki dobór danych do obliczeń stwarza w przybliżeniu podobne warunki wyjściowe dla wszystkich metod. Warunki te sprzyjają, wyższej niż w warunkach praktycznych zastosowań, dokładności obliczeń ponieważ oparte są na danych źródłowych z badań obliczanych obiektów lub obiektów podobnych.

Wyniki badań i obliczeń trwałości zmęczeniowej próbek okrągłych z karbem podano w tab. 10, w której średnią wartość

Tabela 9

Dane do obliczeń trwałości zmęczeniowej

Lp.	Nazwa obiektu	Zmęczeniowe		Współ- czynnik	Parametry						
		Z _{g0} [MPa]	m ₀		CD			FH			
					r	b ₁	b ₂	N ₁ ^{**}	N ₂ ^{**}	d ₁	d ₂
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Próbki okrągłe z karbem	165,6	4,56	0,34	0,2	3,65	5,47	5x10 ²	5x10 ²	5	4
2								5x10 ²	5x10 ²	5	4
3								5x10 ²	5x10 ³	5	4
4	Okrągły węzeł lutowany	103,0	4,11	0,36	0,2	2,0	8,0	5x10 ³	5x10 ³	4	3
5	Eliptyczny wę- zeł lutowany	93,5	6,0	0,29	0,2	4,5	7,5	5x10 ³	5x10 ⁴	6	2
6	Rama roweru typu "Wigry"	43,0	3,24	0,30	0,35	3,0	6,0	5x10 ³	5x10 ³	6	5

Tabela 10

Wyniki badań i obliczeń trwałości zmęczeniowej próbek okrągłych z karbem

I.p.	σ_{max} [MPa]	Średnia trwałość zmęczeniowa $n_c \times 10^{-6}$ cykli																													
		$\xi = 0,34$										$\xi = 0,56$										$\xi = 0,77$									
		E_x	A	PM	S	CD	FH	E_x	A	PM	S	CD	FH	E_x	A	PM	S	CD	FH	E_x	A	PM	S	CD	FH						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20												
1	170	-	65,7	218,9	21,9	43,7	32,33	2,5	11,8	10,5	1,49	5,86	4,812	-	4,44	7,72	5,49	3,3	2,74												
2	190	-	11,5	34,2	3,42	14,2	18,54	1,62	2,43	2,22	0,49	1,91	2,76	0,85	1,00	1,19	0,88	1,09	1,57												
3	205	69,0	7,60	20,98	2,10	8,75	12,68	1,10	1,40	1,36	0,36	1,17	1,89	0,52	0,60	0,731	0,50	0,671	1,074												
4	230	3,40	3,10	6,40	0,64	4,85	7,132	0,50	0,74	0,64	0,20	0,65	1,06	0,30	0,33	0,35	0,24	0,37	0,265												
5	245	1,72	1,90	4,79	0,48	3,63	5,200	0,38	0,47	0,48	0,16	0,49	0,774	0,20	0,21	0,26	0,17	0,28	0,160												
6	285	1,00	0,82	1,70	0,17	0,90	2,441	0,16	0,22	0,23	0,09	0,19	0,114	0,102	0,106	0,131	0,08	0,11	0,0871												
7	325	0,38	0,36	0,93	0,11	0,50	0,3515	0,072	0,106	0,125	0,051	0,106	0,068	0,058	0,053	0,070	0,043	0,061	0,0515												
8	365	0,22	0,18	0,46	0,068	0,29	0,221	0,040	0,055	0,072	0,031	0,063	0,043	0,036	0,029	0,041	0,024	0,036	0,0324												
9	405	0,115	0,116	0,269	0,05	0,183	0,146	0,028	0,038	0,044	0,019	0,039	0,028	0,022	0,020	0,025	0,014	0,022	0,0214												

UWAGA: Objasnienia oznaczeń przyjętych w tabeli podano w tekście.

na poszczególnych poziomach naprężeń maksymalnych w widmie oznaczono Ex. Podobnie wyniki badań i obliczeń dla okrągłego i eliptycznego wężła lutowanego oraz ramy roweru składanego typu "Wigry" podano w tab. 11. Z podanych w tab. 10 i 11 rezultatów wynika różna zgodność obliczonej trwałości zmęczeniowej z trwałością wyznaczoną doświadczalnie. Na wartość tych różnic wpływa metoda obliczeń, parametry widma i cechy konstrukcyjne obiektu badań. Najmniejsze różnice wyników obliczeń w stosunku do wyników badań osiągnięto w obliczeniach według metody A /poza przypadkiem próbek okrągłych z karbem i $\xi = 0,56/$, następnie według hipotezy CD. Skrajne położenia w stosunku do krzywej EX zajmują krzywe trwałości zmęczeniowej S i PM. Trwałość zmęczeniowa wyznaczona według hipotezy S jest znacznie niższa, natomiast wyznaczona według hipotezy PM /w większości przypadków/ znacznie wyższa niż trwałość wyznaczona w badaniach zmęczeniowych. Podobne różnice stwierdzono w pracach [33, 190, 204]. Różnice wyników badań i obliczeń maleją w miarę wzrostu współczynnika wypełnienia widma, spostrzeżenie to potwierdza dane zawarte w pracy [214]. Największe różnice wyników badań i obliczeń stwierdzono w ocenie trwałości zmęczeniowej ram rowerowych. Różnice te wynikają z dużego rozrzutu wyników badań i małej liczby danych do wyznaczenia krzywej zmęczeniowej /Wöhlera/ i krzywej trwałości zmęczeniowej /szerokie przedziały ufności dla wartości średnich wymienionych krzywych, które występują w obliczeniach/. Powyższe stwierdzenia zilustrowano na rys. 65, na którym podano wykresy krzywych trwałości wyznaczone w programowanych badaniach zmęczeniowych Ex oraz krzywe trwałości zmęczeniowej wyznaczone w obliczeniach według metody A oraz hipotez PM, S, CD i FH na tle krzywych zmęczeniowych wyznaczonych przy stałoaamplitudowym obciążeniu. Wykresy a, b i c dotyczą próbek okrągłych z karbem dla widm o współczynniku wypełnienia kolejno: 0,34, 0,56, i 0,76, wykresy c dotyczą okrągłego wężła lutowanego, wykresy d - eliptycznego wężła, natomiast wykresy e - ramy roweru typu "Wigry". Obserwowane przesunięcie krzywej A w stosunku do krzywej Ex /rys. 65 b/ wynikać może ze stwierdzonego w punkcie 4.2.d błędu systematycznego popełnianego w programowanych badaniach zmęczeniowych.

Przedstawione porównanie wyników badań i obliczeń według

Tabela 11

Wyniki badań i obliczeń trwałości zmęczeniowej węzłów lutowanych i ram rowerowych

Lp.	Okrągły węzeł lutowany												Elipsyczny węzeł lutowany												Rama rowerowa typu "Wigry"											
	średnia trwałość zmęczeniowa $n_c \times 10^{-6}$ cykli						średnia trwałość zmęczeniowa $n_c \times 10^{-6}$ cykli						średnia trwałość zmęczeniowa $n_c \times 10^{-6}$ cykli						średnia trwałość zmęczeniowa $n_c \times 10^{-6}$ cykli																	
	$\sigma_{b \max}$ MPa	E_x	A	PM	S	CD	FH	E_x	A	PM	S	CD	FH	E_x	A	PM	S	CD	FH	E_x	A	PM	S	CD	FH											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26											
1	110	-	131,0	357,6	35,76	168,5	40,0	100	80,0	34,4	294,9	29,49	104,6	72,95	50	1800	517,0	185,2	18,52	40,89	16,50															
2	130	80,0	22,5	87,9	8,79	84,8	20,5	110	25,0	11,3	108,7	10,87	59,08	41,18	60	420	139,0	82,82	8,282	22,66	55,58															
3	150	16,0	10,1	33,6	3,36	47,1	11,5	120	9,2	5,27	41,08	4,108	35,08	24,43	70	160	62,5	15,94	1,594	2,59	51,0															
4	170	4,30	5,27	20,1	2,01	2,02	1,47	130	4,6	2,97	25,43	2,543	21,72	15,11	80	70,0	34,5	4,24	0,424	1,68	26,1															
5	190	1,65	2,79	9,27	1,13	1,28	1,05	140	2,7	1,93	13,46	1,346	13,93	9,69	90	32,0	19,4	1,86	0,186	1,15	14,5															
6	210	0,78	1,9	4,44	0,67	0,85	0,78	150	1,5	1,13	8,90	0,890	3,68	0,54	100	15,0	9,58	1,32	0,1428	0,81	8,57															
7	230	0,29	1,12	3,06	0,536	0,58	0,59	160	0,84	0,72	5,07	0,507	2,504	0,48	110	4,8	4,76	0,864	0,1122	0,60	5,32															
8	250	0,15	0,8	2,17	0,42	0,414	0,46	170	0,54	0,45	3,53	0,393	1,741	0,42	120	1,8	1,87	0,652	0,0959	0,453	3,44															
9	-	-	-	-	-	-	-	180	0,43	0,31	2,50	0,350	1,236	0,37	130	0,87	1,07	0,503	0,081	0,349	2,31															

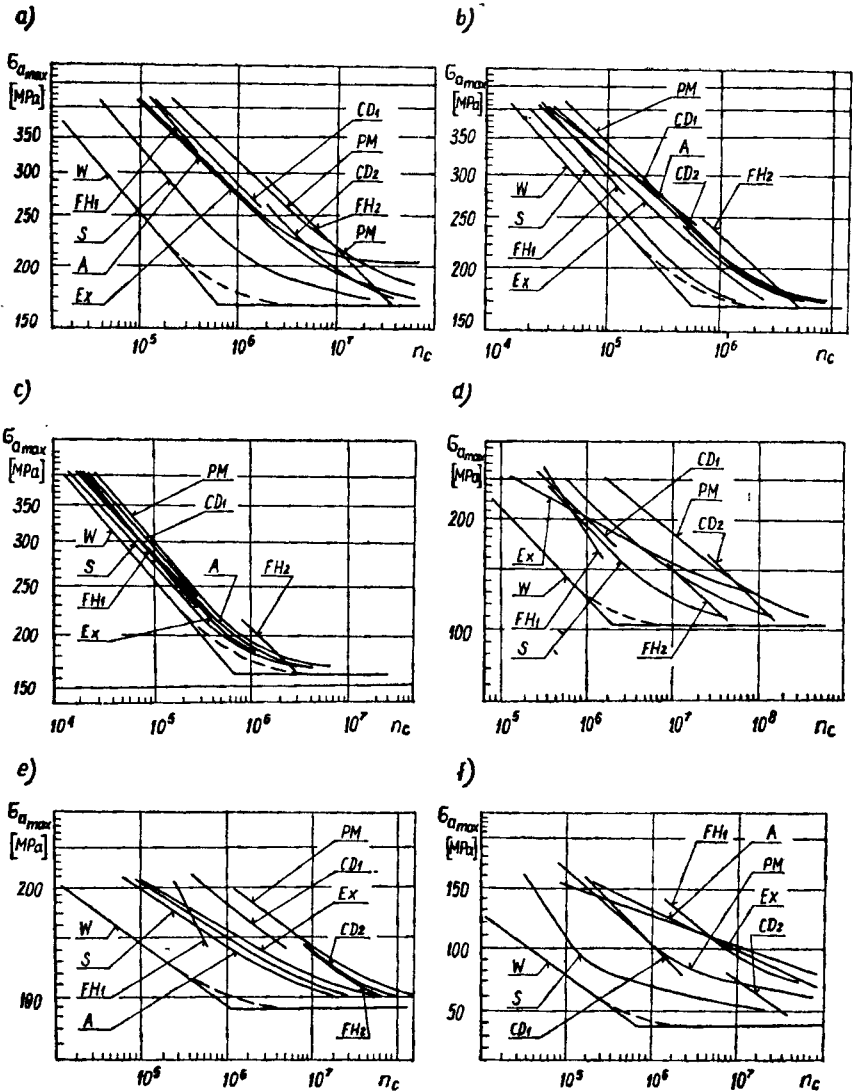
vbranych metod pozwala na dokonanie oceny proponowanej metody. Z danych zawartych w tab. 9 wynika, że w większości przypadków obliczeń /poza ramą roweru/, przyjęto wartość parametrów $r = 0,2$ w całym zakresie naprężeń przyjętym do obliczeń. Należy zauważyć, że do obliczeń według hipotezy CD przyjęto, w celu lepszego przybliżenia wyników obliczeń do wyników badań, dwie różne wartości wykładnika potęgi b w zależności od poziomu naprężeń różne dla każdego obiektu /razem 12 wartości/, natomiast dla hipotezy FH, dwukrotnie więcej parametrów /łącznie 24/. Fakt ten ma istotne znaczenie, ponieważ szczególnie w procesie konstruowania parametry te ocenia się a priori. Prostsze oszacowanie danych do obliczeń /w stosunku do metody A/ ma miejsce jedynie w hipotezie PM i S, jednakże związane jest z małą dokładnością obliczeń.

Z porównania danych zawartych w tab. 10 i 11 oraz na rys. 65 wynika, że krzywe A są przebiegiem najbardziej /w porównaniu z pozostałymi krzywymi S, CD, FH i PM/ zbliżone do krzywych Ex. Fakt ten ma istotne znaczenie, ponieważ wyklucza popełnienie grubych błędów w obliczeniach.

Wadą omawianej metody A jest jej stosunkowo duża wrażliwość na zmianę wartości wykładnika potęgi r . Przyjmowanie jednak małych wartości r z zakresu podanego w punkcie 4.2.d, powoduje przesunięcie krzywej A poniżej krzywej Ex w strefę obliczeń bezpiecznych, w której wyznaczona trwałość jest mniejsza od doświadczalnej.

W przypadkach dokładnych obliczeń wartość wykładnika potęgi r można łatwo wyznaczyć na podstawie programowanych badań na dowolnym poziomie naprężeń z zakresu ograniczonej wytrzymałości posługując się schematem obliczeń według rys. 63.

W ocenie trwałości zmęczeniowej elementów maszyn ważną rolę odgrywa ocena rozrzutu wyników badań. Opierając się na stwierdzeniu o równości rozrzutu wyników badań w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych, programowanych i losowych /punkt 4.2.a/ i [59, 128] można ocenić rozrzut wyznaczonej trwałości zmęczeniowej na podstawie rozrzutu wyników badań przy obciążeniu stałoaamplitudowym. W niektórych opracowaniach [15] krzywe zmęczeniowe przedstawia się w zależności od przyjętego poziomu prawdopodobieństwa. W tej sytuacji dla krzywej zmęczeniowej



Rys. 65. Krzywe trwałości zmęczeniowej: Ex - wyznaczona na podstawie wyników programowanych badań zmęczeniowych; A - obliczona według proponowanej metody; PM, S, CD i FH - obliczone z zastosowaniem hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych: Palmgren - Minera, Serensena, Cortena - Dolana i Freudenthala - Hellera; a, b i c - dla próbek okrągłych z karbem i widm obciążeń o współczynniku ξ kolejno: 0,34, 0,56, 0,77; d - dla okrągłego wężła lutowanego, e - dla eliptycznego wężła lutowanego i f - dla ramy roweru typu "Wigry"

o przyjętym prawdopodobieństwie otrzymuje się z zależności (88) lub (90) krzywą trwałości zmęczeniowej o tym samym prawdopodobieństwie. Przedstawiona analiza dotyczy przyjętych w pracy warunków badań /współczynnik asymetrii cyklu $R = -1,0$; cechy konstrukcyjne obiektów badań; zmienne zginanie/. Najprawdopodobniej stwierdzone związki są słuszne dla innych warunków badań. Potwierdzenie tego stwierdzenia wymaga dalszych badań.

