

Na prawach rękopisu

RAPORTY INSTYTUTU MATERIAŁOZNAWSTWA I MECHANIKI TECHNICZNEJ
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Seria PRE nr 22

WYTRZYMAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA
MOSIĄDZU M058 I DURALU PA6N
PRZY PROGRAMOWANYCH PRZEBIEGACH
NAPRĘŻENIA

Bogumiła Kuźnicka

Słowa kluczowe: zmęczenie, obciążenia
programowane, żywotność

Wrocław, 1980

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
INSTYTUT MATERIAŁOZNAWSTWA I MECHANIKI TECHNICZNEJ

mgr inż. Bogumiła Kuźnicka

WYTRZYMAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA
MOSIĄDZU M058 I DURALU PA6N
PRZY PROGRAMOWANYCH PRZEBIEGACH
NAPRĘŻENIA

P r a c a d o k t o r s k a

Promotor:
Prof. dr hab. inż. Tadeusz Porębski

Wrocław, 1980

S P I S T R E S C I

Strona

Wstęp	5
I. Zagadnienie doboru parametrów programowanych przebiegów obciążenia. Metody obliczania żywotności zmęczeniowej	7
1. Przegląd wyników badań wpływu parametrów programowanego przebiegu obciążenia na żywotność zmęczeniową materiałów	7
1.1. Wpływ liczby cykli w bloku programowanego przebiegu obciążenia.	8
1.2. Wpływ naprężeń niższych od nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej.	10
1.3. Wpływ liczby stopni obciążenia	12
1.4. Wpływ sekwencji obciążeń	14
1.5. Wpływ wartości obciążenia rozpoczynającego przebieg.	18
1.6. Wpływ liczby cykli zmian obciążenia przypadających na każdy stopień przebiegu.	19
1.7. Wpływ zakresu wartości obciążeń w przebiegu	20
2. Podsumowanie przeglądu wyników badań.	20
3. Wybrane hipotezy kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych	22
3.1. Hipoteza Palmgren-Minera.	23
3.2. Hipoteza Cortena-Dolana	24
3.3. Hipoteza Serensena-Kogajewa	27
3.4. Hipoteza Zakrzewskiego.	28
II. Założenia i cel precy.	30
III. Badanie własne wpływu wybranych parametrów programowanego przebiegu naprężenia na żywotność zmęczeniową stopów PA6N i MO58	32
1. Charakterystyka badanych materiałów.	32
2. Urządzenie i próbki do badań zmęczeniowych	36
3. Program badań	37
3.1. Badania wstępne.	37
3.2. Badania przy programowanych przebiegach naprężenia	39

	Strona
3.3. Analiza otrzymanych wyników	45
4. Wyniki badań oraz ich statystyczne opracowanie .	45
4.1. Wyniki badań wstępnych	46
4.2. Wyniki badań przy programowanych przebie- gach naprężenia	52
5. Analiza statystyczna wyników badań stopów PA6N i MO58 przy programowanych przebiegach naprężenia .	61
5.1. Wpływ sekwencji naprężeń na żywotność zmę- czeniową	62
5.2. Wpływ wartości naprężenia rozpoczynającego przebieg na żywotność zmęczeniową.	69
5.3. Wpływ liczby cykli w bloku przebiegu naprę- żenia na żywotność zmęczeniową	74
6. Wnioski	78
IV. Weryfikacja wybranych hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych	81
V. Dyskusja i interpretacja wyników badań	94
1. Wpływ wybranych parametrów programowanego prze- biegu naprężenia na żywotność zmęczeniową stopów PA6N i MO58	94
2. Ocena przydatności wybranych hipotez kumulacji uszkodzeń do przewidywania żywotności zmęcze- niowej stopów PA6N i MO58	106
VI. Wnioski końcowe	110
VII. Bibliografia	112
Aneks	

W S T Ę P

Potrzeba prowadzenia programowanych badań zmęczeniowych jest związana z koniecznością wyznaczania własności zmęczeniowych materiałów i trwałości eksploatacyjnej elementów konstrukcji przenoszących losowo zmienne obciążenia. Obecnie stosowane metody badań programowanych polegają na zastąpieniu eksploatacyjnych przebiegów obciążenia przebiegami sinusoidalnymi o zmiennej amplitudzie (tzw. blokowymi przebiegami obciążenia), różnego rodzaju przebiegami pseudolosowymi lub losowymi o zadanych charakterystykach statystycznych. Szereg względów przemawia za realizacją metod badań przy blokowym przebiegu obciążenia, z których najważniejsze to : możliwość znacznego przyspieszenia badań i ich niski koszt wynikający z zastosowania mało skomplikowanych urządzeń.

Zastąpienie obciążeń eksploatacyjnych obciążeniami sinusoidalnymi o zmiennej amplitudzie wymaga między innymi odpowiedniego doboru parametrów programu obciążenia [1 - 6] , od których zależy zgodność trwałości wyznaczonej w badaniach programowanych z trwałością eksploatacyjną. W literaturze można znaleźć opracowane na podstawie badań wskazówki dotyczące modelowania obciążeń, które w pewnym stopniu normalizują programowane przebiegi obciążenia. Stosowanie tych wskazówek jest korzystne głównie z punktu widzenia możliwości późniejszego porównywania wyników badań, a także odtwarzania samych badań.

O niedoskonałości stosowanych metod opracowywania programów obciążenia świadczą różnice (w niektórych przypadkach bardzo istotne [7,8]) w trwałościach zmęczeniowych wyznaczonych przy eksploatacyjnych przebiegach obciążenia i odwzorowujących je przebiegach programowanych. Wnioski wynikające z badań wpływu parametrów programu obciążenia na trwałość zmęczeniową są w wielu przypadkach sprzeczne. Przyczyną sprzeczności jest prawdopodobnie fakt, że wpływ każdego z parametrów programu obciążenia na żywotność zależy od doboru wartości pozostałych parametrów. Utrudnia to wyciągnięcie przewidywanych wniosków z badań, w których zmienny jest tylko jeden z parametrów programu. Dlatego pożądane jest prowadzenie badań pozwalających określić związki między poszczególnymi parametrami przy wyznaczaniu ich wpływu na żywotność zmęczeniową. Badań takich przeprowadzono, według rozeznania autora, bardzo mało.

Celem niniejszej pracy było określenie wpływu wybranych parametrów przebiegu naprężenia : sekwencji naprężeń, wartości naprężenia rozpoczynającego przebieg oraz liczby cykli w bloku przebiegu na żywotność zmęczeniową duralu PA6N i mosiądzu MO58. Przyjęty program badań zakładał również ustalenie wpływu każdego z tych parametrów (z osobna) na żywotność zmęczeniową w zależności od doboru dwóch pozostałych parametrów, dla różnych zakresów wartości naprężeń występujących w przebiegu. Wyniki badań wykorzystano do weryfikacji wybranych hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych.

I. ZAGADNIENIE DOBORU PARAMETRÓW PROGRAMOWANYCH PRZEBIEGÓW OBCIĄŻENIA. METODY OBLICZANIA ŻYWOTNOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

1. Przegląd wyników badań wpływu parametrów programowanego przebiegu obciążenia (*) na żywotność zmęczeniową materiałów

Badania programowane polegają na obciążeniu próbki, elementu lub konstrukcji według ustalonego programu, składającego się z fragmentów przebiegu zmian obciążenia okresowo powtarzanych aż do złomu. Teki wielokrotnie powtarzany fragment programu obciążenia nazywany jest w polskiej literaturze blokiem [9 (s. 281)] lub okresem [6] programu. Blok programu zawiera szereg różnych amplitud obciążenia, z których każda powtarzana jest określoną ilość razy, tworząc tzw. stopień programu [6]. Opracowanie programu obciążeń wymaga w pierwszej kolejności [1 - 6] :

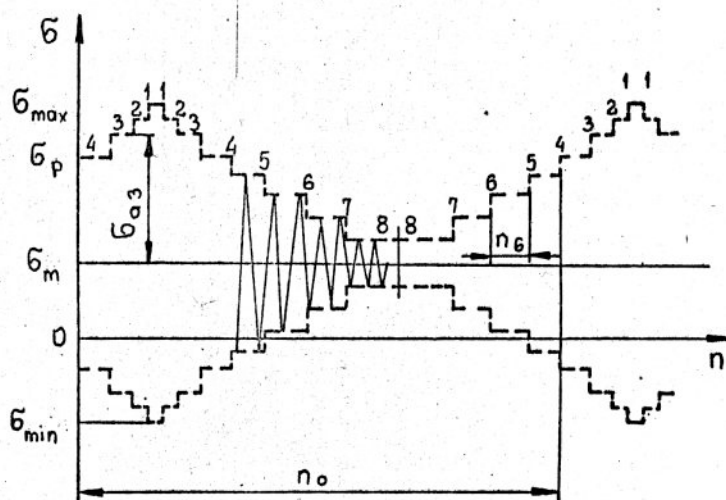
- zarejestrowania widma obciążeń eksploatacyjnych i przeprowadzenia jego statystycznej analizy,
- wyznaczenia krzywej rozkładu sumarycznej częstości występowania charakterystycznych wartości obciążenia w przebiegu eksploatacyjnym.

Przejęcie od krzywej rozkładu do programowanego przebiegu obciążenia wymaga z kolei podjęcia decyzji dotyczącej przyjęcia :

- liczby cykli zmian obciążenia w bloku (n_0),
- dolnej granicy wartości amplitud obciążenia w programie,
- liczby stopni obciążenia w bloku (i),
- sekwencji obciążeń (rosnącej, rosnąco-malejącej, malejącej, o losowym następstwie stopni obciążenia),
- wartości obciążenia rozpoczynającego przebieg (σ_p),
- liczby cykli zmian obciążenia, przypadającej na każdy stopień programu (n_i).

Przykład bloku programu obciążenia o rosnąco-malejącej kolejności następowania poszczególnych stopni obciążenia przedstawiono na rysunku 1.

(*) Programowany przebieg obciążenia (naprężenia) nezywany będzie w niniejszej pracy również programem obciążenia (naprężenia).



Rys. 1. Schemat bloku programowanego przebiegu obciążenia o rosnąco-malejącej sekwencji obciążeń

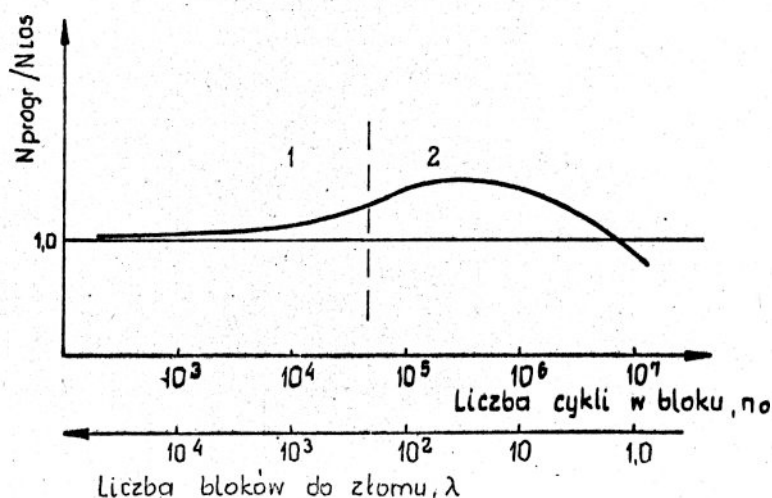
Każdy z wymienionych parametrów programowanego przebiegu obciążenia ma istotny wpływ na żywotność wyznaczaną w programowanych badaniach zmęczeniowych. Od doboru tych parametrów zależy więc dokładność przewidywania trwałości eksploatacyjnej na podstawie wyników badań programowanych. Określenie, w jaki sposób poszczególne parametry wpływają na żywotność przy programowanych przebiegach obciążenia, było celem szeregu prac, których wyniki omówiono w niniejszym rozdziale.

1.1. Wpływ liczby cykli w bloku programowanego przebiegu obciążenia

Przyjęcie małej liczby cykli w bloku programu obciążenia daje dużą liczbę powtórzeń takiego bloku do powstania złomu zmęczeniowego, a tym samym dobre przemieszanie realizowanych obciążeń. Zrealizowanie programu obciążenia o bardzo małej liczbie cykli w bloku jest jednak w wielu przypadkach niemożliwe ze względu na ograniczone możliwości urządzenia badawczego. Stosowanie w badaniach programów obciążenia o dużej liczbie cykli w bloku może natomiast spowodować niedokładną ocenę trwałości eksploatacyjnej wskutek wystąpienia zjawiska umocnienia lub osłabienia materiału przy przenoszeniu obciążeń programowanych [10, 11].

Bloki o dużej liczbie cykli zmniejszają również dokładność oceny żywotności przy obciążeniach programowanych w przypadku, gdy żywotność ta jest rejestrowana przez urządzenie badawcze w postaci liczby pełnych bloków przeniesionych do złomu.

Dotychczas przeprowadzone badania nie dają jednoznacznej odpowiedzi na pytanie, jaki jest wpływ liczby cykli w bloku programu obciążenia na żywotność. Autorzy prac [12 - 16] stwierdzili, że wpływ ten jest istotny, inni badacze [17 - 19], że niewielki, natomiast w badaniach opisanych w pracy [10] nie zaobserwowano go wcale. Szczegółowa analiza wyników, a przede wszystkim warunków realizacji badań w wymienionych wyżej pracach pozwala przypuszczać, że krzywa zmian żywotności zmęczeniowej w funkcji liczby cykli w bloku programu ma przebieg (zgodnie z sugestią autora pracy [6]) - jak na rysunku 2.



Rys. 2. Zależność względnej żywotności zmęczeniowej $N_{\text{progr}}/N_{\text{los}}$ od liczby cykli w bloku programu obciążenia n_0 [6].

Widać, że w zakresie dużej liczby cykli w bloku krzywa żywotności N_{progr} osiąga maksimum, po czym, w miarę zmniejszania liczby cykli, opada, asymptotycznie zbliżając się do wartości żywotności N_{los} wyznaczonej przy losowym następstwie poszczególnych wartości amplitud obciążenia. Wyznaczenie takich krzywych dla różnych materiałów wymaga przeprowadzenia długotrwałych badań dla szerokiego zakresu zmienności liczby cykli w bloku.

Dane doświadczalne podane w wymienionych powyżej pracach dotyczą różnych przedziałów zmienności liczby cykli w bloku, a zatem odpowiadają im różne fragmenty krzywej. Stąd prawdopodobnie biorą się różnice we wnioskach sformułowanych przez autorów tych prac.

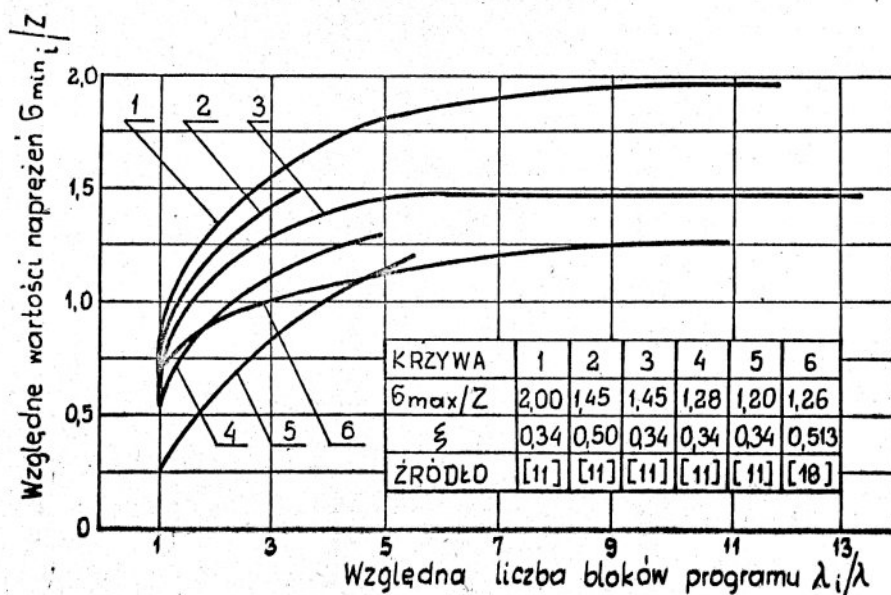
Wyniki badań przedstawione w pracach [13 - 16, 18] mieszczą się w obszarze oznaczonym na rysunku 2 numerem 1, natomiast wyniki prac [12, 17] w obszarze 2. Należy również przypuszczać, że w przypadkach niektórych materiałów zmiana liczby cykli w bloku programu, nawet w bardzo szerokim zakresie, może nie powodować istotnych zmian żywotności. Wskazują na to wyniki badań przedstawione w pracach [10, 19] .

1.2. Wpływ naprężeń niższych od nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej

Przy opracowywaniu programu obciążenia duże znaczenie ma określenie najmniejszej wartości obciążenia w przebiegu, które bierze jeszcze udział w procesie rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych. Odrzucenie z realizowanego programu wszystkich obciążeń, które nie powodują uszkodzenia materiału, daje możliwość znacznego skrócenia czasu badań. Stosowane przez różnych badaczy metoda eksperymentalnego wyznaczania dolnej granicy naprężeń powodujących rozwój uszkodzeń zmęczeniowych polegała na obciążeniu próbek według programów, z których każdy następny otrzymywano z poprzedniego poprzez odrzucenie najniższego stopnia programu. O braku wpływu odrzuconych stopni naprężenia na żywotność świadczyła nie zmieniająca się liczba bloków programu naprężenia, przeniesionych przez próbki do złomu lub do powstania pierwszego pęknięcia zmęczeniowego.

Badania, z których wnioski wyciągnięto na podstawie porównania wyznaczonych w powyższy sposób żywotności, mierzonych liczbą bloków przeniesionych przez próbki aż do złomu - dostarczyły różnych wyników. W pracach [10, 18, 20 - 25] podano, że wartość dolnej granicy naprężeń powodujących uszkodzenie stanowi 0,4 - 0,8 wartości nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej Z , w zależności od rodzaju materiału. W pracach [11, 26, 27] natomiast stwierdzono, że pominięcie w programie naprężeń o wartościach nawet tak niskich jak 0,1 Z powoduje istotną zmianę żywotności.

Niejednoznaczność wyników podanych w wymienionych pracach wytłumaczyć można tym, że uzyskano je przy programowanych przebiegach naprężenia o różnych parametrach. Świadczą o tym rezultaty badań opisanych w pracach [17, 28], w których stwierdzono, że wpływ naprężeń niższych od nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej jest zależny od naprężeń maksymalnych w programie oraz od tzw. współczynnika wypełnienia widma.^(*) Im wyższe są wartości tych parametrów, tym wyższa jest dolna granica naprężeń mających wpływ na żywotność zmęczeniową. Ilustruje to rysunek 3.



Rys. 3. Wpływ naprężeń mniejszych od nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej na żywotność stali 45 (krzywe 1 - 5) oraz stali 30HGSa (krzywa 6)

Bardziej precyzyjnych wniosków dostarczyły badania, w których określano wpływ naprężeń mniejszych od nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej na przebieg procesu zmęczenia, dzieląc go na dwa stadia: pierwsze - do momentu powstania pierwszego pęknięcia i drugie - od momentu powstania pęknięcia do zniszczenia próbki [29, 30]. Wykazano w nich, że dolna granica naprężeń uczestniczących w utworzeniu pierwszych pęknięć zmęczeniowych jest równa (w przybliżeniu) nieograniczonej

(*) Współczynnik wypełnienia widma [6] charakteryzuje postać geometryczną bloku programu; jest równy stosunkowi powierzchni ograniczonej wykresem bloku do powierzchni prostokąta wyznaczonego liczbą cykli w bloku n_0 i maksymalną amplitudą naprężenia $\sigma_{a max}$

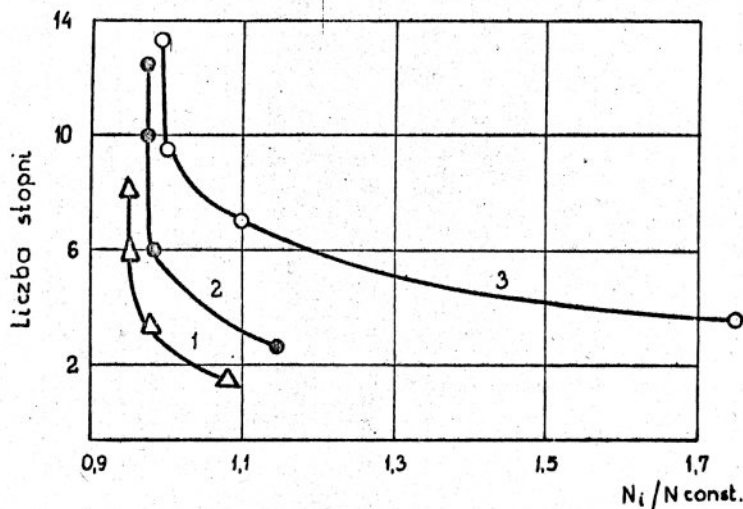
wytrzymałości zmęczeniowej. Natomiast dolna granica naprężeń uczestniczących w rozwoju już istniejącego wstępnego pęknięcia jest znacznie niższa i równa (0,5 - 0,7) Z w zależności od długości tego pęknięcia. Mieści się ona w zakresie wartości naprężeń wyznaczonym w badaniach, w których żywotność określano liczbą bloków programu, zrealizowanych do ostatecznego zniszczenia próbki.

1.3. Wpływ liczby stopni obciążenia

Przy opracowywaniu programu obciążenia histogram amplitud obciążenia otrzymuje się zastępując krzywą rozkładu sumarycznej częstości występowania charakterystycznych wartości obciążenia w przebiegu eksploatacyjnym przez krzywą stopniowaną. Wymaga to wcześniejszego przyjęcia liczby stopni podziału krzywej sumarycznej. Należy przy tym uwzględnić fakt, że przyjęcie dużej liczby stopni obciążenia daje, z jednej strony, lepsze odwzorowanie rozkładu, z drugiej zaś, zwiększa trudności i zmniejsza dokładność późniejszej realizacji najwyższych stopni programu obciążenia (ze względu na bardzo krótki czas ich trwania).

Wyniki stosunkowo nielicznych badań wykazały, że nie ma potrzeby przyjmowania zbyt dużej liczby stopni w bloku, ponieważ, począwszy od pewnej wartości, dalsze zwiększanie liczby stopni nie powoduje istotnych zmian żywotności [11, 28]. Jaka jest ta optymalna liczba stopni, nie zostało jednakże jednoznacznie stwierdzone.

Zdaniem Gassnera [1, 11] liczba ta wynosi 6 - 8 stopni. Gringauz [10] natomiast zaobserwował istotne jeszcze różnice w żywotnościach wyznaczonych przy przebiegach obciążenia o 8- i 12-stopniowych blokach. Autorzy pracy [28] zajęli się omawianym zagadnieniem w szerszym nieco zakresie, przyjmując w swoich badaniach dodatkową (oprócz liczby stopni) zmienną - odchylenie standardowe odwzorowywanego (przez przebieg programowany) losowego przebiegu o normalnym rozkładzie amplitud obciążenia. Wyniki tych badań, przedstawione na rysunku 4, świadczą o ścisłej zależności optymalnej liczby stopni w programie od wartości odchylenia standardowego, a co za tym idzie, od procentowego udziału w przebiegu najwyższych wartości obciążenia,



Rys. 4. Wpływ liczby stopni w bloku programu obciążenia na żywotność zmęczeniową stopu AMg-6BM (PA2) w zależności od wartości odchylenia standardowego s , odwzorowywanego losowego przebiegu obciążenia o rozkładzie normalnym: 1 - $s = 39,2$ MPa; 2 - $s = 49$ MPa; 3 - $s = 58,9$ MPa [28]

Pewne wątpliwości budzi jakościowe porównanie danych doświadczalnych. W pracach [10, 28] stwierdzono, że im drobniejszy jest podział bloku na stopnie, tym mniejsza jest żywotność zmęczeniowa; natomiast wnioski zawarte w pracach [11, 13] mówią o odwrotnej zależności.

Analizując szczegółowo warunki tych badań, przyczyny rozbieżności zdań można doszukiwać się w odmiennym sposobie realizacji badań. Autorzy prac [10, 28], zastępując sumaryczną krzywą rozkładu obciążeń krzywą stopniowaną o coraz większej liczbie stopni, otrzymywali w ten sposób każdorazowo różne wartości obciążenia odpowiadające poszczególnym stopniom. Wskutek tego drobniejszy podział krzywej rozkładu na stopnie, dający większe wartości obciążenia odpowiadające najwyższym stopniom w programie, mógł powodować zmniejszenie żywotności.

W pracach [11, 13] autorzy przyjęli dwie skrajne wartości obciążenia w rozkładzie minimalną i maksymalną jako stałe. Dokonując coraz drobniejszego podziału krzywej rozkładu na stopnie (przy zachowaniu stałych wartości obciążenia najniższego

i najwyższego stopnia) skracali w ten sposób czas trwania maksymalnego obciążenia w histogramie, wskutek czego mógł nastąpić wzrost żywotności.

Należy jednak zaznaczyć, że tłumaczenie to nie zawsze może być stosowane, o czym świadczą wyniki badań przedstawione w pracy [10]. W pracy tej wykazano eksperymentalnie, że zmniejszenie żywotności zmęczeniowej, związane z coraz drobniejszym podziałem krzywej rozkładu na stopnie, spowodowane jest ogólną zmianą wartości i powtarzalności obciążenia na każdym stopniu, a nie podwyższeniem wartości obciążenia odpowiadającego najwyższemu stopniowi w histogramie. Na wyjaśnienie sprzeczności we wnioskach wynikających z przytoczonych powyżej prac nie pozwala zarówno mała liczba, jak i wąski zakres przedstawionych w nich badań.

1.4. Wpływ sekwencji obciążeń

Literatura z zakresu programowych badań zmęczeniowych, w których badano wpływ kolejności następowania poszczególnych stopni obciążenia w przebiegu na żywotność materiałów, jest stosunkowo bogata. Opisane w niej prace doświadczalne przeprowadzono jednak w tak różnych warunkach, że porównywanie ich rezultatów jest możliwe dopiero po odpowiedniej ich segregacji. Przyjmując za kryterium sposób realizacji poszczególnych badań, można je podzielić na dwie grupy.

Do grupy pierwszej należą badania, w których określano wpływ sekwencji obciążeń na przebieg kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych. Realizowano w nich proste, głównie dwustopniowe przebiegi obciążenia, rzadziej wielostopniowe. Przebiegi wielostopniowe charakteryzowały się stopniowym narastaniem lub obniżaniem wartości obciążenia aż do powstania złomu, tzn. próbki poddawano końcowemu działaniu najwyższego lub najniższego stopnia obciążenia w programie aż do ich zniszczenia. Wpływ sekwencji oceniany był na podstawie zmian sum względnych liczb cykli $\Sigma n/N$ przeniesionych do złomu. Rezultaty tej grupy badań zostały szczegółowo omówione w przeglądowych pracach [35, 38, 39]. Przytaczanie ich w niniejszym przeglądzie mija się z jego

celem z tej przyczyny, że wniosków wynikających z badań przeprowadzonych przy tak opracowanych programach obciążenia nie można rozszerzyć na rozpatrywane w niniejszej pracy blokowe przebiegi obciążenia.

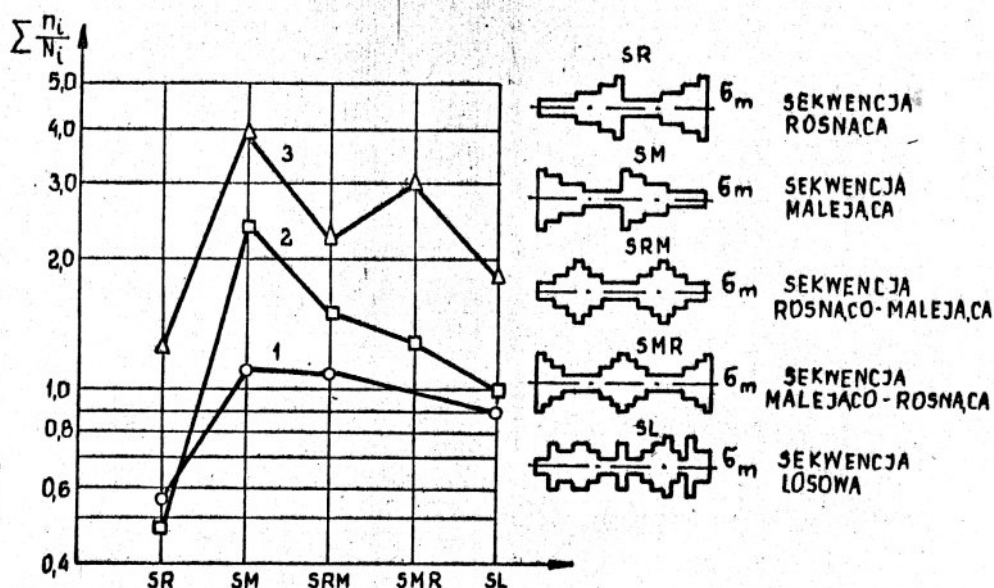
Druga grupa, znacznie mniej liczna, obejmuje badania, w których zajmowano się wpływem sekwencji obciążenia w blokowych, wielostopniowych przebiegach obciążenia na żywotność zmęczenia materiałów. Celem nadrzędnym tych badań była ocena tego wpływu od strony dokładności odwzorowywania obciążeń eksploatacyjnych przez programowane przebiegi obciążenia.

Wyniki jakie uzyskano w tej grupie badań nie wyjaśniły całkowicie wpływu sekwencji na żywotność materiałów, umożliwiły jednak znalezienie pewnych przewidywalności. Stwierdzono mianowicie, że wystąpienie wpływu sekwencji zależy istotnie od innych parametrów programu, takich jak :

- liczba cykli w bloku,
- liczba stopni obciążenia,
- zakres wartości obciążeń występujących w programie.

Rezultaty prac [10, 15, 31] wskazują na to, że w przypadku dużej liczby stopni obciążenia (co najmniej sześciu) i małej liczby cykli w bloku (zapewniającej co najmniej 10-krotne powtórzenie bloku do złomu), kolejność następowania poszczególnych wartości obciążenia nie ma istotnego wpływu na żywotność. Podobne wyniki otrzymano realizując przebiegi obciążenia, w których przyjęto bloki również o małej liczbie cykli, ale z mniejszą od sześciu liczbą stopni obciążenia [19, 32] .

Przyjęcie małej liczby cykli w bloku nie daje jeszcze gwarancji uniknięcia wpływu sekwencji, o czym świadczą wyniki badań Hardratha i Naumanna (cyt. za [33]), przedstawione na rysunku 5, a także wyniki podane w pracach [13, 34, 35] .



Rys. 5. Wpływ sekwencji obciążeń na wartość sumy względnych liczb cykli w zależności od wartości naprężenie średniego i rodzaju materiału :
 1 - stop 7075 (AlZnMgCu), $\sigma_m = 0$;
 2 - stop 2024 (AlCuMg), $\sigma_m = 120$ MPa;
 3 - stop 7075 (AlZnMgCu), $\sigma_m = 138$ MPa [33]

Położenie punktów na rysunku 5 wskazuje na to, że w przypadku programu o malejącej sekwencji obciążeń, żywotność zmęczeniowa osiąga najwyższe wartości; w przypadku sekwencji rosnącej - najniższe; natomiast w przypadku pozostałych rodzajów sekwencji - wartości pośrednie. Podobny charakter wpływu sekwencji potwierdziły również inne badania [13, 36, 37]. Odwrotną zależność, tzn. większą żywotność w przypadku sekwencji rosnącej w porównaniu z żywotnością przy sekwencji malejącej stwierdzono w pracach [10, 34].

Należy zaznaczyć, że taki dwoisty charakter wpływu sekwencji został wyjaśniony i uznany za typowy w przypadku przebiegów o dwustopniowej zmianie obciążenia [35, 38, 39]. Jednocześnie w przypadku omawianej grupy badań wydaje się, że wnioski, wyciągnięte przez różnych badaczy z uzyskanych przez nich wyników, obarczone są błędem związanym z brakiem jednolitości przyjętych przez nich założeń.

Autorzy prac [10, 34, 37] oraz Herdrath i Neumann (cyt. za [33]) określali rodzaj sekwencji biorąc pod uwagę kolejność następowania stopni obciążenia w pierwszym bloku w przebiegu, liczonym od pierwszego (w przebiegu) cyklu obciążenia. Natomiast według autorów prac [13, 35, 38] rodzaj sekwencji określa kolejność następowania stopni obciążenia w całym przebiegu niezależnie od tego, który ze stopni obciążenia rozpoczyna przebieg. Na przykład programowane przebiegi SRM i SMR na rysunku 5 charakteryzuje, według badaczy z pierwszej grupy, różna sekwencja obciążeń; natomiast z punktu widzenia badaczy z drugiej grupy kolejność występowania stopni obciążenia jest w obu przebiegach taka sama - na przemian rosnąca i malejąca. Różnica między obydwoma przebiegami jest tylko taka, że przebieg SRM rozpoczyna się od najniższego stopnia obciążenia, zaś SMR - od najwyższego.

Brak jest również zgodności wśród badaczy w realizacji przebiegów SR, SM (rys. 5). Jedni badają wpływ tych rodzajów sekwencji obciążenia na żywotność rozpoczynając przebieg SM od najwyższego stopnia obciążenia, a przebieg SR - od najniższego. Drudzy przyjmują w badaniach jednakowy stopień obciążenia rozpoczynający przebieg, niezależnie od rodzaju sekwencji. Wobec powyższego wyniki badań wpływu sekwencji są w wielu przypadkach rezultatem jednoczesnego działania dwóch parametrów programu obciążenia: sekwencji obciążeń i stopnia obciążenia rozpoczynającego przebieg.

Należy jeszcze dodać, że trudnych do interpretacji różnic w wynikach dostarczyły badania, w których określano wpływ sekwencji na żywotność zmęczeniową przy różnych zakresach wartości obciążeń, występujących w przebiegu. Według autorów prac [13, 19] wpływ sekwencji jest tym większy, im niższa jest wartość najniższego obciążenia w programie, tzn. im większy jest udział w przebiegu stopni obciążenia o wartościach niższych od nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej. W pracy [34] stwierdzono natomiast, że wpływ sekwencji jest większy w przypadku, gdy wartości wszystkich stopni obciążenia w przebiegu są wyższe od nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej.

1.5. Wpływ wartości obciążenia rozpoczynającego przebieg

W celu uniknięcia efektu treningu, który może być spowodowany działaniem pierwszych stopni obciążenie przyjęte jest, zgodnie z propozycją Gassnera [1], rozpoczynanie realizacji programu od pośredniego stopnia obciążenia. W dostępnej literaturze niewiele jest jednak danych doświadczalnych uzasadniających przyjęcie tego założenia, a także świadczących o istotnym wpływie pierwszych cykli programu na żywotność.

Badania przeprowadzone przez Müllera-Stocka, Kommersa i in. (cyt. za [40 - 42]) wykazały, że obciążenia wstępne mogą powodować, w zależności od ich wartości i czasu trwania - zarówno wzrost, jak i zmniejszenie żywotności zmęczeniowej. Sugeruje to możliwość wystąpienia efektu oddziaływania początkowych wartości obciążenia w przebiegu na żywotność, również w przypadku obciążeń o programowanych zmianach amplitudy.

Rezultaty badań wpływu obciążenia rozpoczynającego przebieg na żywotność zmęczeniową przy blokowych, dwustopniowych [38, 39] oraz wielostopniowych [18, 32] przebiegach obciążenia, można podsumować następująco :

1. Wpływ pierwszego stopnia obciążenia w przebiegu na żywotność jest mocno uzależniony od liczby cykli w bloku programu oraz od związanych z tą liczbą : czasu trwania pierwszych stopni obciążenia i liczby bloków zrealizowanych do złomu.
2. Przyjęcie któregośkolwiek stopnia obciążenia programu jako pierwszy przestaje mieć znaczenie z punktu widzenia oceny żywotności zmęczeniowej w przypadku, gdy liczba cykli w bloku programu jest mała.