5. WNIOSKI

5.1. Wnioski teoretyczne

Przedstawione wyniki badań i ich analiza wykazały, że w świetle kryterium trwałości zmęczeniowej istnieje możliwość zastąpienia obciążeń losowych obciążeniami programowanymi w badaniach stanowiskowych i obliczeniach przy zachowaniu odpowiednich warunków modelowania obciążeń losowych.

Badania zmęczeniowe próbek okrągłych ze stali 45 z obciążeniem losowym i programowanym wykazały, że różnice wartości trwałości zmęczeniowej wyznaczone na ich podstawie są nieistotne na poziomie ufności 0,95 w całym zakresie naprężeń maksymalnych w widmie przyjętym do badań.

Podobnie w programowanych badaniach zmęczeniowych z wykorzystaniem czterech różnie ukształtowanych programów o wartościach naprężeń stopniowo rosnących /Lo - Hi/, stopniowo malejących /Hi - Lo/, stopniowo malejących i rosnących /Lo - Hi - Lo/ oraz nieregularnym następstwie stopni wartości naprężeń /J/, nie stwierdzono istotnego wpływu ukształtowania programu na wyznaczoną trwałość zmęczeniową.

Do krzywej trwałości zmęczeniowej wyznaczonej przy obciążeniu losowym najbardziej zbliżony przebieg mają krzywe wyznaczone w programowanych badaniach zmęczeniowych ze stopniowo rosnącymi i malejącymi wartościami naprężeń /Lo - Hi - Lo/ i z nieregularnym następstwem stopni wartości naprężeń /J/. Różnice średnich wartości dla wymienionych krzywych wynoszą około 20%.

Nieistotny wpływ sekwencji obciążeń na przebiegi krzywych trwałości zmęczeniowej umożliwia wyznaczenie zależności parametrów krzywych trwałości od parametrów krzywej zmęczeniowej. Podstawowymi zależnościami umożliwiającymi przewidywanie prze-

biegu krzywej trwałości zmęczeniowej na podstawie znanej krzywej zmęczeniowej są: stosunek wartości współczynnika kierunkowego prostej regresji odpowiadającej krzywej zmęczeniowej do wartości współczynnika kierunkowego prostej regresji odpowiadającej krzywej trwałości zmęczeniowej oraz podobny stosunek wyrazów wolnych.

Programowane badania zmęczeniowe próbek okrągłych z karbem z zastosowaniem programów obciążeń o różnych współczynnikach wypełnienia widma, badanie wybranych elementów i węzłów konstrukcyjnych o różnych cechach materiałowych i geometrycznych oraz statystyczna analiza osiągniętych rezultatów wykazały, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy/na poziomie ufności 0,95/ o równości wyrazów wolnych w równaniach prostych regresji odpowiadającym krzywej zmęczeniowej i krzywym trwałości zmęczeniowej. Powyższe świadczy o tym, że proste te przecinają się w jednym punkcie, a różnią się jedynie współczynnikiem kierunkowym /wykładnikiem potęgi w równaniu wykładniczym/.

Współczynnik kierunkowy prostej regresji odpowiadającej krzywej trwałości zmęczeniowej zależy od wartości współczynnika wypełnienia widma. Zależność względnej wartości tego współczynnika obliczona w stosunku do wartości współczynnika kierunkowego prostej regresji odpowiadającej krzywej zmęczeniowej od współczynnika wypełnienia widma, jest zależnością wykładniczą opisaną równaniem (84).

Porównanie trwałości zmęczeniowej wyznaczonej w badaniach zmęczeniowych z zastosowaniem programów obciążeń o tej samej wartości parametrów $\sigma_{a_{max}}$ i ξ lecz z różnymi liczbami poziomów wykazało, że w miarę zmniejszania liczby poziomów trwałość zmęczeniowa maleje.

Analiza wpływu naprężeń mniejszych od granicy zmęczenia na trwałość zmęczeniową wykazała, że wpływ ten zależy od parametrów widma obciążeń i cech konstrukcyjnych obiektu badań.

W przypadku, gdy w widmach obciążeń pominięto naprężenia mniejsze od granicy zmęczenia, trwałość zmęczeniowa wzrosła w niektórych przypadkach / $\xi \approx 0,3$, $\sigma_{a_{max}} / Z_{g0} < 1,4$ / do 400 % trwałości wyznaczonej w badaniach z uwzględnieniem wszystkich poziomów naprężeń.

Dla stali o niskiej wytrzymałości doraźnej i zmęczeniowej /stal 10BX/ wpływ ten jest większy niż dla stali o wyższej wy-

trzymałości /stal 45 i stal 10 nawęglana i hartowana powierzchniowo/.

Przyjęcie małej liczby cykli w okresie programu obciążeń prowadzi do zrealizowania dużej liczby powtórzeń okresu programu do pęknięcia zmęczeniowego i zbliża obciążenia programowane do obciążenia losowego. Badania zmęczeniowe wykazały, że dla różnych parametrów widma obciążeń i różnych obiektów badań w miarę wzrostu liczby powtórzeń okresu programu do pęknięcia zmęczeniowego badanego obiektu trwałość zmęczeniowa rośnie osiągając maksimum dla wartości $\lambda = 10 - 20$, następnie maleje zbliżając się asymptotycznie do trwałości wyznaczonej przy obciążeniu losowym.

Stwierdzone w punkcie 4.2.a zależności między parametrami krzywej zmęczeniowej i krzywymi trwałości zmęczeniowej wyznaczonymi z wykorzystaniem programów obciążeń o różnych parametrach dla danego obiektu, umożliwiają wyznaczenie trwałości zmęczeniowej z pominięciem hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych.

Stosunek wyrazów wolnych w równaniach krzywej zmęczeniowej i krzywych trwałości równy jest 1,0, natomiast stosunek współczynników kierunkowych opisany jest wzorem (84).

W oparciu o wymienione związki trwałość zmęczeniową obliczyć można z wzoru (90)

$$\lg n_c = \frac{m_o}{\xi r} \lg \frac{C_o}{\sigma_{a \max}}$$

Wartość wykładnika potęgi r waha się w granicach od 0,16 do 0,44, średnio 0,28.

W celu zwiększenia dokładności obliczeń w zakresie naprężeń $Z_{G_0} < \sigma_a \leq 1,4$ zaleca się uwzględnić przejście krzywej zmęczeniowej z zakresu ograniczonej do nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej po łuku koła oraz do obliczeń trwałości zmęczeniowej stosować zależność (88) w postaci

$$\lg n_c = \frac{1}{\xi r} \lg N$$

Na podstawie porównania wyników obliczeń według proponowanej metody z wynikami programowanych badań zmęczeniowych stwierdzono ich zadowalającą zgodność. Zgodność ta jest w większości przypadków wyższa niż stwierdzona w obliczeniach na podstawie hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych Palmgrena - Minera, Serensena, Cortena - Dolana i Freudenthala - Hellera.

5.2. Wnioski praktyczne

W punkcie tym sformułowane zostaną wnioski praktyczne dotyczące programowanych badań i obliczeń trwałości zmęczeniowej według metody proponowanej w pracy.

Podstawą programowanych badań i obliczeń trwałości zmęczeniowej są dane z badań eksploatacyjnych dotyczące warunków eksploatacji i obciążeń eksploatacyjnych elementów i układów maszynowych. Dane te umożliwiają wybór czynników eksploatacyjnych mających istotny wpływ na obciążenia zmienne. Pomiary obciążeń w wybranych warunkach eksploatacji w miejscach stanowiących słabe ogniwa układu i statystyczna ocena obciążeń są podstawą opracowania widm obciążeń wykorzystywanych do opracowania programów obciążeń w badaniach stanowiskowych i wykorzystywanych w obliczeniach trwałości zmęczeniowej. Do wyznaczania widm obciążeń zalecana jest schematyzacja losowych obciążeń metodą pełnych cykli /w zakresie wysokocyklicznej wytrzymałości zmęczeniowej/ lub metodą obwiedni /w zakresie małowycyklicznej wytrzymałości zmęczeniowej/.

Z blokowych programów obciążeń proponuje się stosowanie programów o sekwencji J lub Lo - Hi - Lo, z możliwie najmniejszą liczbą cykli w okresie programu.

Pewne przyspieszenie badań można uzyskać przez pominięcie naprężeń mniejszych od granicy zmęczenia. W ustaleniu poziomu naprężeń, poniżej którego leżące stopnie programu mają nieistotny wpływ na trwałość zmęczeniową należy posługiwać się wykresem podanym na rys. 55. Uproszczony w ten sposób program powinien zawierać co najmniej 5 poziomów naprężeń realizowanych podczas badań.

W przypadku obliczeń zmęczeniowych według proponowanej w niniejszej pracy metody należy opracować widmo obciążeń zgodnie z

zaleceniami podanymi wyżej dla programowanych badań. Na podstawie przeprowadzonych badań lub wyników badań podobnych elementów maszyn należy oszacować parametry krzywej zmęczeniowej: granicę zmęczenia Z_G , wykładnik potęgi m_0 i stałą C_0 . We wstępnych obliczeniach w procesie konstruowania zaleca się przyjęcie w zależności (88) lub (90) wykładnika potęgi $r = 0,2$, co odpowiada dolnemu zakresowi wartości r . W wyniku takiego założenia trwałość zmęczeniowa obliczona z wymienionych wzorów będzie prawdopodobnie niższa od szukanej.

Dokładniejszej oceny trwałości zmęczeniowej drogą obliczeń można dokonać wykorzystując dane programowanych badań na dowolnym poziomie naprężeń z zakresu ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej (rys. 63). Podany sposób może być wykorzystany także do opracowania metody przyspieszonych badań trwałości zmęczeniowej, ponieważ umożliwia przewidywanie krzywej trwałości zmęczeniowej w szerokim zakresie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej na podstawie znajomości jednego punktu w sensie probabilistycznym. Fakt ten ma istotne znaczenie w procesie optymalizacji konstrukcji w świetle kryterium trwałości zmęczeniowej ograniczając kosztowne i czasochłonne badania stanowiskowe na różnych poziomach naprężeń celem wyznaczenia krzywej trwałości zmęczeniowej. Zmniejszenie kosztów i czasochłonności badań wynika z małej liczby prób zmęczeniowych /około 5/ w stosunku do dotychczas realizowanych w badaniach celem wyznaczenia krzywej trwałości /około 20 prób/ oraz możliwości prowadzenia badań na stosunkowo wysokim poziomie naprężeń, co wydatnie zmniejsza czas badań.

5.3. Wnioski dotyczące dalszych badań

Analiza dotychczasowego stanu wiedzy wykazała, że istnieje znaczne zainteresowanie metodami oceny trwałości zmęczeniowej elementów maszyn oraz, że nie ma do tej pory metody ogólnej do zastosowania w różnych warunkach badań.

Proponowana w prezentowanej pracy metoda oceny trwałości zmęczeniowej elementów maszyn w warunkach obciążeń losowych i programowanych wymaga dalszego opracowania, polegającego

na weryfikacji doświadczalnej w zróżnicowanych warunkach badań w odniesieniu do rodzaju /osiowe, gnące, skręcające i stany złożone/ i charakteru /losowe, programowane o różnych parametrach statystycznych/ obciążeń oraz cech konstrukcyjnych /geometrycznych i materiałowych/ obiektów badań. Szczególnie obserwuje się małą liczbę badań programowanych przy skręcaniu. Podobna sytuacja istnieje w programowanych badaniach zmęczeniowych w warunkach zmiennych obciążeń kontaktowych /zmęczenie powierzchniowe/.

W najbliższym czasie opracowania wymagają także przyspieszone metody badań programowanych. Możliwość stosowania wymienionych metod w procesie konstruowania wymaga wyznaczenia charakterystyk statystycznych obciążeń eksploatacyjnych dla poszczególnych grup maszyn.

Proponowane metody obliczeń oparte na hipotezach sumowania uszkodzeń zmęczeniowych oraz opartych na stwierdzonych zależnościach między krzywą zmęczeniową a krzywą trwałości zmęczeniowej, jak większość innych metod obliczeń wytrzymałościowych elementów maszyn, są w swej formie zdeterminowane. Metody te jedynie w pewnym stopniu uwzględniają losowość obciążeń eksploatacyjnych i losowość własności zmęczeniowych badanych obiektów.

W zakresie obliczeń istnieje zatem potrzeba wprowadzenia i rozwijania statystycznych metod obliczeń uwzględniających losowy rozkład obciążeń i losowy rozkład własności zmęczeniowych elementów maszyn, ponieważ jak podano w punkcie 2.3 istniejące aktualnie metody statystyczne mają zasadniczo jakościowe znaczenie.

LITERATURA

1. Abn - Akeel A.K.: Estimation of Cumulative Fatigue Damage Under Random Loading, *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME*, 1976
2. Anderson O., Popp W., Schaffranek M., Stermetz D., Stenger H.: Schätzen und Testen, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, New York, 1976
3. Ang A.H.S., Munse W.H.: Practical Reliability Basis for Structural Fatigue, *Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej*, 17, 1975
4. Bendat J.S., Piersol A.G.: Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych, PWN, Warszawa, 1976
5. Belianin A.J.: Vynoslivost robočich povierchnostej zubev pri peremennyh nagruzkach, *Vestnik Mašinostroenia* 12, 1957.
6. Bily M., Terentev V.: A Complete Fatigue S/N Curve, *Materialprüfung* 1, 1973, ss. 10 - 15
7. Bily M., Bukoveczky J.: Digital Simulation of Environmental Processes with Respect to Fatigue. *Journal of Sound and Vibration* 49 /4/, 1976
8. Bily M., Bukoveczky J.: Klasifikace zpusobu cyklického zatežování z hlediska pevnostních vypočtu a laboratorních zkoušek, *Přednášky Mechanických Vlastností Novových Materialu, Nove Město na Moravě*, 1977
9. Błaziński W., Macha E.: A Real - Time Method of Determination of Probable Direction of Fatigue Crack Propagation in Materials, in: *Parallel Computers - Parallel Mathematics*, M. Feilmeier, editor, North-Holland Publishing Company, 1977, ss. 319 - 324
10. Bogdanoff J.L.: A New Cumulative Damage Model, Part 1, *Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics*, 2, 1978, ss. 246 - 250
11. Bogdanoff J.L., Krieger W.: A New Cumulative Damage Model, Part 2, *Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics*, 2, 1978, ss. 251-257
12. Bogdanoff J.L.: A New Cumulative Damage Model, Part 3, *Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics*, 4, 1978, ss. 733 - 739
13. Bojcov B.V.: Statističeskij analiz točnosti metoda uskorennyh ispytanij, *Zavodskaja Laboratorija*, 9, 1972, ss. 1129 - 1132
14. Bolotin V.V.: Ob ocenke resursa konstrukciji pri dejstvi slučajnyh nagruzk. *Sb. - Razčety na pročnost, Mašgiz Vyp.* 9, Moskva 1963
15. Bolotin W.W.: Metody statystyczne w mechanice budowli, Arkady, Warszawa, 1968
16. Bolotin V.V.: Nekotorye matematičeskije i eksperimentalnyje modeli procesov rozrušenija, *Problemy Pročnosti*, 2, 1971, ss. 13 - 20
17. Bolotin V.V.: Stochastic Models of Cumulative Damage in Composite Materials, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 8, Pergamon Press, 1976

18. Borodavko V.A., Slobodjanjuk V.J.: Issledovanie vlijanija na dolgovečnosť niźnego uravnja eksploatacionnogo spektra nagruzok, Zavodskaja Laboratorija, 9, 1971, ss. 1120 - 1123
19. Brzózka G.: Przemysłowe badania hałasu z wykorzystaniem techniki korelacyjnej. Przegląd Mechaniczny 1, 1971
20. Buch A.: Zagadnienia wytrzymałości zmęczeniowej, PWN, Warszawa, 1964
21. Buch A.: Verdreheschwingfestigkeit von Achswellen bei Programmbelastung, Materialprüfung 9, 1972, ss. 306 - 313
22. Buch A.: Comparison of Various Gust Loading Test Results for Notched Specimens with the Aid of the Relative Miner Rule, Materialprüfung, 6, 1979, ss. 193 - 198
23. Bui - Quoc T., Choquet I.E., Biron A.: Cumulative Fatigue Damage on Large Steel Specimens Under Axial Programmed Loading with Nonzero Mean Stress, Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME, July, 1976
24. Bukoveczky J., Bily M.: Uzemi terhelés szimulációja kifaradási szempontból, Jarművek, Mezogazdasági Gepek 23, 1976
25. Burns A.: Fatigue Loadings in Flight: Loads in the Tailplane and Fin of a Varsita. A.R.C. Techn. Rep. C.P. 256, London, 1956
26. Čegolin P.M., Pojda V.N.: Metody algoritmy i programy statističeskogo analiza. Mińsk, 1971
27. Cejtlin V.J.: K voprosu ob ocenne pročnosti v uslavijach mnogokomponentnogo nagruźenja, Problemy Pročnosti, 5, 1976
28. Černous B.A., Pereponov V.J.: Rasseivanie resursa i metody vosproizvedenija nagruźoonyh režimov, Vestnik Mašinostroenija, 6, 1976
29. Conover J.C., Jaeckel H.R., Kippola W.J.: Simulation Field Loading in Fatigue Testing, SAE Transactions, Vol. 75, 1967, praca wydana takźe przez Society of Automotive Engineers, 1974
30. Corten H.T., Dolan T.L.: Cumulative Fatigue Damage, International Conference on Fatigue of Metals. London 1956
31. Czajkowski Z.: Fatigue Data Evaluation and Reduction System /Catalogue/, Servotest Limited. Greenford England, 1976
32. Deja J.: Wpływ krótkotrwałych przeciążeń i niedociążeń na ograniczoną wytrzymałość zmęczeniową stali 45, Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, 1969
33. Deja J., Oświęcimski W.: Kumulacja uszkodzeń w przypadku wybranych wiań naprężeń zmęczeniowych, Prace Naukowe Instytutu Metaloznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, 20, 1976
34. Demut S.: Badania zmęczeniowe elementów maszyn na stanowisku symulacyjnym, Przegląd Mechaniczny, 21, 1977
35. Dengel D., Harig H.: Zur Frage der Grenzlastspielzahl und deren Einfluss auf den Schätzwert der Dauerfestigkeit von Stahl, Materialprüfung, 4, 1974, ss. 88 - 94
36. Dietrych J., Kocańda S., Korewa W.: Podstawy Konstrukcji Maszyn, Cz. 1, WNT, Warszawa, 1974, ss. 370 - 376
37. Dietrych L., Turski K.: Badania zmęczeniowe w złożonym stanie naprężenia, Mechanika Teoretyczna i Stosowana, 1, 1972, ss. 9 - 28

38. Dmitričenko S.S.: Sovremennyje metody uskorenyh ispytani^v masin na soprotivlenije ustalosti, Vestnik Mašinstroenija, 2, 1967
39. Dmitričenko S.S.; Chazanov Ch.J., Filatov E.J., Davydov A.P., Čerkašin A.S.: Stendovye ispytani^va svarnych ram na ustalost, Vestnik Mašinstroenija, 2, 1973
40. Dmitričenko S.S., Usov A.M., Nikulin V.N.N.: Zakonomernosti raspredelenija amplitud polnyh ciklov slučajnyh procesov nagruženija metallokonstrukciji masin, Vestnik Mašinstroenija, 2, 1975, ss. 7 - 10
41. Dolan T.J.: Podstawowe teorie zmęczenia i niszczenia metali, Zmęczenie metali, Praca zbiorowa, WNT, Warszawa, 1963
42. Dombrowski N.G., Werczenko W.R., Pereponow W.J., Szuklowski J., Volpert L.: Untersuchung der Belastungskollektive, Maschinenbautechnik, 6, 1972
43. Dowling N.E.: Fatigue Failure Predictions for Complicated Stress-Strain Histories, Journal for Materials, Vol. 7, No 1, 1972
44. Draprev N.R., Smith H.: Analiza regresji stosowana, Warszawa, 1973
45. Dyląg Z., Orłowski Z.: Wytrzymałość zmęczeniowa materiałów, WNT, Warszawa, 1962
46. Ekvall J.C., Young L.: Converting Fatigue Loading Spectra for Flight-by - Flight Testing of Aircraft and Helicopter Components, Journal of Testing and Evaluation, ITEVA, Vol. 4; No 4, 1976
47. Elderton W.P.: Frequency curves and correlation, Cambridge 1955
48. Endo T.: Crack Propagation in Carbon Steel Under Varying Stress Amplitude, Proceedings of the Seventh Japan Congress on testing Materials - Metallic Materials, 1964
49. Erisman T.H.: Unconventional Reflections on Damage Accumulation, Engineering Fracture Mechanics, Pergamon Press, Vol. 8, 1976
50. Filatov E.J., Pavlovskij V.E., Panfilov J.A.: Izučeni^ve nakoplenija ustalostnogo povreždenija v zavisimosti ot režima eksploatacionnoj nagruženosti, Problemy Pročnosti, 3, 1971, ss. 10 - 14
51. Filatov E.J., Dmitričenko S.S., Belokurov V.N., Borisov J.S.: Programnye ispytani^va svarnych obrazcov na ustalost, Problemy Pročnosti, 3, 1972, ss. 17 - 20
52. Findeisen D.: Durchführung des Prüfverfahrens Schwingfestigkeitversuch - Anforderungen an die Schwingprüfmaschine aus systemtheoretischer Sicht. Teil II: Energieumsetzende Maschine "Schwingprüfmaschine". Materialprüfung, 4, 1975, ss. 96 - 104
53. Finney J.M., Mann J.Y.: Fatigue Behaviour of Notched Aluminium Alloy Specimens Under Simulated Random Gust Loading with and without Ground-to-air Cycles of Loading, Fatigue of Aircraft Structures, Pergamon Press, 1963
54. Freudenthal A.M.: Physical and Statistical Aspects of Cumulative Damage, Colloquium on Fatigue, Berlin, 1956
55. Freudenthal A.M., Heller R.A.: On Stress Interaction in Fatigue and a Cumulative Damage Rule, Journal of the Aerospace Sciences, Vol. 26, 1959

56. Gallagher J.P.: Estimating Fatigue - crack Lives for Aircraft: Techni - ques, Experimental Mechanics, November, 1976
57. Garf M.M., Buglov E.C., Pavlovskij V.E.: Ob osobennostiach nakopleni- ja ustalostnego povrazdenija pri spektrach niestacionarnoj nagruzen- nosti, rasprostranijuscichsia nize ischodnogo predela ustalosti, Vestnik Masinostroenia, 6, 1964
58. Gassner E.: Betriebsfestigkeit Eine Bemessungsgrundlage für Konstruk- tionsteile mit statistisch wechsel den Betriebsbeanspruchungen, Kon- struktion, 6, 1954
59. Gassner E.; Schütz W.: The Significance of Constant Load Amplitude Testa for the Fatigue Evaluation of Aircraft Structures, Pergamon Press, 1961
60. Gassner E., Griese F.W., Haibach E.: Ertragbare Spanungen und Lebens- dauer einer Schweissverbindung aus Stahl St 37 bei Verschiedenen For- men des Beanspruchungskollektivs, Archiv für Eisehuffenwesen 35, 1964
61. Gassner E., Haibach E.: Testing Procedures for the Desing and Life Estimation of Fatigue Sensitive Structures, Int. Conf. Struct. Safety and Relability, Washington, D.C. Oxford e.a., 299 - 321, 1972
62. Gassner E.: Zur experimentellen Lebensdauerermittlung von Konstruk- tionselementen mit zufallsartigen Beanspruchungen, Materialprüfung, 6, 1973, ss. 197 - 205
63. Gassner E., Lipp W.: Eignung des Wöhlerversuchs zur Beurteilung des Schwingfestigkeits verhaltens von Bauteilen unter zufallsartigen Beanspruchungen, Materialprüfung, 11, 1974, ss. 353 - 358
64. Gatts R.R.: Application of a Cumulative Damage Concept to Fatigue, Journal of Basic Engineering, Transaction of the ASME, 86, 1961, ss. 529 - 540
65. Gatts R.R.: Cumulative Fatigue Damage with Random Loading, Journal of Basic Engineering Transactions of the ASME, 1962
66. Gaździk P.: Wpływ częstotliwości obciążeń w zakresie 47 - 288 Hz na ży- wotność zmęczeniową duralu PA-6, Prace Naukowe Instytutu Materiało- znawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, 20, 1976
67. Glinka G.: Określenie prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych, Przegląd Mechaniczny, 10, 1976
68. Glinka G., Rzeszot J.: Wpływ kolejności obciążeń na prędkość wzrostu pęknięć zmęczeniowych, Materiały II Sympozjum Zespołu Zmęczenia Mate- rialów i Konstrukcji, Komitetu Budowy Maszyn, PAN, Lublin, 1977
69. Glinka G.: Badanie prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych w złączach spawanych ze stali 18G2AV, Przegląd Spawalnictwa, 3, 1977
70. Glinka G., Oziemski S.: Mechanika pęknięcia w projektowaniu konstrukcji stalowych, Część IV, Przegląd Mechaniczny, 23
71. Glinka G., Sobczykiewicz W.: Badania prędkości rozwoju pęknięć zmę- czeniowych w elementach ze stali o podwyższonej wytrzymałości w wa- runkach normatywnych widm naprężeń, Archiwum Budowy Maszyn, 2, 1978

72. Glinka G.: Wpływ naprężeń pozostających na wytrzymałość połączeń spawanych, *Metodyka obliczania wytrzymałości i trwałości połączeń z uwzględnieniem naprężeń pozostających podczas spawania*, *Przegląd Mechaniczny*, 18, 1978, ss. 14 - 18
73. Glinka G.: Vlijanie spektra naprizeni na skorost rosta ustaloŝtnych trescin, *Masínovedenie*, 3, Moskva, 1978
74. Glinka G., Stephens R.I.: Fatigue Life Predictions in Notched Members Under Variable Loading Histories, Submitted for publication to ASME, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1979
75. Grinenko N.J., Sefer L.A.: Spektralnyj metod ocenki ustalostnoj dol - zovecnosti pri dejstvii slučajnyh nagruzok, *Problemy Pročnosti*, 1, 1976, ss. 19 - 22
76. Gusev A.S.: Ob ocenke vida raspredelenia amplitud napraženij pri raz - vete dolgovecnosti, *Vestnik Mašínostroenia*, 4, 1972
77. Gusev A.S., Rošoin I.M.: Rasčetnaja ocenka rassejanija ustalostnoj dolgovecnosti detalej masin, nachodjaščichsja pod dejstviem slučajnyh nagruzok, *Vestnik Mašínostroenia*, No 10, 1975
78. Haibach E.: Modifizierte Lineare Schadensakkumulations - Hypothese zur Berücksichtigung des Dauerfestigkeitsabfalls mit fortschreitender Schädigung, *Laboratorium für Betriebsfestigkeit, Darmstadt, Technische Mitteilungen TM Nr 50/70, Juli 1970, s. 15*
79. Haibach E.: Probleme der Betriebsfestigkeit von metalischen Konstruktionsteilen, *VDI - Z*, 5, 1971
80. Hajduk J.: Przyspieszone metody wyznaczania parametrów wytrzymałości zmęczeniowej, *Przegląd Mechaniczny*, 17, 1970
81. Hajduk J.: Deterministyczna i probabilistyczna wytrzymałość konstrukcji, *Przegląd Mechaniczny*, 19, 1971, ss. 585 - 588
82. Handzel Z., Ziemia S.: Mechanizm zniszczenia oiał stałych, w zbiorze: *Fizyczne aspekty trwałości i niezawodności obiektów technicznych*, redakcja S. Ziemia, IPPT, PAN, Warszawa - Poznań, 1976, ss. 27 - 56
83. Hempel M.: Das Dauerschwingverhalten der Werkstoffe, *VDI - Z*, 27, 1962, ss. 1362 - 1377
84. Han T., Sapiro S.: Statističeskie modeli v inżynernych zadacach, Moskva, 1969
85. Hanke M., Hromir M.: Zur Berechnung der Betriebsfestigkeit nach der Schaden - Akkumulationshypothese von Corten - Dolan, *Materialprüfung*, 11, 6, 1969
86. Hanke M.: Estimation of component life using stress distribution Parameters, *SAE Transactions*, 78, 1970, ss. 87 - 98
87. Hertel H.: *Ermüdungsfestigkeit der Konstruktionen*, Springer - Verlag, Berlin - Heidelberg - New York, 1969
88. Heywood R.B.: *Designing Against Fatigue*, Chapman Hall, London, 1962, /tłumaczenie rosyjskie Mašínostroenie, Moskva, 1969/
89. Hofmeister W.F.: Application of the Cumulative Fatigue Damage Theory to Practical Problems. *SAE Transactions*, Vol. 68, 1960