Wyniki badań, które świadczą o tym, że obciążenie początkowe w przebiegu może istotnie wpływać na żywotność, znaleziono jedynie w pracy Redkovca [18] (nie licząc wzmianki Kawamoty i in. w pracy [32] o ich wcześniejszych badaniach, w których stwierdzili istnienie tego wpływu). Redkovec przeprowadził swoje badania dobierając liczbę cykli w bloku tak, żeby liczba powtórzeń bloku do złomu nie była większa niż 2 - 3 razy. Stwierdził w nich, że :

- w przypadku realizacji programów, w których liczba cykli

maksymalnego obciążenia jest nieduża (stanowi 1,5 - 2 % całkowitej liczby cykli w bloku), rozpoczynanie badań od najwyższego stopnia obciążenia prowadzi do zwiększenia żywotności; natomiast rozpoczynanie badań od najniższego stopnia obciążenia - do zmniejszenia żywotności (w porównaniu z żywotnością otrzymaną w przypadku rozpoczynania badań od pośredniego stopnia obciążenia),

- w przypadku realizacji programów obciążenia, w których liczba cykli przypadająca na każdy stopień obciążenia programu jest taka sama, rozpoczynanie badań od różnych stopni obciążenia nie powoduje istotnych zmian żywotności.

1.6. Wpływ liczby cykli zmian obciążenia, przypadających na każdy stopień programu

W przypadku badań przy programowanych przebiegach obciążenia, odwzorowujących przebiegi eksploatacyjne, liczba cykli obciążenia odpowiadająca poszczególnym stopniom programu jest z góry narzucona przez kształt, dzielonej na stopnie, sumarycznej krzywej rozkładu częstości. Wymagana jest dokładna aproksymacja krzywej rozkładu przez krzywą stopniową, szczególnie w zakresie wysokich wartości obciążenia, ze względu na istotny wpływ tych obciążeń na żywotność zmęczeniową [19, 43].

Zmiana postaci geometrycznej bloku (charakteryzowanej często wspomnianym w rozdziale I p. 1.3. współczynnikiem wypełnienia widma) może powodować zmiany żywotności zmęczeniowej wskutek zmian udziału wysokich stopni obciążenia w programie [13, 43, 44]. Może również zmienić oddziaływanie na żywotność innych parametrów programu, takich jak: sekwencja obciążeń, obciążenie początkowe, liczba stopni obciążenia poniżej nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej. Ten ostatni fakt powinien być brany pod uwagę przy opracowywaniu programów obciążenia do badań porównawczych, gdy dobór liczby cykli poszczególnych stopni obciążenia może być dowolny.

Omówione w niniejszym przeglądzie badania wpływu parametrów programu obciążenia na żywotność zrealizowane zostały w większości przypadków przy programach opracowanych na podstawie znanych funkcji rozkładu częstości (Gausa, Reileigh'a, Poissona i in.) lub krzywych rozkładu wyznaczonych dla przebiegów eksploatacyjnych.

1.7. Wpływ zakresu wartości obciążeń występujących w przebiegu

Dobór zakresu wartości obciążeń występujących w przebiegu ma w badaniach programowanych duże znaczenie ze względu na możliwość przyspieszenia tych badań. Skrócenie czasu badań można uzyskać drogą podwyższenia wartości obciążenia na poszczególnych stopniach programu, stosując dla wszystkich stopni ten sam współczynnik intensyfikacji [2,45]. Realizowanie badań przyspieszonych może jednak prowadzić do dużych błędów w ocenie żywotności eksploatacyjnej. Przyczyną jest fakt, że - jak już powiedziano w poprzednich rozdziałach - wpływ poszczególnych parametrów programu obciążenia na żywotność zależy w dużym stopniu od zakresu wartości obciążeń występujących w programie.

Parametry, takie jak sekwencja obciążeń i pierwszy stopień obciążenia w przebiegu, mogą różnie wpływać na żywotność w przypadku programów o rzeczywistych wartościach obciążenia i o wartościach podwyższonych. Ponadto dobór innych parametrów programu (minimalna wartość obciążenia w bloku, liczba stopni w bloku, czas trwania jednego bloku) powinien być uzależniony od zakresu wartości realizowanych obciążeń.

2. Podsumowanie przeglądu wyników badań

Przedstawiony przegląd wyników badań pozwala stwierdzić, że dane doświadczalne dotyczące wpływu parametrów programu obciążenia na żywotność zmęczeniową są niekompletne, mimo dużej ilości publikacji. Nie dają one wystarczających podstaw do sformułowania ścisłych zaleceń dotyczących doboru parametrów programowanego przebiegu obciążenia. Nie wyjaśniają również jednoznacznie wpływu parametrów programu obciążenia na przebieg kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych (szczególnie tych parametrów, których nie uwzględnia większość hipotez kumulacji). Przyczyny są następujące:

1. Większość badań zrealizowano przyjmując jako zmienny tylko jeden z parametrów programu obciążenia, przy pozostałych

ustalonych dowolnie, albo według przyjętych (za Gassnerem) w badaniach programowanych zasad. Ponieważ wpływ każdego z parametrów programu obciążenia na żywotność istotnie zależy od doboru pozostałych parametrów, wnioski wyciągnięte z tak przeprowadzonych badań często różnią się, a nawet są sprzeczne.

2. W wielu pracach wyniki badań nie były poddawane analizie statystycznej. Stąd też interpretacja istotności uzyskiwanych różnic w wynikach (zwłaszcza przy dużych rozrzutach, charakterystycznych dla badań programowanych) w przypadkach niektórych prac wydaje się być zbyt tendencyjna.

Potrzebne jest więc prowadzenie dalszych kompleksowych badań wpływu parametrów programu obciążenia na żywotność oraz dokładniejsze opracowywanie ich wyników.

Z przeglądu literatury wynika, że najwięcej niejasności i rozbieżności zdań znajduje się we wnioskach dotyczących wpływu sekwencji obciążeń na żywotność zmęczeniową. Ponadto brak jest danych doświadczalnych dotyczących :

- wpływu pierwszego stopnia obciążenia w programie na żywotność oraz zależności tego wpływu od rodzaju sekwencji obciążeń w programowanym przebiegu i zakresu wartości występujących w nim obciążeń,
- wpływu parametrów programu obciążenia na żywotność w zależności od rodzaju materiału.

Należy również zaznaczyć, że w wielu pracach, których autorzy oceniali wpływ poszczególnych parametrów programu naprężenia na przebieg krzywych trwałości zmęczeniowej - przyjmowano do badań bloki obciążenia o stałej liczbie cykli, niezależnie od wartości naprężenia $\sigma_{a \max}$. W takim przypadku ze zmianą wartości naprężenia $\sigma_{a \max}$ w programie zmieniała się liczba powtórzeń bloku do złomu, co mogło mieć dodatkowy wpływ na przebieg krzywych trwałości. Celowe byłoby więc doświadczalne sprawdzenie, czy przebieg krzywych trwałości, wyznaczonych przy programach o stałej liczbie cykli w bloku, różni się istotnie od przebiegu krzywych wyznaczonych przy blokach o liczbie cykli dobranej tak, aby powtarzalność bloku do złomu była stała (niezależnie od wartości naprężenia $\sigma_{a \max}$).

Powyższe wnioski, wynikające z przeglądu literatury, skłoniły autora niniejszej pracy do podjęcia badań przedstawionych w dalszej jej części.

3. Wybrane hipotezy kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych

Opracowanie obliczeniowej metody przewidywania trwałości zmęczeniowej elementów i całych konstrukcji jest głównym celem od lat prowadzonych i ciągle rozwijanych badań zmęczeniowych. Mimo dużej ilości prac problem nie został jeszcze rozwiązany. Na podstawie obserwacji zjawisk zmęczeniowych w skali makroskopowej zbudowano wiele (według [46] ponad trzydzieści) hipotez opisujących przebieg kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych. Niemało również ukazało się publikacji, w których dokonano przeglądu i oceny tych hipotez (np. [46 - 50]). Wybienie jednak jednej z hipotez do określonych obliczeń nastrocza poważne trudności. Aktualnie bowiem żadna ze znanych hipotez nie spełnia wszystkich stawianych jej wymagań. Wymagane cechy hipotezy to :

- uniwersalność (powinna być słuszna dla różnych przebiegów obciążenia, różnych materiałów, elementów konstrukcyjnych itp.),
- łatwość w stosowaniu (nie powinna wymagać prowadzenia pomocniczych, kłopotliwych w realizacji, badań).

Ponieważ brak jest hipotezy uniwersalnej, szersze zastosowanie znalazły te hipotezy, których stosowanie jest najmniej kłopotliwe. Należą do nich hipotezy : Palmgren-Minera, Cortena-Dolana i Serensena-Kogajewa. Hipotezy te zweryfikowano w dalszej części niniejszej pracy; celem była ocena ich przydatności do przewidywania żywotności w przypadku różnych, programowanych przebiegów naprężenia (zrealizowanych w badaniach własnych).

W pracy zweryfikowano również nową hipotezę zaproponowaną przez Zakrzewskiego [51], która jest modyfikacją hipotezy Palmgren-Minera. Prosta postać zapisu matematycznego tej hipotezy, łatwy sposób obliczeń oraz brak doświadczalnego potwierdzenia jej słuszności skłoniły autora niniejszej pracy do przeprowadzenia doświadczalnej jej weryfikacji.

3.1. Hipoteza Palmgren-Minera

Hipoteza Palmgren-Minera zakłada, że narastanie uszkodzenia zmęczeniowego w materiale jest wprost proporcjonalne do przeniesionej liczby cykli na każdym poziomie obciążenia, niezależnie od historii obciążenia [46 - 50]. Uszkodzenia powodują tylko obciążenia większe od nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej. Złom powstaje po liczbie cykli spełniającej zależność :

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

w której :

n_i - liczba przeniesionych cykli naprężenia,

N_i - liczba cykli naprężenia σ_i powodująca złom (z wykresu Wöhlera).

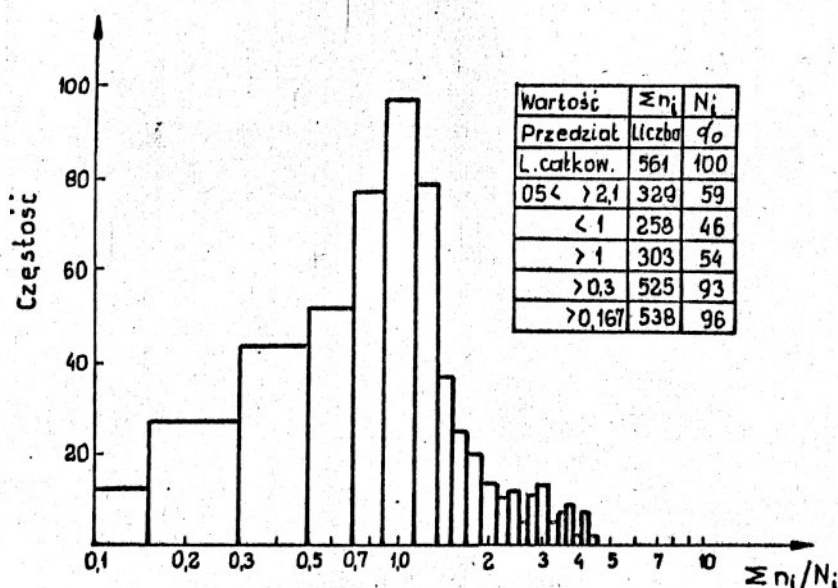
W przypadku złożonych przebiegów obciążenia (np. wielostopniowych) reguła (1) daje na ogół zawyżone wartości przewidywanej trwałości. Większe zastosowanie znalazła jej zmodyfikowana postać :

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = x \quad , \quad (2)$$

przy czym "x" jest współczynnikiem wyznaczonym doświadczalnie.

Wartości współczynnika "x" zmieniają się - jak wykazały badania - w bardzo szerokim przedziale w zależności od rodzaju materiału, historii obciążenia, wartości obciążeń itp.

Na rysunku 6 przedstawiono rozkład rzeczywistych wartości współczynnika "x", opracowany przez Jacoby'ego [3] na podstawie badań przeprowadzonych w różnych warunkach i dla różnych materiałów.



Rys. 6. Rozkład rzeczywistych wartości sumy względnych żywotności $\Sigma n_i/N_i$ [3].

Jak widać, w 93 % analizowanych danych wartość $x > 0,3$. Przyjęcie do obliczeń - jak sugeruje autor [3] - wartości współczynnika $x = 0,3$ jest równoznaczne z dopuszczeniem ewentualnego przewymiarowania elementu lub konstrukcji. Natomiast założenie konieczności eksperymentalnego wyznaczenia wartości "x" dla rozpatrywanych przebiegów obciążenia zmienia czysto obliczeniowy charakter hipotezy.

3.2. Hipoteza Cortena-Dolana

Hipoteza Cortena-Dolana zakłada, że uszkodzenie w materiale narasta zgodnie z przebiegiem funkcji wykładniczej, o wykładniku potęgowym zależnym od amplitudy naprężenia [46 - 50]. Wzór do obliczania żywotności w przypadku przebiegu o "m" amplitudach naprężenia ma postać:

$$N = \frac{N_1 (1 - \beta)}{\sum_{i=1}^m \alpha_i \left(\frac{p_i}{p_1} \right)^{\alpha_i}} + N_1 \frac{\beta}{\alpha_1} \quad (3)$$

przy czym:

- N_1 - liczba cykli do złomu, odpowiadająca maksymalnej amplitudzie naprężenia σ_{a1} przebiegu,
 $n_0 = \sum_{i=1}^m n_i$ - liczba cykli w bloku przebiegu,
 $\beta = n_w/n_0$ - względna liczba cykli o amplitudzie σ_i , odpowiadająca okresowi inkubacji,
 $\alpha_i = n_i/n_0$ - względna liczba cykli o amplitudzie σ_i ,
 ρ_i - współczynnik rozwoju uszkodzenia, zależny od amplitudy naprężenia,
 a_i - stała doświadczalna, zależna od amplitudy naprężenia.

W obliczeniach inżynierskich stosowana jest uproszczona postać zależności (3) :

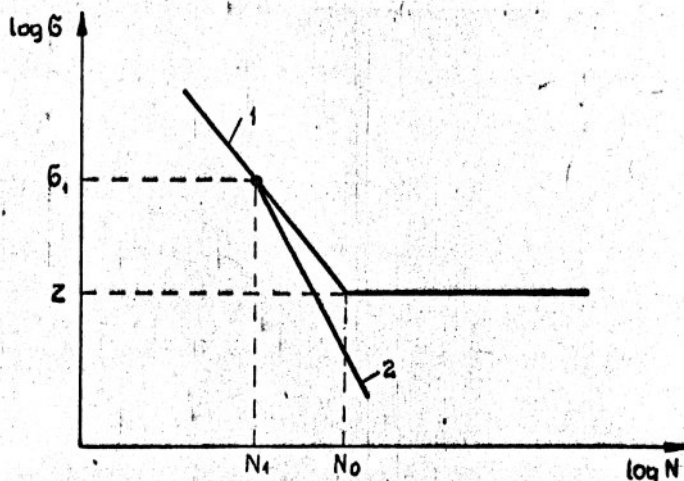
$$N = \frac{N_1}{\sum_{i=1}^m \alpha_i \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{a1}} \right)^d} \quad (4)$$

którą otrzymuje się zakładając, że $a_i = a = \text{const}$, $(n_i/n_0)^a = (\sigma_i/\sigma_{a1})^d$ oraz że nie istnieje okres inkubacji ($\beta = 0$).

W obliczeniach uwzględnia się wszystkie amplitudy naprężenia w przebiegu. Stała "d" jest wykładnikiem potęgowym obliczeniowej (wtórnej) krzywej zmęczenia (rys. 7), związanym z wykładnikiem krzywej Wöhlera "m" zależnością [52] :

$$d = k \cdot m \quad (5)$$

w której "k" jest eksperymentalnym współczynnikiem redukcji.



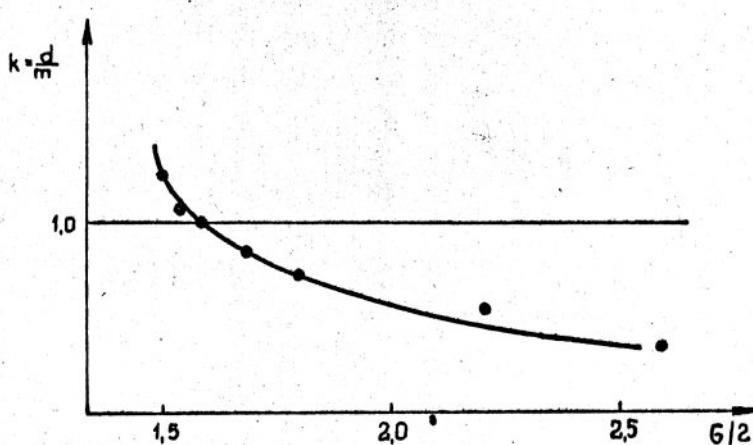
Rys. 7. Wykres Wöhlera (1) oraz wtórna krzywa zmęczenia Cortena-Dolana (2)

Wartość współczynnika "k" zależy od kształtu geometrycznego i wartości naprężeń w przebiegu. W pracy [52] podano, że wartość "k" należy przyjmować w zakresie :

$$k = 0,7 - 1,0 \quad \text{dla} \quad \delta_1/Z = 1,2 - 1,5,$$

$$k = 1,0 - 1,6 \quad \text{dla} \quad \delta_1/Z = 2,0 - 3,0.$$

Przedstawiony na rysunku 8 przykładowy wykres zmian współczynnika "k" od wartości naprężeń w przebiegu dla stali 10 BX [6], podważa słuszność powyższych zaleceń.



Rys. 8. Wykres zmian współczynnika redukcji "k" od wartości naprężeń w przebiegu dla stali 10 BX ($\xi = 0,33$; $m = 3,5$; $Z = 100$ MPa) [6]

Ponadto o znacznie szerszym zakresie zmienności rzeczywistych wartości współczynnika redukcji świadczą dane zamieszczone w pracy [53]. Zgodnie z nimi, wartości współczynnika "k", obliczone dla zdecydowanie różnych przebiegów obciążenia, wynoszą odpowiednio dla :

- wielostopniowych przebiegów naprężeń uderowych :

$$k = 1,05 - 2,04 \quad (\text{dla} \quad \delta_1/Z = 1,53 - 2,48),$$

- przebiegów biharmonicznych :

$$k = 0,17 - 0,98 \quad (\text{dla} \quad \delta_1/Z = 1,55 - 1,72),$$

- dwustopniowych przebiegów harmonicznych :

$$k = 0,13 - 3,94 \quad (\text{dla} \quad \delta_1/Z = 1,05 - 1,27).$$

Stosowanie w obliczeniach hipotezy Cortena-Dolana, jak wiadomo, wymaga eksperymentalnego wyznaczenia współczynnika "k" dla rozpatrywanego przebiegu naprężenia, ze względu na brak możliwości jednoznacznego wyboru jego wartości.

3.3. Hipoteza Serensena-Kogajewa [54]

Hipoteza Serensena-Kogajewa jest jedną z licznych modyfikacji hipotezy Palmgren-Minera. Modyfikacja polega na wprowadzeniu do obliczeń współczynnika korekcyjnego "a", uwzględniającego uszkodzenie spowodowane działaniem naprężeń mniejszych od nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej:

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = a \quad (6)$$

Wartość współczynnika a określa zależność:

$$a = \frac{\delta_1 \cdot \xi - c \cdot Z}{\delta_1 - c \cdot Z} \quad (7)$$

w której:

$$\xi = \frac{\sum_{i=1}^m \delta_i \cdot n_i^*}{\delta_1 \sum_{i=1}^m n_i^*} \quad \begin{array}{l} \text{-- współczynnik wypełnienia widma,} \\ \delta_1 \quad \text{-- naprężenie maksymalne w widmie,} \\ c \quad \text{-- współczynnik zawarty w przedziale } <0,1> . \end{array}$$

Według autorów hipotezy, wzór (7) można stosować, jeżeli spełnione są warunki:

$$\delta_1/Z \text{ oraz } \frac{1}{\delta_1} \sum \delta_i \frac{n_i^*}{\sum n_i^*} > 0,5.$$

Iloczyn $c \cdot Z$ określa najmniejszą wartość naprężeń, które biorą jeszcze udział w procesie zmęczenia. Stąd warunek:

$$c \cdot Z \leq \delta_1 \leq \delta_1.$$

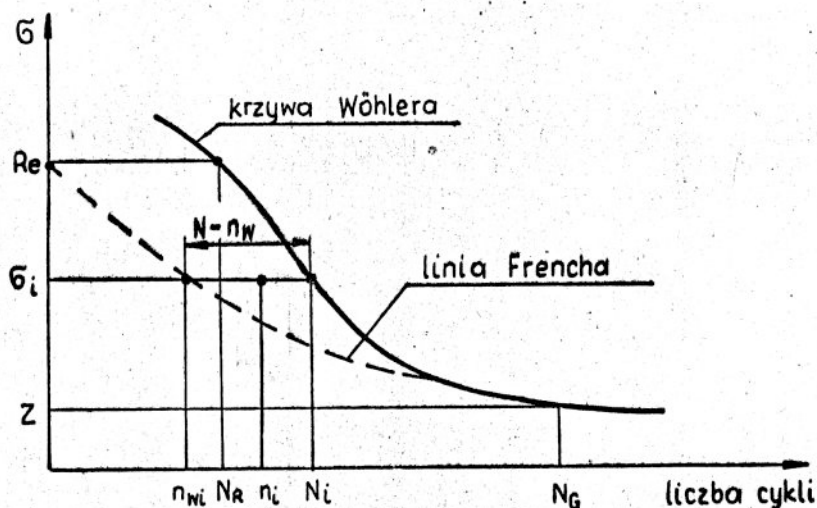
Z przeglądu wyników badań, przedstawionego w rozdziale I p. 1.2. niniejszej pracy, wynika, że rzeczywista wartość współczynnika "c" może zmieniać się w przedziale 0,4 - 0,8, a czasami nawet w przedziale 0,1 - 0,8, w zależności od wartości naprężeń w przebiegu oraz rodzaju materiału. Autorzy prac [44, 54] proponują przyjęcie do obliczeń $c = 0,5 - 0,7$.

3.4. Hipoteza Zakrzewskiego [51]

Hipoteza Zakrzewskiego jest nową propozycją modyfikacji reguły Palmgrens-Minera z uwzględnieniem linii Frencha. Autor założył, że narastanie uszkodzenia jest wprost proporcjonalne do liczby cykli na każdym poziomie obciążenia, ale dopiero po przekroczeniu linii Frencha, czyli dla liczby cykli $n > n_w$ (rys. 9). Wobec powyższego zasada kumulacji ma postać zależności :

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i - n_{wi}}{N_i - N_{wi}} = 1 \quad (8)$$

Obciążenia o liczbie cykli $n_i < n_{wi}$ nie biorą udziału w procesie kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych.



Rys. 9. Ilustracja wielkości występujących we wzorze Zakrzewskiego (8)

W celu ułatwienie praktycznego zastosowania proponowanego sposobu przewidywania trwałości zmęczeniowej, autor przedstawił również metodę wyznaczenia prawdopodobnego przebiegu linii Frencha. Założył przy tym, że :

1. W przypadku gdy naprężenie osiąga wartość równą granicy plastyczności R_e , kumulacja odkształceń prowadzi do narastanie uszkodzenia już od pierwszego cyklu.

2. W przypadku naprężenia równego granicy zmęczenia Z_G dla N_G cykli, kumulacja odkształceń prowadzi do uszkodzenia podczas tak małej liczby cykli końcowych, że można ją przyrównać do pojedynczego cyklu.
3. Dla wszystkich poziomów naprężenia $\delta_i > Z_G$ liczbę cykli $n_{wi} < N_i$, od której począwszy rozpoczyna się proces uszkodzenia, określa stosunek przyrostu naprężenia $\delta_i - Z$ do maksymalnego przyrostu $R_e - Z$ w myśl równania (rys. 9) :

$$\frac{N_i - n_{wi}}{\delta_i - Z} = \frac{\delta_i - Z}{R_e - Z} . \quad (9)$$

Po uwzględnieniu równania (9) zasada kumulacji uszkodzeń (8) wyrażone jest zależnością :

$$\sum_{i=1}^m \frac{N_i - n_{wi}}{\delta_i - Z} = (m-1) \frac{N_R}{R_e - Z} , \quad (10)$$

przy czym spełniony musi być każdorazowo warunek :

$$n_i > n_{wi} = N_i - \frac{\delta_i - Z}{R_e - Z} N_R .$$

Jak już wspomniano, przedstawiona hipoteza jest nową propozycją, nie sprawdzoną jeszcze doświadczalnie.

II. ZAŁOŻENIA I CEL PRACY

Do podjęcia niniejszej pracy skłonił autora brak wystarczającej liczby danych dotyczących wpływu parametrów programowanego przebiegu obciążenia na żywotność zmęczeniową. Dane te są potrzebne przy opracowywaniu programowanych przebiegów obciążenia, zastępujących przebiegi eksploatacyjne. Od sposobu opracowania programu obciążenia zależy dokładność późniejszej oceny trwałości eksploatacyjnej na podstawie wyników badań programowanych.

Parametry przebiegu naprężenia, których wpływ interesował autora przede wszystkim, to : sekwencja naprężeń, wartość naprężenia rozpoczynającego przebieg oraz liczba cykli w bloku przebiegu. Analizując warunki dotychczas przeprowadzonych badań wpływu tych parametrów na żywotność oraz wnioski wynikające z tych badań (rozdz. I p. 2) uznano za słuszne przyjęcie założenia, że wpływ wymienionych parametrów przebiegu na żywotność jest związany z ich oddziaływaniem na przebieg procesu zmęczenia w pierwszym jego stadium.

Pierwsze stadium procesu zmęczenia obejmuje okres, w którym nie zachodzą procesy destrukcyjne w materiale. Koniec trwania tego stadium określa liczba cykli odpowiadająca linii uszkodzeń Frencha (dla określonej wartości naprężenia) . Wzmocnienie materiału, objawiające się wzrostem jego żywotności zmęczeniowej, może nastąpić w początkowym okresie obciążania, tzn. w czasie trwania początkowego fragmentu programowanego przebiegu naprężenia do chwili, gdy liczba cykli zrealizowanego fragmentu przebiegu przekroczy liczbę cykli odpowiadającą linii Frencha.

Wobec powyższych założeń wysunięto tezę, że jeżeli w czasie trwania pierwszych cykli pierwszego stopnia naprężenia w przebiegu zostanie przekroczona liczba cykli odpowiadająca linii Frencha - to wpływ sekwencji i stopnia naprężenia rozpoczynającego przebieg na żywotność powinien być nieistotny, niezależnie od liczby cykli w bloku przebiegu. Jeżeli natomiast przekroczenie linii uszkodzeń nastąpi dopiero po zrealizowaniu pewnej liczby stopni przebiegu naprężenia, wówczas żywotność zmęczeniowa będzie zależała od parametrów tego fragmentu przebiegu.

Sprawdzenie tej tezy wymagało włączenia do programu badań własnych zmienności jeszcze jednego (oprócz sekwencji, pierwszego stopnia naprężenia w przebiegu i liczby cykli w bloku) parametru programowanego przebiegu naprężenia - zakresu wartości naprężeń występujących w przebiegu. Ponadto, ponieważ przebieg cyklicznego odkształcania materiału oraz przebieg linii Frencha zależą od rodzaju materiału, wybrano do badań dwa różne materiały - utwardzony dyspersyjnie dural oraz dwufazowy mosiądz. Z prac [9 (rozdz. 3), 55, 65 - 68] wynikało, że przebieg cyklicznego odkształcania w tych stopach jest zdecydowanie różny.

Wspomniano już, że obliczeniowe przewidywanie trwałości zmęczeniowej przy obciążeniach programowanych jest wciąż jeszcze mało dokładne, mimo istnienia dużej liczby hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych. Korzystanie z nich utrudnia, z jednej strony, brak wskazówek dotyczących kryteriów wyboru, z drugiej zaś, brak danych doświadczalnych dotyczących stałych we wzorach opisujących te hipotezy. Dlatego jest celowe działanie (przy obecnym stanie wiedzy o przebiegu kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych) zmierzające do powiększanie zbioru danych dla kilku najczęściej stosowanych hipotez. Wobec powyższego, wyniki uzyskane w badaniach własnych skonfrontowano z czterema hipotezami kumulacji uszkodzeń: Palmgren-Minera, Corten-Dolana, Serensena-Kogajewa oraz nie weryfikowaną jeszcze doświadczalnie hipotezą Zakrzewskiego.

Celem badań było zatem :

- określenie wpływu wybranych parametrów programowanego przebiegu naprężenia : sekwencji naprężeń, pierwszego stopnia naprężenia w przebiegu oraz liczby cykli w bloku na żywotność zmęczeniową duralu PA6N i mosiądzu MO58 przy różnych zakresach wartości naprężeń występujących w przebiegu,
- sprawdzenie przydatności hipotez : Palmgren-Minera, Corten-Dolana, Serensena-Kogajewa i Zakrzewskiego do obliczania żywotności zmęczeniowej próbek ze stopów PA6N i MO58 przy zastosowanych w badaniach własnych programowanych przebiegach naprężenia.

III. BADANIA WŁASNE WPŁYWU WYBRANYCH PARAMETRÓW PROGRAMOWANEGO PRZEBIEGU NAPRĘŻENIA NA ŻYWOTNOŚĆ ZMĘCZENIOWĄ, STOPÓW PA6N I MO58

1. Charakterystyka badanych materiałów

Zebrane dane literaturowe nie pozwalają stwierdzić ze względu na różne warunki badań, czy wpływ parametrów programu obciążenia na żywotność zmęczeniową zależy od rodzaju materiału. Mając na uwadze wyjaśnienie tego zagadnienia, do badań wybrano dwa materiały: utwardzony dyspersyjnie dural PA6N oraz wyżarzony dwufazowy mosiądz MO58. Przewidywano, że w przypadku tych materiałów przebieg procesu zmęczenia przy programowanych obciążeniach będzie różny. Wskazywały na to różne nachylenia krzywych uszkodzeń Frencha, które wyznaczono dla obydwu stopów w badaniach wstępnych (rys. 23, 24).

Ponadto na wybór tych materiałów miały wpływ następujące czynniki:

a) w przypadku stopu PA6N:

- stosowanie go na konstrukcje lotnicze (przenoszące losowo zmienne obciążenia), które są często badane przy programowanych przebiegach obciążenia,
- duża ilość badań, zrealizowanych na duralach przy programowanych przebiegach obciążenia, których wyniki mogą być materiałem porównawczym dla wyników badań własnych,
- celowość kontynuowania badań zmęczeniowych tego stopu, przeprowadzonych w Instytucie Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej przez Gaździka [55] i Kuźnickiego (praca doktorska, nie publikowana) przy różnych rodzajach obciążenia;

b) w przypadku stopu MO58:

- przeprowadzenie badań zmęczeniowych tego materiału w IMiMT Politechniki Wrocławskiej przez Wiernika [56] (przy obciążeniach sinusoidalnych o stałej amplitudzie), które dostarczyły wstępnych informacji o własnościach zmęczeniowych tego materiału (przebieg krzywych zmęczeniowych,

wyznaczonych przy częstotliwości zmian obciążenia w zakresie 47 - 283 Hz, maksymalna temperatura nagrzewania się próbek),

- brak danych doświadczalnych dotyczących zachowania się mosiądzów przy programowanych przebiegach obciążenia.

Skład chemiczny obydwu stopów, określony w Laboratorium Chemicznym IMiMT Politechniki Wrocławskiej, podano w tabelach 1 i 2. Obydwa materiały, dostarczone w postaci ciągnionych prętów, pocięto i obrobiono cieplnie. Parametry obróbki cieplnej dobrano mając na uwadze uzyskanie najlepszych własności mechanicznych duralu oraz usunięcie naprężeń własnych w mosiądzu, powstałych wskutek obróbki plastycznej. Obróbka cieplna polegała na :

a) w przypadku PA6N :

- przesycaniu w temperaturze 768 K w czasie 2 godz., chłodzeniu w wodzie i samorzutnym starzeniu (obróbkę skrawaniem pociętych prętów rozpoczynano nie wcześniej niż po upływie 20 dni),

b) w przypadku MO58 :

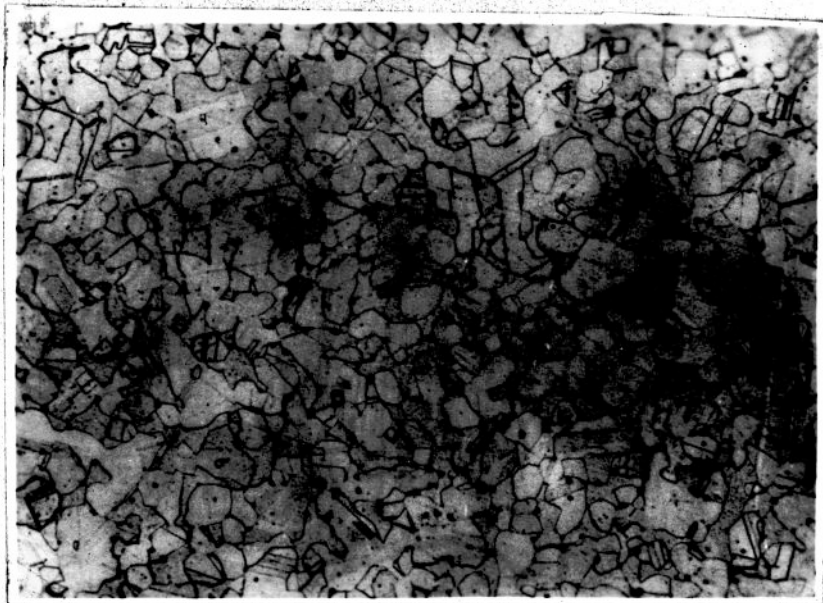
- wyżarzaniu odpężającym w temperaturze 673 K w czasie 2 godzin i następnym chłodzeniu wraz z piecem.

Własności mechaniczne materiałów po obróbce cieplnej wyznaczono w statycznej próbie rozciągania zgodnie z normą PN-71/H-04310, na maszynie wytrzymałościowej Instron model 1126. Wyniki podano w tabeli 3 (wszystkie wartości w tabelach 1 - 3 są wartościami średnimi z uzyskanych dla każdego pręta). Mały rozrzut uzyskanych wyników świadczył o jednorodności badanych materiałów pod względem składu chemicznego i własności mechanicznych.

Aby uniknąć dużego rozrzutu wyników badań zmęczeniowych (utrudniającego późniejszą ich interpretację), przeprowadzono dalszą selekcję badanych materiałów na podstawie badań metalograficznych wielkości ziarna i pomiarów twardości. Na rysunku 10 i 11 pokazano mikrostruktury obydwu materiałów o wielkościach ziarna uznanych za średnie (odrzucono pręty, w przypadku których stwierdzono, że ziarna wyraźnie różnią się wielkością od pokazanych na rysunku 10 i 11). Twardość prętów wybranych do wykonania próbek wynosiła w przypadku duralu $HV_{10} = 1690 \pm 50$ MPa; w przypadku mosiądzu $HV_{10} = 1060 \pm 50$ MPa.



Rys. 10. Mikrostruktura stopu PA6N w stanie przesyconym,
po starzeniu samorzutnym; traw. M15Al, pow. 100 x



Rys. 11. Mikrostruktura mosiądzu MO58; traw. M18Cu,
pow. 100 x

Tabela 1

Skład chemiczny duralu PA6N				
Cu	Mg	Mn	Si	Al
[%]				
4,46	1,33	0,72	0,25	reszta

Tabela 2

Skład chemiczny mosiądzu MO58				
Cu	Pb	Fe	Ni	Zn
[%]				
58,42	1,95	0,093	0,033	reszta

Tabela 3

Własności mechaniczne duralu PA6N i mosiądzu MO58							
Materiał	Własności wytrzymałościowe				Własności plastyczne		
	R_m	$R_{0,2}$	$R_{0,02}$	E	A_5	Z	HV_{10}
	[MPa]				[%]		[MPa]
PA6N	407	254	220	$5,74 \cdot 10^4$	22	39	1690
MO58	392	125	107	$7,82 \cdot 10^4$	42	38	1060

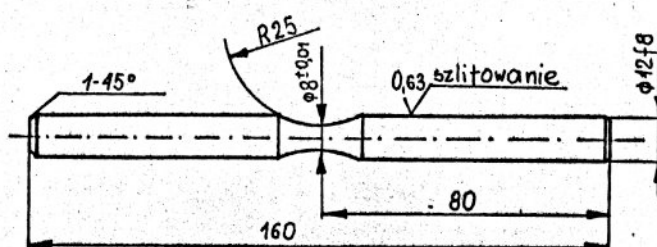
2. Urządzenie i próbki do badań zmęczeniowych

Badania zmęczeniowe przeprowadzono na czterowrzecionowej maszynie zmęczeniowej produkcji Werkstoffprüfmaschinen - Leipzig (nr fabr. 520/23, rok produkcji 1969), przeznaczonej do badań przy obrotowym zginaniu i stałej amplitudzie naprężenia.