90. Hornig R., Weiler W.: Statistische Methoden bei der Lebensdauerprüfung - Aufnahme und Verarbeitung von Belastungskollektiven, Materialprüfung, 2, 1971, ss. 53 - 60
91. Isaev A.S.: K opredeleniju verojastnosti ustalostnogo razrušenija pri slučajnom stacionarnom nagruženii, Sb. Konstrukcionnaja pročnost legkich splavov i stalej, Trudy MAT, vyp. 61, Moskva, 1964
92. Isaev A.S.: Eksperimentalnoe issledovanie ustalosti pri slučajnom nagruženii, Sb. Konstrukcionnaja pročnost legkich splavov i stalej, Trudy MAT, vyp. 61, Moskva, 1964
93. Jacoby G.: Comparison of Fatigue Lives Under Conventional Program Loading and Digital Random Loading. Effects of Environment and Complex Load History on Fatigue Life. ASTM, STP. 462, 1960, s. 184
94. Jacoby G., Nowack H.: Nowoczesna metodyka badań wytrzymałościowych, Materiały Seminarium SIMP, Warszawa, 1974
95. Jacoby G.: Neuzeitliche Prüfverfahren und Prüfmaschinen, Rheinstahl Technik, 10, 1972, ss. 20 - 30
96. Jakobson J.V.: Metody uskorennych ispytanij nadežnosti i ustalostnoj dolgovečnosti samoletnych konstrukcji, Problemy Pročnosti, 4, 1970, ss. 30 - 35
97. Jakowluk A.: Kumulacja odkształceń i uszkodzeń przy wibropełzaniu stopu Al - Mg - Si przy ciągłym jednoschodkowym obciążeniu, Archiwum Budowy Maszyn, 1, 1971
98. Jakowluk A.: Kumulacja odkształceń i uszkodzeń przy zmęczeniu stopu Al - Mg - Si przy ciągłym jednoschodkowym obciążeniu, Archiwum Budowy Maszyn, 2, 1971
99. Jazdon A.: Uszkodzenia zmęczeniowe pojazdów jednośladowych. Akademia Techniczno - Rolnicza, Zeszyty Naukowe Nr 26, Bydgoszcz, 1975
100. Jazdon A., Szala J., Wojciechowicz B.: Programowane badania niezawodności i trwałości obiektów technicznych. Akademia Techniczno-Rolnicza, Zeszyty Naukowe Nr 47, Bydgoszcz, 1977
101. Kalinowski K., Macha E.: Wyznaczanie rozkładów gęstości prawdopodobieństwa wielkości charakteryzujących płaski stan naprężenia przy wymuszeniach losowych. Prace Naukowe Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, Nr 17, 1975
102. Kasprówic Z., Szala J., Wocianiec R.: Widma obciążeń elementów pojazdów jednośladowych. Materiały II Sympozjum Zespołu Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji Komitetu Budowy Maszyn PAN, Lublin, 1977
103. Kasprówic Z., Szala J., Zawisłak K.: Konstrukcyjne badania zmęczeniowe maszyn. Materiały VIII Sympozjum Podstaw Konstrukcji Maszyn, Zeszyty Naukowe Nr 45, Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz, 1977
104. Kasprówic Z., Szala J.: Możliwości stosowania metody Locati w badaniach zmęczeniowych elementów pojazdów jednośladowych. Materiały Sympozjum: Naukowe Problemy Konstrukcji, Technologii i Eksploatacji Maszyn, Bydgoszcz, 1977, ss. 238 - 247
105. Kawamoto M., Ishikawa H., Onoe T.: O programowaniu losowych obciążeń metodą "pełnej fali". Trans. Jap. Soc. Mech. Eng., 37, Nr 296, 1971

106. Kawamoto M., Ishikawa H.: A New Mechanical Random Fatigue Testing Machine and Some Results. Bulletin of the ISME, Vol. 14, 72, 1971
107. Kawamoto M., Ishikawa H., Inoue N., Yoshida Y.: Fatigue Test Results and Fatigue Life Estimation on Hard Steel and Aluminium Alloy under Random Loads. Bulletin of the ISME, 122, 1975, ss. 761 - 768
108. Kigawa H., Fukuda S., Nishiyama A.: Fatigue Crack Propagation in Steels under Random Loading. Bulletin of the ISME, 153, 1978, ss. 367 - 374
109. Klinger F.: Servohydraulische Prüfstände für Ermüdungsversuche mit dynamischer Torsionsbelastung an Kraftfahrzeugteilen, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, 3, 1971, ss. 85 - 89
110. Klinger F.: Prüfstände für Getriebe, Wellen, Kupplungen, Lebensdauer-test unter Drehmoment - Wechsellast, Antriebstechnik, 9, 1972, ss. 332 - 336
111. Klokov J.D., Žuravlev L.V.: Metod ocenki uslovnogo vremeni zatychaniya korrekcijonnyh funkciji nekatorogo klasa slučajnyh procesov, Avtomatika i Telemekhanika, 10, 1965
112. Kobiela T., Bąk R., Koziński J., Orłowski J.: Opracowanie warunków badań standowych nadwozi i ram autobusów i samochodów ciężarowych dużej ładowności ..., Etap III, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, Raporty 59 i 63, 1976
113. Kocańda A., Głowacki M.: Oddziaływanie karbu przy wysokich obciążeniach cyklicznych, Metoda określania wartości współczynnika działania karbu przy uwzględnieniu badań własności stali narzędziowej, Przegląd Mechaniczny, 11, 1979, ss. 14 - 18
114. Kocańda S.: O przebiegu zjawisk zmęczenia w żelazie w obszarze ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej i poniżej praktycznie określonej wytrzymałości zmęczeniowej. Wybrane materiały II Krajowej Konferencji Wytrzymałościowej SIMP - WAT, 1961
115. Kocańda S.: Poradnik inżyniera mechanika, rozdz. XIII, WNT, Warszawa, 1968
116. Kocańda S.: Zmęczeniowe niszczenie metali, WNT, Warszawa, 1978
117. Kogaev V.P., Kirin V.V.: Statističeskie charakteristiki soprotivlenija ustalosti žaropročnoj stali 1X10H9T pri stacionarnych i programnyh režimach nagruženija v uslovjach povyšennyh temperatur, Problemy Pročnosti, 6, 1973, ss. 8 - 10
118. Kogaev V.P.: Nesuščaja sposobnost i osnovy razčeta na pročnost pri peremennyh napraženijach, w zbiorze: Nesuščaja sposobnost i razčety detalej mašin na pročnost, pod redakcją S.V.Serensena, Mašinostroenie, Moskva, 1975, ss. 119 - 186
119. Kogaev V.P.: Statističeskie zakonomernosti ustalostnogo razrušenija i verojstnostnye metody razčeta detalej mašin na ustalost, w zbiorze: Nesuščaja sposobnost i razčety detalej mašin na pročnost, pod redakcją S.V.Serensena, Mašinostroenie, Moskva, 1975, ss. 255 - 313
120. Konvalov L.V., Vinogradova M.D.: Nakoplenie ustalostnyh povreždenij pri nestacionarnom peremennom kručenii valov v soedineniach, Vestnik Mašinostroenia, 1, 1977

121. Kopecky M.: Experimentálna analýza namáhania nosných častí jednostopového motorového vozidla, *Strojirestvi*, 24, 1974
122. Koreskov V.I.: Statističeskaja nagruženost' i voprosy metodiki rasčeta na vynoslivost' nesuščich konstrukcii mašin, *Vestnik Mašinstroenia*, No 1, 1975
123. Kowalewski J.: Beschreibung regelloser Vorgänge, *VDI - Z*, 7, 1969
124. Kowalewski J.: On the Relation Between Fatigue Lives under Random Loading and Corresponding Program Loading. Full-Scale Fatigue Testing of Aircraft Structures, Pergamon Press, 1961
125. Kowalska B., Wiernik R.: Wpływ powłoki niemetalicznej na stosowalność hipotezy Minera, *Prace Naukowe Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej*, 20, 1976
126. Kozicki J., Macha E.: Choice of Statistical Characteristics of the Random Signal Generator Intended for Dynamical Testing of Mechanical Structures, *Scientific Papers of the Institute of Material Science and Applied Mechanics of Wrocław Technical University*, No 19, 1976
127. Kudrjavcev J.V.: Dva zamiečanija po metodike ispytanij metallov na ustalost', *Zavodskaja Laboratoria*, 9, 1978
128. Kufaev V.N.: Issledovanie ustalostnoj pročnosti žaropročnych materialov pri nestacionarnom napraženii, *Problemy Pročnosti*, 3, 1972, ss. 13 - 16
129. Kugler J., Szala J.: Ocena statystyczna obciążeń eksploatacyjnych pojazdów mechanicznych, *Zeszyt Naukowy BTN, seria Mechanika*, 13 /w druku/
130. Kupfer H.: Sicherheit und Zuverlässigkeit von Tragwerken im Bauwesen, *Materialprüfung*, 1, 1978, ss. 2 - 6
131. Larson R.L., Swanson S.R.: Random Load Testing with Multiple Inputs, *Proceedings of International Conference on Mechanical Behaviour of Materials*, Vol. V, The Society of Materials Science, Japan, 1972
132. Lehman R.: Eine Induktionsfunktion zur Korrektur der Hypothese der Linearen Schädigung IFL - Mitt. Heft 6, 8, 1969
133. Lehman R.: Über die Gültigkeit der Hypothese der Linearen Schadensakkumulation, *Maschinenbautechnik*, 5, 1970
134. Lewandowski S., Tabor J.: Kryterium kumulacji uszkodzeń i zniszczenia zmęczeniowego, *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej, Nauki Techniczne - Mechanika*, 3/18, 1969
135. Lewandowski S., Tabor J.: Współczynnik działania karbu w zakresie ograniczonej trwałości zmęczeniowej, *Materiały II Sympozjum Zespołu Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji Komitetu Budowy Maszyn, PAN, Lublin*, 1977, ss. 119 - 123
136. Łapiński Z.: Programowane badania zmęczeniowe, *Wybrane materiały II Konferencji Wytrzymałościowej SIMP - WAT*, 1961
137. Macha E.: Probability Function of the Stress Reduced According to Huber - Mises - Hencky's Hypothesis at a Random Two-dimensional State of Stress, *Scientific Papers of the Institute Materials Science and Applied Mechanics of Wrocław Technical University*, No 19, 1976

138. Macha E.: Simulation of Fatigue Process in Material Subjected to Random Complex State of Stress, Simulation of Systems, North - Holland Publishing Company, 1976
139. Macha E.: Algorithm of Life Fatigue Damage with Random Loading, Scientific Papers of the Materials Science and Applied Mechanics of Technical University, No 30, 1976
140. Macha E.: Modele matematyczne trwałości zmęczeniowej materiałów w warunkach losowego złożonego stanu naprężenia, Prace Naukowe Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, Nr 41, 1979
141. Macha E.: Symulacja trwałości zmęczeniowej materiału w warunkach losowego trójosiowego stanu naprężenia, Raporty Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, 13, 1979
142. Maennig W.: Vergleichende Untersuchung über die Eignung der Treppenstufen Methode zur Berechnung der Dauerschwingfestigkeit, Materialprüfung, 1, 1971, ss. 6 - 11
143. Maennig W.: Statistical Planning and Evaluation of Fatigue tests. A survey of Recent Results, International Journal of Fracture, 1, 1975
144. Maennig W.: Das Abgrenzungsverfahren, eine kostensparende Methode zur Ermittlung von Schwingfestigkeitswerten - Theorie Praxis und Erfahrungen, Materialprüfung, 8, 1977, ss. 280 - 289
145. Mažoletev A.J.: Udarenaja ustalost stali pri mnogostupenčatom nagruženii, Vestnik Mašinstroenia, 6; 1964
146. Matolesy M.: New Approach to the Fatigue Crack Propagation in Metal Structural Parts, Materialprüfung, 5, 1978, ss. 184 - 189
147. Mc Cartney L.N.: The effect of Periodic - Random Loading on Fatigue Crack Growth, International Journal of Fracture, Vol. 12, No 2, 1976
148. Miner M.A.: Cumulative Damage in Fatigue, J. Appl. Mechanics, Vol. 12, 3, 1945
149. Miner M.A.: Ocena trwałości zmęczeniowej ze szczególnym uwzględnieniem kumulatywnego zniszczenia, Zmęczenie Metali, WNT, 1962, ss. 256 - 267
150. Mitroposkij A.K.: Technika statističeskich vycislenii, Moskva, 1971
151. Müller L.: Obciążenie obliczeniowe elementów maszyn, Przegląd Mechaniczny, 11, 1971
152. Neuber H.: Theoy of Stress Concentration for Shear - Strained Prismatical Bodies with Arbitrary Nonlinear Stress - Strain Law, Transactions, ASME, Journal of Applied Mechanics, 4, 1961
153. Niczyporczyk S., Popko.H., Rogoziński T.: Obliczenia zmęczeniowe elementów z karbem, Określenie współczynnika działania karbu dla warunków ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej, Przegląd Mechaniczny, 7, 1974, ss. 235 - 236
154. Nikulin V.N., Dmitričenko S.S., Filatov E.J., Cedjakin M.N.: Prime-nienie EVM dla schematizaci slučajnych procesov nagruženia, Vestnik Mašinstroenia, 10, 1973
155. Nishichara T., Jamada T.: Fatigue Strenght of Metals under Alternating Stresses of Varying Amplitude, Mem. Fac. Eng. Kyoto Univ., 1956, 18, No 3

156. Nowack H.: Biharmonische Beanspruchungsabläufe zur Beurteilung der Schädigung unregelmässiger Beanspruchungen, VDI - Z, 7, 1969
157. Orsetti W.M.: Sumowanie uszkodzeń zmęczeniowych w elementach stalowych z karbem, Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa, 1975
158. Orsetti W.M.: O pewnej metodzie sumowania uszkodzeń zmęczeniowych w elementach stalowych z karbami, Rozprawy Inżynierskie, 25, 1, 1977
159. Orsetti W.M.: Model procesu narastania uszkodzeń zmęczeniowych, Przegląd Mechaniczny, 7, 1978, ss. 11 - 23
160. Oziemski S.: Trwałość ustrojów nośnych żurawi, Przegląd Mechaniczny, 21, 1976
161. Pavlovskij V.E.: Vlijanie asimetrii nagruženija na nakoplenie povreždenij pri programnyh ispytaniach na ustalost stalnyh obrazcov, Problemy Pročnosti, 11, 1970, ss. 24 - 26
162. Pilecki Sz., Ziemba S.: Znaczenie programowych badań zmęczeniowych dla doskonalenia konstrukcji maszyn, Materiały V Krajowej Konferencji Wytrzymałości i Badań Materiałów, Kraków, 1969
163. Pindera T.J., Orłowski Z., Rościszewski K.: O pewnych zagadnieniach kształtowania wytrzymałościowego ramy skutera, Przegląd Mechaniczny, 16, 1960, ss. 474 - 479
164. Počtennyj E.K.: Metod analiza polcyklov napraženi, Vestnik Masinstroenia, 10, 1975
165. Pratusевич R.M., Rešetov D.N., Litvak A.S.: Vlijanie udarnykh peregruzok na izgibnuju pročnost zakalennykh zubatykh koles pri peremennykh režimach nagruženija, Vestnik Masinstroenia, No 1, 1975
166. Przybylski J.: Modelowanie obciążeń w przyspieszonych badaniach zmęczeniowych, Przegląd Mechaniczny, 2, 1973
167. Przybylski J.: Programowane badania zmęczeniowe ram samochodowych, Technika motoryzacyjna, 4, 1973
168. Rakowski M.: Wymuszanie naprężeń o charakterze przypadkowym przy pomocy generatora sygnałów pseudoprzypadkowych, Akademia Techniczno - Rolnicza w Bydgoszczy, Zeszyty Naukowe, 26, 1975
169. Rehlich G.: Eine Möglichkeit der Zusammenfassung verschiedener Formeln zur Lebensdauer - berechnung, Maschinenbautechnik, 6, 1972
170. Rehlich G.: Lebensdauerberechnung von Bauteilen bei Beanspruchungskollektiven mit Normalverteilung, Maschinenbautechnik, 9, 1972
171. Redkovec N.F.: Vlijanie napraženi niže predela ustalosti na dolgovėčnost detalej robotajuščich pri peremennykh nagruzkach, Vestnik Masinstroenia, 6, 1964
172. Rešetov D.N., Čatynjan R.M., Fadjeev V.Z.: Metod oblegėnija rasčeta detalej mašin pri peremennykh režimach nagruženij, Vestnik Masinstroenia, 4, 1972
173. Robakowski T.: Ocena trwałości i jakości konstrukcji spawanych na podstawie badań zmęczeniowych, Przegląd Spawalnictwa, 5, 1970, ss. 112 - 118

174. Robakowski T.: Zmęczeniowa i eksploatacyjna wytrzymałość złączy spawanych stosowanych w budowie pojazdów szynowych, Przegląd Spawalnictwa, 2, 1978, ss. 12 - 15
175. Romanienko A.F., Sergejev G.A.: Voprosy prikladnogo analiza slučajnyh processov, Moskva, 1968
176. Romanov A.H.: Nakoplenie povreždenij pri malociklovom nagruženii, Problemy Pročnosti, 4, 1975, ss. 21 - 27
177. Schijve J.: The Analysis of Random Load - Time Histories with Relation to Fatigue Testes and Life Calculations. Fatigue of Aircraft Structures, Pergamon Press, 1963
178. Schijve J., Jacobs F.A., Tromp P.J.: The Effect of Load Sequence on Fatigue Crack Propagation under Random Loading and Program Loading, National Aerospace Laboratory, NIR, TR 71014 U, 1971
179. Schott G.: Vorschlag eines verfahrens zur berechnung der lebensdauer bei mehrstufen - b. zw. Kollektivbelastung, Materiały II Sympozjum Zespołu Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji, Komitetu Budowy Maszyn, PAN, Lublin, 1977, ss. 23 - 39
180. Schutz W., Zenner H.: Schadensakkumulationshypothese zur Lebensdauer vorhersage bei Schwingen der Beanspruchung, Teil 1, Ein Kritischer Überblick, Werkstofftechnik, 1, Nr 1, 1973
181. Serensen S.V., Bucharin N.A., Buglov E.G., Snytin M.E.: K ustanovleniju režimov peremenoj napražennosti dla rasčeta na ustalost, Vestnik Mašinostroenia, 1, 1961
182. Serensen S.V., Kozlov L.A.: K rasčetu na pročnost pri nestacionarnoj peremenoj napražennosti, Vestnik Mašinostroenia, 1, 1962
183. Serensen S.V.: Nesuščaja sposobnost i rasčety detalej mašin, Moskva, 1963, Mašgiz
184. Serensen S.V., Kozlov L.A.: Charakteristiki nestacionarnoj napražennosti i opredelenie zapasa pročnosti, Vestnik Mašinostroenia, 6, 1964
185. Serensen S.V., Kogaev V.P.: Dolgovečnost detalej mašin s učetom verojatnosti rozrusenia pri nestacionarnom peremennom nagruženii, Vestnik Mašinostroenia, 1, 1966
186. Serensen S.V., Kogaev V.P., Šnejderovič R.M.: Nesuščaja sposobnost i rasčety detalej mašin na pročnost, Mašinostroenie, Moskva, 1975
187. Slabin B.Z.: K rasčetu na pročnost pri nestacionarnych režimach peremennyh napraženii, Vestnik Mašinostroenia, 6, 1964
188. Slobodjanjuk V.J., Borodovko V.A.: O sviazi risunka izloma s režimom nestacionarnoj cikličeskoj nagruzki, Zavodskaja Laboratoria, 9, 1975
189. Šnejderovic R.M.: Nesuščaja sposobnost i osnovy rasčeta na pročnost pri malom čisle ciklov nagruženia, w zbiorze: Nesuščaja sposobnost i rasčety detalej mašin na pročnost, pod redakcją S.V. Serensena, Mašinostroenie, Moskva, 1975, ss. 77 - 118
190. Sobozykiewicz W.: Wrażliwość zmęczeniowa spawalnych stali o podwyższonej wytrzymałości na statystyczne widmo obciążeń występujące w wysięgnikach kratowych żurawi jezdniowych, Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 1972

191. Sobczykiewicz W.: Kumulacja uszkodzeń, Materiały I Sympozjum Zespołu Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji Komitetu Budowy Maszyn PAN, Lublin, 1973
192. Sobolev V.L.: Soveryšenstvovaniya metodiki uskorennoj ocenki predelov vynoslivosti pri ispytaniach so stupencato izmenjajuščajsja nagruzkoy, Zavodskaja Laboratoria, 11, 1977, ss. 1401 - 1405
193. Stepnov M.N., Truskin M.A.: Ocenka izmeneniya ustalostnykh svoystv aljuminievykh splavov pod dejstviem peremennykh nagruzk c pomosćju vtoričnykh krivykh ustalosti, Zavodskaja Laboratoria, 7, 1972, ss. 769 - 896
194. Stepnov M.N., Truskin M.A.: O charakteristikach soprotivleniya ustalosti materialov v svyazi s dymjya studiami nakopleniya povreždenij, Zavodskaja Laboratoria, 3, 1975
195. Stepnov M.N., Evstratova S.P.: Forisirovanie ispytaniy na mnogociklovuju ustalost konstrukcionnykh aljuminievykh splavov, Zavodskaja Laboratoria, 7, 1979
196. Stephens R.I.: Wpływ przeciążeń na wzrost szczelin zmęczeniowych, Mechanika Teoretyczna i Stosowana, 2, 16, 1978
197. Subramanyan S.: A Cumulative Damage Rule Based on the Knee Point of the S - N Curve, Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, A, 1976, ss. 316 - 321
198. Suvalov S.A.: Dolgovečnost detalej masin pri peremennykh režimach nagruzki i sumirovanie ustalosti, Vestnik Mašinostroenia, 5, 1959
199. Swanson S.R.: Load Fatigue Testing: State of the Art Survey, Materials Research and Standards, April, 1968
200. Swiesznikow A.A.: Podstawowe metody funkcji losowych, PWN, Warszawa, 1965
201. Szala J.: Rzeczywiste widma obciążeń i ich aproksymacja, Materiały I Ogólnopolskiego Sympozjum Zespołu Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji Komitetu Budowy Maszyn PAN, Warszawa - Lublin, 1973
202. Szala J.: Trwałość zmęczeniowa konstrukcji - wybrane zagadnienia, Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Bydgoszczy, Nr 6, 1973
203. Szala J.: Obliczenia trwałości zmęczeniowej układów oparte na wybranych hipotezach kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych i ich doświadczalna weryfikacja, Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Bydgoszczy, Nr 9, 1974
204. Szala J.: Zastosowanie wybranych metod aproksymacji losowych zmian naprężeń do wyznaczania trwałości zmęczeniowej, Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, 1974
205. Szala J.: Zagadnienie aproksymacji zmian obciążeń o charakterze losowym w programowanych badaniach trwałości zmęczeniowej, Akademia Techniczno - Rolnicza, Zeszyty Naukowe, Nr 26, Bydgoszcz, 1975
206. Szala J.: Wybrane zagadnienia z programowania obciążeń zmiennych na stanowiskach do badań zmęczeniowych, Zeszyty Naukowe Nr 8 - Mechanika /9/, 1975

- 207 Szala J., Zawiślak K.: Ocena eksploatacyjnej trwałości zmęczeniowej na podstawie wyników badań stanowiskowych, Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Nr 241, 1975
- 208 Szala J.: The Effect of Load Sequence on Fatigue Life, The Fourth Colloquium on Fatigue, Czechoslovak Academy of Sciences, Institute of Physical Metallurgy, Brno, 1977
- 209 Szala J., Zawiślak K.: Wybrane zagadnienia programowanych badań zmęczeniowych, Materiały II Sympozjum Zespołu Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji Komitetu Budowy Maszyn PAN, Lublin, 1977
- 210 Szala J.: Wpływ naprężeń o wartościach mniejszych od nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej na trwałość zmęczeniową, Zeszyty Naukowe BTN, 10, 1978
- 211 Szala J.: Podstawy programowanych badań i obliczeń zmęczeniowych w konstrukcji maszyn, Materiały Sympozjum Jednostek Organizacyjnych Podstaw Konstrukcji Maszyn Uczelni Technicznych, Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej, Warszawa, 1978
- 212 Szala J.: Wpływ sekwencji obciążeń na trwałość zmęczeniową, Mechanika Teoretyczna i Stosowana, Nr 2, 1978
- 213 Szala J.: Badania i obliczenia zmęczeniowe elementów maszyn w warunkach obciążeń losowych i programowanych, Prace Instytutu Podstawowych Problemów Techniki, PAN, Nr 6, Warszawa, 1979
- 214 Szala J., Sempruch J.: Wpływ wybranych parametrów obciążeń programowanych na trwałość zmęczeniową, Zeszyty Naukowe Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy, Mechanika, 21, 1979
215. Szala J., Sempruch J.: Analiza statystyczna wyników badań zmęczeniowych, Zeszyty Naukowe BTN, seria Mechanika, 13 /w druku/
216. Tanaka T., Fujii.: Studies on Fatigue Damage Caused by Stresses Below the Endurance Limit, Bulletin of the ISME, Vol. 20, 143, 1977
217. Teichmann A.: Grundsätzliches zum Betriebsfestigkeitsversuch, Deutschen Luftfahrtforschung, 1, 1951
218. Terentev V.F., Bily M.: K voprosu o postroenii polnoj krivoj ustalosti, Problemy Pročnosti, 6, 1972, ss. 12 - 22
219. Topper T.H., Wetzel R.M., Morrow J.D.: Neuber's Rule Applied to Fatigue of Notched Specimens, Journal of Materials, IMLSA, 1, 1969
220. Troost A., El Magd E.: Allgemeine Formulierung der Schwingfestigkeitsamplitude in Haigscher Darstellung, Materialprüfung, 2, 1975, ss. 47 - 49
221. Troščenko V.T., Koval J.J.: Zakonomernosti nakoplenia ustalostnogo povreždenija v stalach 45 i 1X13 v uslovijach programmno izmenenija nagruzki, Problemy Pročnosti, 12, 1973, ss. 9 - 15
222. Tucker L.E.: A Procedure for Designing Against Fatigue Failure of Notched Parts, Society of Automotive Engineers, Inc., SAE Paper No 720265, New York, 1972
223. Virabov R.V.: K razčetu na ustalost pri asimetričnych ciklach napraženii, Vestnik Mašinostroenia, 4, 1975, ss. 26 - 29

224. Visnjakov N.A., Gringauz G.D., Rautman N.J.: Sravnenie dvuch metodov statisticeskoj obrabotki nestacionarnych nagruzok s pozicii ustalojnogo povrezdenija materiala, Zavodskaja Laboratorija, 11, 1977, ss. 1396 - 1397
225. Wallgren G.: Fatigue Tests with Cycles of Varying Amplitude, FFA, 28, 1949
226. Weibull W.: Fatigue Testing and Analysis of Results, Pergamon Press, 1961
227. Wichor J.: Wyznaczanie statystycznych charakterystyk czynników wymuszających, w zbiorze: Fizyczne aspekty trwałości i niezawodności obiektów technicznych, redakcja S. Ziemia, IPPT, PAN, Warszawa - Poznań, 1976, ss. 127 - 153
228. Wirsching P.H., Haugen E.B.: A General Statistical Model for Random Fatigue, Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, 1, 1974, ss. 34 - 40
229. Zaskurski J.: Przyspieszone badania zmęczeniowe ładowarek kołowych, Przegląd Mechaniczny, 9, 1974, ss. 297 - 302

Prace badawcze cytowane w tekście

230. Szala J., Zawisłak K.: Optymalizacja konstrukcji ram jednobelkowych /otwartych/ dla rowerów, motorowerów i motocykli do 100 cm³, Akademia Techniczno - Rolnicza, nr pracy GP-1/74, Bydgoszcz, 1976
231. Szala J., Jazdon A., Zawisłak K.: Sprawozdanie za rok 1976 z realizacji pracy w ramach problemu węzłowego 05.12 tematu 05.7 pt.: "Obliczenia elementów i układów na zmęczenie przy obciążeniach losowych i programowanych", Akademia Techniczno - Rolnicza, nr pracy BZ-38/76 /PW-20/76, Bydgoszcz, 1976
232. Szala J.: Sprawozdanie za rok 1977 z realizacji pracy w ramach problemu węzłowego 05.12 tematu 05.7 pt.: "Obliczenia elementów i układów na zmęczenie przy obciążeniach losowych i programowanych", Akademia Techniczno - Rolnicza, nr pracy BZ-38/76 /PW-20/76, Bydgoszcz, 1977
233. Szala J., Zawisłak K.: Opracowanie metod przyspieszonych badań zmęczeniowych elementów pojazdów jednośladowych, praca wykonana w ramach problemu węzłowego 05.12 pt.: "Wytrzymałość i optymalizacja konstrukcji maszynowych i budowlanych", Akademia Techniczno - Rolnicza, nr pracy BZ-23/77, Bydgoszcz, 1978
234. Szala J., Kugler J., Sempruch J.: Sprawozdanie za rok 1978 z realizacji pracy w ramach problemu węzłowego 05.12 tematu 05.7 pt.: "Obliczenia elementów i układów na zmęczenie przy obciążeniach losowych i programowanych", Akademia Techniczno - Rolnicza, nr pracy BZ-38/76, Bydgoszcz, 1978
235. Szala J., Kugler J., Sempruch J.: Sprawozdanie za rok 1979 z realizacji pracy w ramach problemu węzłowego 05.12 tematu 05.7 pt.: "Obliczenia elementów i układów na zmęczenie przy obciążeniach losowych i programowanych", Akademia Techniczno - Rolnicza, nr pracy BZ-38/76, Bydgoszcz, 1979

THE FATIGUE LIFE EVALUATION OF MACHINE PARTS UNDER RANDOM AND PROGRAMMED LOADING

Summary

Many machine parts are found to be under the influence of loads changing randomly with time which results in fatigue failure processes developing in a material. The fatigue life may be evaluated by calculation on the basis of the cumulative damage hypothesis and by programmed or random tests.

The work includes a review of publications and authors testing fatigue life evaluation of machine parts under random and programmed loading. There exists a relationship between number of cycles to failure obtained from programmed or random tests and that obtained from one level tests if the one level test is carried out at the maximum stress of the load spectrum. In the author's fatigue tests with different parameters of spectrum loads the relation between fatigue curves /one level tests/ and fatigue life curves /programmed or random tests/ has been carried out. The relation may be described by the following formula:

$$\lg n_c = \xi^{-r} \lg N \quad \text{for} \quad \sigma_{a_{\max}} = \sigma_a$$

where:

- n_c - cumulative number of stress cycles in the program test to failure, fatigue life in cycles for maximum stress amplitude $\sigma_{a_{\max}}$
- N - number of stress cycles at constant amplitude to failure for stress amplitude σ_a
- ξ - parameter of load spectrum /fulfilment factor/
- r - exponent

In the present work, fatigue lives in steel /10, 45, 10BX/ specimens under pseudorandom loading and corresponding - to service random loading - programmed loading have been studied.

A discussion is presented here on other areas such as the influence of load sequence, the stress below the endurance limit, number of programmed periods to failure and parameters of load spectrum on the fatigue life.