Dane techniczne maszyny :

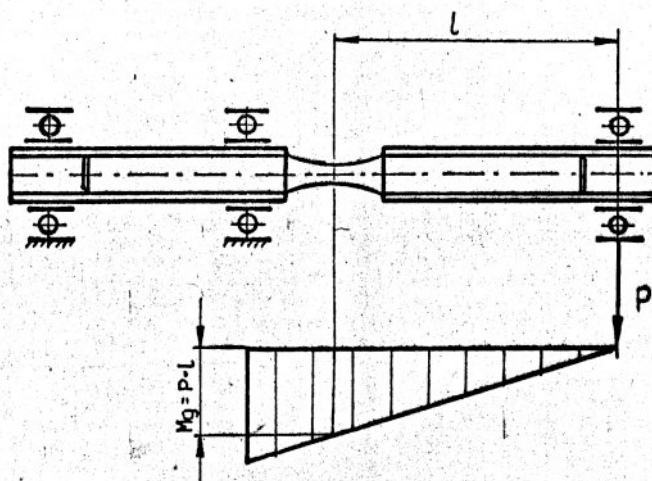
- maksymalny moment gnący $M_g = 39,2 \text{ Nm}$,
- częstotliwość zmian obciążenia $f = 33 - 100 \text{ Hz}$,
- dokładność nastawienia obciążenia $\delta = 3 \%$.

Kształt i wymiary badanych próbek (zgodne z zaleceniami producenta maszyny) przedstawiono na rysunku 12 :



Rys. 12 . Kształt i wymiary badanych próbek

Próbki obciążano liniowo zmiennym momentem zginającym, wymuszonym przez siłę P przyłożoną na swobodnym końcu próbki (rys. 13) :



Rys. 13. Schemat obciążenia próbki

Wymiary próbek zastosowanych w badaniach różnią się od wymiarów zalecanych przez normę PN-67/H-04326. Ponieważ z wykresów podanych w pracy [57] wynika, że α_k można uznać dla takich próbek za równy 1, wartość naprężenia w niebezpiecznym przekroju próbki obliczano według wzoru :

$$\sigma = \frac{M_a}{W} = \frac{P \cdot L}{W}, \quad (11)$$

w którym :

W - wskaźnik wytrzymałości na zginanie.

Próbki mocowano w uchwytach tak, aby bicie ich swobodnych końców nie przekraczało 0,03 mm.

Badanie programowane realizowano zmieniając ręcznie, według ustalonego programu, wartość siły obciążającej próbkę. Czas zmiany wartości siły (zmianę wartości siły uzyskiwano przez przesunięcie ciężaru na dźwigni obciążającej) był zawsze w przybliżeniu taki sam i nie przekraczał 3 % czasu trwania najkrótszego stopnia naprężenia w programie. Podczas badań zachowana była stała częstotliwość zmian naprężenia równa 100 Hz.

3. Program badań

Całość zrealizowanych badań można podzielić na dwa etapy :

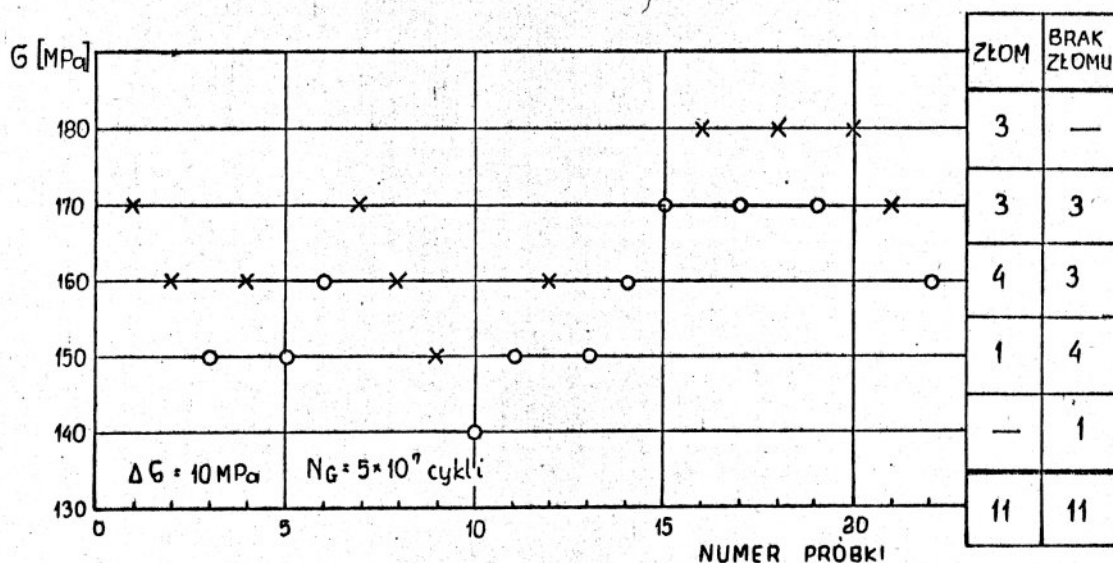
- badania wstępne, w których wyznaczono charakterystyki zmęczeniowe duralu i mosiądzu potrzebne do opracowania programu dalszych badań,
- badania przy programowanych przebiegach naprężenia.

3.1. Badania wstępne

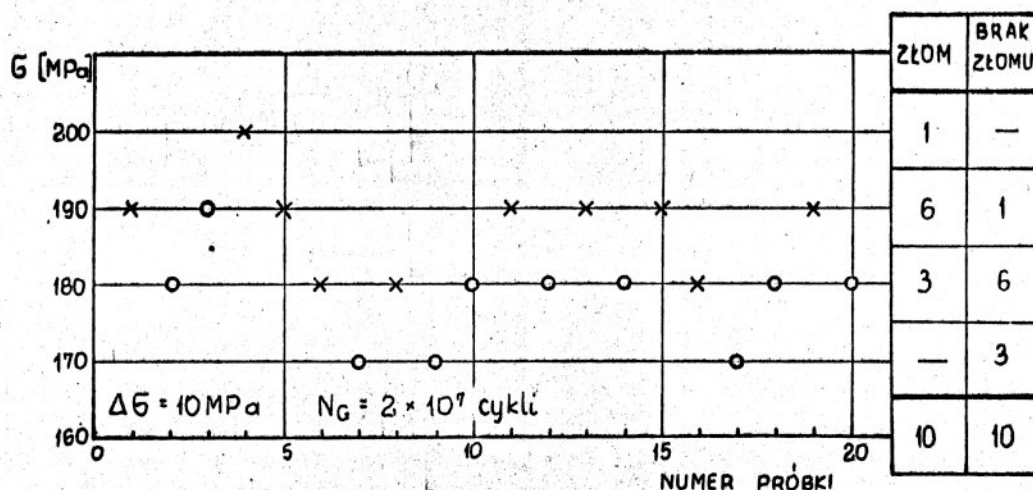
Program badań wstępnych obejmował :

1. Wyznaczenie krzywych Wöhlera obydwu stopów w zakresie ograniczonej i nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej. Nieograniczoną wytrzymałość zmęczeniową wyznaczono metodą schodkową na 22 próbkach, przy $N_G = 5 \cdot 10^7$ cykli w przypadku duralu oraz na 20 próbkach, przy $N_G = 2 \cdot 10^7$ cykli w przypadku mosiądzu. Poziomy naprężeń, na których wyznaczono nieogra-

niczoną wytrzymałość badanych stopów, podano w tabelach 1 i 2 (w aneksie). Przebieg wyznaczania nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej przedstawiony jest na rysunku 14 i 15 :



Rys. 14. Przebieg wyznaczania nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej duralu PA6N metodą schodkową



Rys. 15. Przebieg wyznaczania nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej mosiądzu MO58 metodą schodkową

2. Wyznaczenie przybliżonego przebiegu krzywych uszkodzeń Frencha badanych materiałów. Przebieg krzywych uszkodzeń określono w sposób opisany w pracy [40 (s. 80)] wyznaczając po cztery, dla każdego materiału, punkty tych krzywych. W tabeli 8 (w aneksie) podano przyjęte wartości przeciążeń wstępnych i odpowiadające im liczby cykli. Graniczną liczbę cykli N_G dla obydwu stopów przyjęto taką samą jak przy wyznaczaniu nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej.

3.2. Badania przy programowanych przebiegach naprężenia

Celem badań programowanych było określenie wpływu wybranych parametrów programowanego przebiegu naprężenia na żywotność zmęczeniową duralu PA6N i mosiądzu MO58. Program badań przewidywał określenie wpływu :

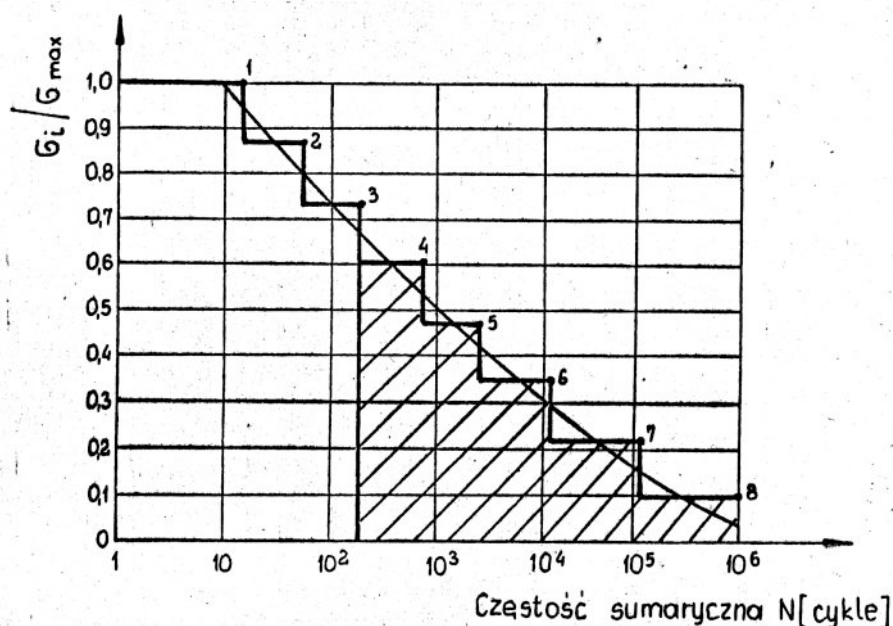
- sekwencji naprężeń w zależności od : wartości pierwszego stopnia naprężenia w przebiegu, liczby cykli w bloku i zakresu wartości naprężeń występujących w przebiegu,
- wartości pierwszego stopnia naprężenia w przebiegu w zależności od sekwencji i zakresu wartości naprężeń występujących w przebiegu,
- liczby cykli w bloku przebiegu przy różnych sekwencjach naprężeń.

Wyznaczenie zależności wpływu sekwencji na żywotność od wartości pierwszego stopnia naprężenia w przebiegu (dla różnych zakresów wartości naprężeń) wymagało odpowiedniego doboru pozostałych parametrów przebiegu (liczby cykli w bloku, liczby stopni naprężenia w przebiegu) tzn. takiego, aby sprzyjały one wystąpieniu wpływu sekwencji.

Wyniki badań omówione w rozdziale I p. 1.4. sugerują, że wpływ sekwencji naprężeń jest tym większy, im mniejsza jest powtarzalność bloku przebiegu do złomu oraz im mniejsza jest liczba stopni w bloku. Wobec powyższego przyjęto do badań trzystopniowe przebiegi naprężenia. Liczbę cykli w bloku dobierano tak, aby średnia jego powtarzalność do złomu była trzykrotna, niezależnie od wartości naprężeń występujących w przebiegu. Nie dotyczy to przebiegów naprężenia, w przypadku których zwiększenie powtarzalności bloku było celowe (określenie wpływu sekwencji

w zależności od czasu trwania bloku) . Średnią powtarzalność bloku do złomu oceniano orientacyjnie korzystając z reguły Palmgren-Minera $\sum n/N = 1$.

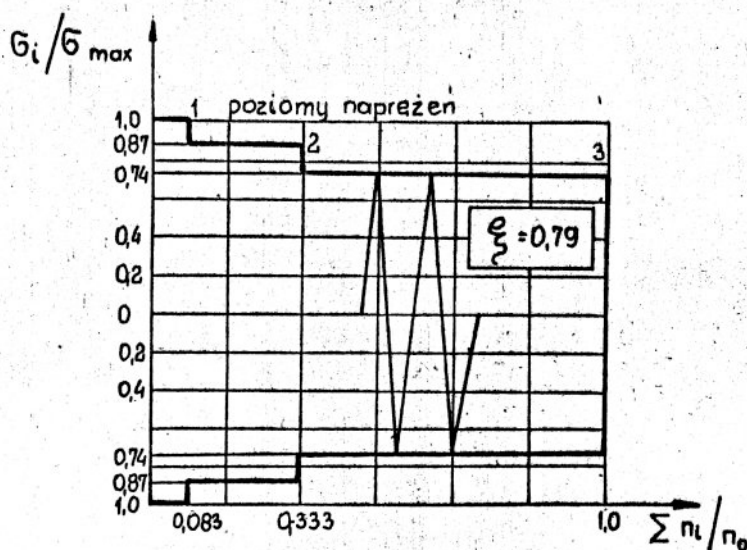
Ponieważ względna powtarzalność poszczególnych wartości naprężenia w bloku może mieć wpływ na uzyskiwane wyniki (rozdz. I p. 1.6.), podziału całkowitej liczby cykli w bloku między poszczególne stopnie naprężenia dokonano według krzywej rozkładu obciążeń eksploatacyjnych. Przyjęto do tego celu półlogarytmiczny rozkład dwumienowy, który jest charakterystyczny dla obciążeń skrzydeł samolotu [11] . Przykład ośmiostopniowego histogramu naprężeń, opracowanego przez Gassnera [11] na podstawie ciągłej krzywej takiego rozkładu, przedstawiono na rysunku 16.



Rys. 16. Dwumienowy rozkład częstości sumarycznej w układzie półlogarytmicznym i aproksymujący go 8-stopniowy rozkład częstości [11.]

W celu skrócenia czasu badań własnych pominięto w przyjętym rozkładzie dwumienowym naprężenia o amplitudach $\sigma_{ai} < 0,74 \sigma_{a max}$ (z zakreskowana na rys. 16 część wykresu) . W rezultacie, dzieląc pozostałą górną część krzywej na 3 stopnie naprężenia, można było tak dobrać najmniejszą z 3 przyjętych wartości $\sigma_{a max}$ w programie (tabela 4) , aby najniższa w przebiegu wartość σ_{ai} (równa $0,74 \sigma_{a max}$) nie była niższa od Z_{go} .

Na rysunku 17 pokazano przyjęty ostatecznie do badań histogram amplitud naprężenia (w układzie współrzędnych względnych), na podstawie którego opracowano wszystkie przebiegi naprężenia zrealizowane w badaniach własnych.



Rys. 17. Histogram amplitud naprężenia przyjęty w badaniach własnych

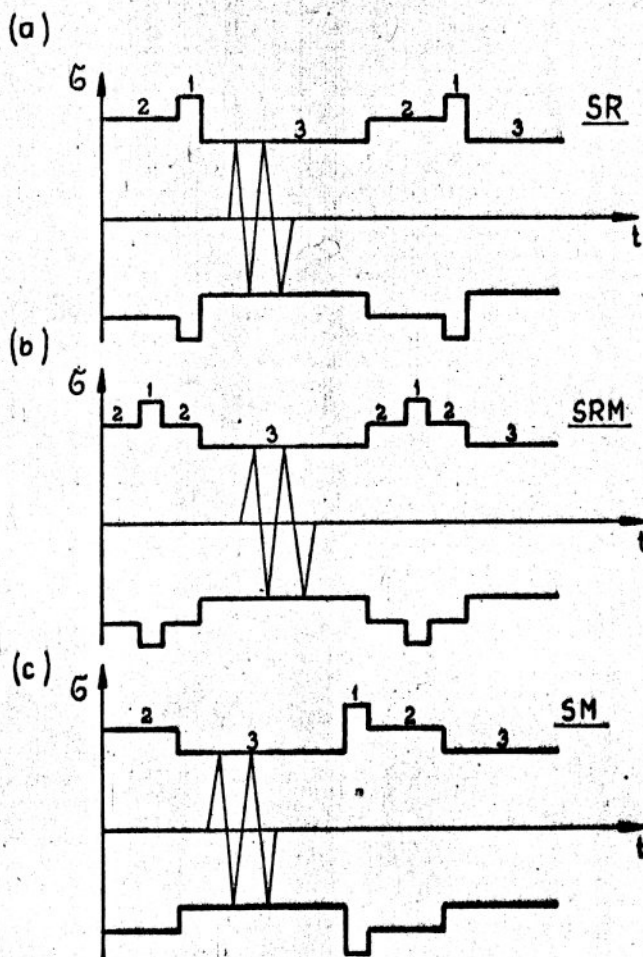
Szczegółowy program badań przeprowadzonych przy programowanych przebiegach naprężenia przedstawia tabela 4. W wewnętrznych polach tabeli podano wartości kolejno po sobie następujących stopni naprężenia w pierwszym bloku przebiegu naprężenia. W nawiasach podano liczby cykli odpowiadające poszczególnym stopniom naprężenia w obrębie jednego bloku przebiegu.

Wpływ sekwencji naprężeń na trwałość zmęczeniową duralu PA6N i mosiądzu MO58 określono przyjmując do badań przebiegi naprężenia o rosnącej (SR), rosnąco-malejącej (SRM) i malejącej (SM) kolejności następowanie poszczególnych poziomów naprężenia (rys. 18 a, b, c). W przypadku mosiądzu badania zrealizowano tylko przy programach SR i SM z tej przyczyny, że żywotność zmęczeniowa otrzymywana przy programie SRM albo przyjmuje wartości pośrednie między wartościami żywotności odpowiadającymi programom SR i SM, albo pokrywa się z jedną z nich. Świadczą o tym wyniki badań podane w literaturze [13, 33, 36, 37].

Wekazywały na to również wyniki programowanych badań własnych duralu PA6N, które przeprowadzono wcześniej niż miało to

miejsce w przypadku mosiądzu (rys. 36.- 39) .

W badaniach zrealizowano przebiegi naprężenia, w których przyjęto dla każdego rodzaju sekwencji :



Rys. 18. Przykład przebiegów naprężenia o sekwencji rosnącej (a), rosnąco-malejącej (b) oraz malejącej (c) dla przypadku, gdy przebieg rozpoczyna naprężenie $\sigma_p = \sigma_2 = \sigma_a$ śr

a) trzy wartości naprężenia maksymalnego w przebiegu :

$$\begin{aligned} \sigma_{a \max} &= 1,60; 1,48; 1,36 Z_{go} \text{ dla PA6N - oraz} \\ \sigma_{a \max} &= 1,53; 1,42; 1,31 Z_{go} \text{ dla MO58(*)} \end{aligned}$$

(*) Przy doborze wartości $\sigma_{a \max}$ kierowano się tym, aby zakres naprężeń w przebiegach programowanych nie był większy od zakresu naprężeń, dla którego wyznaczono krzywe Wöhlera, tzn. (260 - 162) MPa dla duralu oraz (280 - 183) MPa dla mosiądzu. Jest to również przyczyną przyjęcia dla mosiądzu nieco niższych względnych wartości $\sigma_{a \max}$ niż dla duralu.

b) trzy wartości naprężenia rozpoczynającego przebieg:

$\delta_p = \delta_1, \delta_2, \delta_3$ (1, 2, 3 - oznaczenia poziomów naprężenia zgodnie z rysunkiem 18, które w dalszej części pracy zostały zastąpione bardziej czytelnymi oznaczeniami, odpowiednio: $\delta_{a \max}, \delta_{a \text{ sr}}, \delta_{a \min}$),

c) liczbę cykli w bloku:

- w pierwszej serii badań liczbę cykli n_0 , stałą dla wszystkich wartości $\delta_{a \max}$, dobrano kierując się tym, żeby średnia powtarzalność bloku do złomu, przy najwyższej wartości $\delta_{a \max}$, była trzykrotna:

$$n_0 = 4,2 \cdot 10^5 \text{ cykli dla duralu PA6N,}$$

$$n_0 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ cykli dla mosiądzu MO58 (kolumna}$$

$$n_0 = \text{const w tabeli 4),}$$

- w drugiej serii badań n_0 dobrano tak, aby średnia powtarzalność bloku do złomu była trzykrotna, niezależnie od wartości $\delta_{a \max}$ (kolumna $n_0 \sim N$ w tabeli 4), mianowicie:

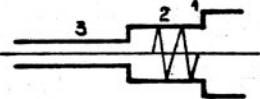
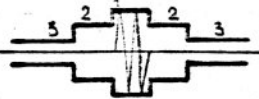
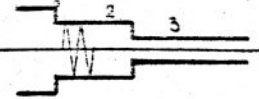
$$\begin{array}{lll} \delta_{a \max} = 1,60 Z_{go} & 1,48 Z_{go} & 1,36 Z_{go} \\ n_0 = 4,2 \cdot 10^5 & 6,0 \cdot 10^5 & 1,2 \cdot 10^6 \text{ cykli} \end{array} \quad \text{PA6N}$$

$$\begin{array}{lll} \delta_{a \max} = 1,53 Z_{go} & 1,42 Z_{go} & 1,31 Z_{go} \\ n_0 = 1,2 \cdot 10^5 & 3,6 \cdot 10^5 & 9,6 \cdot 10^5 \text{ cykli} \end{array} \quad \text{MO58}$$

Tak zaprojektowany program badań umożliwił, oprócz określenia wpływu sekwencji naprężeń na trwałość zmęczeniową w zależności od wybranych parametrów przebiegu naprężenia, również ocenę wpływu naprężenia rozpoczynającego przebieg i czasu trwania bloku przebiegu przy różnych rodzajach sekwencji naprężeń.

Badania programowane przeprowadzono przyjmując 5 - 8 próbek na każdy poziom naprężenia $\delta_{a \max}$, w zależności od uzyskiwanego rozrzutu wyników.

Wyniki badań programowanych przedstawiono w układzie $\delta_{a \max} - \lg N$, gdzie N oznacza całkowitą liczbę cykli do złomu (przeniesioną przez próbki przy wszystkich stopniach naprężenia w przebiegu).

MATERIAŁ	NAPRĘŻENIE POCZĄTKOWE σ_p	POZIOM NAPRĘŻENIA σ_{amax} [MPa]	 SR		 SRM		 SM	
			$n_0 = \text{const}$	$n_0 \sim N$	$n_0 = \text{const}$	$n_0 \sim N$	$n_0 = \text{const}$	$n_0 \sim N$
PA6N	$\sigma_1 = \sigma_{amax}$	260		260 \ 192 \ 226 (35) (280) (105)		260 \ 226 \ 162 \ 260 (35) (52,5) (280) (52,5)		260 \ 226 \ 192 (35) (105) (280)
		240		240 \ 178 \ 208 (50) (400) (150)		240 \ 208 \ 178 \ 208 (50) (75) (400) (75)		240 \ 208 \ 178 (50) (150) (400)
		220		220 \ 162 \ 192 (100) (800) (300)		220 \ 192 \ 162 \ 192 (100) (150) (800) (150)		220 \ 192 \ 162 (100) (300) (800)
	$\sigma_2 = \sigma_{adr}$	260	226 \ 260 \ 192 (105) (35) (280)	226 \ 260 \ 192 (105) (35) (280)	226 \ 260 \ 226 \ 192 (52,5) (35) (52,5) (280)	226 \ 260 \ 226 \ 192 (52,5) (35) (52,5) (280)	226 \ 192 \ 260 (105) (280) (35)	226 \ 192 \ 260 (105) (280) (35)
		240	208 \ 240 \ 178 (105) (35) (280)	208 \ 240 \ 178 (150) (50) (400)	208 \ 240 \ 208 \ 178 (52,5) (35) (52,5) (280)	208 \ 240 \ 208 \ 178 (75) (50) (75) (400)	208 \ 178 \ 240 (105) (280) (35)	208 \ 178 \ 240 (150) (400) (50)
		220	192 \ 220 \ 162 (105) (35) (280)	192 \ 220 \ 162 (300) (100) (800)	198 \ 220 \ 192 \ 162 (52,5) (35) (52,5) (280)	192 \ 220 \ 192 \ 162 (150) (100) (150) (800)	192 \ 162 \ 220 (105) (280) (35)	192 \ 162 \ 220 (300) (800) (100)
	$\sigma_3 = \sigma_{amin}$	260		192 \ 226 \ 260 (280) (105) (35)		192 \ 226 \ 260 \ 226 \ 192 (140) (52,5) (55) (52,5) (140)		192 \ 260 \ 226 (280) (35) (105)
		240		178 \ 208 \ 240 (400) (150) (50)		178 \ 208 \ 240 \ 208 \ 178 (200) (75) (50) (75) (200)		178 \ 240 \ 206 (400) (500) (150)
		220		162 \ 192 \ 220 (800) (300) (100)		162 \ 192 \ 220 \ 192 \ 162 (400) (150) (100) (150) (400)		162 \ 220 \ 192 (800) (100) (300)
M058	$\sigma_1 = \sigma_{amax}$	280		280 \ 208 \ 240 (10) (80) (50)				260 \ 244 \ 208 (10) (30) (80)
		260		260 \ 192 \ 226 (30) (240) (90)				260 \ 226 \ 196 (30) (90) (240)
		240		240 \ 178 \ 208 (90) (640) (240)				240 \ 208 \ 178 (90) (240) (640)
	$\sigma_2 = \sigma_{adr}$	280	244 \ 280 \ 208 (30) (10) (80)	244 \ 280 \ 208 (30) (80) (10)			244 \ 208 \ 280 (30) (80) (10)	244 \ 208 \ 280 (30) (80) (10)
		260	226 \ 260 \ 192 (30) (10) (80)	226 \ 260 \ 192 (90) (30) (240)			226 \ 192 \ 260 (30) (80) (10)	226 \ 192 \ 260 (90) (240) (30)
		240	208 \ 240 \ 178 (30) (10) (80)	208 \ 240 \ 178 (240) (90) (640)			208 \ 178 \ 240 (30) (80) (10)	208 \ 178 \ 240 (240) (640) (80)
	$\sigma_3 = \sigma_{amin}$	280		208 \ 244 \ 280 (80) (30) (10)				208 \ 280 \ 244 (80) (10) (30)
		260		192 \ 226 \ 260 (240) (90) (30)				192 \ 260 \ 226 (240) (30) (90)
		240		178 \ 208 \ 240 (640) (240) (80)				178 \ 240 \ 208 (640) (80) (240)

Uwaga : W nawiasach podano czas trwania stopni naprężenia w przebiegu, w tysiącach cykli.

3.3. Analiza otrzymanych wyników

Wyniki badań poddano szczegółowej analizie przy zastosowaniu odpowiednich metod statystycznych opisanych w pracach [58, 59]. Wyniki wykorzystano do weryfikacji przedstawionych wcześniej hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych: Palmgren-Minera, Cortena-Dolana, Serensena-Kogejewa oraz Zakrzewskiego.

4. Wyniki badań oraz ich statystyczne opracowanie

Program badań własnych został opracowany przy założeniu, że ocena wpływu parametrów przebiegu naprężenia na żywotność będzie dokonana drogą porównania krzywych trwałości zmęczeniowej, (*) wyznaczonych przy różnych przebiegach naprężenia. Wobec powyższego opracowanie statystyczne wyników badań obejmowało:

1. Sprawdzenie czy rozkład żywotności na ustalonych poziomach naprężenia jest rozkładem normalnym.

Sprawdzenie normalności rozkładu żywotności nerzucają zastosowane i przedstawione niżej metody statystyczne. Weryfikacje polegała na sprawdzeniu czy wyniki naniesione na logarytmo-normalną siatkę prawdopodobieństwa układają się wadłuż linii prostej [41 (s. 158)].

2. Wyznaczenie równań prostych regresji.

Zakładając korelację liniową naprężenia i logarytmu żywotności, metodą najmniejszych kwadratów wyznaczono proste regresji o równaniu [58 (s. 251)]:

$$y = a + bx,$$

w którym: $y = \lg N$, $x = \sigma_a$ - gdy $\sigma_a = \text{const}$

$y = \lg N$, $x = \sigma_{a \max}$ - w przypadku programowanych przebiegów naprężenia.

3. Sprawdzenie słuszności przyjęcia korelacji liniowej.

(*) Krzywymi trwałości zmęczeniowej nazywane są w literaturze [2, 3, 4, 6] krzywe przedstawione w układzie $\sigma_{a \max} - \lg N$ lub $\sigma_{a \max}$ - liczba bloków do złomu, wyznaczone przy programowanych przebiegach naprężenia.

W celu ustalenia, czy przyjęcie korelacji liniowej jest słuszne, zastosowano wariancyjny test korelacji F [58 (s. 159)] w przypadku każdej wyznaczonej prostej regresji.

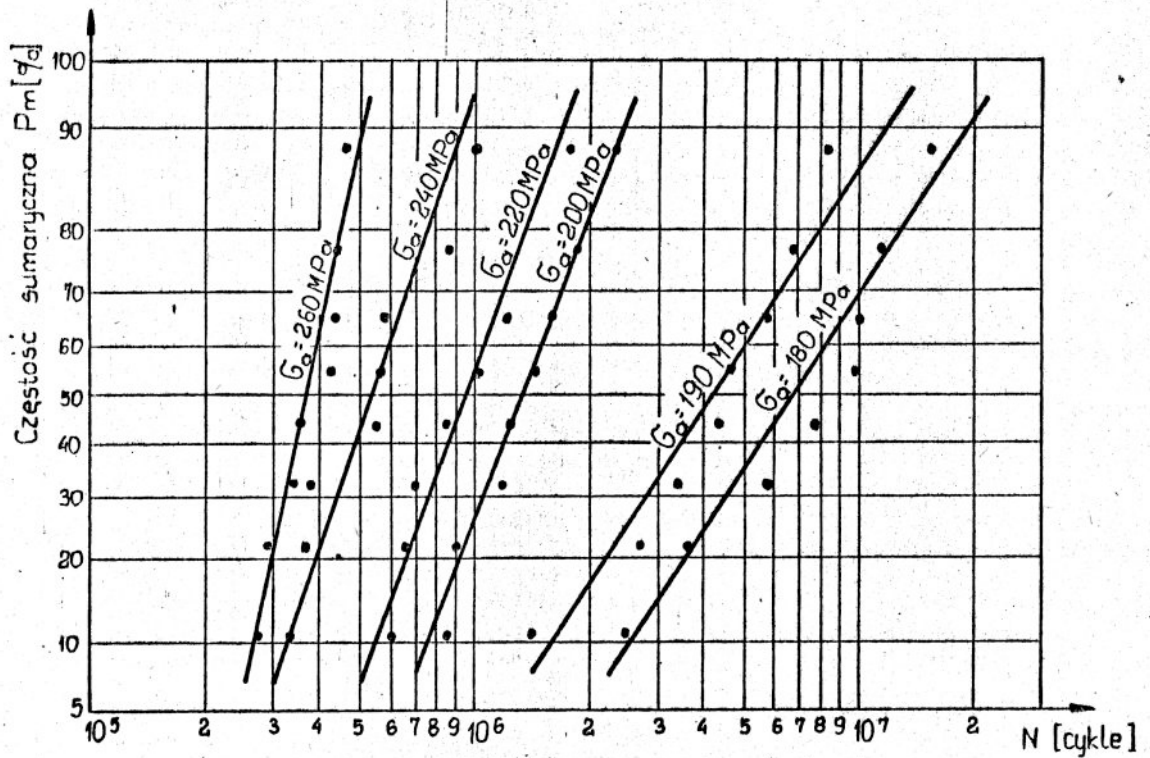
4. Wyznaczenie przedziałów ufności prostych regresji dla wartości średnich i pojedynczych spostrzeżeń.

Połowa przedziału ufności równa jest iloczynowi oszacowania odpowiedniego odchylenia standardowego s i parametru $t_{n;\alpha}$ (rozkład t - Studenta [58]) określonego dla przyjętego poziomu istotności i odpowiedniej liczby stopni swobody. W obliczeniach przyjęto poziom istotności $\alpha = 0,05$.

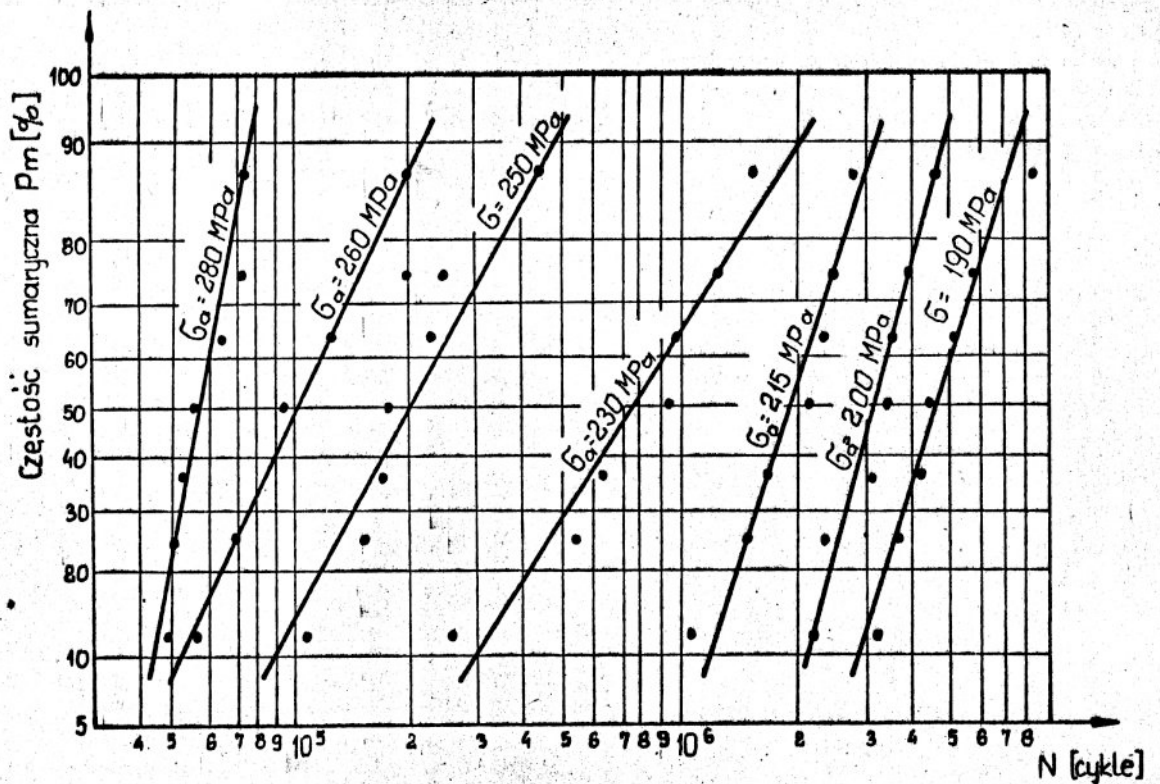
Wszystkie wyniki badań oraz szczegółowy przebieg obliczeń statystycznych podano w tabelach zamieszczonych w aneksie. Tabele w tekście pracy zawierają tylko średnie wyniki badań oraz końcowe wyniki obliczeń statystycznych. Oznaczenia występujących w obliczeniach wielkości statystycznych przyjęto za pracą [58]. Wyjątek stanowią wielkości występujące w testach, zaczerpniętych z innych prac. Niezbędne dodatkowe wyjaśnienia zamieszczone zostały w tabelach lub w tekście pracy.

4.1. Wyniki badań wstępnych

Średnie wyniki badań stopów PA6N i MO58 w zakresie ograniczonej i nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej podano w tabeli 5. Pojedyncze wyniki natomiast zawierają tabele 1, 2, 6 (w aneksie). Weryfikację normalności rozkładu logarytmów żywotności na poszczególnych poziomach naprężenia pokazano na rysunku 19 i 20.