The average fatigue life time obtained in random and programmed loading experiments with non-regular /I/ and increas-

ing - decreasing /Lo - Hi - Lo/ order of amplitudes exhibits slight differences. Differences of fatigue life obtained in programmed tests with four types of load sequences were slight as well.

The presented data show that fatigue damage may be caused by stress levels below the endurance limit of specimen materials. Increasing the stress and fulfilment factor value of the spectrum and increasing mechanic properties of specimen materials make the influence of stress levels below the endurance limit on the fatigue damage accumulation smaller.

The analysis of the tests results, the influence of the number of programmed periods to failure on the fatigue life indicate that a small number of periods /about 10/ to failure may cause the increase /30 %/ in fatigue life obtained in programmed tests as compared with random tests. Increasing the number of programmed loading periods to failure, the obtained value of the fatigue life approaches the fatigue life obtained in the random loading test.

ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННЫХ, СЛУЧАЙНЫХ И ПРОГРАММИРОВАННЫХ НАГРУЗОК

Резюме

Многие детали машин находятся под действием нагрузок изменяющихся случайно во времени, результатом которых являются процессы усталостного разрушения.

Работа содержит оценку существующего объема знаний по методам определения усталостной долговечности в условиях случайных и программированных нагрузок. На основании этой оценки сформулированы цель и объем собственных испытаний.

Целью работы была разработка метода расчета усталостной долговечности на основе результатов программных усталостных испытаний.

Основной характеристикой усталостных свойств материалов в расчетах деталей машин есть кривая усталости $N(\sigma_a)$, определенная при напряжениях с постоянной амплитудой.

Оценка усталостной долговечности деталей машин в условиях эксплуатации при действии переменных случайных нагрузок может быть проведена на основе расчетов с использованием гипотез суммирования усталостных повреждений, а также на основе стендовых испытаний со случайной или программированной нагрузкой. В программированных испытаниях используются в большинстве случаев кривые усталостной долговечности $n_c(\sigma_{a\max})$, которые определяют зависимость между суммарным числом циклов в спектре до разрушения и максимальным напряжением в этом спектре.

Кривые усталости $N(\sigma_a)$ и кривые усталостной долговечности $n_c(\sigma_{a\max})$ в логарифмических или полуллогарифмических координатах представляют собой прямые линии.

В работе дается описание зависимости между кривыми $N(\sigma_a)$ и $n_c(\sigma_{a\max})$, а также зависимости, которые дают возможность определить долговечность деталей машин при случайной или программированной нагрузке на основе известной кривой усталости $N(\sigma_a)$.

Эта зависимость может быть выражена формулой:

$$\lg n_c = \xi^{-r} \lg N \quad \text{для } \sigma_{a\max} = \sigma_a \quad (1)$$

где: n_c - усталостная долговечность в циклах, определена в программированных испытаниях с максимальным напряжением в спектре,

N - число циклов до разрушения при постоянной амплитуде напряжения,

ξ - параметр функции плотности распределения амплитуд напряжения,

r - показатель степени.

На основе испытаний образцов и деталей машин сделанных из стали 45, 10 ВХ, 10 с поверхностной закалкой после цементирования, и сварных узлов, определены исходные данные для расчетов на усталостную долговечность.

В работе проведен также анализ результатов испытаний влияния: секвенций нагрузки, напряжений находящихся ниже предела усталости, количества периодов программы нагрузок до момента разрушения и параметров спектра нагрузки на усталостную долговечность деталей машин.

Из представленных результатов испытаний возникает, что разница средних усталостных долговечностей определенных при случайной и программной нагрузке является несущественной. Разница усталостной долговечности определенной во время испытаний с четырьмя разными программными нагрузками тоже несущественная.

Влияние напряжений находящихся ниже предела усталости зависит от значения параметров спектра. Для малых значений максимального напряжения в спектре и малых значений коэффициента заполнения это влияние является существенным; по мере увеличения значения параметров спектра это влияние уменьшается.

Небольшое количество периодов программной нагрузки реализованных до усталостного разрушения может быть причиной возрастания определенной в программных испытаниях усталостной долговечности. С увеличением количества периодов значение усталостной долговечности приближается к усталостной долговечности определенной в испытаниях со случайной нагрузкой.

DODATEK

D.1. Wyniki opracowania wykresu losowych naprężeń w ramie rowerowej metodą pełnych cykli (tab. D.1)

Tabela D.1

Wyniki opracowania wykresu losowych naprężeń
w ramie rowerowej metodą pełnych cykli

$\sigma_{mj} \backslash \sigma_{ai}$	[MPa]	160	140	120	100	80	60	40	20	n_a
[MPa]	j \ 1	1	2	3	4	5	6	7	8	
80	I					1		5		6
60	II					2	2	15	11	30
40	III	2		1	1	1	11	21	10	47
20	IV		3	4	7	8	4	15	11	52
0	V			2	8	6	5	21	5	47
- 20	VI	1		1		2	2	13	6	25
- 40	VII					1	2	6	5	14
- 60	VIII						2	3	5	10
- 80	IX									
n_a		3	3	8	16	21	28	99	53	231

D.2. Zestawienie wyników badań zmęczeniowych (tab. D.2-D.24)

Tabela D.3

Wyniki badań zmęczeniowych próbek okrągłych z karbem wykonanych ze stali 45 w zakresie nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej

Lp.	Nr próbki	Maksymalne naprężenie $\sigma_{a \max}$ [MPa]	Liczba cykli do pęknięcia $N/10^6$	Lp.	Nr próbki	Maksymalne naprężenie $\sigma_{a \max}$ [MPa]	Liczba cykli do pęknięcia $N/10^6$
1	2	3	4	1	2	3	4
1	13	161,6	5,0/	15	79	165,2	5,0/
2	14	165,2	5,0/	16	83	168,8	5,0/
3	15	165,2	1,0	17	87	172,4	5,0/
4	23	161,6	3,8	18	88	176,0	0,6
5	25	158,0	1,7	19	94	172,4	1,7
6	27	154,4	5,0/	20	95	168,8	1,2
7	46	158,0	5,0/	21	96	165,2	1,3
8	55	161,6	5,0/	22	99	161,6	5,0/
9	58	165,2	5,0/	23	101	165,2	0,9
10	59	168,8	5,0/	24	102	161,6	5,0/
11	63	172,4	1,7	25	110	165,2	5,0/
12	64	168,8	1,2	26	107	168,8	1,7
13	65	165,2	0,24	27	113	165,2	5,0/
14	68	161,6	5,0/				

Badania przeprowadzono metodą schodkową dla następujących danych: minimalny poziom naprężenia $\sigma_{a \min} = 154,4$ MPa, przyrost naprężenia na stopień $\Delta\sigma = 3,6$ MPa, liczba stopni - 7, bazowa liczba cykli $N_0 = 5 \cdot 10^6$.
W nawiasach podano liczbę cykli obciążenia próbek, które osiągnęły bazową liczbę cykli i nie uległy pęknięciu zmęczeniowemu.

Tabela D.2

Wyniki badań zmęczeniowych próbek okrągłych z karbem wykonanych ze stali 45 w zakresie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej

Lp.	Nr próbki	Naprężenie σ_a [MPa]	Liczba cykli do pęknięcia $N/10^4$	Lp.	Nr próbki	Naprężenie σ_a [MPa]	Liczba cykli do pęknięcia $N/10^4$
1	2	3	4	1	2	3	4
1	1		1,03	18	36		3,60
2	2		1,53	19	48	304	3,40
3	28		0,90	20	50		3,60
4	29	424	1,00	21	49		4,00
5	34		1,02	22	41		5,0
6	37		1,20	23	56		8,0
7	47		1,25	24	40		10,3
8	30		2,00	25	39	248	11,6
9	31		1,80	26	57		14,0
10	32		1,50	27	51		6,0
11	33	368	1,20	28	44		8,0
12	38		1,60	29	11		20,0
13	43		2,00	30	12		32,0
14	52		3,00	31	54		30,0
15	9		5,00	32	53	192	39,0
16	10	304	4,00	33	42		44,0
17	35		5,40	34	45		63,0

Tabela D.6

Wyniki badań zmęczenia próbek okrągłych z karbem wykonanych ze stali 45 przy programowanym obciążeniu /H₁-Lo/, $\xi = 0,34$

Lp.	Nr próbki	Maksymalne naprężenie $\sigma_{a \max}$ [MPa]	Liczba cykli do pęknięcia $n_c / 10^6$	
			3	4
1	2			
1	70			0,31
2	71			0,10
3	72	365		0,35
4	73			0,05
5	143			0,38
6	144			0,32
7	145	325		0,50
8	146			0,39
9	131			0,79
10	132			0,96
11	133	285		0,49
12	134			0,69
13	104			0,57
14	105			1,05
15	106	285		0,69
16	108			1,15
17	127			2,6
18	128			1,5
19	129	245		1,1
20	130			1,4
21	209			45,0
22	210			25,0
23	211	205		50,0
24	212			40,0

Tabela D.5

Wyniki badań zmęczenia próbek okrągłych z karbem wykonanych ze stali 45 przy programowanym obciążeniu /Lo-H₁/, $\xi = 0,34$

Lp.	Nr próbki	Maksymalne naprężenie $\sigma_{a \max}$ [MPa]	Liczba cykli do pęknięcia $n_c / 10^6$	
			3	4
1	2			
1	60			0,49
2	62			0,39
3	66	365		0,30
4	69			0,20
5	147			0,56
6	148			0,65
7	149	325		0,57
8	150			0,46
9	135			0,76
10	136			0,846
11	137	285		0,76
12	138			1,05
13	99			0,86
14	110			0,70
15	111	285		0,94
16	112			1,24
17	159			2,6
18	160			1,8
19	161	245		2,1
20	162			1,2
21	213			42,5
22	214			50,0
23	215	205		25,0
24	216			35,0

Tabela D.4

Wyniki badań zmęczenia próbek okrągłych z karbem wykonanych ze stali 45 przy obciążeniu pseudolosowym /R/, $\xi = 0,34$

Lp.	Nr próbki	Maksymalne naprężenie $\sigma_{a \max}$ [MPa]	Liczba cykli do pęknięcia $n_c / 10^6$	
			3	4
1	2			
1	22			0,08
2	21			0,063
3	4	405		0,15
4	15			0,238
5	225			0,17
6	224			0,20
7	242	365		0,25
8	244			0,22
9	221			0,36
10	246			0,48
11	226	325		0,22
12	241			0,36
13	3			0,87
14	5			0,84
15	237			1,27
16	227			0,48
17	238	285		0,55
18	236			0,60
19	243			0,80
20	233			1,09
21	228			1,60
22	229			3,20
23	230	245		1,06
24	233			2,20

Tabela D.7

Wyniki badań zmęczeniowych próbek okrągłych z karbem wykonanych ze stali 45 przy obciążeniu programowanym /Lo - Hi - Lo/, $\xi = 0,34$

Lp.	Nr próbki	Maksymalne naprężenie σ_a max [MPa]	Liczba cykli do pęknięcia $n_c/10^6$				
				1	2	3	4
1							
2	269	405	0,08				
3	270		0,12				
4	74		0,20				
5	75	365	0,11				
6	76		0,61				
7	77		0,20				
8	171		0,57				
9	172	325	0,71				
10	173		0,83				
11	174		0,62				
12	151		1,1				
13	152	285	0,79				
14	153		0,88				
15	154		1,16				
16	117		0,77				
17	118	285	1,24				
18	119		0,96				
19	120		1,35				
20	163		2,5				
21	164	245	1,5				
22	165		2,3				
23	166		2,1				
24	217		25,0				
25	218	205	47,5				
26	219		80,0				
	220		50,0				

Tabela D.8

Wyniki badań zmęczeniowych próbek okrągłych z karbem wykonanych ze stali 45 przy obciążeniu programowanym /3/, $\xi = 0,34$

Lp.	Nr próbki	Maksymalne naprężenie σ_a max [MPa]	Liczba cykli do pęknięcia $n_c/10^6$				
				1	2	3	4
1							
2	271		0,13				
3	272	365	0,18				
4	273		0,24				
5	80		0,35				
6	155		0,67				
7	156	325	0,63				
8	157		0,77				
9	158		0,48				
10	139		1,4				
11	140	285	0,8				
12	141		1,0				
13	142		0,95				
14	123		1,2				
15	123	285	0,77				
16	124		0,96				
17	125		1,1				
18	167		1,5				
19	168	245	1,3				
20	169		2,0				
21	170		2,2				
22	204		35,0				
23	205	205	95,0				
24	206		170,0				
	207		40,0				

Tabela D.9

Wyniki badań wpływu naprężeń mniejszych od nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej na trwałość zmęczeniową próbek okrągłych z karkbem /parametry widma: $\sigma_a \text{ max} = 245 \text{ MPa}$, początkowe wartości $n_0 = 10^5$, $\xi = 0,34$

Lp.	Oznaczenie programu	Liczba powtórzeń programu λ_i					Średnia liczba powtórzeń $\bar{\lambda}_i$
		3	4	5	6	7	
1	2						
1	J 7	15,4	15,6	15,6	15,5	15,5	15,5
2	J 6	20,4	20,4	15,0	15,6	17,9	17,9
3	J 5	15,0	13,0	20,0	22,0	18,0	18,0
4	J 4	12,6	25,6	23,6	20,6	21,9	21,9
5	J 3	45,0	40,0	25,0	25,0	33,8	33,8

Tabela D.11

Wyniki badań wpływu naprężeń mniejszych od nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej na trwałość zmęczeniową próbek okrągłych z karkbem /początkowe parametry widma: $\sigma_a \text{ max} = 325 \text{ MPa}$, $n_0 = 5 \cdot 10^4$, $\xi = 0,34$

Lp.	Oznaczenie programu	Liczba powtórzeń programu λ_i					Średnia liczba powtórzeń $\bar{\lambda}_i$
		3	4	5	6	7	
1	2						
1	J 7	10,0	12,4	14,2	15,0	12,90	12,90
2	J 6	12,1	10,0	14,0	16,0	13,03	13,03
3	J 5	12,0	12,6	13,0	13,1	12,64	12,64
4	J 4	15,0	15,6	17,0	22,0	17,40	17,40
5	J 3	36,0	28,4	33,0	38,0	31,35	31,35

Tabela D.10

Wyniki badań wpływu naprężeń mniejszych od nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej na trwałość zmęczeniową próbek okrągłych z karkbem /parametry widma: $\sigma_a \text{ max} = 245 \text{ MPa}$, początkowe wartości $n_0 = 10^4$, $\xi = 0,56$

Lp.	Oznaczenie programu	Liczba powtórzeń programu λ_i					Średnia liczba powtórzeń $\bar{\lambda}_i$
		3	4	5	6	7	
1	2						
1	J 7	15,0	25,0	27,5	25,0	23,1	23,1
2	J 6	15,0	25,0	30,0	25,0	27,8	27,8
3	J 5	22,5	22,5	25,0	25,0	23,3	23,3
4	J 4	20,0	26,7	20,8	20,0	23,3	23,3
5	J 3	22,5	30,0	22,5	30,4	28,9	28,9

Tabela D.12

Wyniki badań wpływu naprężeń mniejszych od nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej na trwałość zmęczeniową eliptrycznych węzłów lutowanych /początkowe parametry widma: $\sigma_a \text{ max} = 160 \text{ MPa}$, $n_0 = 4,86 \cdot 10^4$, $\xi = 0,4$

Lp.	Oznaczenie programu	Liczba powtórzeń okresu programu λ_i					Średnia liczba powtórzeń $\bar{\lambda}_i$
		3	4	5	6	7	
1	2						
1	J 8	10,12	10,39	6,99	13,87	10,34	10,34
2	J 7	12,92	9,48	13,72	11,64	11,94	11,94
3	J 6	27,59	34,23	22,19	-	27,98	27,98
4	J 5	43,54	21,23	38,00	-	34,26	34,26
5	J 4	43,10	21,73	55,17	-	39,83	39,83
6	J 3	28,125	48,75	76,25	-	51,00	51,00

Tabela D.13

Wyniki badań wpływu naprężeń mniejszych od nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej na trwałość zmęczeniową /początkowe parametry widma: $\sigma_a \text{ max} = 513 \text{ MPa}$, $n_0 = 10^5$, $\xi = 0,56/$

Lp.	Oznaczenie programu	Liczba powtórzeń okresu programu λ_i				Srednia liczba powtórzeń $\bar{\lambda}_i$
		3	4	5	6	
1						7
1	J 8	19,9	10,2	8,3	-	12,8
2	J 7	6,1	7,1	24,1	-	12,6
3	J 6	4,4	12,0	29	-	15,1
4	J 4	16	46	30	-	30,7

Tabela D.15

Wyniki badań wpływu liczby okresów programu realizowanych do pęknięcia zmęczeniowego na trwałość zmęczeniową /próbki okrągłe z karbem ze stali 45, $\sigma_a \text{ max} = 260 \text{ MPa}$, $\xi = 0,77$, program J/

Lp. programu	Liczba cykli w bloku n_0	Liczba cykli do pęknięcia zmęczeniowego				Liczba powtórzeń λ_i	
		$n_{c_i}/10^4$					
		3	4	5	6	7	8
1	2						
1	$5,0 \cdot 10^3$	8,5	11,0	15,0	-	11,5	23,0
2	$1,0 \cdot 10^4$	17,0	21,0	19,0	11,0	17,0	17,0
3	$2,0 \cdot 10^4$	19,0	16,0	20,0	12,0	16,75	8,37

Tabela D.14

Wyniki badań wpływu liczby okresów programu realizowanych do pęknięcia zmęczeniowego na trwałość zmęczeniową /próbki okrągłe z karbem ze stali 45, $\sigma_a \text{ max} = 205 \text{ MPa}$, $\xi = 0,34$, program J/

Lp.	Liczba cykli w bloku programu n_0	Liczba cykli do pęknięcia zmęczeniowego						λ_i
		$n_{c_i}/10^7$						
		3	4	5	6	7	8	
1	2							
1	$2,5 \cdot 10^6$	3,75	5,25	4,86	3,12	4,25	17,0	
2	$5,0 \cdot 10^6$	4,50	2,50	5,00	4,00	4,00	8,0	
3	$7,5 \cdot 10^6$	3,00	3,30	3,37	4,40	3,52	4,7	
4	$1,0 \cdot 10^7$	4,50	3,10	2,00	2,75	2,90	2,9	

Tabela D.16

Wyniki badań wpływu liczby okresów programu realizowanych do pęknięcia zmęczeniowego na trwałość zmęczeniową /elipsydzny węzeł lutowany ze stali 10BX, $\sigma_a \text{ max} = 160 \text{ MPa}$, $\xi = 0,40$, program J/

Lp. programu	Liczba cykli w bloku programu n_0	Liczba cykli do pęknięcia zmęczeniowego						Liczba powtórzeń λ_i
		$n_{c_i}/10^5$						
		3	4	5	6	7	8	
1	2							
1	$2,5 \cdot 10^4$	12,4	11,8	10,4	-	11,55	46,20	
2	$5,0 \cdot 10^4$	9,8	12,6	13,3	-	11,91	23,83	
3	$7,5 \cdot 10^4$	9,7	11,9	11,1	-	10,89	14,53	
4	$1,0 \cdot 10^5$	9,8	10,1	6,8	13,5	10,05	10,05	
5	$2,5 \cdot 10^5$	10,2	4,8	9,4	-	8,15	3,26	

Tabela D.17

Wyniki badań wpływu liczby okresów programu realizowanych do pęknięcia zmęczeniowego na trwałość zmęczeniową / eliptyczny węzeł lutownicy ze stali 10BX, $\sigma_a \text{ max} = 153 \text{ MPa}$, $\xi = 0,41$, program J/

Lp.	Liczba cykli w bloku programu n_0	Liczba cykli do pęknięcia zmęczeniowego $n_{c1}/10^5$						Liczba powtórzeń λ_1
		3	4	5	6	7	8	
1	2							
1	$2,5 \cdot 10^4$	13,0	14,5	15,8	-	14,16	56,67	
2	$5,0 \cdot 10^4$	12,5	13,5	15,0	-	13,67	27,33	
3	$1,0 \cdot 10^5$	9,2	12,5	14,0	16,0	12,93	12,93	
4	$2,0 \cdot 10^5$	10,2	13,7	13,8	-	12,56	6,28	

Tabela D.18

Wyniki badań wpływu liczby okresów programu realizowanych do pęknięcia zmęczeniowego na trwałość zmęczeniową / eliptyczny węzeł lutownicy ze stali 10BX, $\sigma_a \text{ max} = 122 \text{ MPa}$, $\xi = 0,41$, program J/

Lp.	Liczba cykli w bloku programu n_0	Liczba cykli do pęknięcia zmęczeniowego $n_{c1}/10^6$						Liczba powtórzeń λ_1
		3	4	5	6	7	8	
1	2							
1	$1,0 \cdot 10^5$	5,3	8,4	9,7	10,8	8,55	85,50	
2	$5,0 \cdot 10^5$	8,9	12,1	9,75	-	10,25	20,50	
3	$1,0 \cdot 10^6$	9,1	10,7	12,3	-	10,70	10,70	
4	$1,5 \cdot 10^6$	9,15	9,75	10,2	-	9,70	6,47	

Tabela D.19

Wyniki badań zmęczeniowych próbek okrągłych z karbem wykonanych ze stali 45 przy obciążeniu programowym J, $\xi = 0,56$

Lp.	Nr próbki	Napężenie $\sigma_a \text{ max}$ [MPa]	Liczba cykli do pęknięcia $N/10^4$	
			3	4
1	2			
1	321		5,1	
2	322	352	5,0	
3	323		5,6	
4	324		5,8	
5	320		8,9	
6	325	312	11,2	
7	326		8,2	
8	327		9,8	
9	319		20,5	
10	328		18,6	
11	330	272	6,3	
12	331		15,0	
13	329		15,7	
14	356		33,0	
15	357		55,0	
16	358	232	60,0	
17	359		55,0	
18	315		180,0	
19	316		110,0	
20	317	192	170,0	
21	318		183,0	
22	332		110,0	
23	333		330,0	
24	334		600,0	
25	335		160,0	

Tabela D.20

Wyniki badań zmęczeniowych próbek okrągłych z karbem wykonanych ze stali 45 przy obciążeniu programowym J, $\xi = 0,77$

Lp.	Nr próbki	Napężenie $\sigma_a \text{ max}$ [MPa]	Liczba cykli do pęknięcia $n_c/10^4$	
			3	4
1	2			
1	336		5,25	
2	342	324	6,25	
3	345		7,50	
4	343		7,0	
5	340		15,34	
6	344	295	7,0	
7	346		9,9	
8	347		11,3	
9	337		16,4	
10	341	263	21,0	
11	348		18,4	
12	349		10,2	
13	338		27,0	
14	350		25,0	
15	351	230	24,0	
16	352		16,0	
17	339		95,0	
18	353	196	55,0	
19	354		140,0	
20	355		55,0	

Tabela D.21

Wyniki badań trwałości zmęczeniowej próbek okrągłych z karbem wykonanych ze stali 45 dla różnych ukształtowanych programów obciążeń / σ_a max = 245 MPa, początkowa wartość $\xi = 0,34$

Ip.	Oznaczenie programu	Współczynnik ξ	Liczba cykli $n_0/10^3$	Liczba cykli do pęknięcia zmęczeniowego $n_{c_i}/10^5$					$\bar{n}_c/10^5$	
				5	6	7	8	9		
1	2	3	4							
1	J 7	0,3959	8,30	1,28	1,29	1,30	1,29	1,29	1,29	1,29
2	J 6	0,5028	5,20	1,06	1,06	0,78	0,81	0,93	0,93	0,93
3	J 5	0,5983	3,20	0,48	0,42	0,64	0,70	0,56	0,56	0,56
4	J 4	0,6976	1,82	0,28	0,47	0,47	0,37	0,40	0,40	0,40
5	J 3	0,8330	1,01	0,45	0,40	0,25	0,25	0,34	0,34	0,34

Tabela D.23

Wyniki badań trwałości zmęczeniowej próbek okrągłych z karbem wykonanych ze stali 45 dla różnych ukształtowanych programów obciążeń / σ_a max = 325 MPa, początkowa wartość $\xi = 0,34$

Ip.	Oznaczenie programu	Współczynnik ξ	Liczba cykli $n_0/10^4$	Liczba cykli do pęknięcia zmęczeniowego $n_{c_i}/10^5$					$\bar{n}_c/10^5$	
				5	6	7	8	9		
1	2	3	4							
1	J 7	0,3959	4,15	4,15	5,15	5,89	6,23	5,35	5,35	5,35
2	J 6	0,5028	2,40	3,14	3,36	3,84	3,19	3,19	3,19	3,19
3	J 5	0,5983	1,37	1,65	1,73	1,79	1,80	1,74	1,74	1,74
4	J 4	0,6976	0,66	1,03	1,07	1,16	1,51	1,19	1,19	1,19
5	J 3	0,8330	0,28	0,73	0,80	0,93	1,06	0,88	0,88	0,88

Tabela D.22

Wyniki badań trwałości zmęczeniowej próbek okrągłych z karbem wykonanych ze stali 45 dla różnych ukształtowanych programów obciążeń / σ_a max = 245 MPa, początkowa wartość $\xi = 0,56$

Ip.	Oznaczenie programu	Współczynnik ξ	Liczba cykli $n_0/10^3$	Liczba cykli do pęknięcia zmęczeniowego $n_{c_i}/10^5$					$\bar{n}_c/10^5$	
				5	6	7	8	9		
1	2	3	4							
1	J 7	0,625	8,75	1,31	2,19	2,41	2,19	2,03	2,03	2,03
2	J 6	0,6875	7,50	1,13	1,88	2,25	1,86	1,78	1,78	1,78
3	J 5	0,750	6,25	1,41	1,41	1,56	1,56	1,49	1,49	1,49
4	J 4	0,8128	5,0	1,00	1,34	1,04	1,00	1,09	1,09	1,09
5	J 3	0,8751	3,75	0,84	1,13	0,84	1,14	0,99	0,99	0,99

Tabela D.24

Wyniki badań trwałości zmęczeniowej eliptycznych węzłów lutowanych wykonanych ze stali 10BX dla różnych ukształtowanych programów obciążeń / σ_a max = 160 MPa, początkowa wartość $\xi = 0,4$

Ip.	Oznaczenie programu	Współczynnik ξ	Liczba cykli $n_0/10^4$	Liczba cykli do pęknięcia zmęczeniowego $n_{c_i}/10^5$					$\bar{n}_c/10^5$	
				5	6	7	8	9		
1	2	3	4							
1	J 8	0,5024	4,86	4,92	5,05	3,40	6,74	5,02	5,02	5,02
2	J 7	0,5864	2,50	3,23	2,37	3,43	2,91	2,98	2,98	2,98
3	J 6	0,6829	1,37	3,78	4,69	3,04	-	3,83	3,83	3,83
4	J 5	0,7860	0,69	2,83	1,38	2,47	-	2,23	2,23	2,23
5	J 4	0,8562	0,29	1,25	0,63	1,60	-	1,16	1,16	1,16
6	J 3	0,9500	0,16	0,45	0,78	1,22	-	0,82	0,82	0,82

D. Test analizy wariancji dla wielu średnich (tab. D.25-D.30)

Wyniki prób podane w tab. D.4 - D.8 oznaczono przez x_{ij} / $i = 1, 2, 3, 4, 5, j = 1, 2, \dots, 20$ lub 24 /

gdzie:

i - oznacza zbiór wyników trwałości dla poszczególnych krzywych /kolejno: 1 - R, 2 - Lo-Hi, 3 - Hi-Lo, 4 - Lo-Hi-Lo, 5 - J/, natomiast j - kolejny wynik. Na podstawie wyników $\lg n_{cij} = X_{ij}$ należy zweryfikować hipotezę $H_0: m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = m_5$, wobec hipotezy alternatywnej H_1 : nie wszystkie średnie badanych populacji są równe.

Test istotności /analizy wariancji/ dla tej hipotezy jest następujący. Z wyników poszczególnych prób wyznacza się średnie grupowe \bar{X}_i i średnią ogólną \bar{X} z wzorów:

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij} \quad (D.1)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij} \quad \text{gdzie } n = \sum_{i=1}^k n_i \quad (D.2)$$

Wyniki obliczeń podano w tab. D.25.

Tabela D.25

Lp.	Oznaczenie danych	Liczba danych n_i	Wartość średnia \bar{X}_i	Wartość $\sum_{j=1}^{n_i} /X_{ij} - \bar{X}_i/2$	Wartość $/\bar{X}_i - \bar{X}/2 n_i$
1	2	3	4	5	6
1	R	24	5,7278	4,3559	0,2319
2	Lo-Hi	20	5,8806	1,4675	0,0594
3	Hi-Lo	20	5,7487	3,0238	0,1188
4	Lo-Hi-Lo	20	5,9023	2,3641	0,1161
5	J	20	5,8715	2,0950	0,0412
6		$\sum n_i = 104$	$\bar{X} = 5,8261$	$\sum = 13,3063$	$\sum = 0,5673$

Na podstawie danych z tab. D.25 opracowano tab. D.26 analizy wariancji.

Tabela D.26

Zródło zmienności	Suma kwadratów	Stopnie swobody	Wariancja	Test F
1	2	3	4	5
Między grupami /krzywymi/	0,5673	4	0,1418	F = 1,0550
Wewnątrz grup /resztowa/	13,3063	99	0,1344	

Z tablicy rozkładu F Snedecowa dla przyjętego poziomu istotności $\alpha=0,05$ i dla stopni swobody 4 i 99 odczytuje się krytyczną wartość $F_{\alpha} = 2,46$. Ponieważ wartość F leży poza obszarem krytycznym, bo $F = 1,0550 < 2,46 = F_{\alpha}$, nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej H_0 o równości średnich wartości trwałości zmęczeniowej wyznaczonej dla poszczególnych obciążeń.

Przedstawiona wyżej analiza dotyczyła wyników badań trwałości zmęczeniowej dla poszczególnych obciążeń na wszystkich poziomach, dla których wyznaczono proste regresji.

Podobną analizę przeprowadzono dla wyników badań na średnim poziomie naprężeń w programie $\sigma_a \max = 285$ MPa. Wyniki obliczeń podano w tab. D.27 i D.28. Ctrzymana z obliczeń statystycznych wartość $F = 0,2937 < 2,64 = F_{\alpha}$ świadczy o tym, że brak podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej H_0 średnich wartości trwałości zmęczeniowej dla poszczególnych obciążeń na poziomie $\sigma_a \max = 285$ MPa.