Rys. 19. Weryfikacja logarytmo-normalnego rozkładu wyników pomiaru żywotności duralu PA6N $\sigma_a = \text{const}$

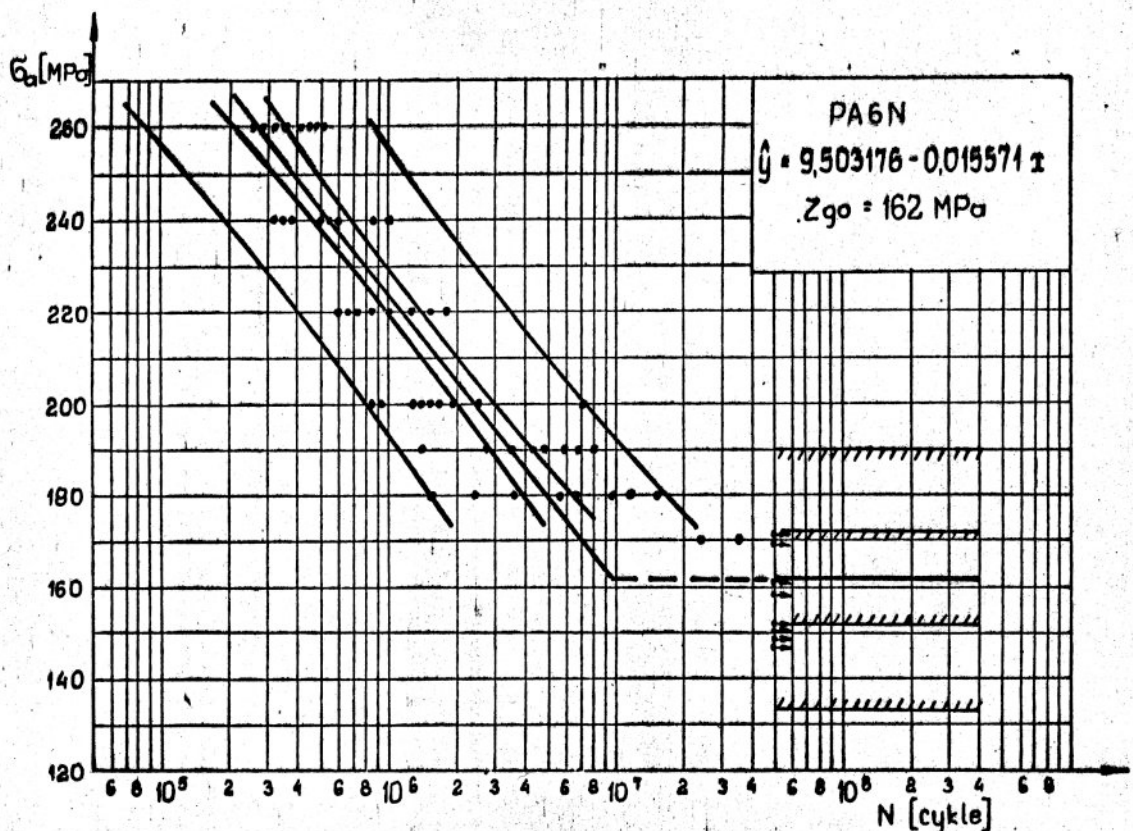


Rys. 20. Weryfikacja logarytmo-normalnego rozkładu wyników pomiaru żywotności mosiądzu MO58 $\sigma_a = \text{const}$

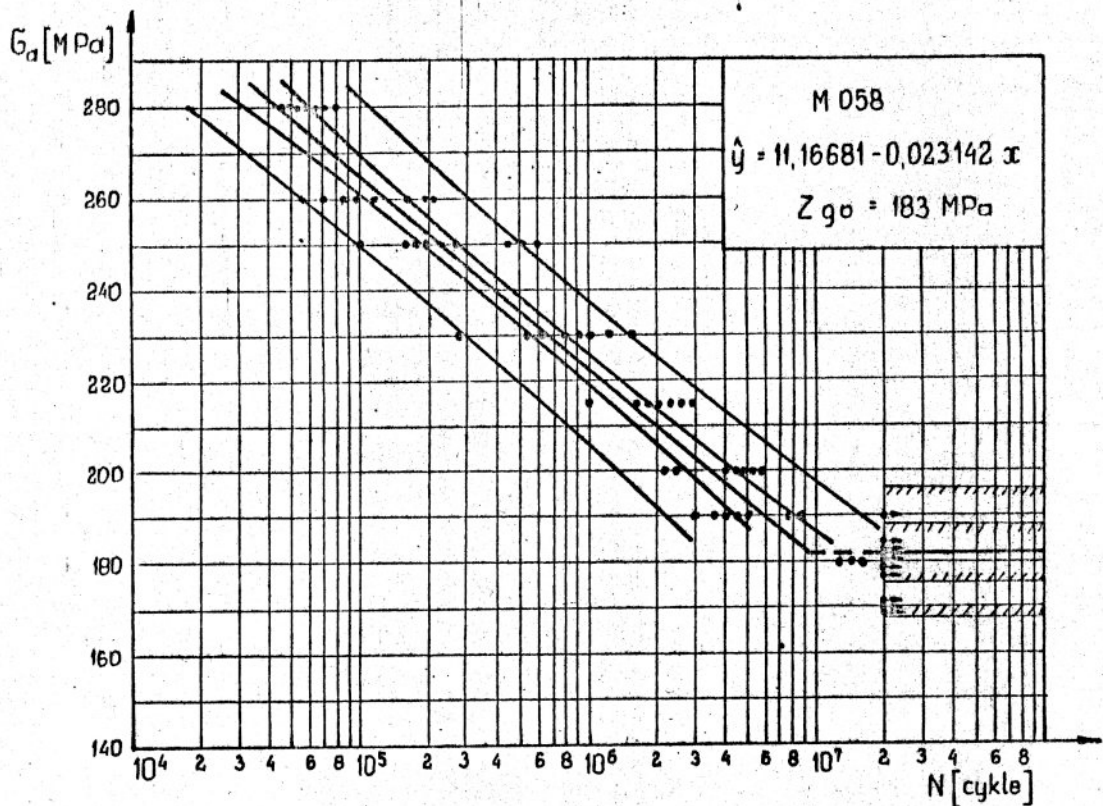
Ponieważ poszczególne wyniki układały się wzdłuż prostych z małym - jak widać z rysunków - rozrzutem, zrezygnowano z dodatkowych obliczeń istotności tych korelacji.

Przebieg obliczeń związany z opracowaniem wyników z zakresu ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej (wyznaczenie równań prostych regresji i ich 95 %-owych obszarów ufności oraz sprawdzenie istotności przyjętej korelacji) podano w aneksie w tabelach 3 - 5. Wyniki z zakresu nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej opracowano według metody opisanej w pracy [40 (s. 171)]. Oszacowane średnie wartości trwałej wytrzymałości zmęczeniowej obydwu materiałów podano w tabeli 5. W tabeli 7 (w aneksie) umieszczono ponadto wyznaczone 95 %-owe przedziały ufności tych średnich a także pojedynczych wyników. Wyznaczone krzywe wytrzymałości zmęczeniowej wraz z obszarami ufności pokazano na rysunkach 21, 22.

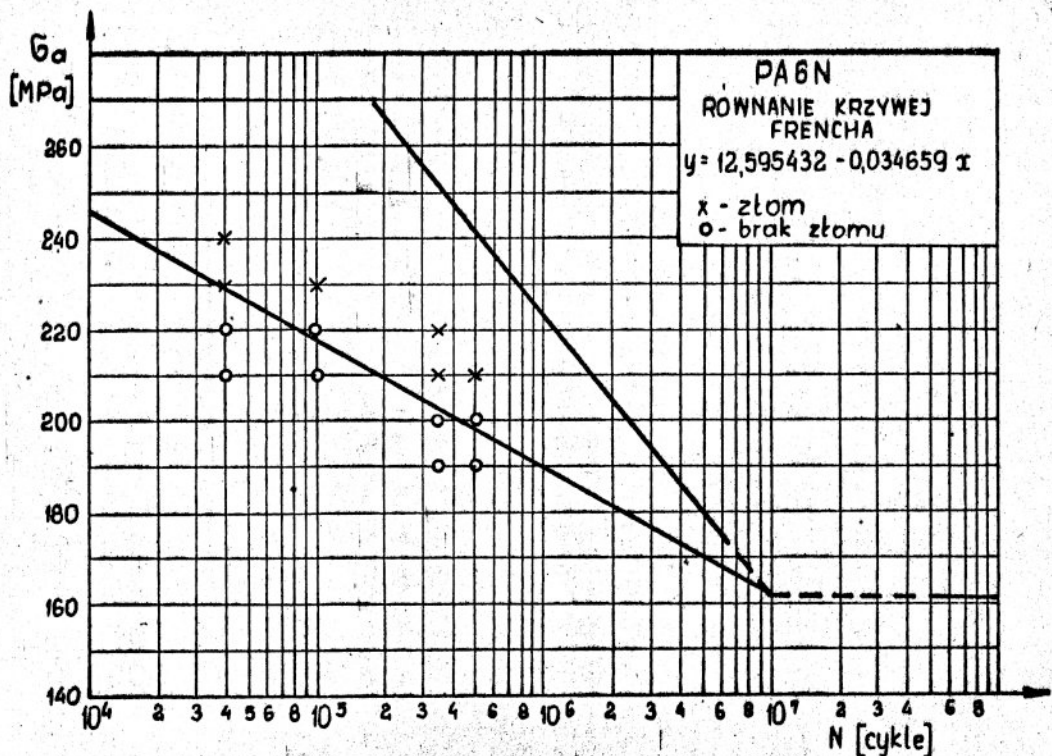
Przebieg wyznaczania krzywych Frencha obydwu materiałów ilustrują rysunki 23, 24. Odpowiadające poszczególnym punktom pomiarowym wartości liczbowe podano w tabeli 8 (w aneksie).



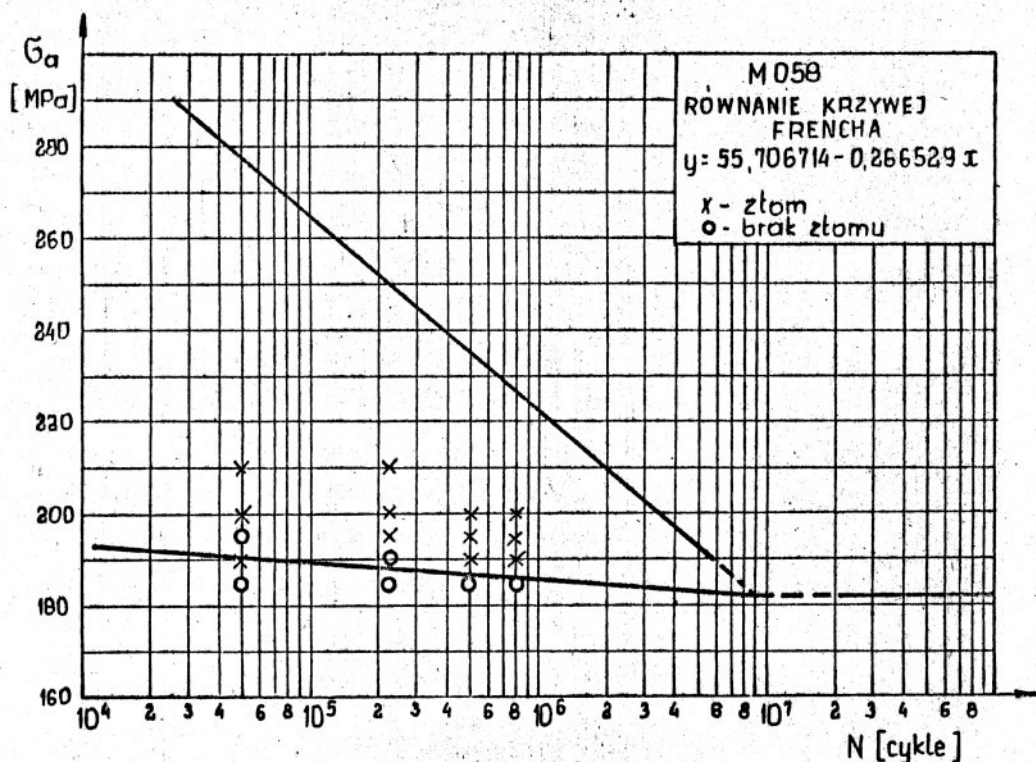
Rys. 21. Wykres Wöhlera duralu PA6N oraz 95 %-owe przedziały ufności



Rys. 22. Wykres Wöhlera mosiądzu M058 oraz 95 %-owe przedziały ufności



Rys. 23. Wykres Wöhlera i linie uszkodzeń Frencha duralu PA6N



Rys. 24. Wykres Wöhlera i linie uszkodzeń Frencha mosiądzu M058

Proste na rysunkach 23, 24 wykreślono kierując się tym, żeby w obszarze poniżej prostych nie występowały punkty pomiarowe oznaczające złamanie próbki przed osiągnięciem przez nią granicznej liczby cykli. Równania prostych podano w opisach rysunków.

Tabela 5

Średnie wyniki badań w zakresie ograniczonej i nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej, przy stałej amplitudzie naprężenia

MATERIAŁ	Lp.	WYTRZYMAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA				
		OGRANICZONA			NIEOGRANICZONA	
		POZIOM NAPRĘŻENIA σ_{ai} [MPa]	ŚREDNIA LICZBA CYKLI DO ZŁDMU N_i [cykle]	RÓWNANIE PROSTEJ REGRESJI	GRANICZNA LICZBA CYKLI N_{BR} [cykle]	Z_{90} [MPa]
PA 6N	1	260	369 200	$\hat{y} = 9,503176 - 0,015571 x$	$5 \cdot 10^7$	162
	2	240	546 500			
	3	220	984 400			
	4	200	1 423 600			
	5	190	4 208 100			
	6	180	7 193 600			
MO 58	1	280	50 000	$\hat{y} = 11,166810 - 0,023142 x$	$2 \cdot 10^7$	183
	2	260	108 800			
	3	250	205 100			
	4	230	772 400			
	5	215	1 939 700			
	6	200	3 773 100			
	7	190	4 896 000			

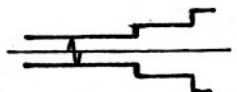
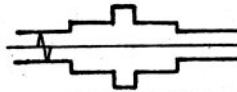
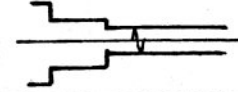
4.2. Wyniki badań przy programowanych przebiegach naprężenia

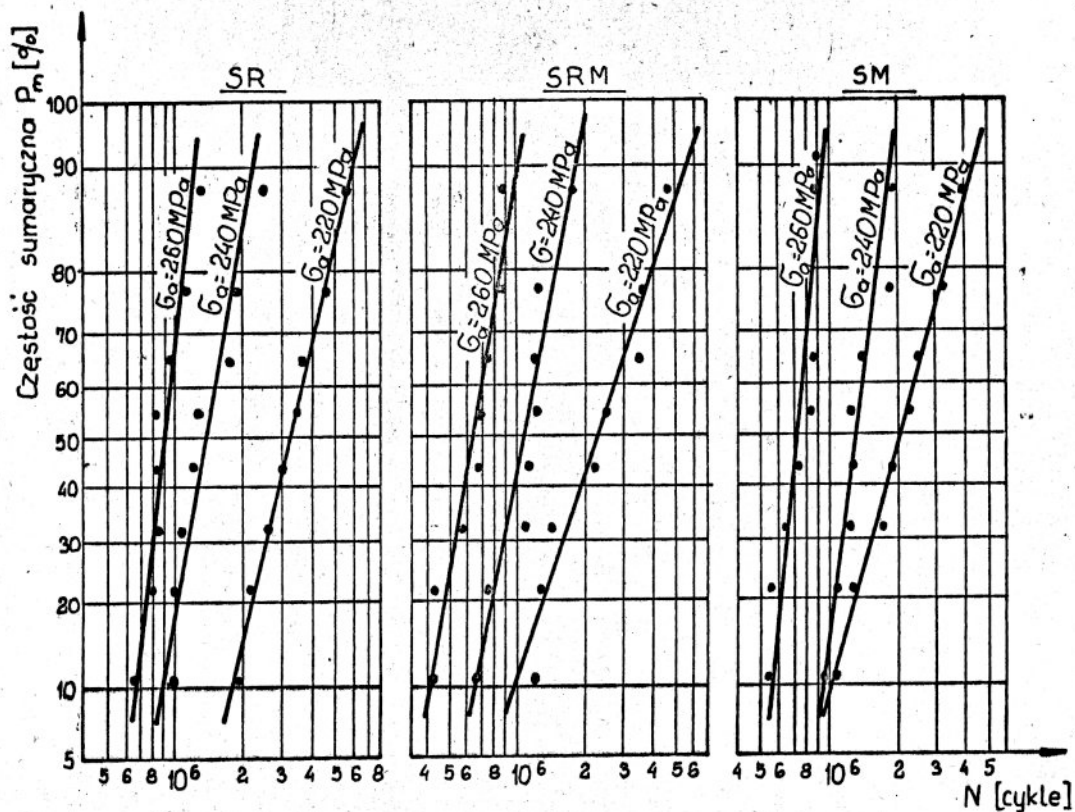
Średnie wartości żywotności uzyskane w badaniach przy programowanych przebiegach naprężenia podano w tabeli 6 (pojedyncze wyniki zamieszczono w aneksie w tabelach 9 - 20 dla duralu oraz 21 - 28 dla mosiądzu). Opracowanie wyników polegało na poprowadzeniu krzywej trwałości zmęczeniowej dla każdego rodzaju przebiegu przez trzy punkty pomiarowe, wyznaczone przez poziom naprężenia $\sigma_{a \max}$ i odpowiadającą mu sumaryczną liczbę cykli do złomu. Podobnie jak wyżej, przy założeniu liniowej korelacji $\sigma_{a \max}$ i $\log N$ metodą najmniejszych kwadratów wyznaczono proste regresji dla wszystkich zrealizowanych rodzajów przebiegu. Na rysunkach 25 - 32 przedstawiono graficzną weryfikację normalności rozkładu żywotności dla poszczególnych poziomów naprężenia. Widać, że we wszystkich przypadkach wyniki układają się wzdłuż prostych z małym rozrzutem. Obliczenia związane z wyznaczeniem równań prostych regresji podano w tabelach 9 - 28 (w aneksie).

Następne tabele w aneksie (29 - 40 dla duralu oraz 41 - 48 dla mosiądzu) zawierają wyniki obliczeń pomocniczych i końcowych 95 %-owych obszarów ufności dla odpowiednich prostych, a także każdorazowe sprawdzenie istotności przyjętej korelacji liniowej wraz z wnioskami. Tabele z wynikami obliczeń dla poszczególnych prostych ułożone są w takiej samej kolejności, w jakiej wyznaczono równanie tych prostych w poprzednich tabelach. Uzyskane proste regresji wraz z ich 95 %-owymi obszarami ufności pokazano na rysunkach 33 - 35.

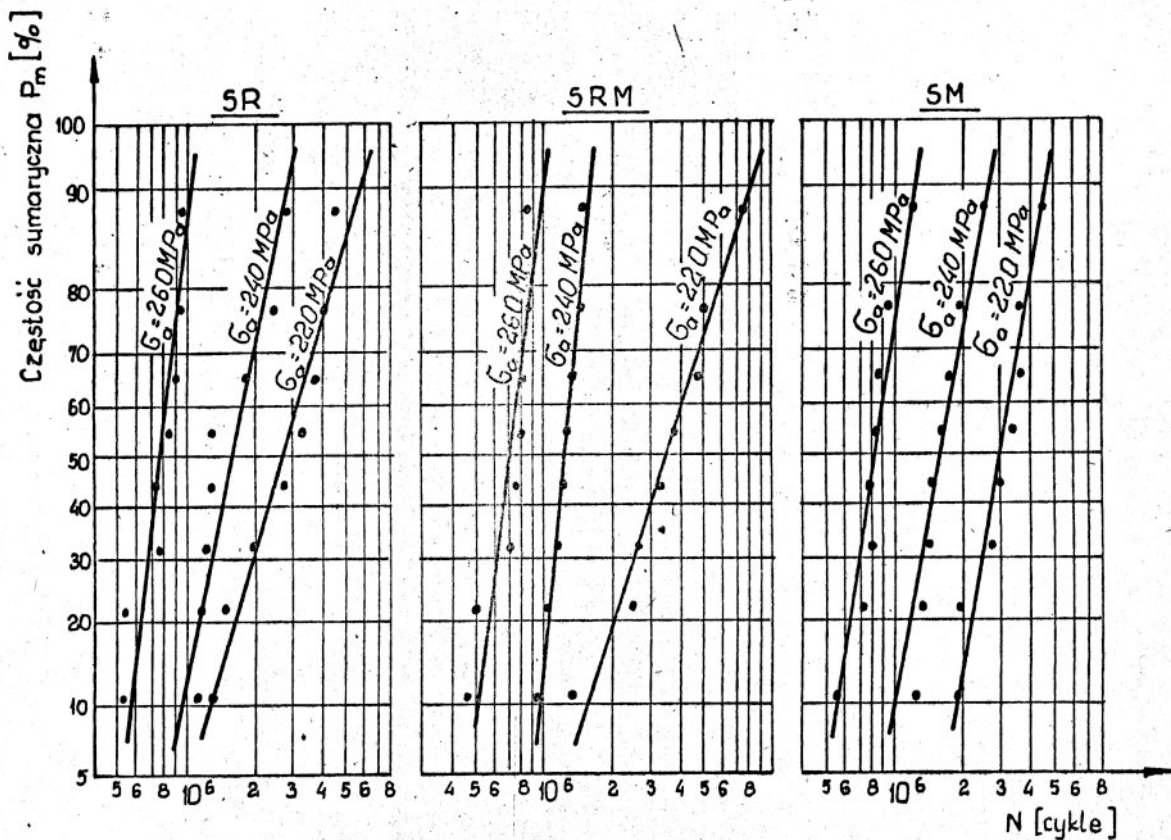
Tabela 6

Srednie wyniki badań duralu PA6N i mosiądzu MO58
przy programowanych przebiegach naprężenia

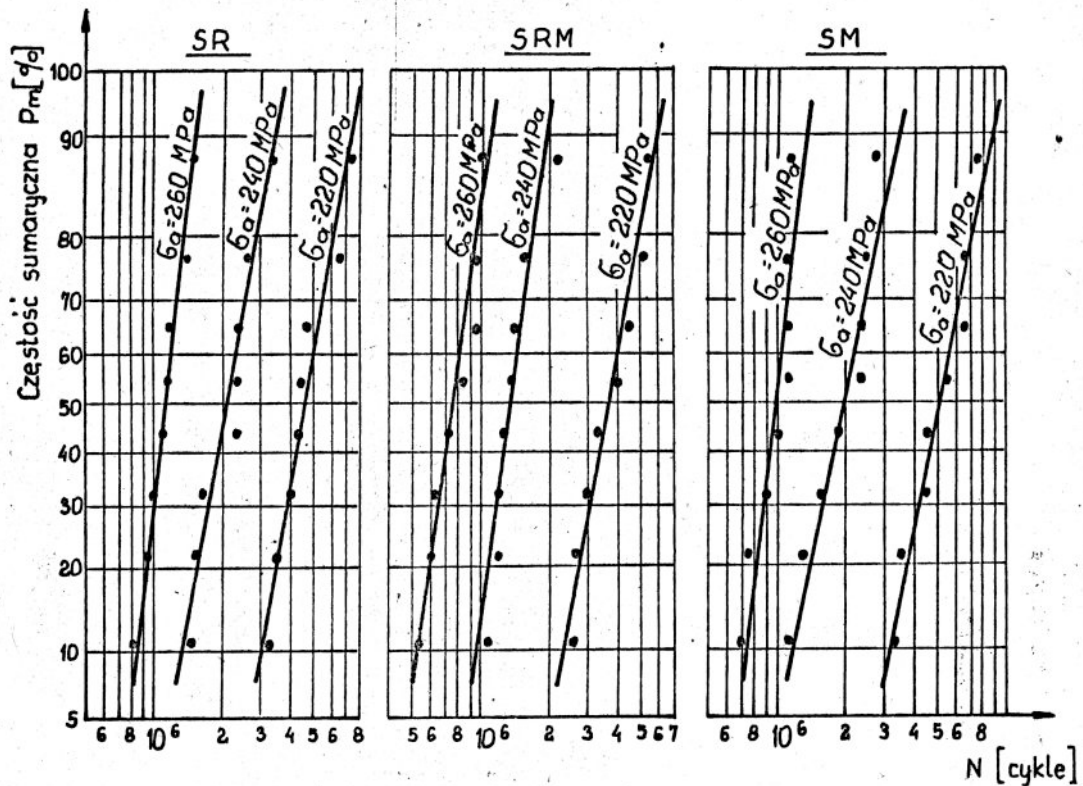
MATERIAŁ	NAPRĘŻENIE POCZĄTKOWE σ_p	POZIOM NAPRĘŻENIA σ_{amax} [MPa]						
			$n_0 = \text{const}$ $\times 10^{-3}$ [cykle]	$n_0 \sim N$ $\times 10^{-3}$ [cykle]	$n_0 = \text{const}$ $\times 10^{-3}$ [cykle]	$n_0 \sim N$ $\times 10^{-3}$ [cykle]	$n_0 = \text{const}$ $\times 10^{-3}$ [cykle]	$n_0 \sim N$ $\times 10^{-3}$ [cykle]
PA6N	σ_{amax}	260		901,4		628,5		724,9
		240		1 388,2		1 104,2		1 388,7
		220		3 159,9		2 259,2		2 049,7
	$\sigma_{a\acute{s}r}$	260	765,0	765,0	711,2	711,2	825,0	825,0
		240	1 460,3	1 582,8	1 055,3	1 286,0	1 517,7	1 668,1
		220	2 783,4	2 679,4	2 357,0	3 495,4	3 159,1	3 146,3
	σ_{amin}	260		1 171,5		763,5		979,2
		240		2 255,9		1 493,1		1 940,7
		220		4 654,3		3 756,2		5 116,8
MO58	σ_{amax}	280		336,3				261,4
		260		713,4				654,5
		240		1 936,3				2 642,6
	$\sigma_{a\acute{s}r}$	280	354,6	354,6			432,8	432,8
		260	1 098,9	1 502,4			775,0	1 436,6
		240	2 336,0	4 412,6			1 982,6	3 802,2
	σ_{amin}	280		434,1				324,6
		260		1 248,7				1 004,1
		240		4 256,1				2 094,9



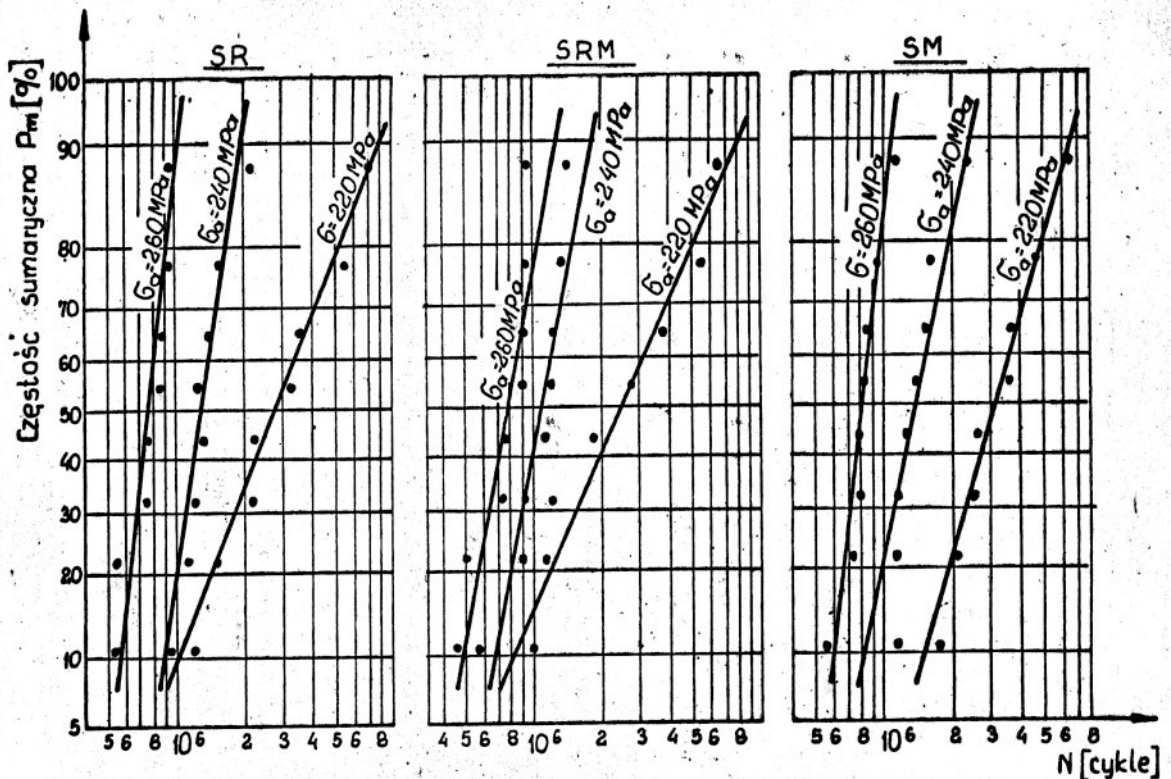
Rys. 25. Weryfikacja logarytmo-normalnego rozkładu żywotności duralu PA6N dla programowanego przebiegu naprężenia o parametrach: $\delta_p = \delta_{a \max}$, $n_0 \sim N$



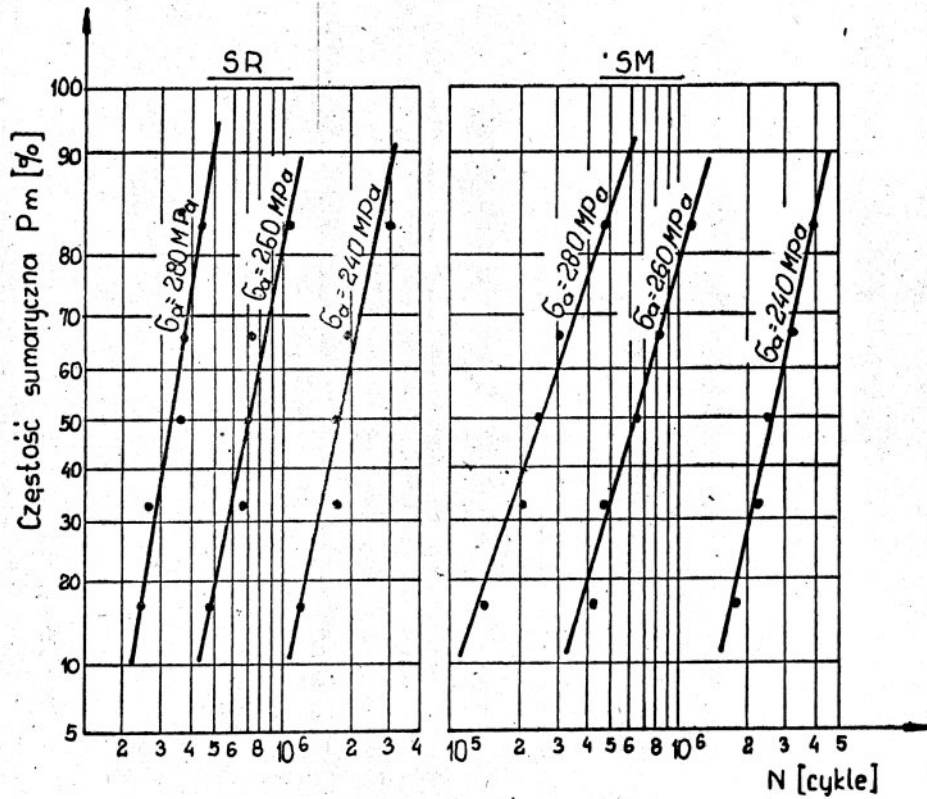
Rys. 26. Weryfikacja logarytmo-normalnego rozkładu żywotności duralu PA6N dla programowanego przebiegu naprężenia o parametrach: $\delta_p = \delta_{a \text{ sr}}$, $n_0 \sim N$



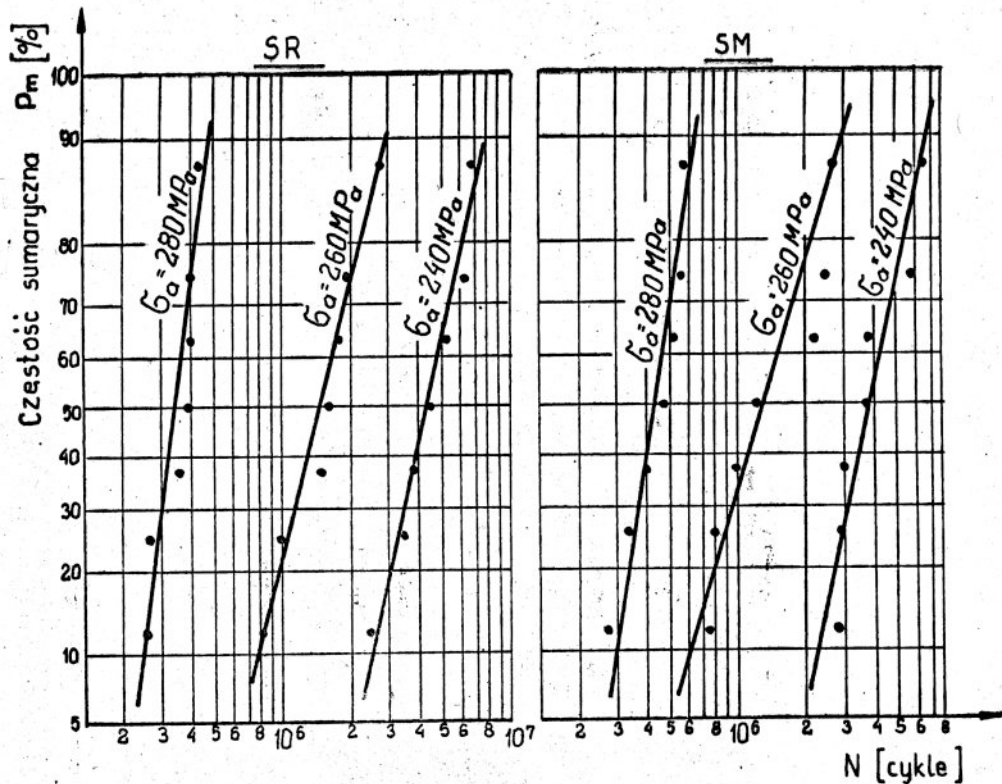
Rys. 27. Weryfikacja logarytmo-normalnego rozkładu żywotności duralu PA6N dla programowanego przebiegu naprężenie o parametrach: $\sigma_p = \sigma_a \min$, $n_o \sim N$



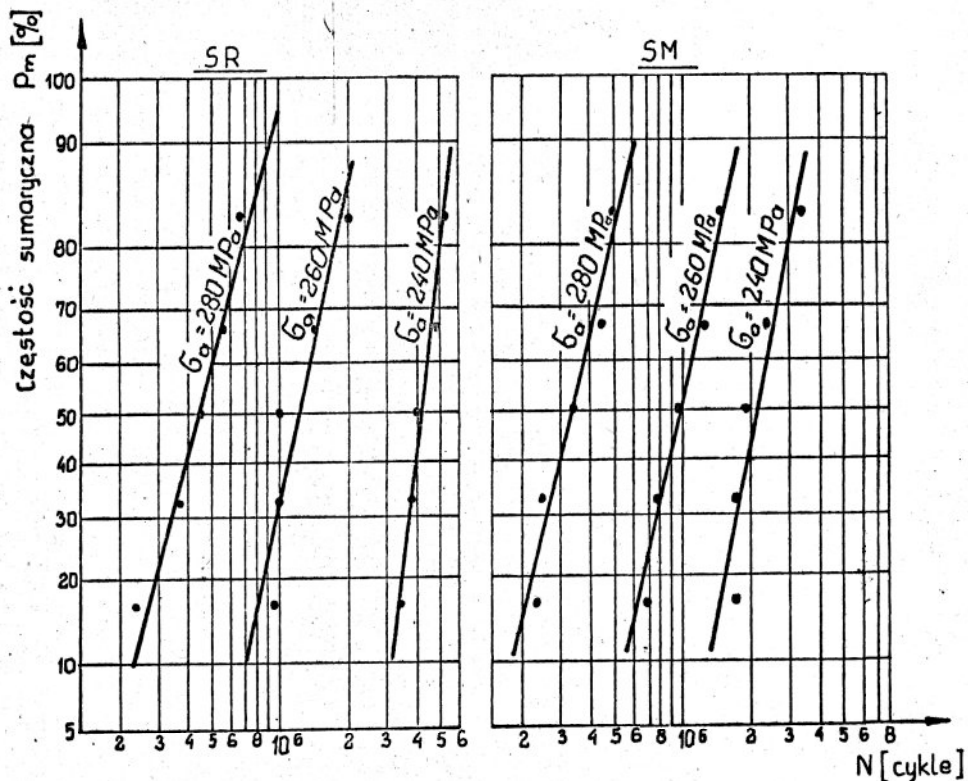
Rys. 28. Weryfikacja logarytmo-normalnego rozkładu żywotności duralu PA6N dla programowanego przebiegu naprężenie o parametrach: $\sigma_p = \sigma_a \text{ sr}$, $n_o = \text{const} = 4,2 \cdot 10^6$ cykli



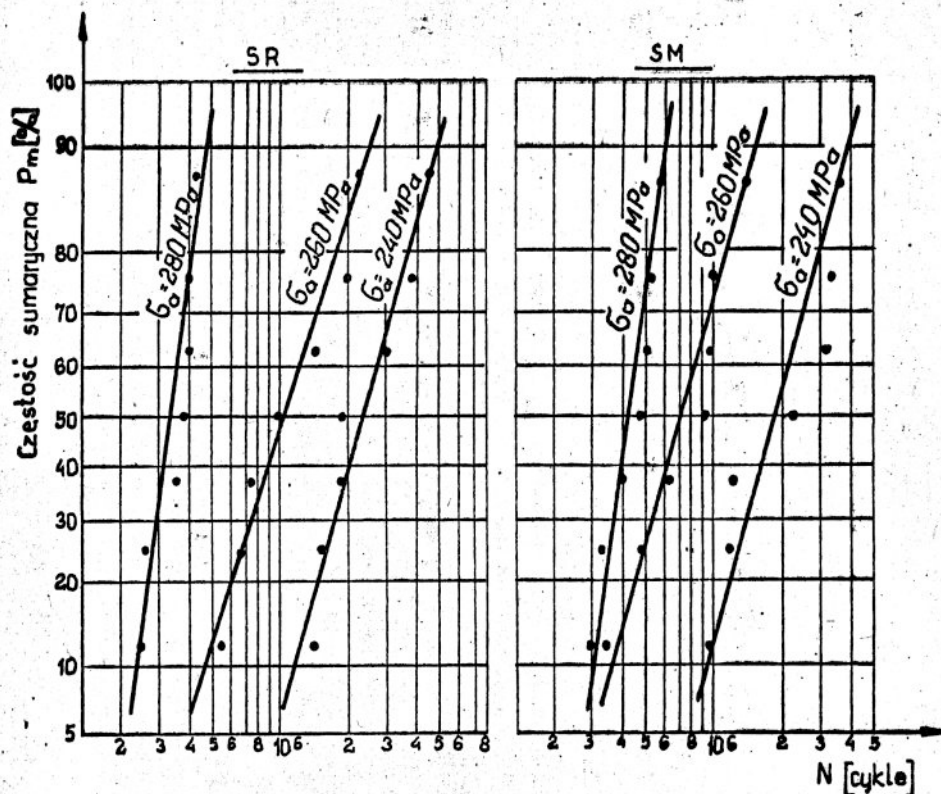
Rys. 29. Weryfikacja logarytmo-normalnego rozkładu żywotności mosiądzu MO58 dla programowanego przebiegu naprężenia o parametrach: $\sigma_p = \sigma_{a \max}$, $n_o \sim N$



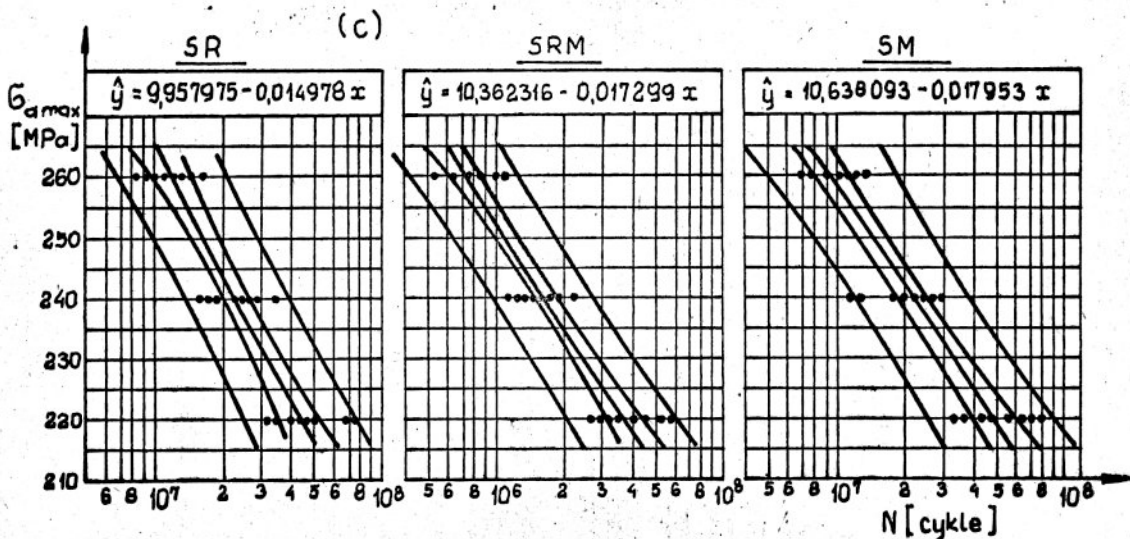
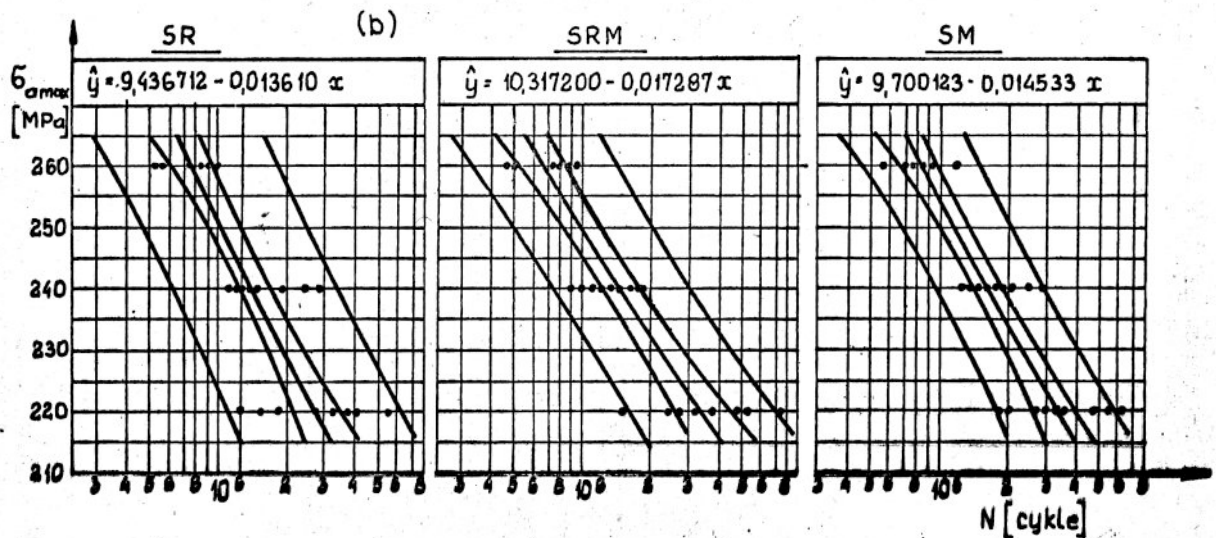
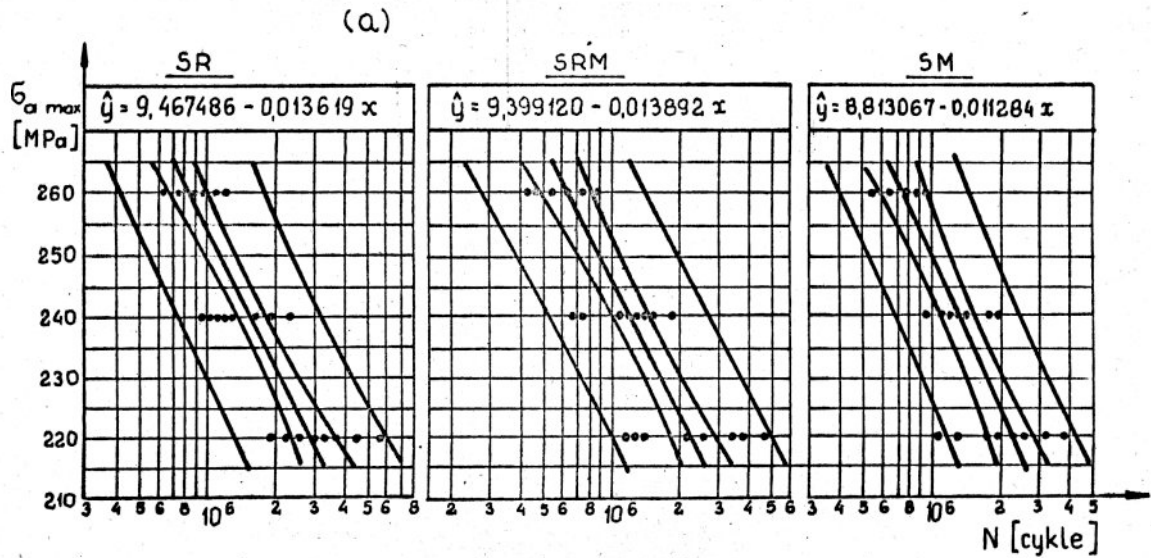
Rys. 30. Weryfikacja logarytmo-normalnego rozkładu żywotności mosiądzu MO58 dla programowanego przebiegu naprężenia o parametrach: $\sigma_p = \sigma_{a \text{ sr}}$, $n_o \sim N$



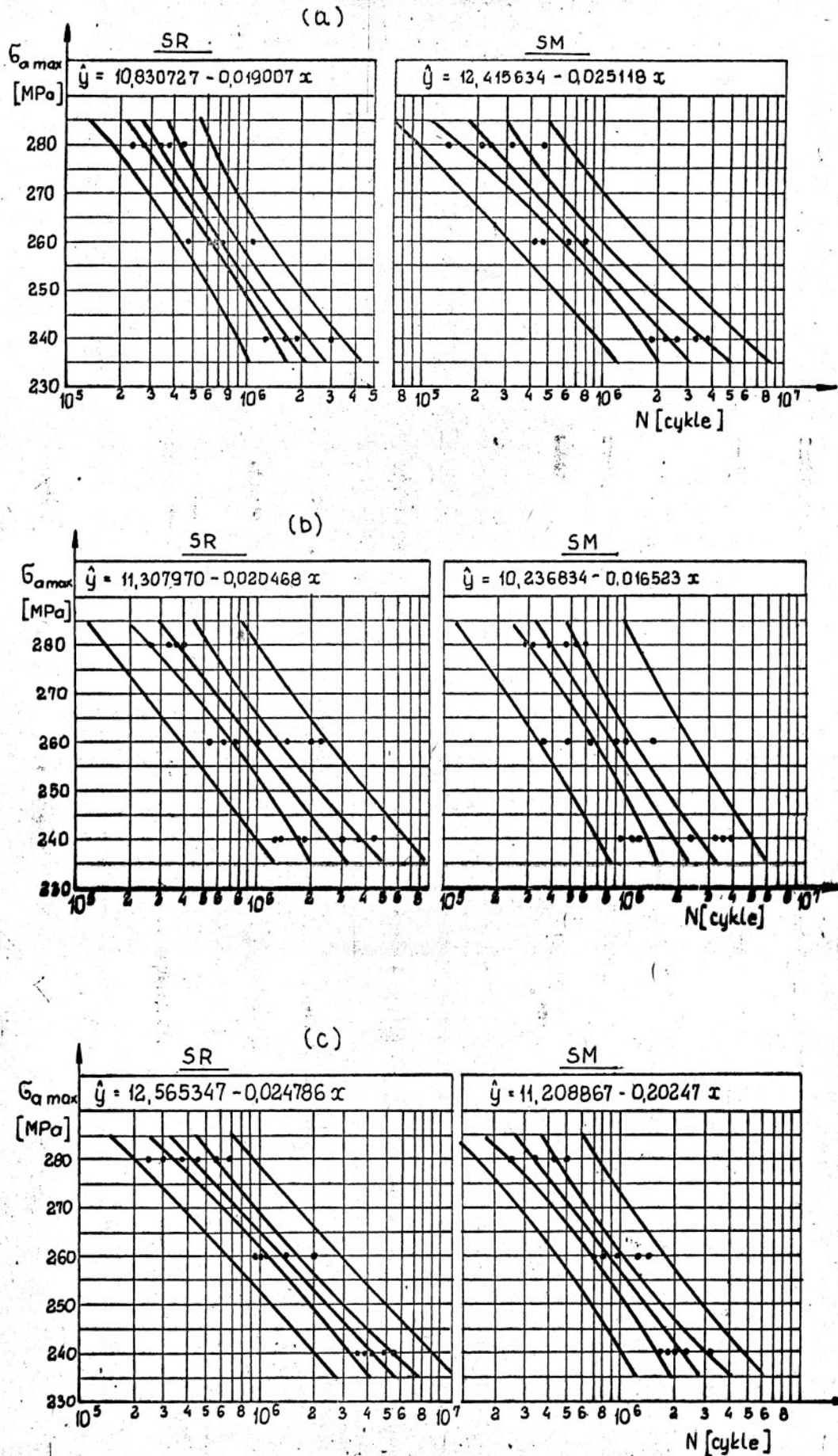
Rys. 31. Weryfikacja logarytmo-normalnego rozkładu żywotności mosiądzu MO58 dla programowanego przebiegu naprężenia o parametrach : $\sigma_p = \sigma_a \min$, $n_0 \sim N$



Rys. 32. Weryfikacja logarytmo-normalnego rozkładu żywotności mosiądzu MO58 dla programowanego przebiegu naprężenia o parametrach : $\sigma_p = \sigma_a \text{ sr}$, $n_0 = \text{const} = 1,2 \cdot 10^7$ cykli

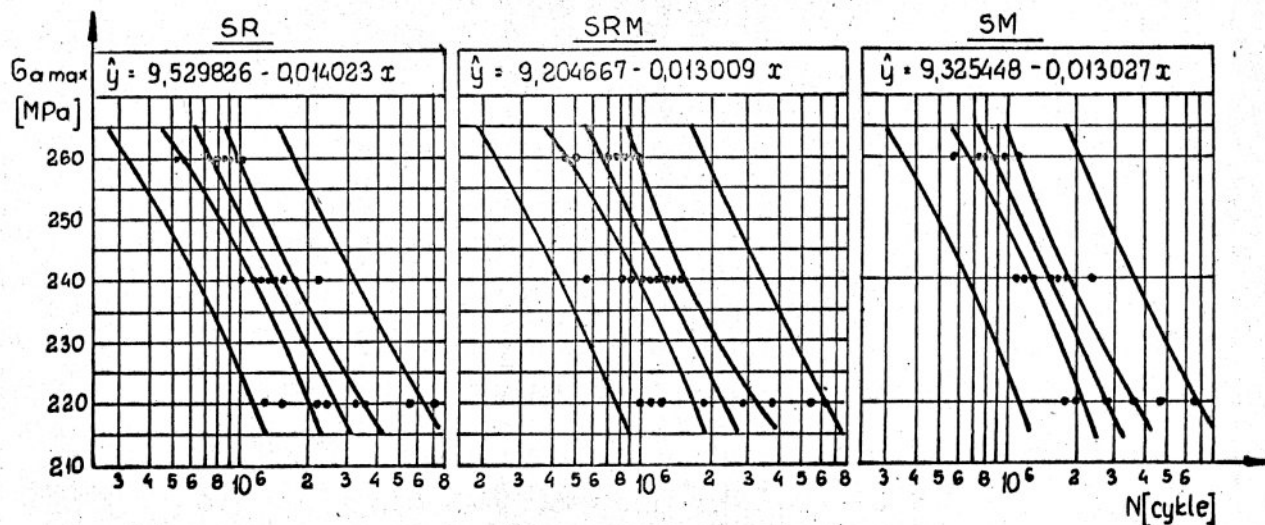


Rys. 33. Proste regresji oraz 95 %-owe obszary ufności dla duralu PA6N wyznaczone przy programowanych przebiegach naprężenia o parametrach: a) $\sigma_p = \sigma_{a \max}$, $n_0 \sim N$; b) $\sigma_p = \sigma_{a sr}$, $n_0 \sim N$; c) $\sigma_p = \sigma_{a \min}$, $n_0 \sim N$.

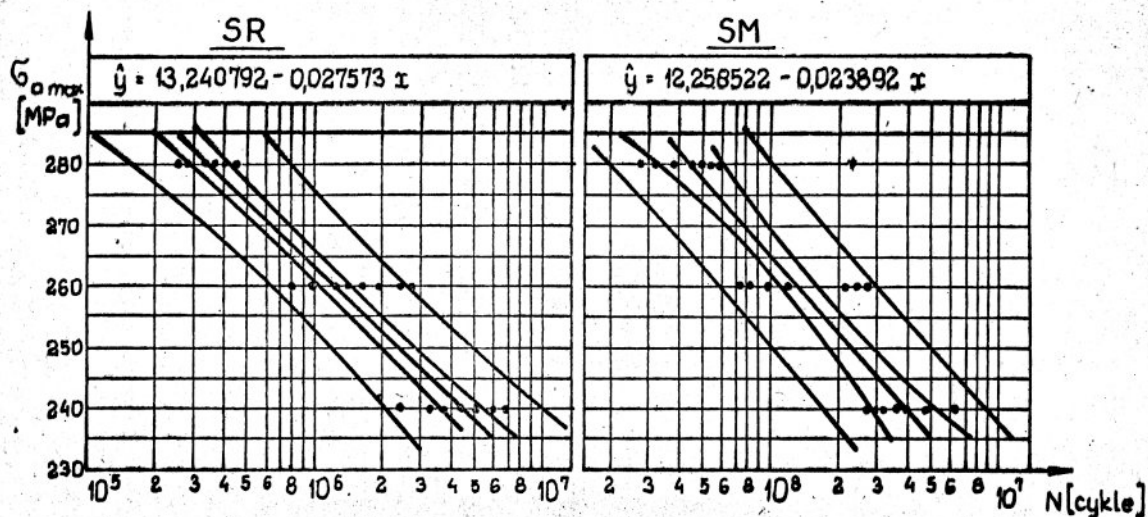


Rys. 34. Proste regresji oraz 95 %-owe obszary ufności dla materiałowi MO58 wyznaczone przy programowanych przebiegach naprężenia o parametrach: a) $\sigma_p = \sigma_{a \max}$, $n_0 \sim N$; b) $\sigma_p = \sigma_{a \min}$, $n_0 \sim N$; c) $\sigma_p = \sigma_{a \min}$, $n_0 \sim N$

(a)



(b)



Rys. 35. Proste regresji oraz 95 %-owe obszary ufności dla :

- a) duralu PA6N przy programie naprężenia o parametrach:
 $\sigma_p = \sigma_a$ sr, $n_0 = \text{const}$;
- b) mosiądzu MO58 przy programie naprężenia o parametrach:
 $\sigma_p = \sigma_a$ sr, $n_0 = \text{const}$

5. Analiza statystyczna wyników badań stopów PA6N i M058 przy programowanych przebiegach naprężenia

Celem statystycznej analizy wyników badań było określenie istotności wpływu parametrów programu naprężeń takich jak :

- sekwencja naprężeń,
- wartość naprężenia rozpoczynającego przebieg,
- liczba cykli w bloku przebiegu,

na żywotność zmęczeniową duralu PA6N i mosiądzu M058. Statystyczna ocena różnic trwałości zmęczeniowej uzyskanej przy przebiegach naprężenia o różnych parametrach polegała na porównaniu położenia odpowiednich prostych regresji. Porównanie dwu lub trzech (w zależności od rodzaju parametru, którego wpływ był analizowany) prostych regresji obejmowało :

- porównanie współczynników kierunkowych tych prostych testem t-Studenta w przypadku dwu prostych i testem istotności F (dla kilku średnich) w przypadku trzech prostych [58 (s. 266, 270)] ,
- porównaniu średnich generalnych tych prostych przy pomocy wyżej wymienionych testów [58 (s. 133, 170)] .

W przypadku stwierdzenia, że trzy proste są równoległe oraz że różnica między ich średnimi generalnymi jest istotna, dalsze postępowanie polegało na sprawdzeniu, między którymi z porównywanych średnich różnica jest istotna. Zastosowano do tego celu wielokrotny test rozstępu Duncana [59 (s. 172)] .

W przypadku stwierdzenia, że różnice w nachyleniu prostych są istotne, porównania średnich dokonywano na każdym poziomie naprężenia $\sigma_{a \max}$ przy pomocy testu t lub testu rozstępu Duncana.

Stwierdzenie nieistotnych różnic między położeniami porównywanych prostych regresji oznaczało brak istotności wpływu określonego parametru programu obciążenia na żywotność zmęczeniową. W takich przypadkach wyznaczano każdorazowo łączną prostą regresji dla porównywanych zbiorów wyników.

Stosowanie zarówno testu t jak i testu rozstępu Duncana wymaga spełnienia warunku jednorodności wariancji oszacowania. O jednorodności względnie niejednorodności wariancji wnioskowano na podstawie testu istotności F - dla dwu wariancji,

oraz testu χ^2 - dla trzech wariancji [58 (s. 167)]. Jeżeli w wyniku testowania stwierdzono, że wariancje są niejednorodne (miało to miejsce tylko w jednym przypadku porównywania dwu prostych - tabela 69 w aneksie), istotność różnic między nachyleniami prostych i ich średnimi generalnymi oceniono korzystając z odpowiednio opracowanego dla tego przypadku testu t-Studenta [59 (s. 132)].

Przebieg testowania wraz z uzyskanymi wnioskami przedstawiono w tabelach zamieszczonych w aneksie.

5.1. Wpływ sekwencji naprężeń na żywotność zmęczeniową

Analizę statystyczną wpływu sekwencji naprężeń w przebiegu na żywotność stopów PA6N i MO58 przeprowadzono dla czterech grup wyników badań (tab. 49 - 58 w aneksie). Poszczególne grupy obejmowały wyniki badań otrzymane przy programach naprężenia o trzech (w przypadku duralu) lub dwóch (w przypadku mosiądzu) rodzajach sekwencji oraz jednym z następujących wariantów parametrów σ_p i n_0 :

- 1) $\sigma_p = \sigma_{a \min}$; $n_0 \sim N$,
- 2) $\sigma_p = \sigma_{a \text{ sr}}$; $n_0 \sim N$,
- 3) $\sigma_p = \sigma_{a \max}$; $n_0 \sim N$,
- 4) $\sigma_p = \sigma_{a \text{ sr}}$; $n_0 = \text{const.}$

Wzajemne położenie porównywanych prostych regresji przedstawiono na rysunkach 36 - 43. Dla orientacji na rysunkach pokazano także położenie krzywej Wöhlera odpowiedniego materiału. Widać, że przebiegi prostych wyznaczonych przy różnych rodzajach sekwencji są bardzo do siebie zbliżone.

Przeprowadzona analiza statystyczna wykazała (tabele 49 - 56 w aneksie), że w przypadku duralu PA6N wpływ kolejności występowania poszczególnych wartości naprężeń w przebiegu na trwałość zmęczeniową jest nieistotny niezależnie od:

- wartości naprężenia maksymalnego $\sigma_{a \max}$ w przyjętych do badań przebiegach naprężenia,
- poziomowi naprężenia rozpoczynającego przebieg σ_p ,
- liczby cykli w bloku przebiegu n_0 .

Wyniki stąd, że własności zmęczeniowe duralu w przypadku przebiegu naprężenia o ustalonych wartościach σ_p i n_0 i różnych rodzajach sekwencji naprężeń można opisać jedną wspólną krzywą trwałości zmęczeniowej. Wyznaczone równanie łącznych prostych regresji podano w tabeli 7, natomiast przebiegi tych prostych pokazano na rysunkach 36 - 39 linią przerywaną.

Odmienne wnioski wynikają z analizy wyników badań mosiądzu MO58. Wykazała ona (tab. 57 - 58 w aneksie), że żywotność zmęczeniowa mosiądzu wyznaczona przy przebiegu naprężeń o stopniowo rosnących (SR) wartościach naprężeń jest istotnie różna od żywotności wyznaczonej przy przebiegu o sekwencji malejącej (SM) ale tylko w przypadku programu o określonych parametrach, mianowicie przebiegu naprężeń :

- o liczbie cykli w bloku dobranej tak, aby zapewniała ona średnio trzykrotną powtarzalność bloku do złomu ($n_0 \sim N$),
- rozpoczynającego się od najniższego stopnia naprężenia $\sigma_a \text{ min}$ (rys. 40) .

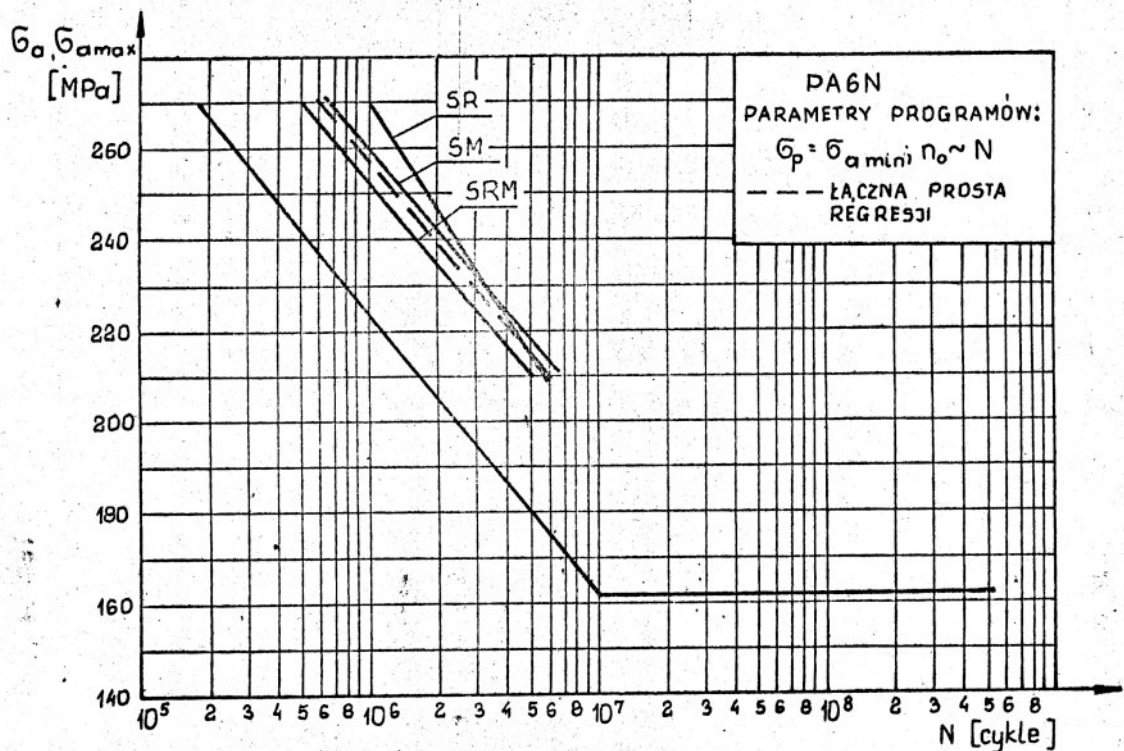
W wyniku przeprowadzonej analizy statystycznej stwierdzono jednocześnie, że zmiana sekwencji w omawianym przypadku przebiegu naprężenia nie powoduje istotnych zmian nachylenia prostych regresji (proste uważać można za równoległe) : Oznacza to, że wpływ sekwencji naprężeń na żywotność mosiądzu jest istotny dla wszystkich przyjętych w badaniach wartości naprężenia maksymalnego w przebiegu. Skorygowane (o wyznaczonym łącznym współczynniku nachylenia) proste regresji pokazano na rysunku 40 (linie przerywane) a ich równania podano w tabeli 7. Jak wynika z rysunku 40, żywotność zmęczeniowa wyznaczona przy programowanym przebiegu o rosnącej sekwencji naprężeń jest większa o 50 % od żywotności wyznaczonej przy przebiegu naprężeń o sekwencji malejącej.

W pozostałych przypadkach zrealizowanych przebiegów naprężenie, tzn. przy : $\sigma_p = \sigma_a \text{ sr}$, $n_0 \sim N$; $\sigma_p = \sigma_a \text{ max}$, $n_0 \sim N$; oraz $\sigma_p = \sigma_a \text{ sr}$, $n_0 = \text{const}$, wpływ sekwencji na żywotność zmęczeniową mosiądzu okazał się nieistotny. Poszczególne grupy wyników połączono, podobnie jak dla duralu, wyznaczając łączne proste regresji.

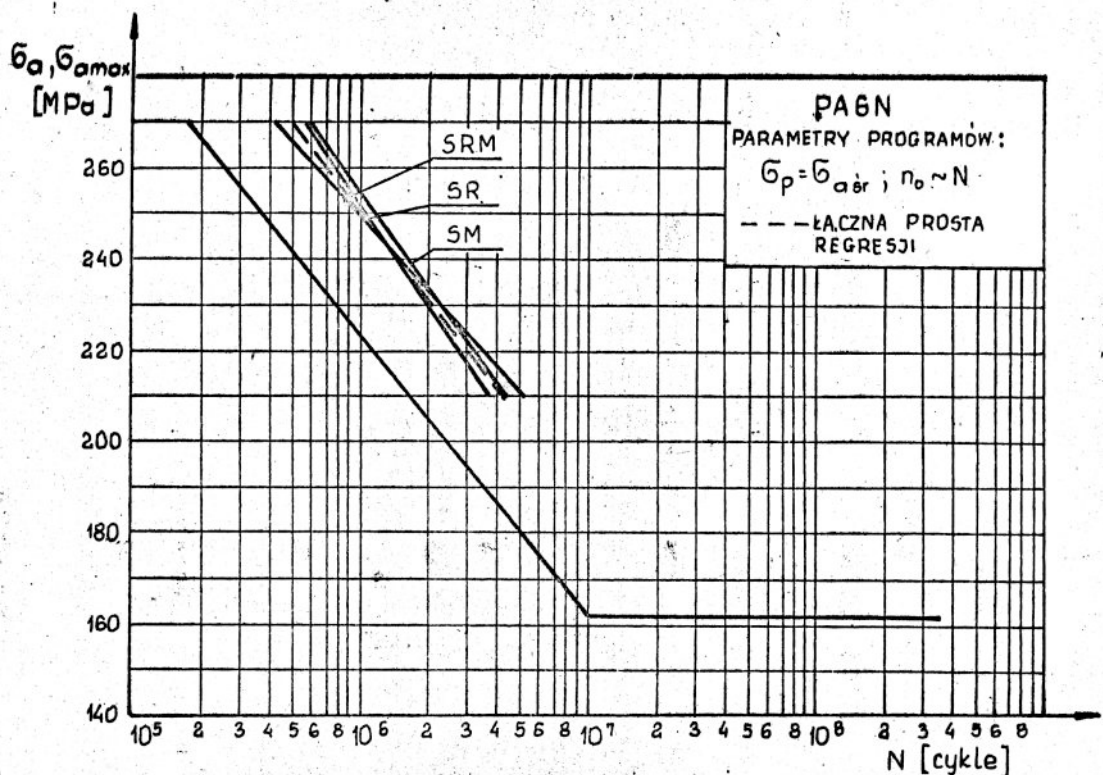
Równania tych prostych podano w tabeli 7 a ich przebieg pokazano na rysunkach 41 - 43 linią przerywaną.