Tabela D.27

Lp.	Oznaczenie danych	Liczba danych n_i	Wartość średnia \bar{x}_i	Wartość $\sum_{j=1}^{n_i} /x_{ij} - \bar{x}_i /^2$	Wartość $\sum / \bar{x}_i - \bar{x} /^2 n_i$
1	2	3	4	5	6
1	R	8	5,8884	0,2984	0,0256
2	Lo-Hi	8	5,9446	0,1957	0,0001
3	Hi-Lo	8	5,8856	0,2925	0,0035
4	Lo-Hi-Lo	8	6,0050	0,1832	0,0035
5	J	8	6,0020	0,0919	0,0032
6		$\sum n_i = 40$	$\bar{\bar{x}} = 5,9451$	$\sum = 1,0617$	$\sum = 0,0359$

Tabela D.28

Zródło zmienności	Suma kwadratów	Stopnie swobody	Wariancja	Test F
1	2	3	4	5
Między grupami /obciążeń/	0,0359	4	0,0089	F = 0,2937
Wewnątrz grup /resztowa/	1,0617	35	0,0303	

Wyniki badań trwałości zmęczeniowej na poziomie 205 MPa wyraźnie odbiegają od prostych regresji, stąd konieczność przeprowadzenia oddzielnej analizy statystycznej wyników na tym poziomie. Wyniki analizy wariancji dla średnich na tym poziomie przedstawione zostały w tab. D.29 i D.30.

Tabela D.29

Lp.	Oznaczenie danych	Liczba danych n_i	Wartość średnia \bar{X}_i	Wartość $\sum_{j=1}^{n_i} /X_{1j} - \bar{X}_i /^2$	Wartość $/\bar{X}_i - \bar{X} /^2 n_i$
1	2	3	4	5	6
1	Lo-Hi	4	7,56709	0,0730	0,0388
2	Hi-Lo	4	7,58804	0,0666	0,0240
3	Lo-Hi-Lo	4	7,66917	0,1648	0,0000
4	J	4	7,83857	0,5518	0,1192
5		$\sum n_i = 16$	$\bar{X} = 7,66572$	$\sum = 0,8563$	$\sum = 0,1820$

Tabela D.30

Zródło zmienności	Suma kwadratów	Stopnie swobody	Wariancja	Test F
1	2	3	4	5
Między grupami /obciążeń/	0,1820	3	0,0606	F = 0,8499
Wewnątrz grup /resztowa/	0,8563	12	0,0713	

Spełniony warunek $F = 0,8499 < 3,49 = F_{\alpha}$ świadczy o tym, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o równości średnich wartości trwałości zmęczeniowej wyznaczonej dla poszczególnych obciążeń na poziomie $\sigma_{amax} = 205 \text{ MPa}$.

D.4. Test równoległości prostych regresji (tab. D.31-D.32)

Na podstawie wyników badań należy sprawdzić hipotezę, że dwie liniowe funkcje regresji $y = \beta_1 \cdot X + \gamma_1$ i $y = \beta_2 \cdot X + \gamma_2$ mają takie same współczynniki regresji, tj. należy zweryfikować hipotezę $H_0: \beta_1 = \beta_2$, czyli $H_0: \beta_1 - \beta_2 = 0$, wobec hipotezy alternatywnej $H_1: \beta_1 \neq \beta_2$. Z badań metodą najmniejszych kwadratów szacujemy proste regresji otrzymując odpowiednio $y = b_1 x + c_1$ oraz $y = b_2 x + c_2$.

Obliczyć należy statystykę:

$$t = \frac{b_1 - b_2}{s_{b_1 - b_2}} \quad (D.3)$$

gdzie:

$$s_{b_1 - b_2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_1} /y_{11} - \hat{y}_{11}/^2 + \sum_{i=1}^{n_2} /y_{12} - \hat{y}_{12}/^2}{n_1 + n_2 - 4} \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^{n_1} /x_{11} - \bar{x}_1/2} + \frac{1}{\sum_{i=1}^{n_2} /x_{12} - \bar{x}_2/2} \right)} \quad (D.4)$$

Dane pomocnicze do obliczeń podanych wyżej wielkości zamieszczono w tab. D.31.

Tabela D.31

Lp.	Prosta regresji		Liczba danych n	Wartość	Wartość
	Oznaczenie	Równanie		$\sum_{i=1}^n /x_i - \bar{x}/2$	$\sum_{i=1}^n /y_i - \hat{y}_i/2$
1	2	3	4	5	6
1	R	$y_1 = -0,1592x_1 + 3,4013$	24	4,3559	0,0187
2	Lo-Hi	$y_1 = -0,2015x_1 + 3,6601$	20	1,4675	0,0241
3	Hi-Lo	$y_1 = -0,1307x_1 + 3,2261$	20	3,0238	0,0219
4	Lo-Hi-Lo	$y_1 = -0,1489x_1 + 3,3532$	20	2,3641	0,0135
5	J	$y_1 = -0,1661x_1 + 3,4499$	20	2,0950	0,0109

Oznaczenia do tab. D.31:

$$x_i = \lg n_{ci}$$

$$y_i = \lg \sigma_{amax i}$$

\hat{y}_i - wartość wzięta z wyznaczonej prostej regresji dla n_{ci}

Wyniki obliczeń statystyk na podstawie wzorów (D.3) i (D.4) oraz dane do sprawdzenia hipotezy $H_0: b_1 = b_2$ dla poszczególnych par prostych regresji według systemu "każdy z każdym" podano w tab. D.32.

Tabela D.32

Lp.	Oznaczenie prostych regresji	Wartość $s_{b_1 - b_2}$	Wartość statystyki $ t $	Wartość krytyczna t_γ	$ t \geq t_\gamma$
1	2	3	4	5	6
1	R-/Lo-Hi/	0,0300	1,410	2,021	$ t < t_\gamma$
2	R-/Hi-Lo/	0,0236	1,202	2,021	$ t < t_\gamma$
3	R-/Lo-Hi-Lo/	0,0228	0,452	2,021	$ t < t_\gamma$
4	R-J	0,0222	0,311	2,021	$ t < t_\gamma$
5	/Lo-Hi/-/Hi-Lo/	0,0348	2,040	2,042	$ t < t_\gamma$
6	/Lo-Hi/-/Lo-Hi-Lo/	0,0332	1,584	2,042	$ t < t_\gamma$
7	/Lo-Hi/~J	0,0324	1,092	2,042	$ t < t_\gamma$
8	/Hi-Lo/-/Lo-Hi-Lo/	0,0260	0,700	2,042	$ t < t_\gamma$
9	/Hi-Lo/~J	0,0269	1,316	2,042	$ t < t_\gamma$
10	/Lo-Hi-Lo/~J	0,0232	0,741	2,042	$ t < t_\gamma$

Ponieważ z danych wyszczególnionych w tab. D.32 w kolumnach 4, 5 i 6 wynika, że dla wszystkich przypadków zachodzi zależność $|t| < t_\gamma$, wobec tego nie ma podstaw do odrzucenia hipotez o równości współczynników regresji prostych regresji.

D.5. Test wyrazu wolnego w równaniu prostej regresji (tab. D.88-D.84)

Opracowanie statystyczne oparto na pracy [2]. Do opracowania wzięto wyniki badań zmęczeniowych zamieszczonych w tab. D.2, D.4, D.8, D.19, D.20 oraz wyniki badań eliptycznego wężła lutowanego i osi zamieszczone w sprawozdaniu z badań [234] oraz wyniki badań okrągłego wężła lutowanego i ramy rowerowej typu "Wigry" zamieszczone w sprawozdaniu z badań [231].

Mając równanie prostej regresji w postaci $y = \beta_0 + \beta_1 X$ stawia się hipotezę zerową $H_0: \beta_0 = B_0$, gdzie B_0 - pewna ustalona liczba.

Statystyka testowana wyrażona jest wzorem

$$K = \frac{|c - B_0| \sqrt{n \sum (X_i - \bar{X})^2}}{s_n \sqrt{\sum X_i^2}} \quad (D.5)$$

gdzie:

$$s^2 = \frac{1}{n-2} \sum (Y_i - c - b X_i)^2 \quad (D.6)$$

lub

$$s^2 = \frac{1}{n-2} \sum (Y_i - \bar{Y})^2 - b \sum (X_i - \bar{X}) (Y_i - \bar{Y}) \quad (D.7)$$

c - wartość estymatora wyrazu wolnego w równaniu prostej / β_0 /

$b = \frac{1}{m} \sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) / \sum (X_i - \bar{X})^2$ - wartość estymatora współczynnika kierunkowego prostej regresji / β_1 /

Statystyka K ma rozkład t - Studenta z $n-2$ stopniami swobody. Hipotezę zerową H_0 odrzuca się na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, gdy K przyjmie wartość z przedziału

$$| -\infty; -t_{n-2, \alpha/2} | \text{ lub } | t_{n-2, \alpha/2}; \infty | \quad (D.8)$$

Wyniki obliczeń podano w tab. D.33 korzystając z danych pomocniczych, które zamieszczono w tab. D.34.

Z porównania wartości podanych w kol. 7 i 8 tab. D.33 wynika, że wszystkie wartości statystyki K leżą poza przedziałami (D.8), a zatem nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej.

Tabela D.33

Wyniki obliczeń do testu wyrazu wolnego w równaniach prostych regresji

Lp.	Obiekt badań	Program	$\frac{m_0}{m_1}$	$\frac{c_1}{c_0}$	B_0	K	$t_{n-2, \alpha/2}$
1	2	3	4	5	6	7	8
1		$W_{1,0}$	-	-	3,48	0,28904	2,450
2	Próbki okrągłe z karbem	$R_{0,34}$	1,372	0,9738	3,48	- 0,9965	2,508
3		$J_{0,34}$	1,319	0,9878	3,48	- 0,3017	2,552
4		$J_{0,56}$	1,261	0,9613	3,48	- 1,2150	2,552
5		$J_{0,77}$	1,177	0,9704	3,48	- 0,1190	2,552
6		Węzeł lutowany 10BX /elip-tyczny/	$W_{1,0}$	-	-	2,94	1,3162
7		$J_{0,29}$	1,459	0,9654	2,94	- 1,7757	2,440
8	Oś stal 10 hart. pow.	$W_{1,0}$	-	-	1,96	- 2,45	2,450
9		$J_{0,56}$	1,7803	0,9594	1,96	2,45	2,624
10	Węzeł lutowany 10BX /okrągły	$W_{1,0}$	-	-	3,30	1,9498	2,552
11		$J_{0,3}$	2,1168	0,8837	3,30	- 1,1354	2,998
12	Rama roweru składanego "Wigry"	$W_{1,0}$	-	-	3,10	1,0166	3,365
13		$J_{0,3}$	2,6285	0,8143	3,10	- 1,7409	2,718

Dane pomocnicze do obliczeń statystycznych / test wyrazu wolnego/

Lp.	Objekt badań	Oznaczenie programu	Równanie	Liczba danych	x_1	$/x_1 - \bar{x}/^2$	$/y_1 - \bar{y}/^2$	$/x_1 - \bar{x}/$ $/x_1 - \bar{y}/$
1		3	4	5	6	7	8	9
1		$W_{1,0}$	$y = -0,2191x + 3,4929$	34	745,9315	0,5997	0,4858	- 2,0908
2	Próbki okrągłe z karbem stal 45	$R_{0,34}$	$y = -0,1597x + 3,4013$	24	773,7104	4,3559	0,1305	- 0,7010
3		$J_{0,34}$	$y = -0,1661x + 3,4499$	20	691,5767	2,09498	0,068628	- 0,3478
4		$J_{0,56}$	$y = -0,17379x + 3,3576$	20	581,7	5,5906	0,17307	- 0,97161
5		$J_{0,77}$	$y = -0,18613x + 3,3894$	20	555,78	3,0143	0,11991	- 0,56105
6	Eliptryczny węzeł lutowany stal 10BX	$W_{1,0}$	$y = -0,16694x + 2,9925$	24	587,52	7,4240	0,21847	- 1,2393
7		$J_{0,29}$	$y = -0,11444x + 2,8888$	37	1504,86	6,085211	0,085211	- 0,7060
8	Oś stal 10 hartowana powierzchniowo	$W_{1,0}$	$y = -0,052663x + 2,0127$	35	1007,615	16,327	0,05429	- 0,85982
9		$J_{0,56}$	$y = -0,029581x + 1,9310$	16	582,192	4,6788	0,004328	- 0,1384
10	Okrągły węzeł lutowany stal 10BX	$W_{1,0}$	$y = -0,24329x + 3,5473$	20	610,94	2,01105	0,13806	- 0,48913
11		$J_{0,3}$	$y = -0,12331x + 3,0474$	9	346,365	2,7778	0,047702	- 0,34255
12	Rama "Wigry"	$W_{1,0}$	$y = -0,30882x + 3,4234$	7	200,214	0,90941	0,10282	- 0,28084
13		$J_{0,3}$	$y = -0,11749x + 2,7876$	13	660,40	4,0089	0,08329	- 0,47101

Objaśnienia: symbol np. $J_{0,34}$ - oznacza program z nieregularnym następnstwem poziomów naprężeń o współczynniku wypełnienia 0,34;

$W_{1,0}$ - oznacza krzywą zmęczenia / $\xi = 1,0/$

Tabela D.35

D.6. Widma obciążeń elementów pojazdów jednośladowych (tab. D.35)

Współczynniki wypełnienia widm obciążeń ξ elementów pojazdów jednośladowych

Lp.	Badany pojazd	Miejsce pomiaru naprężeń eksploatacyjnych	Nawierzchnia drogi	Współczynnik ξ	Lp.	Badany pojazd	Miejsce pomiaru naprężeń eksploatacyjnych	Nawierzchnia drogi	Współczynnik ξ
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1			A	0,36	21	Motocykl		A	0,38
2			B	0,33	22	typu "Pegaz"	rama	B	0,39
3	Rower sportowy	rama	P	0,35	23			P	0,34
4	typu "Delta"		S	0,25	24			S	0,24
5			A	0,51	25			A	0,29
6		elementy układu napędowego	B	0,69	26		oś koła przedniego	B	0,36
7			P	0,61	27	Motocykl		P	0,40
8			S	0,56	28	typu "WSK-125"		S	0,27
9			A	0,40	29			A	0,37
10			B	0,32	30		rama	B	0,32
11	Rower szlasyany	rama	P	0,36	31			P	0,29
12	typu "Wigry"		S	0,30	32			S	0,27
13			A	0,34	Objaśnienia: A - nawierzchnia asfaltowa, B - bruk, P - droga nieutwardzona, S - widmo sumaryczne uwzględniające procentowy udział nawierzchni w całkowitym przebiegu pojazdu.				
14		widelec koła przedniego	B	0,35					
15			P	0,41					
16			S	0,29					
17	Motocykl		A	0,27				A	0,27
18	typu "Komar"	wahacz koła przedniego	B	0,34				B	0,34
19			P	0,23				P	0,23
20			S	0,25				S	0,25

noteka Główna ATR
w Bydgoszczy

1006

2. 1980