Równania łącznych (lub skorygowanych) prostych regresji, wyznaczone dla połączonych grup wyników otrzymanych przy programach o różnych sekwencjach naprężeń

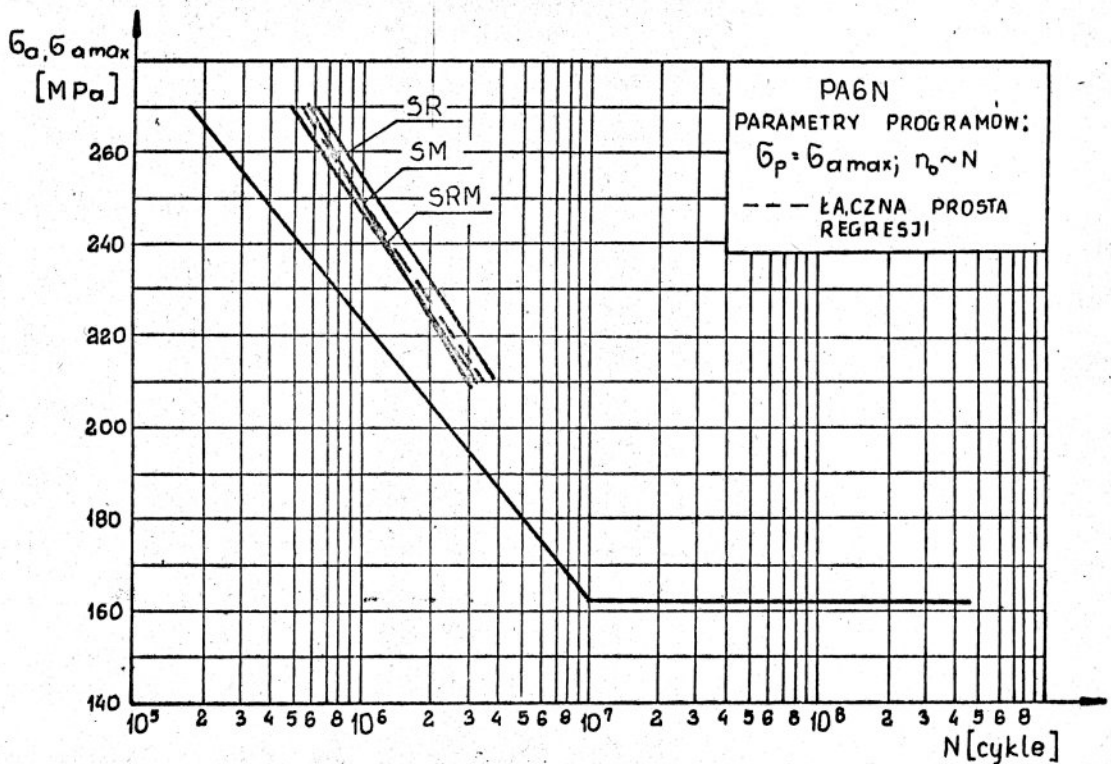
MATERIAŁ	LICZBA CYKLI W BLOKU n_0	NAPRĘŻENIE POCZĄTKOWE σ_p	SEKWENCJA NAPRĘŻEŃ	RÓWNANIE PROSTEJ REGRESJI
PA6N	$n_0 \sim N$	$\sigma_{a \text{ min}}$	SR	$\hat{y} = 10,319456 - 0,016743 x$
			SRM	
			SM	
		$\sigma_{a \text{ śr}}$	SR	$\hat{y} = 9,817989 - 0,015143 x$
			SRM	
			SM	
		$\sigma_{a \text{ max}}$	SR	$\hat{y} = 9,226550 - 0,012932 x$
			SRM	
			SM	
	$n_0 = \text{const}$	$\sigma_{a \text{ śr}}$	SR	$\hat{y} = 9,353348 - 0,013353 x$
			SRM	
			SM	
MO58	$n_0 \sim N$	$\sigma_{a \text{ min}}$	SR	$\hat{y} = 11,975235 - 0,022416 x$
			SM	$\hat{y} = 11,798963 - 0,022516 x$
		$\sigma_{a \text{ śr}}$	SR	$\hat{y} = 12,666276 - 0,025162 x$
			SM	
		$\sigma_{a \text{ max}}$	SR	$\hat{y} = 11,623180 - 0,022062 x$
			SM	
	$n_0 = \text{const}$	$\sigma_{a \text{ śr}}$	SR	$\hat{y} = 10,772400 - 0,018495 x$
			SM	



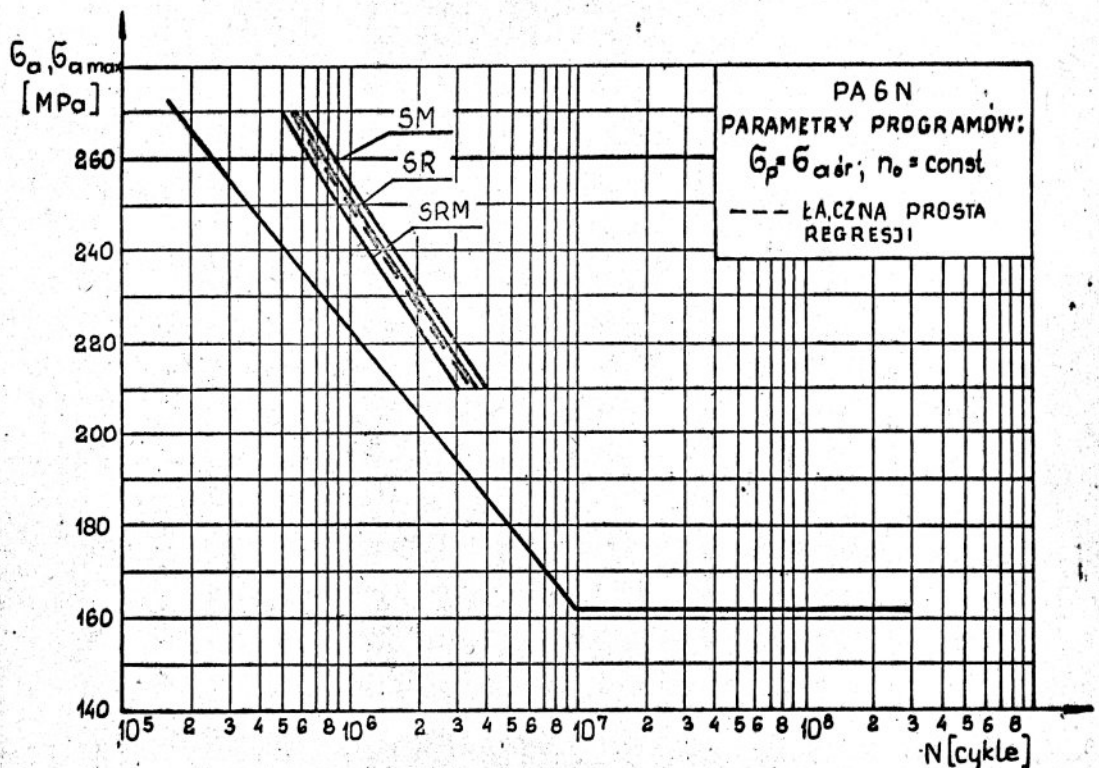
Rys. 36. Krzywe trwałości zmęczeniowej wyznaczone dla duralu PA6N przy przebiegach, w których naprężenie początkowe $\sigma_p = \sigma_{a \min}$, liczba cykli w bloku $n_0 \sim N$ (SR - sekwencja rosnąca, SRM - sekwencja rosnąco-malejąca, SM - sekwencja malejąca)



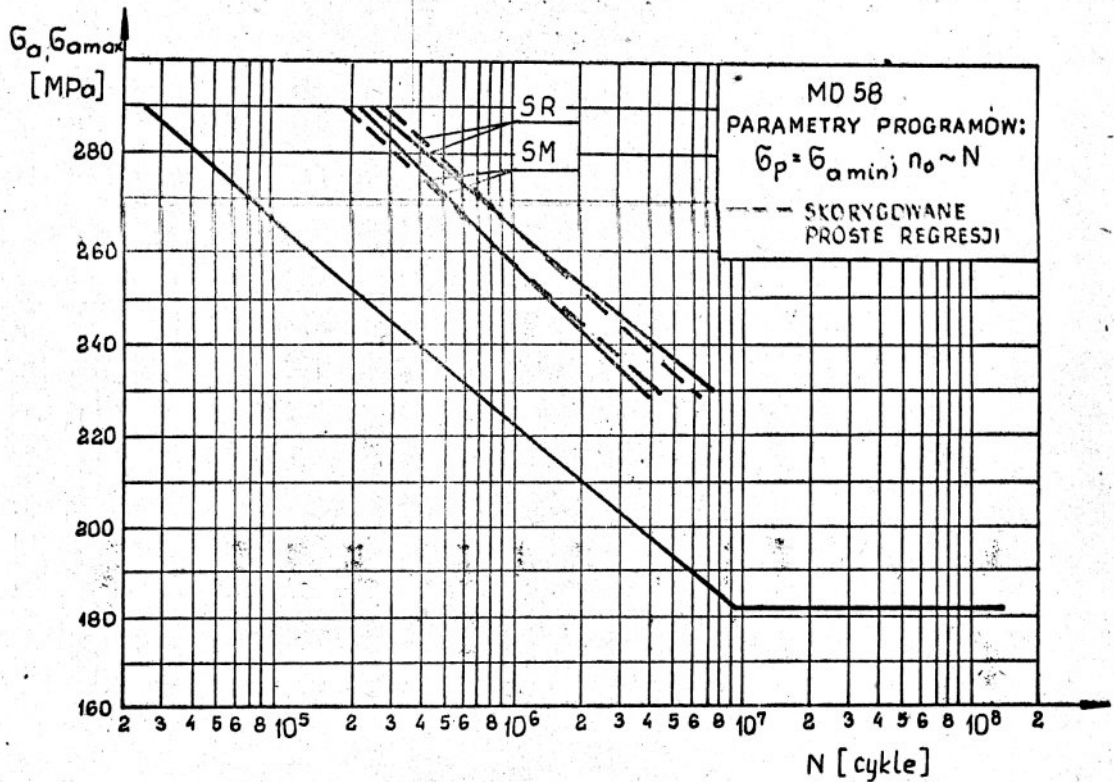
Rys. 37. Krzywe trwałości zmęczeniowej wyznaczone dla duralu PA6N przy przebiegach, w których naprężenie początkowe $\sigma_p = \sigma_{a \text{ sr}}$, liczba cykli w bloku $n_0 \sim N$



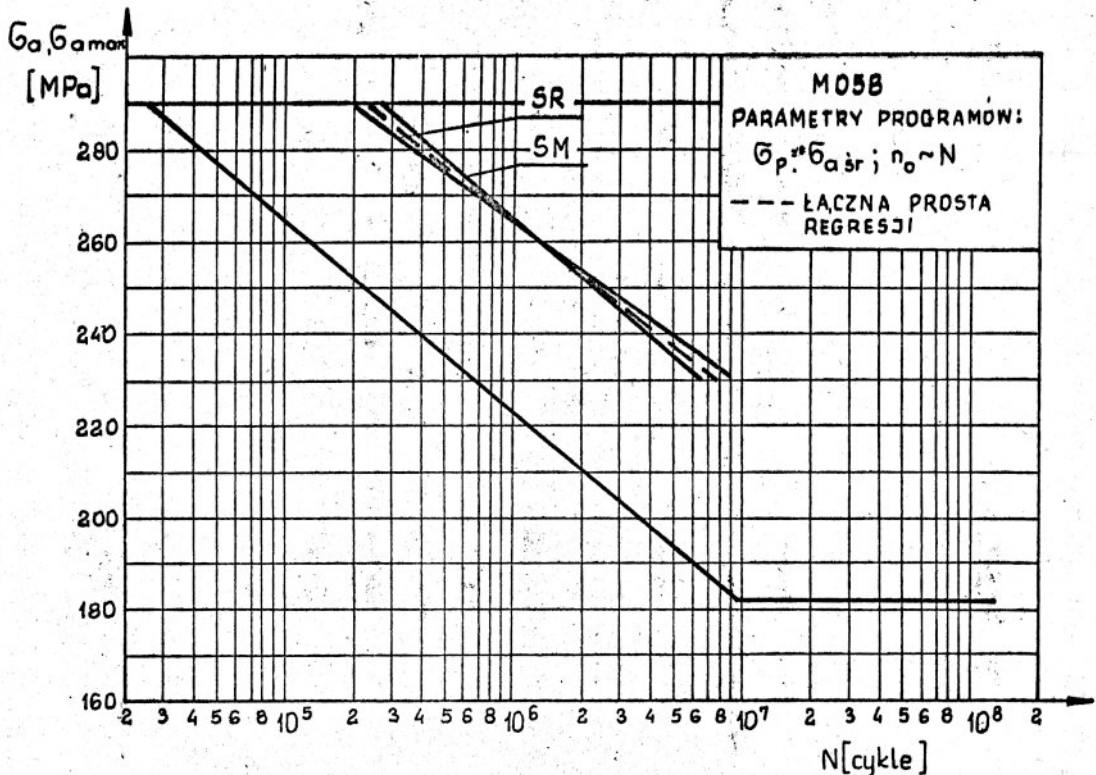
Rys. 38. Krzywe trwałości zmęczeniowej wyznaczone dla duralu PA6N przy przebiegach, w których naprężenie początkowe $\sigma_p = \sigma_{a \max}$, liczba cykli w bloku $n_0 \sim N$



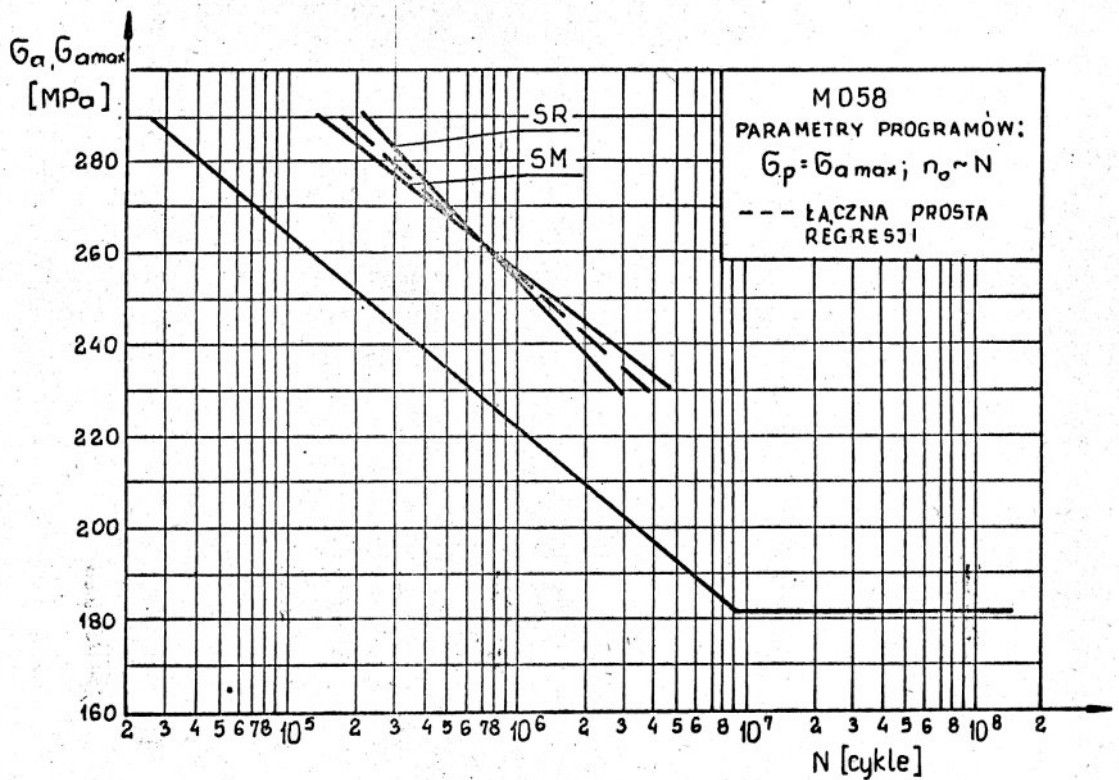
Rys. 39. Krzywe trwałości zmęczeniowej wyznaczone dla duralu PA6N przy przebiegach, w których naprężenie początkowe $\sigma_p = \sigma_{a \text{ sr}}$, liczba cykli w bloku $n_0 = \text{const} = 42 \cdot 10^4$ cykli



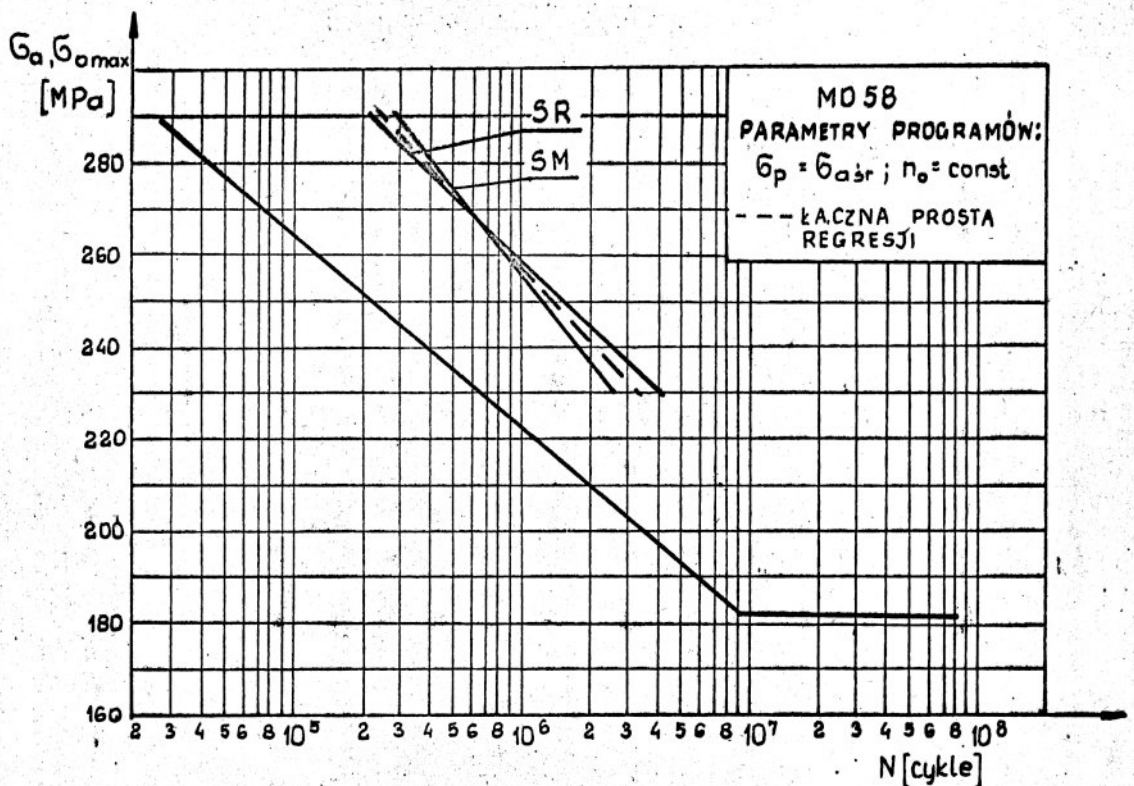
Rys. 40. Krzywe trwałości zmęczeniowej wyznaczone dla mosiądzu MO58 przy przebiegach, w których naprężenie początkowe $\sigma_p = \sigma_{a \min}$, liczba cykli w bloku $n_0 \sim N$ (SR - rosnąca sekwencja naprężeń, SM - sekwencja malejąca)



Rys. 41. Krzywe trwałości zmęczeniowej wyznaczone dla mosiądzu MO58 przy przebiegach, w których naprężenie początkowe $\sigma_p = \sigma_{a \text{ sr}}$, liczba cykli w bloku $n_0 \sim N$



Rys. 42. Krzywe trwałości zmęczeniowej wyznaczone dla mosiądzu MO58 przy przebiegach, w których naprężenie początkowe $\sigma_p = \sigma_{a \max}$, liczba cykli w bloku $n_0 \sim N$



Rys. 43. Krzywe trwałości zmęczeniowej wyznaczone dla mosiądzu MO58 przy przebiegach, w których naprężenie początkowe $\sigma_p = \sigma_{a \text{ sr}}$, liczba cykli w bloku $n_0 = \text{const} = 12 \cdot 10^4$ cykli

5.2. Wpływ wartości naprężenia rozpoczynającego przebieg^(*)

Analizę wpływu wartości naprężenia rozpoczynającego przebieg na żywotność zmęczeniową badanych materiałów przeprowadzono w trzech grupach wyników otrzymanych dla duralu oraz w dwu grupach dla mosiądzu. Poszczególne grupy wyników różniły się między sobą tym, że otrzymano je przy programach o trzech (w przypadku duralu) lub dwóch (w przypadku mosiądzu) rodzajach sekwencji naprężeń. O istotności wpływu naprężenia początkowego w przebiegu na żywotność wnioskowano na podstawie wyników porównanie prostych regresji wyznaczonych przy programach o naprężeniu początkowym $\sigma_p = \sigma_{a \text{ min}}, \sigma_{a \text{ sr}}, \sigma_{a \text{ max}}$, dla danego rodzaju sekwencji naprężeń oraz liczbie cykli w bloku $n_0 \sim N$. Wpływ ten istnieje, jeżeli rozpoczynanie realizacji programu naprężenia od wymienionych stopni naprężenia spowoduje istotne zmiany w całkowitej liczbie cykli, przeniesionych przez próbki do złomu.

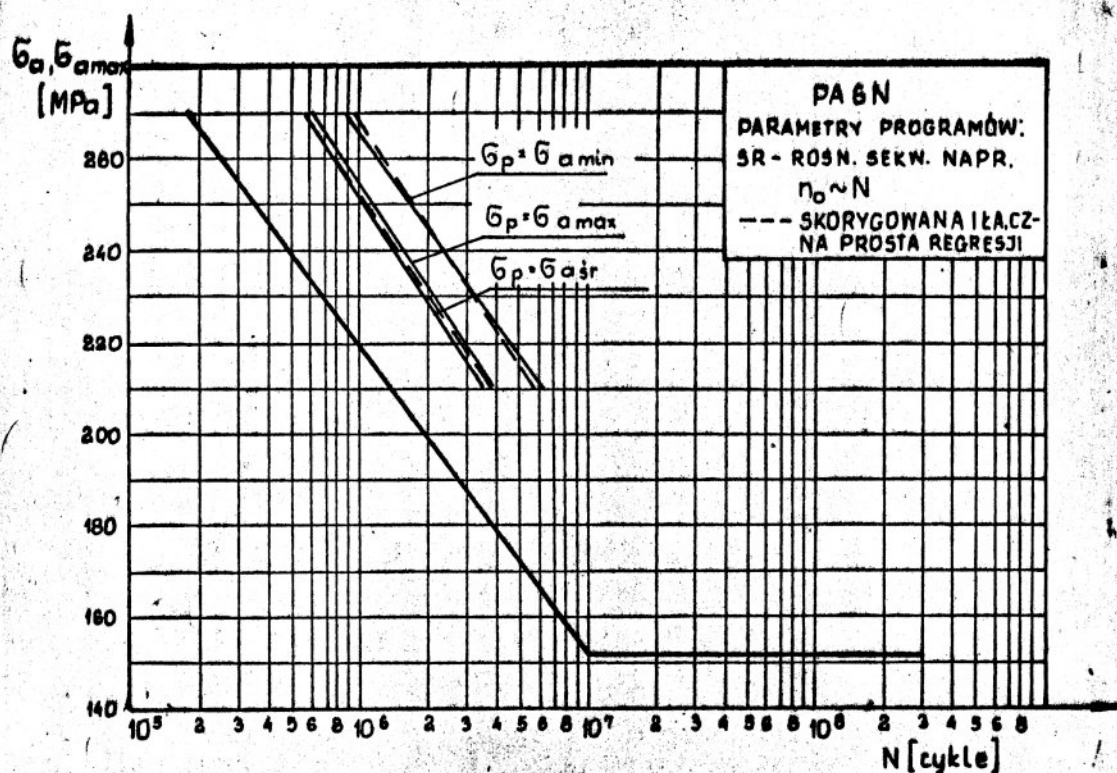
Przeprowadzona analiza wyników badań duralu PA6N wykazała, że :

1. W przypadku programów SR (stopniowo rosnących naprężeń) wpływ naprężenia początkowego na zmianę współczynnika kierunkowego prostych regresji jest nieistotny (tab. 59 w aneksie). Oznacza to, że porównywane proste regresji (rys. 44) można uznać za równoległe. Rozpoczynanie realizacji przebiegu naprężenia od pośredniego ($\sigma_p = \sigma_{a \text{ sr}}$) lub najwyższego ($\sigma_p = \sigma_{a \text{ max}}$) stopnia naprężenia nie ma istotnego wpływu na żywotność zmęczeniową (tab. 60 w aneksie). Natomiast krzywa trwałości zmęczeniowej, wyznaczona z zastosowaniem programu o naprężeniu początkowym $\sigma_p = \sigma_{a \text{ min}}$, jest istotnie (równoległe) przesunięta względem wyżej wymienionych krzywych, w stronę większej liczby cykli. Wartość tego przesunięcia odpowiada 51 %-owej różnicy w żywotności. Na rysunku 44 pokazano linią przerywaną przebieg skorygowanej prostej regresji wyznaczonej dla $\sigma_p = \sigma_{a \text{ min}}$ oraz przebieg łącznej

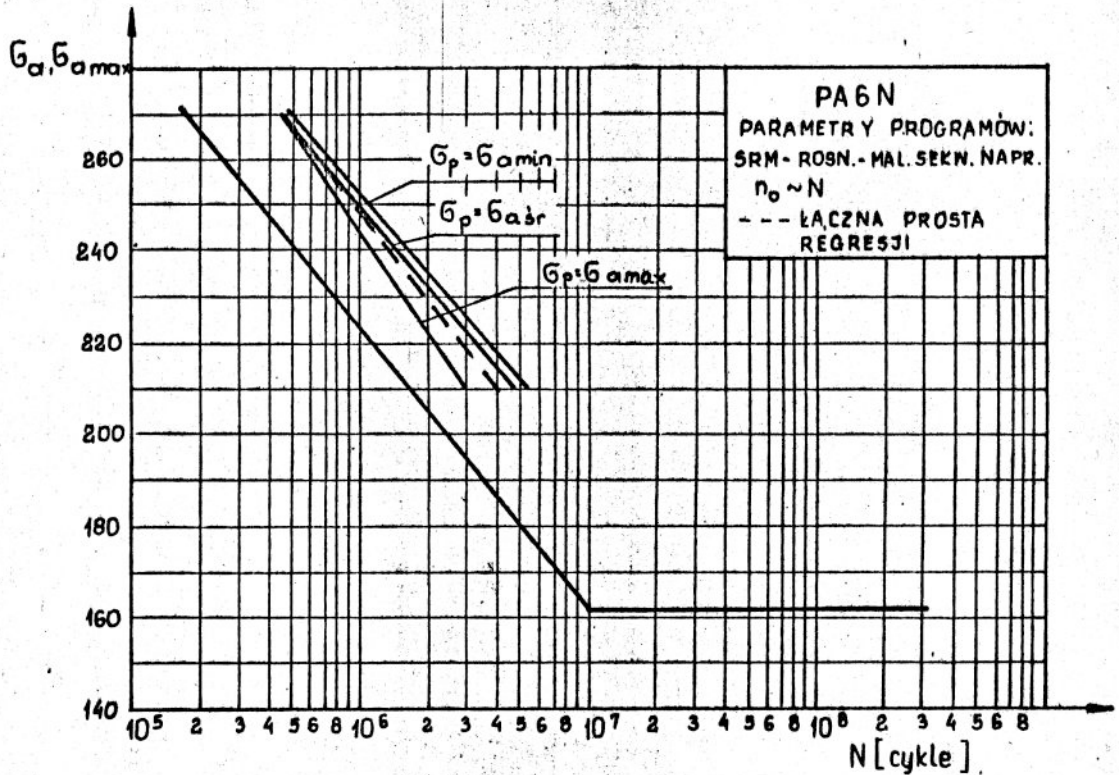
(*) Naprężenie rozpoczynające przebieg nazywane będzie również naprężeniem początkowym w przebiegu

prostej dla wyników otrzymanych przy $\sigma_p = \sigma_{a \text{ } \acute{s}r}$, $\sigma_{a \text{ } max}$. Odpowiadające im równania zawiera tabela 8.

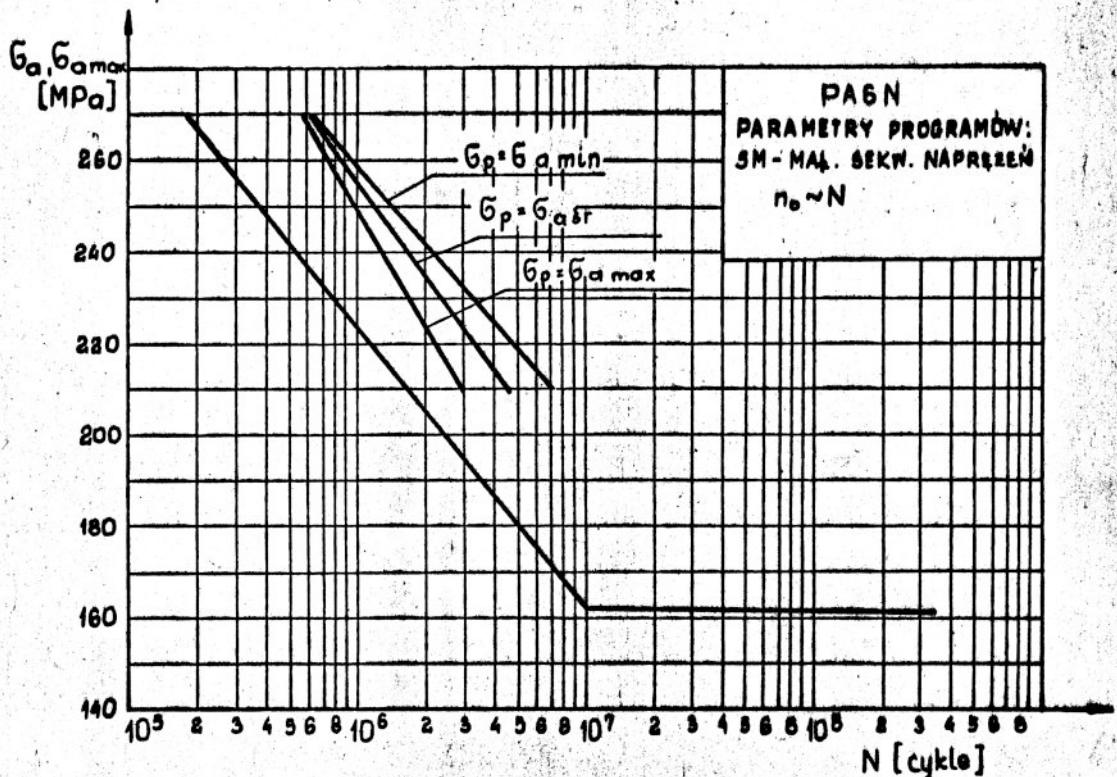
2. W przypadku programów SRM (stopniowo rosnących i malejących naprężeń) wpływ naprężenia początkowego na położenie krzywych trwałości zmęczeniowej jest nieistotny (tab. 61, 62 w aneksie). Równanie łącznej prostej regresji podano w tabeli 8, a jej przebieg pokazano na rysunku 45 linią przerywaną.
3. W przypadku programów SM (stopniowo malejących naprężeń) zmiana stopnia naprężenia rozpoczynającego przebieg powoduje istotną zmianę współczynnika kierunkowego prostej regresji (rys. 46, tab. 63 w aneksie). Wpływ naprężenia początkowego na żywotność zmęczeniową jest w tym przypadku zależny od wartości naprężenia maksymalnego w programie $\sigma_{a \text{ } max}$. Dla naprężenia $\sigma_{a \text{ } max} = 260$ MPa wpływ ten jest nieistotny (tab. 64 w aneksie). Dla naprężenia $\sigma_{a \text{ } max} = 240$ MPa żywotność zmęczeniowa wyznaczone przy programie, w którym $\sigma_p = \sigma_{a \text{ } min}$, jest o 31 % i 68 % większa od żywotności wyznaczonej przy programach, w których odpowiednio $\sigma_p = \sigma_{a \text{ } \acute{s}r}$, $\sigma_{a \text{ } max}$. Dla najniższej wartości $\sigma_{a \text{ } max} = 220$ MPa różnice te są większe i wynoszą odpowiednio 53 % i 128 %.



Rys. 44. Krzywe trwałości zmęczeniowej wyznaczone dla duralu PA6N przy przebiegach o rosnącej sekwencji naprężeń i liczbie cykli w bloku $n_0 \sim N$



Rys. 45. Krzywe trwałości zmęczeniowej wyznaczone dla duralu PA6N przy przebiegach o rosnąco-malejącej sekwencji naprężeń i liczbie cykli w bloku $n_0 \sim N$



Rys. 46. Krzywe trwałości zmęczeniowej wyznaczone dla duralu PA6N przy przebiegach o malejącej sekwencji naprężeń i liczbie cykli w bloku $n_0 \sim N$

Tabela 8

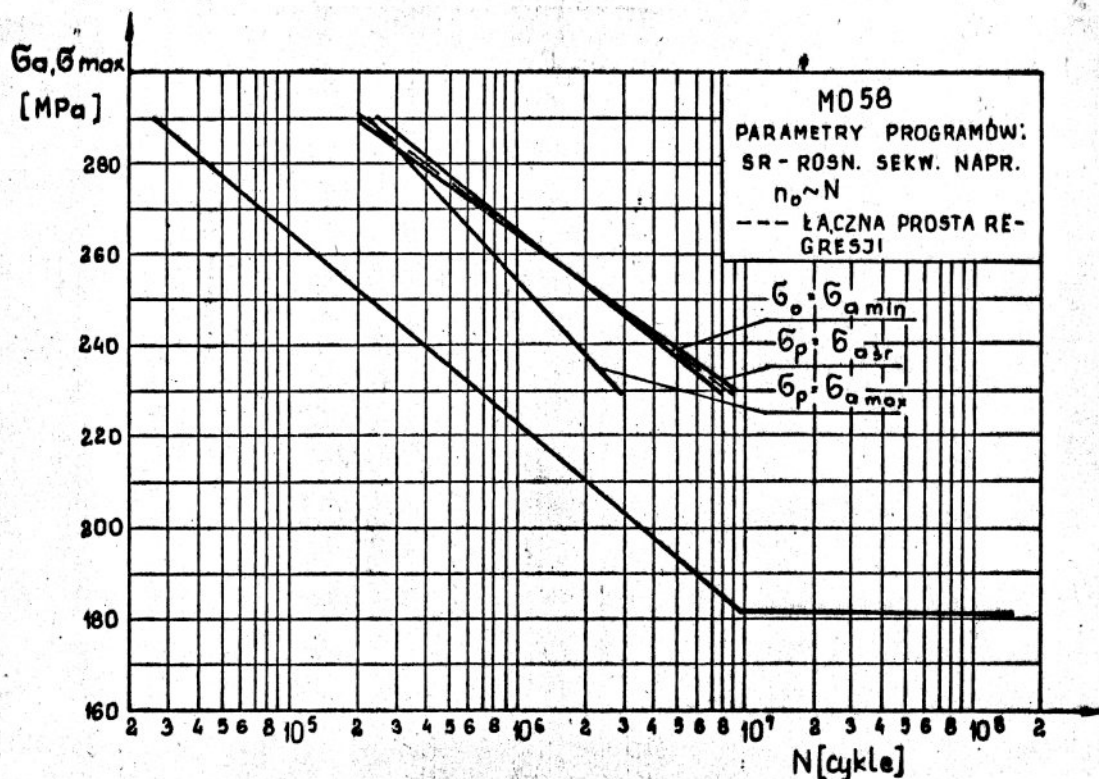
Równania łącznych (lub skorygowanych) prostych regresji, wyznaczone dla połączonych grup wyników otrzymanych przy programach o różnych wartościach naprężenia początkowego

MATERIAŁ	SEKWENCJA NAPRĘŻEN	NAPRĘŻENIE POCZĄTKOWE σ_p	RÓWNANIE PROSTEJ REGRESJI
PA6N	SR	$\sigma_{a \text{ min}}$	$\hat{y} = 9,739792 - 0,014069 x$
		$\sigma_{a \text{ śr}}$	$\hat{y} = 9,561181 - 0,014069 x$
		$\sigma_{a \text{ max}}$	
	SRM	$\sigma_{a \text{ min}}$	$\hat{y} = 10,026458 - 0,016160 x$
		$\sigma_{a \text{ śr}}$	
		$\sigma_{a \text{ max}}$	
	SM	$\sigma_{a \text{ min}}$	$\hat{y} = 10,638093 - 0,017953 x^{(*)}$
		$\sigma_{a \text{ śr}}$	$\hat{y} = 9,700123 - 0,014533 x^{(*)}$
		$\sigma_{a \text{ max}}$	$\hat{y} = 8,813067 - 0,011284 x^{(*)}$
MO58	SR	$\sigma_{a \text{ min}}$	$\hat{y} = 12,959312 - 0,026295 x$
		$\sigma_{a \text{ śr}}$	
		$\sigma_{a \text{ max}}$	$\hat{y} = 10,830727 - 0,019007 x$
	SM	$\sigma_{a \text{ min}}$	$\hat{y} = 11,996023 - 0,023057 x$
		$\sigma_{a \text{ śr}}$	
		$\sigma_{a \text{ max}}$	

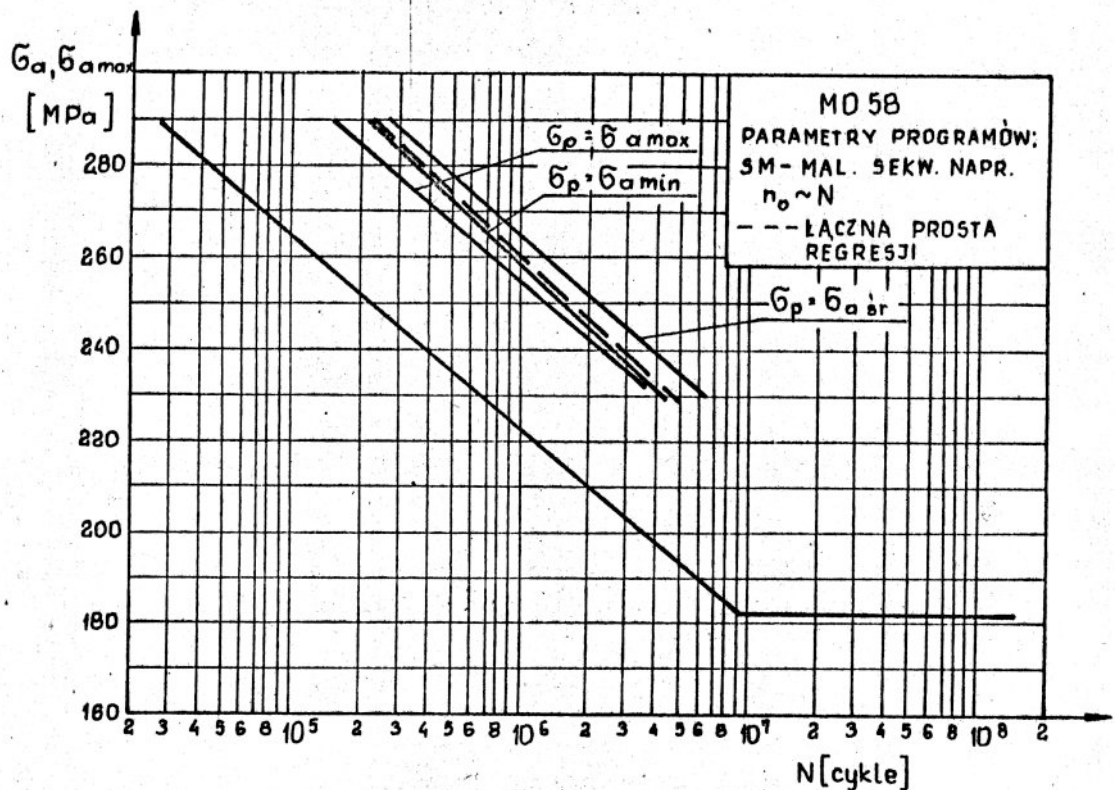
(*) Ponieważ wpływ naprężenia początkowego na zmianę współczynników regresji tych prostych okazał się istotny, równania ich pozostały bez zmian.

Przeprowadzona analiza wyników badań mosiądzu MO58 wykazała, że :

1. W przypadku programów o rosnącej sekwencji naprężeń (SR) różnica położenia krzywych trwałości zmęczeniowych, uzyskanych przy programach rozpoczynających się od naprężenia $\sigma_p = \sigma_{a \min}$ oraz $\sigma_p = \sigma_{a \text{ sr}}$, jest nieistotna (rys. 47, tab. 65, 66 w aneksie). Na rysunku 47 pokazano przebieg łącznej prostej regresji wyznaczonej dla połączonych - wobec powyższego wniosku - dwu grup wyników. Równanie prostej podano w tabeli 8. Z rysunku 47 widać również, że w zakresie niższych wartości $\sigma_{a \max}$ łączna prosta regresji jest wyraźnie przesunięta względem prostej wyznaczonej dla przebiegu, w którym $\sigma_p = \sigma_{a \max}$, w stronę większej liczby cykli. Żywotność zmęczeniowa wyznaczona przy programie, w którym naprężenie $\sigma_p = \sigma_{a \min}$ i $\sigma_{a \text{ sr}}$ jest istotnie większa od żywotności wyznaczonej przy programie, w którym $\sigma_p = \sigma_{a \max}$, tylko dla najniższej wartości naprężenia $\sigma_{a \max} = 240$ MPa. Różnica ta wynosi 235 %.
2. W przypadku programów o malejącej sekwencji naprężeń SM wpływ naprężenia początkowego na położenie krzywych trwałości zmęczeniowej jest nieistotny (rys. 48, tab. 67, 68 w aneksie). Równanie łącznej prostej regresji podano w tabeli 8, a jej przebieg pokazano na rysunku 48 linią przerywaną.



Rys. 47. Krzywe trwałości zmęczeniowej wyznaczone dla mosiądzu MO58 przy przebiegach o rosnącej sekwencji naprężeń i liczbie cykli w bloku $n_0 \sim N$



Rys. 48. Krzywe trwałości zmęczeniowej wyznaczone dla mosiądzu MO58 przy przebiegach o malejącej sekwencji naprężeń i liczbie cykli w bloku $n_0 \sim N$

5.3. Wpływ liczby cykli w bloku przebiegu naprężenia na żywotność zmęczeniową

Analizę wpływu liczby cykli w bloku programu na żywotność przeprowadzono w trzech grupach wyników dla duralu (poszczególne grupy wyników otrzymano przy programach SR, SMR, SM) oraz dwu grupach dla mosiądzu (programy SR, SM). W każdej z tych grup porównywano położenie dwu prostych regresji, z których jedna wyznaczone była z zastosowaniem programu naprężeń o stałej liczbie cykli w bloku programu n_0 (niezależnej od wartości naprężenia $\sigma_{a \max}$), natomiast druga - przy programie o zmiennej liczbie cykli n_0 , zależnej od wartości naprężenia $\sigma_{a \max}$ (rys. 49, 50). Wszystkie programy naprężeń, które zrealizowano w celu określenia wpływu liczby cykli n_0 na żywotność zmęczeniową, rozpoczynały się od pośredniego stopnia naprężenia $\sigma_p = \sigma_{a \text{ sr}}$.

W wyniku analizy przeprowadzonej dla duralu PA6N stwierdzono, że różnica między położeniami porównywanych prostych -

niezależnie od sekwencji naprężeń w programie, przy którym je wyznaczono - jest statystycznie nieistotna (tab. 69 w aneksie). Należy przy tym mieć na uwadze, że jedna z prostych w każdej z par była wyznaczona przy programie, w którym liczba cykli w bloku $n_0 = 4,2 \cdot 10^5$ cykli dla każdej wartości naprężenia $\sigma_{a \max}$. Drugą prostą natomiast wyznaczono przy programie, w którym liczba cykli w bloku $n_0 = 4,2 \cdot 10^5$; $6,0 \cdot 10^5$; $1,2 \cdot 10^6$ cykli dla naprężenia o wartościach odpowiednio: $\sigma_{a \max} = 260, 240, 220$ MPa. Wynika stąd wniosek, że zwiększenie liczby cykli w bloku programu 1,4 oraz 2,9 razy nie powoduje istotnych zmian żywotności zmęczeniowej duralu. (*) Wobec tego dla każdej pary porównywanych prostych wyznaczono łączne proste regresji, których równania podano w tabeli 9.

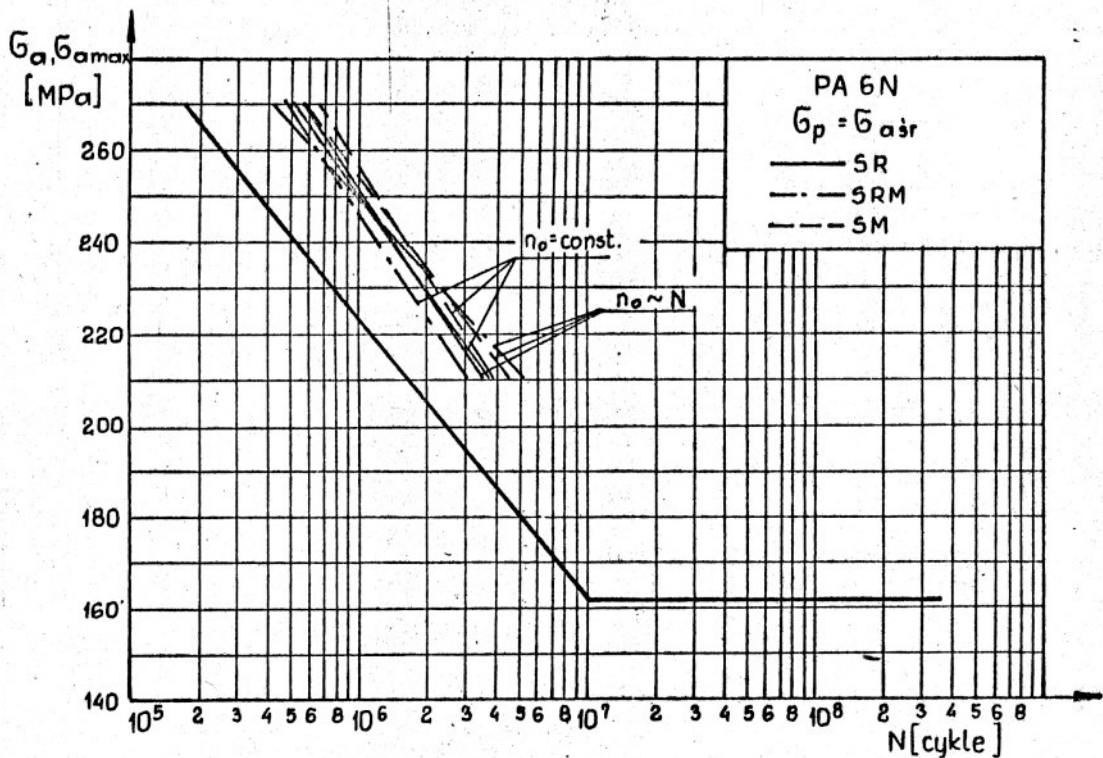
Analiza statystyczna wyników badań otrzymanych dla mosiądzu wykazała, że różnica między położeniami prostych wyznaczonych przy $n_0 = \text{const}$ i $n_0 \sim N$ jest istotna (tab. 70, 71 w aneksie).

Dotyczy to obydwu par prostych wyznaczonych przy programach o rosnącej (SR) i malejącej (SM) sekwencji naprężeń (rys. 50).

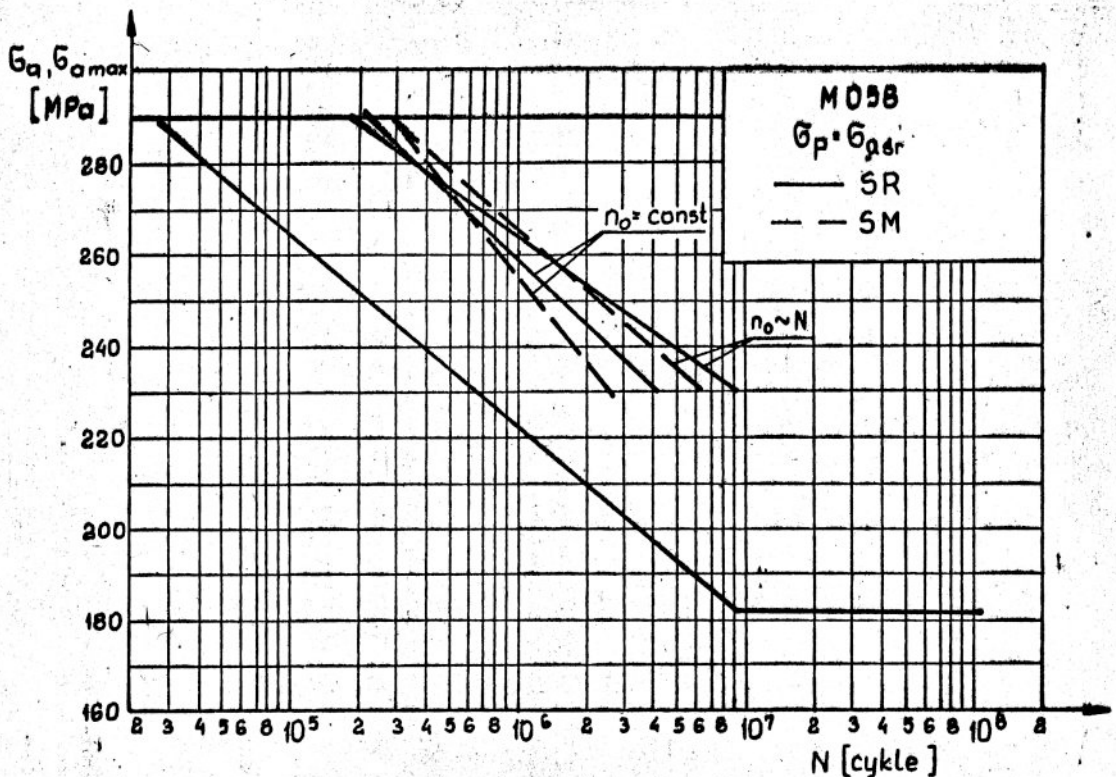
Mając na uwadze fakt, że w każdej parze jedną z prostych otrzymano przy programie, w którym $n_0 = \text{const} = 1,2 \cdot 10^5$ cykli, natomiast drugą przy $n_0 = 1,2 \cdot 10^5$; $3,6 \cdot 10^5$; $9,6 \cdot 10^5$ cykli odpowiednio dla naprężenia $\sigma_{a \max} = 280, 260, 240$ MPa, należy stwierdzić, że :

- w przypadku programu o rosnącej sekwencji naprężeń trzykrotne zwiększenie liczby cykli w bloku n_0 powoduje wzrost żywotności mosiądzu o 37 %, natomiast zwiększenie liczby cykli 8 razy - o 113 %,
- w przypadku programu o malejącej sekwencji naprężeń 3-krotne zwiększenie liczby cykli w bloku n_0 powoduje wzrost żywotności o 53 %, natomiast zwiększenie liczby cykli 8 razy - o 111 %.

(*) Fakt, że 1,4- oraz 2,9-krotne zwiększenie liczby cykli n_0 odpowiada różnym zakresom naprężeń w programie nie ma wpływu na uzyskany wniosek. Świadczą o tym wyniki uzyskane przez Szalę i Zawisłęka [17].



Rys. 49. Krzywe trwałości zmęczeniowej wyznaczone dla duralu PA 6N przy przebiegach o sekwencji naprężeń SR, SRM, SM oraz liczbie cykli w bloku : $n_0 = \text{const} = 4,2 \cdot 10^5$ cykli i $n_0 = 4,2 \cdot 10^5$; $6,0 \cdot 10^5$; $1,2 \cdot 10^6$ cykli, odpowiednio dla $G_{a \max} = 260$; 240 ; 220 MPa ($n_0 \sim N$)



Rys. 50. Krzywe trwałości zmęczeniowej wyznaczone dla mosiądzu MO58 przy przebiegach o sekwencji naprężeń SR i SM oraz liczbie cykli w bloku : $n_0 = \text{const} = 1,2 \cdot 10^5$ cykli i $n_0 = 1,2 \cdot 10^5$; $3,6 \cdot 10^5$; $9,6 \cdot 10^5$ cykli, odpowiednio dla $G_{a \max} = 280$; 260 ; 240 MPa ($n_0 \sim N$)

Tabela 9

Równania łącznych prostych regresji, wyznaczone dla grup wyników otrzymanych przy programach o różnej liczbie cykli w bloku oraz $\delta_p = \delta_a$ sr

MATERIAŁ	SEKWENCJA NAPRĘŻEN	LICZBA CYKLI W BLOKU n_0	RÓWNANIE PROSTEJ REGRESJI
PA6N	SR	$n_0 = \text{const}$	$\hat{y} = 9,483279 - 0,013817 x$
		$n_0 \sim N$	
	SRM	$n_0 = \text{const}$	$\hat{y} = 9,760892 - 0,015148 x$
		$n_0 \sim N$	
	SM	$n_0 = \text{const}$	$\hat{y} = 9,512798 - 0,013780 x$
		$n_0 \sim N$	
MO58	SR	$n_0 = \text{const}$	$\hat{y} = 11,307970 - 0,020468 x^{(*)}$
		$n_0 \sim N$	$\hat{y} = 13,240792 - 0,027373 x^{(*)}$
	SM	$n_0 = \text{const}$	$\hat{y} = 10,236834 - 0,016523 x^{(*)}$
		$n_0 \sim N$	$\hat{y} = 12,258552 - 0,023592 x^{(*)}$

(*) Ponieważ położenie prostych regresji wyznaczonych dla $n_0 = \text{const}$ oraz $n_0 \sim N$ różniło się istotnie, równania ich pozostały bez zmian.

6. Wnioski

Z przeprowadzonych badań wynikają następujące wnioski :

1. Parametry programowanego przebiegu naprężenia, takie jak : sekwencja naprężeń, liczba cykli w bloku i pierwszy stopień naprężenia, wywierają istotny wpływ na żywotność zmęczeniową materiałów. Wpływ każdego z tych parametrów na żywotność jest uzależniony od doboru wartości pozostałych parametrów, a także od zakresu wartości naprężeń występujących w przebiegu i rodzaju materiałów.
2. Stosowanie w badaniach trzystopniowych przebiegów naprężenia o wartościach naprężeń stopniowo rosnących, rosnąco-malejących lub malejących nie wywiera istotnego wpływu na żywotność zmęczeniową duralu PA6N w całym, przyjętym w badaniach zakresie naprężeń maksymalnych w przebiegu ($\sigma_{a \max} = 1,36 - 1,6 Z_{go}$). Wpływ sekwencji naprężeń jest nieistotny niezależnie od tego, który z trzech stopni naprężenia ($\sigma_{a \max}$, $\sigma_{a \text{śr}}$, $\sigma_{a \min}$) rozpoczyna przebieg oraz niezależnie od przyjętej liczby cykli w bloku.
3. Stosowanie w badaniach przebiegów o wartościach naprężeń stopniowo rosnących lub malejących ma istotny wpływ na żywotność zmęczeniową mosiądzu MO58 w przypadku, gdy przebieg rozpoczyna najniższy stopień naprężenia ($\sigma_{a \min}$) a przyjęta, odpowiednio duża liczba cykli w bloku zapewni małą liczbę jego powtórzeń do złomu (średnio 3 razy). Żywotność zmęczeniowa mosiądzu wyznaczona przy przebiegu naprężeń o sekwencji rosnącej jest wówczas większa o 50 % od żywotności wyznaczonej przy sekwencji malejącej w całym, przyjętym w badaniach zakresie naprężeń maksymalnych w przebiegu ($\sigma_{a \max} = 1,31 - 1,53 Z_{go}$). Sekwencja naprężeń w przebiegach rozpoczynających się od pośredniego ($\sigma_{a \text{śr}}$) i najwyższego ($\sigma_{a \max}$) stopnia naprężenia nie wywiera istotnego wpływu na żywotność mosiądzu, niezależnie od liczby cykli w bloku i wartości naprężenia maksymalnego w przebiegu.
4. Rozpoczynanie realizacji przebiegu od różnych stopni naprężenia może powodować istotne zmiany żywotności zmęczeniowej duralu PA6N. Wartość i charakter tych zmian zależą od

sekwencji naprężeń w przebiegu. Żywotność przy przebiegach o sekwencji rosnącej, rozpoczynających się od najniższego stopnia naprężenia ($\sigma_{a \min}$), jest o 51 % większa od żywotności przy przebiegach o naprężeniu początkowym równym naprężeniu $\sigma_{a \text{ sr}}$ i $\sigma_{a \max}$, w całym przyjętym w badaniach zakresie wartości naprężenia maksymalnego w przebiegu,

W przypadku przebiegów o malejącej sekwencji naprężeń rozpoczynanie realizacji przebiegu od różnych stopni naprężenie powoduje istotne zmiany żywotności duralu, zależne od wartości naprężenia $\sigma_{a \max}$. Dla najniższej wartości naprężenia $\sigma_{a \max} = 1,36 Z_{go}$ żywotność, przy przebiegu rozpoczynającym się od najniższego stopnia naprężenia $\sigma_{a \min}$, jest maksymalnie o 128 % większa od żywotności wyznaczonej przy przebiegu, który rozpoczyna naprężenie $\sigma_{a \max}$. W przypadku przebiegów o rosnąco-malejącej sekwencji naprężeń wpływ pierwszego stopnia naprężenia w przebiegu na żywotność duralu jest nieistotny.

5. Zależność żywotności zmęczeniowej mosiądzu MO58 od wartości naprężenia rozpoczynającego przebieg istnieje tylko w przypadku realizacji przebiegów o rosnącej sekwencji naprężeń. Wpływ naprężenia początkowego jest tym większy, im niższa jest wartość maksymalnego naprężenia w przebiegu. Żywotność przy przebiegach, w których naprężenie początkowe $\sigma_p = \sigma_{a \min}$, $\sigma_{a \text{ sr}}$ jest maksymalnie o 235 % większa od żywotności przy przebiegach, w których $\sigma_p = \sigma_{a \max}$ (dla $\sigma_{a \max} = 1,31 Z_{go}$). Rozpoczynanie przebiegu od różnych stopni naprężenia nie powoduje istotnych zmian żywotności zmęczeniowej mosiądzu w przypadku przebiegów o malejącej sekwencji naprężeń.
6. Położenie krzywych trwałości zmęczeniowej duralu PA6N wyznaczonych przy przebiegach naprężenia, w których liczba cykli w bloku jest stała, niezależnie od wartości naprężenia $\sigma_{a \max}$, nie różni się istotnie od położenia krzywych, wyznaczonych przy przebiegach, w których liczba cykli w bloku zapewnia zbliżoną liczbę jego powtórzeń do złomu dla każdej wartości naprężenia $\sigma_{a \max}$. Wpływ liczby cykli w bloku na żywotność duralu jest nieistotny niezależnie od sekwencji naprężeń w przebiegu.

7. Sposób przyjęcia liczby cykli w bloku przebiegu ($n_0 = \text{const}$ lub $n_0 \sim N$) ma istotny wpływ na położenie krzywych trwałości mosiadzu MO58. W przypadku przebiegów zarówno o rosnącej, jak i malejącej sekwencji naprężeń, 8-krotny wzrost liczby cykli w bloku powoduje wzrost żywotności mosiadzu o 112%. Oznacza to, że w zakresie małej liczby bloków realizowanych do złomu żywotność zmęczeniowa mosiadzu wzrasta.

IV. WERYFIKACJA WYBRANYCH HIPOTEZ KUMULACJI USZKODZEN ZMĘCZENIOWYCH

Weryfikację wybranych hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczenia przeprowadzono wyznaczając właściwe wartości współczynników charakterystycznych dla poszczególnych hipotez, tzn. takie wartości współczynników, dla których $N_{hip} = N_{eksp}$. Obliczenie rzeczywistych wartości współczynników i porównanie ich z zakładanymi przez hipotezę ma następujące zalety :

- prowadzi do zwiększenia zbioru danych ułatwiających dobór doświadczalnych współczynników do obliczeń konstrukcyjnych (dotyczy to szczególnie hipotez Cortena-Dolana i Serensena-Kogajewa),
- umożliwia korektę obliczeń trwałości zmęczeniowej, zwłaszcza dla tych przypadków obciążeń i materiałów, dla których hipoteza (np. Palmgren-Minera) przewiduje trwałość mniejszą od rzeczywistej.

Za podstawę obliczeń wartości współczynników charakterystycznych dla poszczególnych hipotez przyjęto następujące zależności :

- $X = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i}$, hipoteza Palmgren-Minera,
- $\sum_{i=1}^m n_i \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{amax}} \right)^d = \frac{N(\sigma_{amax}) \cdot n_0}{N_{eksp}}$, hipoteza Cortena-Dolana, (*)
- $a = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i}$, hipoteza Serensena-Kogajewa,
- $r = \sum_{i=1}^m \frac{n_i - n_{wi}}{N_i - N_{wi}}$, hipoteza Zakrzewskiego.

(*) Ze względu na stopień uwikłanie równania, wykładnik potęgowy 'd' obliczono metodą kolejnych przybliżeń.

Zależności te wynikają z wcześniej już podanych wzorów (2), (4), (6) i (8). Liczbę cykli N_1 konieczną do złomu próbki oraz N_{eksp} obliczono z równań prostych regresji wyznaczonych przy przebiegach odpowiednio o stałej i programowanej amplitudzie naprężenia.

W celu oceny dokładności poszczególnych hipotez, dla rzeczywistych współczynników o wartościach minimalnie i maksymalnie odbiegających od teoretycznych lub zalecanych, obliczono względne różnice ($\Delta N/N_{\text{eksp}}$) odpowiadających im żywotności przewidywanej (N_{hip}) i rzeczywistej (N_{eksp}). Wyniki obliczeń omówiono poniżej, kolejno dla każdej hipotezy.

Hipoteza Palmgrena-Minera

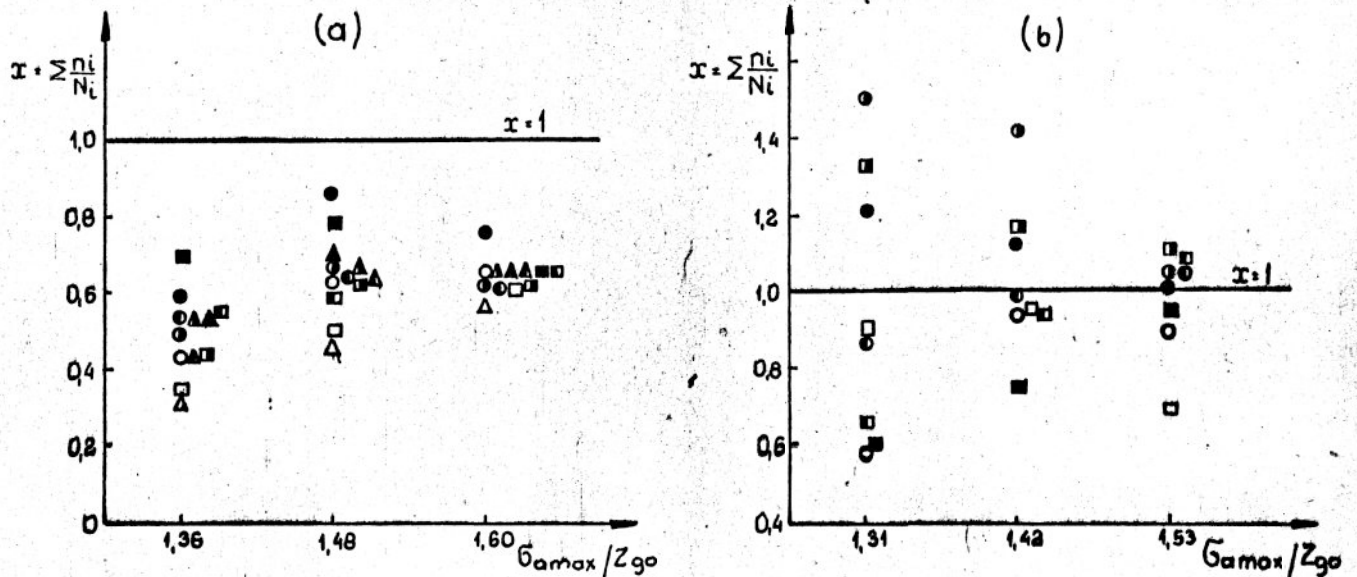
Rzeczywiste wartości współczynników "x", obliczone dla obydwu badanych materiałów podano w tabelach 10 - 12. Ich graficzną ilustracją jest rysunek 51. Widoczne jest na rysunku, że w przypadku duralu właściwe wartości współczynnika "x" dla wszystkich zrealizowanych programów naprężeń są mniejsze od teoretycznej wartości $x = 1$ (rys. 51 a). Ponadto są one tym niższe, im niższa jest wartość naprężenia maksymalnego w programie

$\sigma_{a \text{ max}}$. Wyznaczone wartości współczynnika "x" mieszczą się w zakresie $x = 0,31 - 0,86$. Oznacza to, że obliczenie trwałości zmęczeniowej N_{PM} według hipotezy Palmgrena-Minera w jej pierwotnej postaci ($\sum n/N = 1$) daje w tym przypadku zawsze większą wartość, niż to wynika z pomiarów. Różnica wynosi :

$$\Delta N/N_{\text{eksp}} = (178 - 12) \%.$$

Dla mosiądzu rzeczywiste wartości współczynnika "x" układają się zarówno powyżej, jak i poniżej prostej $x = 1$ (rys. 51 b). Rozrzut wyników jest znacznie większy, niż dla duralu, zwłaszcza dla niższych wartości naprężenia $\sigma_{a \text{ max}}$. Ma to związek z zaobserwowanym w przypadku tego materiału istotnym wpływem niektórych parametrów przebiegu naprężenia na żywotność. Uzyskane wartości dla mosiądzu mieszczą się w granicach $x = 0,58 - 1,51$. Wynika stąd, że żywotność obliczeniowa jest większa lub mniejsza od eksperymentalnej, w zależności od programu naprężenia.

W przypadku przebiegów SR i SM ($n_0 \sim N$) rozpoczynających się od pośredniego stopnia naprężenia ($\sigma_p = \sigma_{a \text{ sr}}$), przebiegów SR ($n_0 \sim N$) rozpoczynających się od najniższego stopnia naprężenia ($\sigma_p = \sigma_{a \text{ min}}$) oraz przebiegów SR i SM ($n_0 = \text{const}$, $\sigma_p = \sigma_{a \text{ sr}}$, ale tylko dla najwyższych wartości naprężenia $\sigma_{a \text{ max}} = 1,53 Z_{go}$) żywotność wyznaczona eksperymentalnie jest większa od przewidywanej według hipotezy Palmgren-Minera (rys. 51 b). Względna różnica tych żywotności zmienia się w zakresie $\Delta N/N_{\text{eksp}} = (2 - 34) \%$. W przypadku pozostałych zrealizowanych przebiegów naprężeń żywotność doświadczalna jest mniejsza od obliczeniowej: $\Delta N/N_{\text{eksp}} = (57 - 2) \%$.

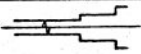
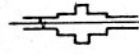
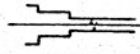


NAPRĘŻENIE POCZĄTKOWE σ_p	LICZBA CYKŁÓW W BŁOKU n_0	SEKWENCJA NAPRĘŻEŃ		
		SR	SRM	SM
$\sigma_{a \text{ max}}$	$n_0 \sim N$	○	△	□
$\sigma_{a \text{ sr}}$	$n_0 \sim N$	●	▲	■
	$n_0 = \text{const}$	○	△	□
$\sigma_{a \text{ min}}$	$n_0 \sim N$	●	▲	■

Rys. 51. Porównanie teoretycznej i wyznaczonych doświadczalnie wartości współczynnika 'x' w hipotezie Palmgren-Minera dla : a) duralu PA6N; b) mosiądzu MO58.

Tabela 10

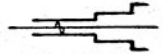
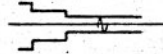
Porównanie teoretycznych i wyznaczonych doświadczalnie wartości współczynników
w hipotezach kumulacji uszkodzeń dla dursłu PA6N w przypadku programów naprężeń,
w których $n_0 \sim N$

MATERIAŁ	NAPRĘŻENIE POCZĄTKOWE σ_p	POZIOM NAPRĘŻENIA σ_{amax} [MPa]																								
			PALMGREN - MINER		CORTEN - DOLAN		SERENSEN - KOGAJEW		ZAKRZEWSKI		PALMGREN - MINER		CORTEN - DOLAN		SERENSEN - KOGAJEW		ZAKRZEWSKI		PALMGREN - MINER		CORTEN - DOLAN		SERENSEN - KOGAJEW		ZAKRZEWSKI	
			$x = \sum \frac{n_i}{N_i}$		$k = \frac{d}{m}$		$a = \sum \frac{n_i}{N_i}$		$r = \sum \frac{n_i - n_{wi}}{N_i - N_{wi}}$		$x = \sum \frac{n_i}{N_i}$		$k = \frac{d}{m}$		$a = \sum \frac{n_i}{N_i}$		$r = \sum \frac{n_i - n_{wi}}{N_i - N_{wi}}$		$x = \sum \frac{n_i}{N_i}$		$k = \frac{d}{m}$		$a = \sum \frac{n_i}{N_i}$		$r = \sum \frac{n_i - n_{wi}}{N_i - N_{wi}}$	
			TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.
PA6N	σ_{amax}	260	1	0,65	0,7 - 1,0	0,67	0,66	0,65	1	0,42	1	0,57	0,7 - 1,0	0,45	0,66	0,57	1	0,34	1	0,61	0,7 - 1,0	0,59	0,66	0,61	1	0,40
		240		0,63		0,61	0,65	0,63		0,23		0,46		0,40	0,65	0,46		0,14		0,50		0,46	0,65	0,50		0,28
		220		0,43		0,54	0,62	0,43		0,19		0,31		0,35	0,62	0,31		0,10		0,35		0,33	0,62	0,35		0,10
	$\sigma_{a\bar{a}r}$	260	1	0,62	0,7 - 1,0	0,62	0,66	0,62	1	0,40	1	0,66	0,7 - 1,0	0,50	0,66	0,66	1	0,40	1	0,62	0,7 - 1,0	0,66	0,66	0,62	1	0,38
		240		0,66		0,56	0,65	0,66		0,36		0,66		0,56	0,65	0,66		0,36		0,62		0,63	0,65	0,62		0,28
		220		0,50		0,37	0,62	0,50		0,17		0,53		0,61	0,62	0,53		0,19		0,44		0,59	0,62	0,44		0,11
	$\sigma_{a\min}$	260	1	0,76	0,7 - 1,0	0,94	0,66	0,76	1	0,45	1	0,66	0,7 - 1,0	0,57	0,66	0,66	1	0,40	1	0,66	0,7 - 1,0	0,75	0,66	0,66	1	0,40
		240		0,86		0,92	0,65	0,86		0,43		0,70		0,63	0,65	0,70		0,36		0,79		0,84	0,65	0,79		0,36
		220		0,69		0,89	0,62	0,59		0,28		0,53		0,66	0,62	0,53		0,20		0,70		0,93	0,62	0,70		0,41

(*) Wartość współczynnika $Q_{teoret.}$ obliczono na podstawie zależności (7) przyjmując
 $c = 0,6$ (zgodnie z pracą [54]).

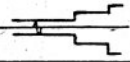
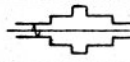
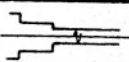
Tabela 11

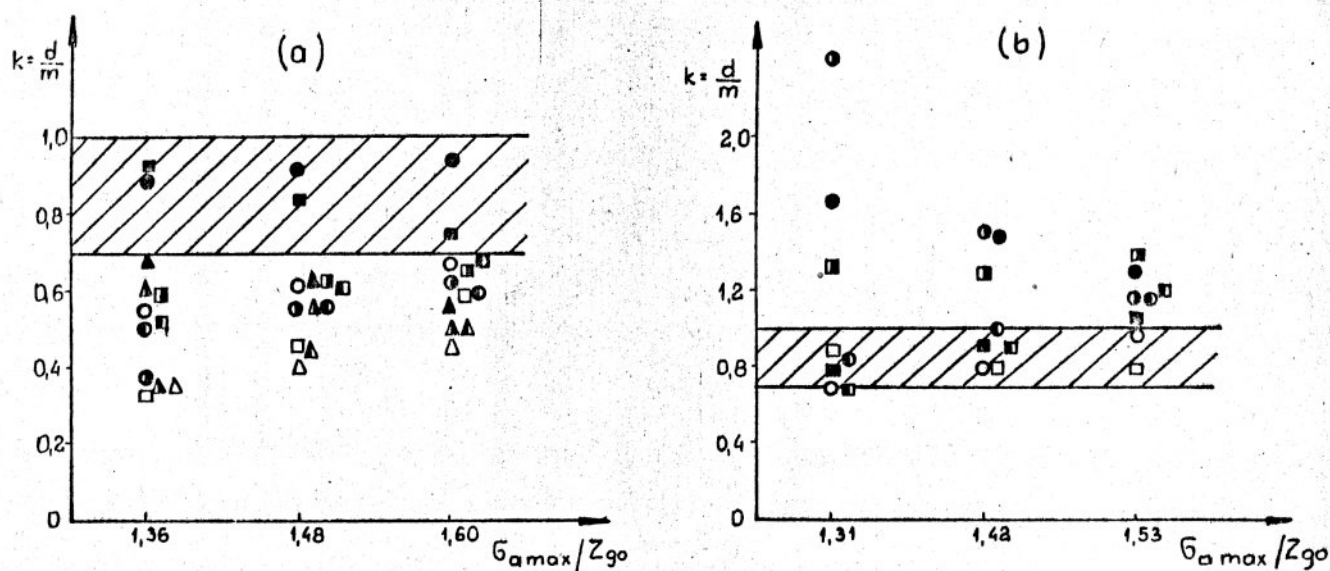
Porównanie teoretycznych i doświadczalnych wartości współczynników w hipotezach kumulacji uszkodzeń dla mosiadzu MO56 w przypadku programów naprężeń, w których $n_0 \sim N$

MATERIAŁ	NAPRĘŻENIE POCZĄTKOWE σ_p	POZIOM NAPRĘŻENIA σ_{amax} [MPa]																
			PALMGREN - MINER		CORTEN - DOLAN		SERENSEN - KOGAJEW		ZAKRZEWSKI		PALMGREN - MINER		CORTEN - DOLAN		SERENSEN - KOGAJEW		ZAKRZEWSKI	
			$x = \sum \frac{n_i}{N_i}$		$k = \frac{d}{m}$		$a = \sum \frac{n_i}{N_i}$		$r = \sum \frac{n_i - n_{wi}}{N_i - N_{wi}}$		$x = \sum \frac{n_i}{N_i}$		$k = \frac{d}{m}$		$a = \sum \frac{n_i}{N_i}$		$r = \sum \frac{n_i - n_{wi}}{N_i - N_{wi}}$	
			TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.
MO58	σ_{amax}	280	1	0,90	0,7 - 1,0	0,98	0,65	0,90	1	0,90	1	0,69	0,7 - 1,0	0,80	0,65	0,69	1	0,69
		260		0,94		0,80	0,64	0,94		0,94		0,95		0,79	0,64	0,95		0,95
		240		0,58		0,67	0,61	0,58		0,58		0,90		0,86	0,61	0,90		0,90
	$\sigma_{a \pm r}$	280	1	1,05	0,7 - 1,0	1,16	0,65	1,05	1	1,05	1	1,11	0,7 - 1,0	1,40	0,65	1,11	1	1,11
		260		1,42		1,50	0,64	1,42		1,42		1,17		1,50	0,64	1,17		1,17
		240		1,51		2,43	0,61	1,51		1,51		1,33		1,54	0,61	1,33		1,33
	σ_{amin}	280	1	1,02	0,7 - 1,0	1,30	0,65	1,02	1	1,02	1	0,95	0,7 - 1,0	1,06	0,65	0,95	1	0,95
		260		1,13		1,48	0,64	1,13		1,13		0,75		0,90	0,64	0,75		0,75
		240		1,21		1,67	0,61	1,21		1,21		0,60		0,79	0,61	0,60		0,60

Porównanie teoretycznych i doświadczalnych wartości współczynników
w hipotezach kumulacji uszkodzeń dla duralu PA6N i mosiądzu MO58 w przypadku
programów naprężeń, w których $n_0 = \text{const}$

Tabela 12

MATERIAŁ	NAPRĘŻENIE POCZĄTKOWE σ_p	POZIOM NAPRĘŻENIA σ_{amax} [MPa]																								
			PALMGREN - MINER		CORTEN - DOLAN		SERENSEN - KOGAJEW		ZAKRZEWSKI		PALMGREN - MINER		CORTEN - DOLAN		SERENSEN - KOGAJEW		ZAKRZEWSKI		PALMGREN - MINER		CORTEN - DOLAN		SERENSEN - KOGAJEW		ZAKRZEWSKI	
			$x = \sum \frac{n_i}{N_i}$		$k = \frac{d}{m}$		$a = \sum \frac{n_i}{N_i}$		$r = \sum \frac{n_i - n_{wi}}{N_i - N_{wi}}$		$x = \sum \frac{n_i}{N_i}$		$k = \frac{d}{m}$		$a = \sum \frac{n_i}{N_i}$		$r = \sum \frac{n_i - n_{wi}}{N_i - N_{wi}}$		$x = \sum \frac{n_i}{N_i}$		$k = \frac{d}{m}$		$a = \sum \frac{n_i}{N_i}$		$r = \sum \frac{n_i - n_{wi}}{N_i - N_{wi}}$	
			TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.	TEORET.	DOŚWIADCZ.
PA6N	$\sigma_{a \text{ dr}}$	260	1	0,61	0,7 - 1,0	0,59	0,66	0,61	1	0,40	1	0,66	0,7 - 1,0	0,50	0,66	0,66	1	0,40	1	0,66	0,7 - 1,0	0,68	0,66	0,66	1	0,43
		240		0,64		0,56	0,65	0,64		0,33		0,64		0,44	0,65	0,64		0,20		0,59		0,61	0,65	0,59		0,26
		220		0,54		0,51	0,62	0,54		0,14		0,43		0,35	0,62	0,43		0,07		0,55		0,52	0,62	0,55		0,11
MO58	$\sigma_{a \text{ dr}}$	280	1	1,05	0,7 - 1,0	1,16	0,65	1,05	1	1,05	1	-	0,7 - 1,0	-	-	-	1	-	1	1,09	0,7 - 1,0	1,20	0,65	1,09	1	1,09
		260		0,99		1,00	0,64	0,99		0,39		-		-	-	-		-		0,94		0,89	0,64	0,94		0,94
		240		0,87		0,85	0,61	0,87		0,87		-		-	-	-		-		0,66		0,67	0,61	0,66		0,66



Rys. 52. Porównanie teoretycznych i wyznaczonych doświadczalnie wartości współczynnika "k" w hipotezie Cortena-Dolana dla : a) duralu PA6N; b) mosiądzu MO58 (oznaczenia punktów jak na rys. 51)

Hipoteza Cortena-Dolana

Rzeczywiste wartości współczynnika redukcji "k" obliczono z zależności :

$$k = -\frac{d}{m} ,$$

w której wykładnik potęgowy wtórnej krzywej zmęzeniowej "d" wyznaczono z zależności (4) . Wykładnik potęgowy krzywej Wöhlera "m" natomiast określono, wyznaczając równanie krzywej w układzie dwulogarytmicznym :

- dla duralu PA6N : $\log N = 24,522561 - 7,887037 \cdot \log \bar{\sigma}$,
- dla mosiądzu MO58: $\log N = 34,868188 - 12,308925 \cdot \log \bar{\sigma}$.

Do obliczeń przyjęto odpowiednio $m = 7,9$ oraz $m = 12,3$. Wyznaczone w ten sposób rzeczywiste wartości współczynnika "k" podano w tabelach 10 - 12. Rozkład tych wartości względem zakresu zalecanego do stosowania (podanego w pracy [52] pokazano na rysunku 52 (obszar zakreskowany) .

Na podstawie rysunku 52a można stwierdzić, że dla duralu tylko w 6 spośród 33 przypadków zrealizowanych przebiegów

naprężenia doświadczalna wartość współczynnika "k" mieści się w zakresie $k = 0,7 - 1,0$. W pozostałych przypadkach doświadczalne wartości "k" są niższe od zalecanych i zmieniają się w granicach $k = 0,33 - 0,68$. Przy przyjęciu współczynnika $k = 0,7$ dla programów SR i SM ($n_0 \sim N$, $\sigma_p = \sigma_{a \min}$) obliczona według hipotezy Cortena-Dolana żywotność duralu jest mniejsza od wyznaczonej doświadczalnie ($\Delta N/N_{\text{eksp}} = 6\% - 24\%$). Dla pozostałych przebiegów naprężeń żywotność obliczeniowa znajduje się po stronie niebezpiecznej^(*) ($\Delta N/N_{\text{eksp}} = 72\% - 2\%$).

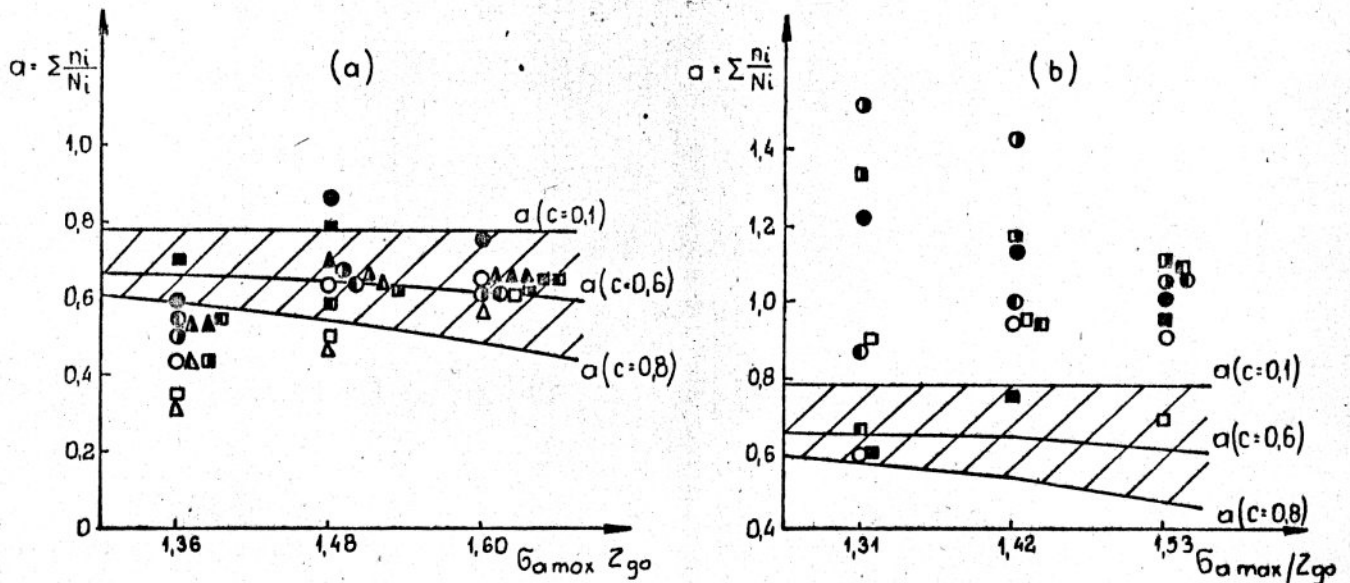
W przypadku mosiądzu przyjęcie do obliczeń współczynnika $k = 0,7$ daje dla wszystkich zrealizowanych programów naprężeń bezpieczne oszacowanie żywotności (rys. 52 b). Rzeczywiste wartości współczynnika "k" mieszczą się w granicach $k = 0,67 - 2,43$. Względne różnice żywotności eksperymentalnej i obliczonej według hipotezy, przy przyjęciu $k = 0,7$, zawarte są w zakresie $\Delta N/N_{\text{eksp}} = (-0,6 - 58)\%$.

Hipoteza Serensena-Kogajewa

Doświadczalne wartości współczynnika "a", charakterystycznego dla hipotezy Serensena-Kogajewa, są identyczne z wartościami współczynnika "x" Palmgrena-Minera. W tabelach 10 - 12 obok wyznaczonych doświadczalnie wartości "a" podano również teoretyczne, obliczone z zależności (7), dla przyjętego (zgodnie z sugestiami autorów hipotezy [54]) współczynnika $c = 0,6$. Ponieważ wartości rzeczywiste różnią się od przyjmowanych do obliczeń, na rysunkach 53 a, b pokazano, oprócz prostej $a = \{(\sigma_{a \max})\}_{c=0,6}$, obszar zmienności "a" dla $c = 0,8 - 0,1$ ^(**) (zakreskowane pole) w celu dokładniejszego zweryfikowania hipotezy.

(*) Żywotność obliczona według hipotezy jest większa od żywotności wyznaczonej doświadczalnie.

(**) Jest to najszerszy, ustalony w badaniach, przedział zmienności współczynnika "c" (rozdz. I, p. 1.2).



NAPRĘŻENIE POZATKOWE σ_p	LICZBA CYCŁÓW W BŁOKU n_0	SEKWENCJA NAPRĘŻEN		
		SR	SRM	SM
$\sigma_{a \max}$	$n_0 \sim N$	○	△	□
$\sigma_{a \text{śr.}}$	$n_0 \sim N$	●	▲	■
$\sigma_{a \text{śr.}}$	$n_0 \sim c \cdot \sigma_{a \max}$	○	△	□
$\sigma_{a \min}$	$n_0 \sim N$	●	▲	■

Rys. 53. Porównanie teoretycznych i wyznaczonych doświadczalnie wartości współczynnika "a" w hipotezie Serensena-Kogajewa dla : a) duralu PA6N; b) mosiądzu MO58

Na rysunku 53 a widać dokładnie, że w 23 przypadkach zrealizowanych dla duralu przebiegów naprężeń, doświadczalne wartości współczynnika "a" mieszczą się w zakreskowanym obszarze. Jednak w 12 przypadkach programowanych przebiegów naprężenia zastosowanie w obliczeniach hipotezy Serensena-Kogajewa prowadzi do niebezpiecznego oszacowania żywotności, niezależnie od przyjętej wartości współczynnika "c". Dużą zgodność doświadczalnych i teoretycznych (przy $c = 0,6$) wartości współczynnika "a" uzyskano dla przebiegów programów, w których $\sigma_{a \max} = 1,60 Z_{go}$, bardzo małą - dla $\sigma_{a \max} = 1,36 Z_{go}$. Względne wartości różnic żywotności eksperymentalnej i obliczonej dla przyjętego współczynnika

$c = 0,6$ mieszczą się w zakresie $\Delta N/N_{\text{eksp}} = (-69 - 24) \%$ ($a_{\text{rzecz}} = 0,31 - 0,86$).

W przypadku mosiądzu przewidywana według hipotezy Serensena-Kogajewa (przy $c = 0,6$) żywotność zmęczeniowa jest mniejsza od eksperymentalnej ($\Delta N/N_{\text{eksp}} = 3 \% - 59 \%$). Tylko w 6 przypadkach z 24 realizowanych wariantów programu naprężenia rzeczywiste wartości współczynnika "a" mieszczą się w zakresowanym na rysunku 53 b obszarze.

Hipoteza Zakrzewskiego

Weryfikacja hipotezy Zakrzewskiego polegała na ocenie:

- stopnia zgodności prawdopodobnego przebiegu krzywej uszkodzeń Frencha, zaproponowanego przez autora hipotezy, z przebiegiem doświadczalnym,
- przydatności zmodyfikowanej zasady liniowej kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych do przewidywania trwałości zmęczeniowej przy programowanych przebiegach naprężenia.

Wyznaczenie teoretycznej linii Frencha według równania (9) wymaga, w przypadku zastosowanego w badaniach własnych rodzaju obciążenia, znajomości umownej granicy plastyczności przy zginaniu $R_{g 0,2}$ obydwu badanych materiałów. Statyczną próbę zginania przeprowadzono według wskazówek podanych w pracy [60].

Zastosowano próbki pięciokrotne o średnicy $d_0 = 12 \text{ mm}$. Wyznaczone wartości granicy plastyczności przy zginaniu wynoszą:

- dla duralu $R_{g 0,2} = 282 \text{ MPa}$,
- dla mosiądzu $R_{g 0,2} = 221 \text{ MPa}$.

Przebieg teoretycznych krzywych uszkodzeń dla obydwu materiałów o równaniu:

$$\log n_w = \log N - \frac{6 - Z_{go}}{R_g - Z_{go}} N_R \quad (12)$$

pokazano na rysunkach 54, 55 (krzywe 2) razem z krzywymi wyznaczonymi doświadczalnie (krzywe 1).

Jak widać, w przypadku duralu prosta (2) leży poniżej prostej doświadczalnej. Oznacza to, że przyjęcie równania (12) do oszacowania przebiegu linii uszkodzeń daje wyniki leżące po stronie bezpiecznej. Należy dodać, że podobny rezultat uzyskuje się porównując równanie (12) z przebiegiem doświadczalnym

krzywych uszkodzeń, wyznaczonych przez Bucha [61] dla stali niskostopowej (0,18 % C) na próbkach z materiału rodzimego i spawanych. (*)

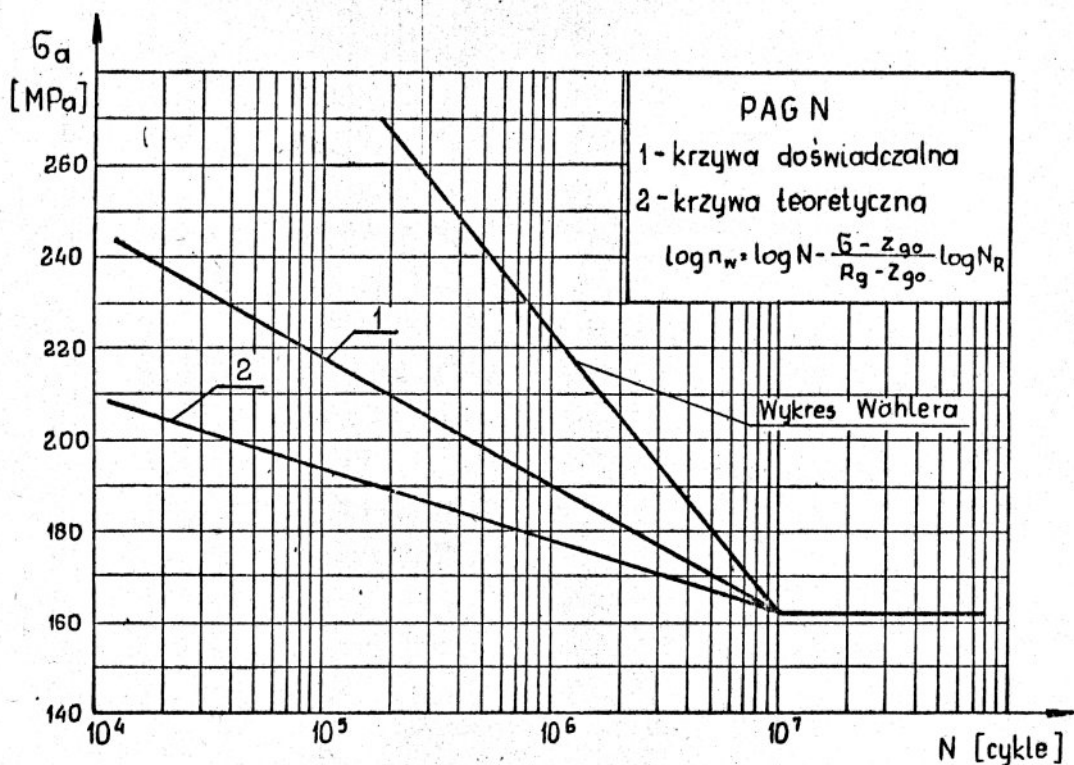
W przypadku mosiądzu natomiast, jak widać na rysunku 55, krzywa teoretyczna leży powyżej doświadczalnej. Różnica między położeniami tych krzywych jest mała, ale przy tak dużym nachyleniu prostych powoduje ona, że przewidywana liczba cykli n_{wi} jest znacznie większa od rzeczywistej. Należy jeszcze podkreślić, że doświadczalne krzywe Frencha zostały wyznaczone tylko fragmentarycznie, w zakresie dużych liczb cykli. Powyższa weryfikacja dotyczy więc tylko dolnego odcinka krzywych uszkodzeń.

Sprawdzenie przydatności zasady kumulacji wyrażonej równaniem (8) przeprowadzono podobnie, jak dla poprzednio omówionych hipotez. Obliczone wartości współczynnika $r = \sum(n_i - n_{wi}) / (N_i - N_{wi})$ podano w tabelach 10 - 12. Do obliczeń przyjęto liczby cykli n_{wi} odpowiadające doświadczalnie wyznaczonym krzywom Frencha, aby zwiększyć dokładność weryfikacji samej zasady kumulacji. Ponieważ krzywa uszkodzeń dla mosiądzu jest prawie pozioma (rys. 55), zasada kumulacji (8) pokrywa się w tym przypadku z zasadą Palmgren-Minera, czyli współczynnik $r = a$.

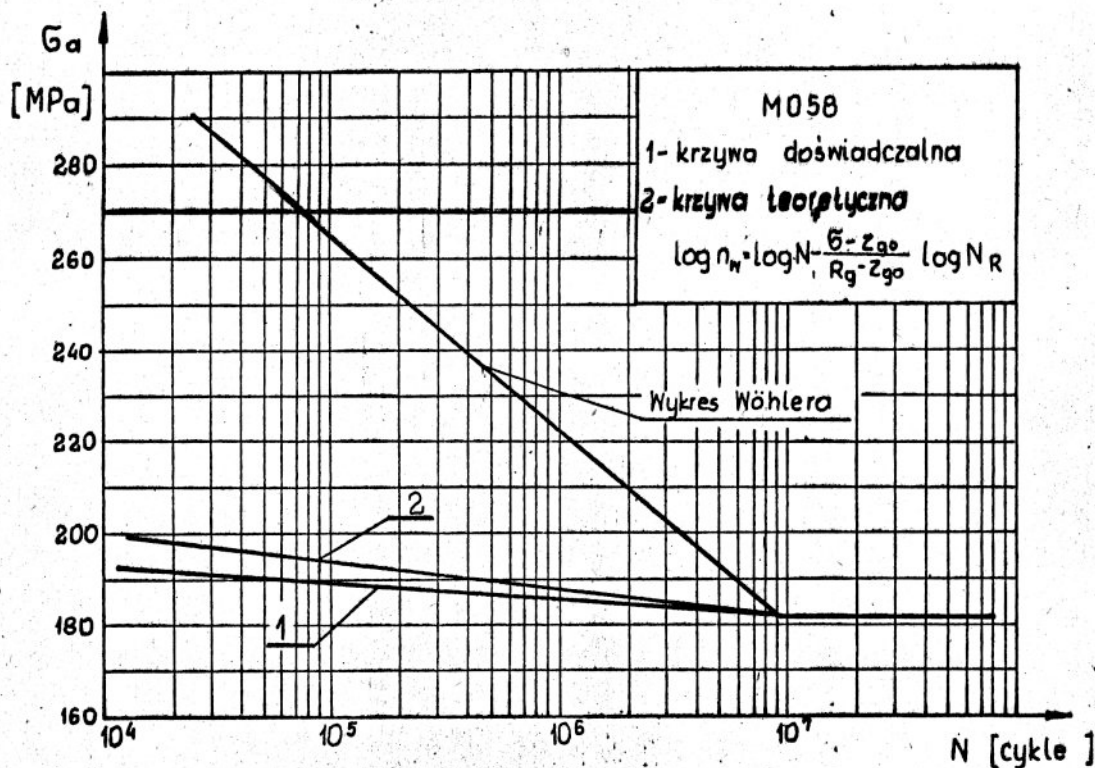
Wyniki obliczeń współczynnika "r" dla duralu wskazują (rys. 56), że jego rzeczywista wartość jest znacznie mniejsza od zakładanej jedności ($r = 0,07 - 0,45$).

Należy przy tym podkreślić, że wartości te są również niższe od wcześniej podanych wartości współczynnika "x" w hipotezie Palmgren-Minera ($a < 1$). Wynika stąd, że przyjęcie do obliczeń żywotności zmęczeniowej duralu hipotezy Zakrzewskiego prowadzi, w przypadku zrealizowanych programów naprężenia, do niebezpiecznego oszacowania żywotności ($\Delta N / N_{eksp} = 264 \% - 48 \%$).

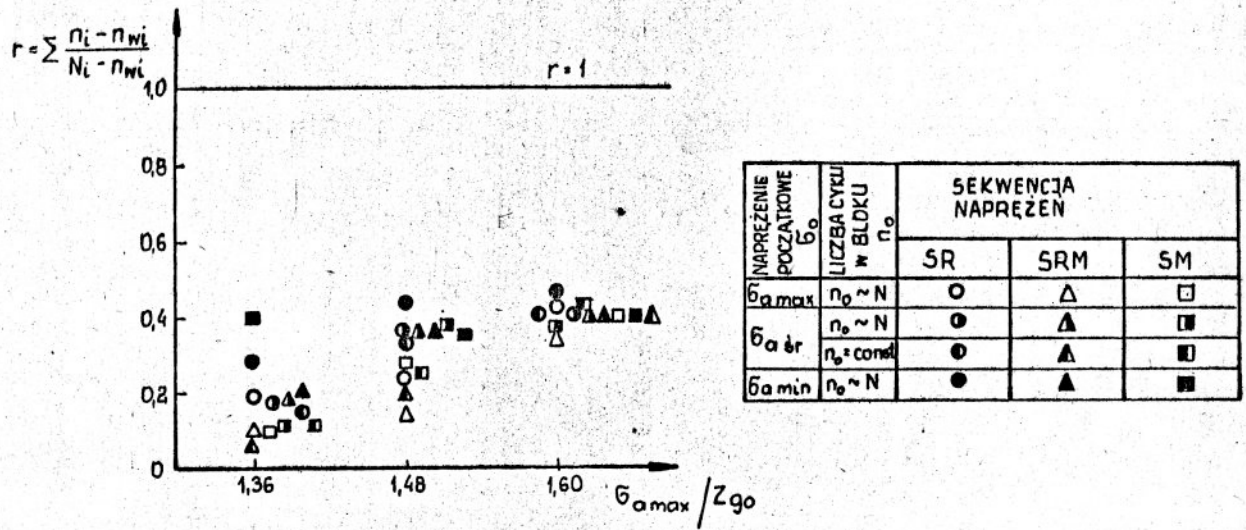
(*) Brakujące wartości granicy plastyczności przy zginaniu R_g obliczono z zależności $R_g = 1,2 R_e$ (zgodnie z [57])



Rys. 54. Wykres Wöhlera oraz krzywe uszkodzeń Frencha duralu PA6N : 1 - wyznaczona doświadczalnie; 2 - teoretyczna



Rys. 55. Wykres Wöhlera oraz krzywe uszkodzeń Frencha mosiądzu MO58 : 1 - wyznaczona doświadczalnie; 2 - teoretyczna



Rys. 56. Porównanie teoretycznych i wyznaczonych doświadczalnie wartości współczynnika "r" w hipotezie Zakrzewskiego dla duralu PA6N

V. DISKUSJA I INTERPRETACJA WYNIKÓW BADAŃ

1. Wpływ wybranych parametrów programu naprężenia na żywotność zmęczeniową stopów PA6N i MO58

Na podstawie przeprowadzonych badań programowanych i analizy statystycznej ich wyników stwierdzono, że sekwencje naprężeń w przebiegu może mieć różny wpływ na żywotność zmęczeniową badanych stopów. W przypadku duralu PA6N nie zaobserwowano wpływu sekwencji, niezależnie od liczby cykli w bloku i stopnia naprężenia rozpoczynającego przebieg, w całym zakresie zrealizowanych wartości naprężenia $\sigma_{a \max}$ (rys. 36 - 39). Żywotność mosiądzu natomiast okazała się być zależną od rodzaju sekwencji, ale tylko w przypadku przebiegów rozpoczynających się od najniższego stopnia naprężenia $\sigma_{a \min}$ i o dużej objętości bloku, dającej średnio trzykrotną powtarzalność bloku do złomu (rys. 40). Można więc powiedzieć, że obydwa badane materiały w tych samych warunkach obciążenia charakteryzują się różną wrażliwością na zmianę sekwencji naprężeń.

Miała wrażliwość duralu (mimo odpowiedniego doboru liczby cykli i stopni naprężenia w bloku programu, sprzyjających według danych literaturowych wystąpieniu wpływu sekwencji) nasuwa wniosek, że czynnikiem decydującym o pojawieniu się wpływu sekwencji jest nie tylko (jak sądzą autorzy pracy [32]) mała powtarzalność bloku przebiegu naprężenia do złomu, ale również rodzaj materiału. Podobny wniosek wynika również z badań, przedstawionych w pracy [19].

Fakt stwierdzenia wpływu sekwencji na żywotność mosiądzu tylko w przypadku przebiegów rozpoczynających się od najniższego stopnia naprężenia, świadczy o zależności tego wpływu od kolejnego czynnika - stopnia naprężenia rozpoczynającego przebieg. Można więc przypuszczać, że wyjaśnienia wpływu sekwencji na żywotność należy szukać, rozważając początkowy fragment przebiegu obciążenia. Znajomość oddziaływania pierwszych stopni naprężenia w programie na przebieg procesu zmęczenia powinna ułatwić - zdaniem autora - uzasadnienie różnorodności wyników uzyskanych w badaniach przy przebiegach o różnej kolejności występowanie poszczególnych stopni naprężeń.

W badaniach własnych wpływu stopnia naprężenia rozpoczynającego przebieg na żywotność stwierdzono zależność tego wpływu od rodzaju materiału i parametrów przebiegu naprężenia, takich jak : sekwencje naprężeń, czas trwania i wartości poszczególnych stopni naprężeń, występujących w przebiegu.

Dla duralu, w przypadku programów o rosnącej sekwencji naprężeń, wpływ naprężenia początkowego okazał się istotny w całym zakresie wartości naprężenia $\sigma_{a \max}$ w przebiegach naprężenia zrealizowanych w badaniach (rys. 44) . W przypadku programów o sekwencji malejącej istotny wpływ stwierdzono tylko dla niższych wartości naprężenia $\sigma_{a \max}$ (rys. 46) . Rozpoczęcie realizacji programów o rosnąco-malejącej sekwencji naprężeń od różnych stopni naprężenia nie spowodowało istotnych zmian żywotności (rys. 45) .

Dla mosiądzu zależność żywotności od pierwszego stopnia naprężenia w przebiegu zaobserwowano tylko w przypadku przebiegów o rosnącej sekwencji naprężeń i najniższej wartości naprężenia $\sigma_{a \max}$ (rys. 47) .

Dokładna analiza zastosowanych programowanych przebiegów naprężenia pozwoliła - zdaniem autora - znaleźć wyjaśnienie uzyskanych zależności między żywotnością badanych stopów a sekwencją naprężeń i wartością naprężenia rozpoczynającego programowany przebieg, przy określonych pozostałych parametrach przebiegu : zakresie wartości naprężeń występujących w przebiegu i liczbie cykli w bloku.

Podstawą przeprowadzonych niżej rozważań jest przyjęcie dyslokacyjnej teorii zmęczenia [9 (s. 146), 62] . Zgodnie z nią, mechanizmowi rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych towarzyszy proces poślizgu. Liczne przeprowadzone badania mikroskopowe [9 (rozdz. 2)] wykazały, że mikropeknięcia są zwykle poprzedzane tworzeniem się pasm poślizgu. Mikropeknięcia powstają w pasmach poślizgu i rozwijają się zgodnie z ich kierunkiem. Na tej podstawie przypuszcza się, że jakikolwiek proces zapobiegania rozwojowi poślizgów w metalach zwiększa również ich wytrzymałość zmęczeniową. Zwiększenie amplitudy obciążenia, na przykład, może wywołać blokadę dyslokacji na granicach ziarn, granicach subziarn, granicach bliźniaków oraz przecięciach pasm poślizgu [63] .

Na podstawie obserwacji zmian fizycznych i strukturalnych zachodzących w metalu pod wpływem zmęczenia wyodrębniono w procesie zmęczenia charakterystyczne okresy, które kolejno przechodzi materiał [9 (rozdz. 1.4), 64 (rozdz. V.1), 63] :

- a) wzmocnienia wywołanego blokadą dyslokacji,
- b) przerwania blokady inicjacji i rozwoju mikropęknięć,
- c) łączenia się mikropęknięć i rozwoju makropęknięcia.

Długość tych okresów zależy od wartości obciążenia i własności materiału. Można sądzić, że stosowanie zabiegów prowadzących do zahamowania rozwoju poślizgów jest celowe w pierwszym okresie procesu zmęczenia. Sposób podwyższenia wytrzymałości zmęczeniowej przez przyłożenie określonej liczby cykli przeciążenia w pierwszym okresie procesu zmęczenia nazywany jest w literaturze (np. [40, 41]) zaprawą lub trenowaniem materiału.

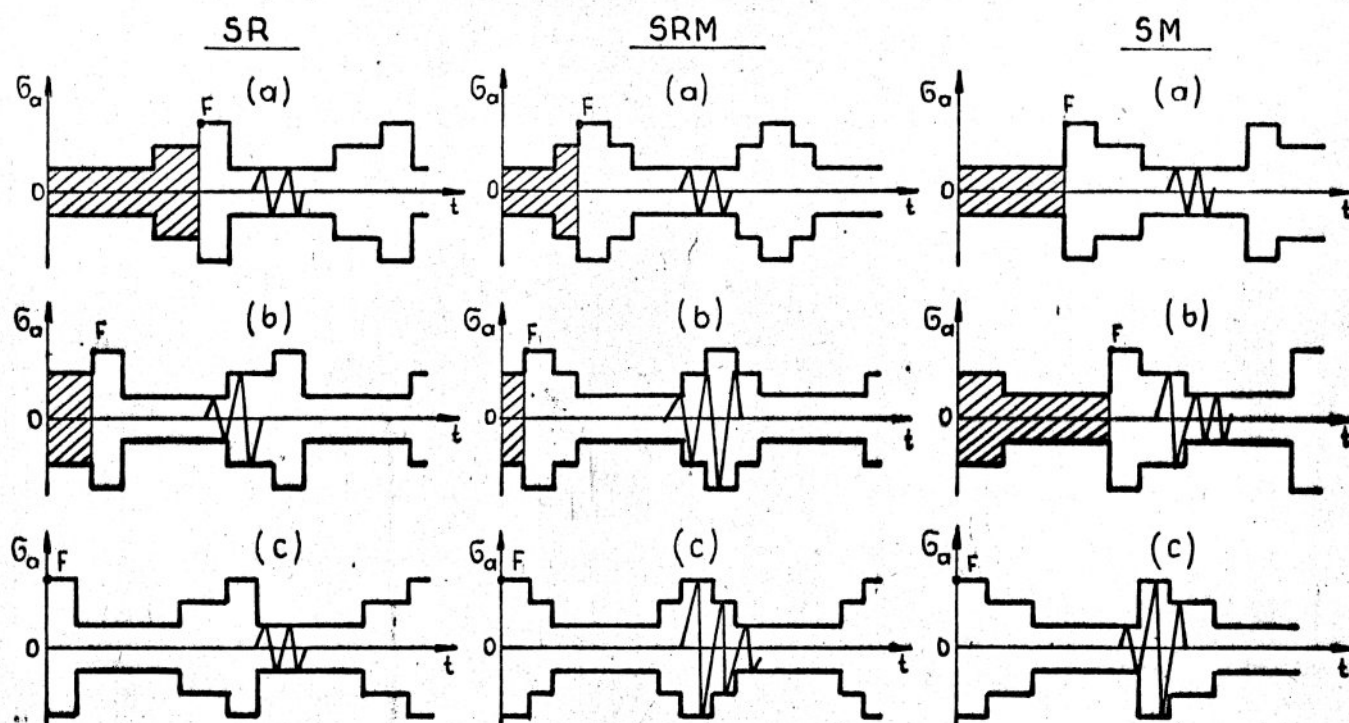
Zgodnie z teorią Odinga (za [64 (rozdz. VI.3)]), cyklicznie powtarzające się obciążenie wywołuje w materiale dwa jednocześnie zachodzące procesy : cyklicznego umacniania i osłabiania^(*) się materiału. Procesy te przebiegają w określonej współzależności, uwarunkowanej własnościami fizycznymi materiału, wartością obciążenia i prędkością odkształcania. Oceny współzależności tych procesów dla dwufazowego mosiądzu dokonał Szpil [65] metodą rejestracji zmiany ugięcia próbki. Stosując przeciążenie równe $1,6 Z_{go}$ stwierdził on, że przez cały czas cyklicznego obciążania przeważał proces cyklicznego umacniania się mosiądzu, bardzo intensywnie przebiegający w pierwszym okresie procesu zmęczenia (25 % żywotności). Cykliczne osłabienie nastąpiło dopiero po okresie odpowiadającym 95 % żywotności.

Z analogicznych badań przeprowadzonych przez Gaździka [55] dla duralu PA6N wynika, że przy częstotliwości 100 Hz i przeciążeniu równym $1,4 Z_{go}$ osiągają przewagę procesy cyklicznego osłabienia duralu. Przy niższej natomiast częstotliwości, w początkowym okresie zmęczenia, przeważał proces cyklicznego umocnienia duralu. Podobny rezultat badań przedstawiono w pracach [66 - 68] .

(*) W warunkach badań przy $\dot{\epsilon}_a = \text{const}$, materiał osłabia się cyklicznie, gdy amplitudy odkształceń plastycznych zwiększają się (zwiększają się szerokości pętli histerezy plastycznej); w przypadku ich zmniejszania się materiał doznaje cyklicznego umocnienia.

Umocnienie mosiądzu związane jest według Odinga (za [69 (rozdz. VI. p. 3)]) ze zgniotem, natomiast zjawisko osłabienia duralu, zgodnie z wynikami prac [66 - 68] - ze zniszczeniem wydzieleni fazy utwardzającej^(*) wskutek przecinania ich przez dyslokacje i następne rozpuszczanie. Wobec powyższego można więc założyć, że w przypadku stopów, zastosowanych w badaniach własnych, wystąpienie istotnego efektu treningu jest możliwe dla mosiądzu. W przypadku duralu natomiast efekt ten może być niewielki lub może nie być go wcale.

Przystępując do analizy wpływu pierwszego stopnia naprężenia w przebiegu i sekwencji naprężeń na żywotność duralu PA6N porównano schematy zrealizowanych w badaniach przebiegów naprężeń, przedstawione na rysunku 57.



Rys. 57. Schematy programowanych przebiegów naprężenia o rosnącej (SR), rosnąco-malejącej (SRM) i malejącej (SM) sekwencji naprężeń, rozpoczynających się od stopnia naprężenia: a) $\sigma_{a \min}$; b) $\sigma_{a \text{ śr}}$; c) $\sigma_{a \max}$

(*) W przypadku zastosowanego w badaniach własnych stopu PA6N starzonego naturalnie podstawową fazą utwardzającą jest faza β (CuMgAl_2) [69].

Stwierdzono, że przebiegi o tej samej sekwencji naprężeń różnią się między sobą zakreskowanymi na rysunku fragmentami. Począwszy od najwyższego w przebiegu stopnia naprężenia $\sigma_{a \max}$ (początek którego oznaczono na rysunku punktem F) przebiegi a, b, c są identyczne. Uzyskanie różnic w żywotności zmęczeniowej wyznaczonej przy takich przebiegach naprężenia sugeruje więc, że spowodowały je te początkowe fragmenty przebiegów.

Przeprowadzone badania pozwoliły stwierdzić, że żywotność duralu przy przebiegach SR i SM, rozpoczynających się od naprężenia $\sigma_p = \sigma_{a \min}$ (przebiegi a), jest większa od żywotności wyznaczonej przy przebiegach, w których $\sigma_p = \sigma_{a \text{ śr}}$ (przebiegi b), przyjmuje natomiast wartości pośrednie (przebiegi SM) albo nie różni się istotnie od żywotności uzyskanej przy przebiegach, w których $\sigma_p = \sigma_{a \min}$ (przebiegi SR).

Powyższe wyniki można uzasadnić, zakładając, że pierwsze stopnie naprężenia niższe od wartości naprężenia $\sigma_{a \max}$ nie wywołują procesów destrukcyjnych w materiale, mimo zachodzących w nim wspomnianych już przemian nieodwracalnych [9 (rozdz. 1.4), 64 (rozdz. V. 1)]. Z tego powodu oraz wskutek braku efektu treningu różnice żywotności, uzyskane przy przebiegach naprężenia a i c (SR, SM), są w przybliżeniu równe okresowi działania zakreskowanych na rysunku 57 fragmentów przebiegów.

Liczby cykli najniższych naprężeń w programie są na tyle duże^(*), że odpowiadające im różnice żywotności okazały się statystycznie istotne. Liczba cykli pierwszego stopnia naprężenia w przebiegach b (SR) na rysunku 57 jest znacznie mniejsza (tab. 4), w związku z czym różnice w żywotnościach wyznaczonych przy przebiegach b (SR) i c (SR) są nieistotne. Mała liczba cykli poszczególnych stopni naprężenia w przebiegu SRM (o połowę mniejsza od liczby cykli odpowiadających im stopni w przebiegach SR i SM - tab. 4) uzasadnia również brak wystąpienia różnic żywotności wskutek zmiany pierwszych stopni naprężenia w przebiegu.

Sugerowana interpretacja wyników wymaga dodatkowych wyjaśnień w przypadku przebiegów SM, ponieważ na rysunku 57 nie

(*) Związane jest to z przyjęciem dużej liczby cykli w jednym bloku przebiegu naprężenia, dejącej średnio 2 - 3-krotne powtórzenie bloku do złomu.

stwierdzono w nich wpływu pierwszego stopnia naprężenia dla programów naprężeń, w których $\sigma_{a \max} = 1,6 Z_{go}$, podczas gdy przy niższych wartościach naprężeń $\sigma_{a \max} = 1,48; 1,36 Z_{go}$ wpływ ten okazał się istotny.

Ponadto okazało się, że żywotność wyznaczona przy przebiegu b (SM) na rysunku 57 jest mniejsza albo nie różni się istotnie (w zależności od wartości naprężenia $\sigma_{a \max}$) od żywotności przy przebiegu a (SM). Należy tu mieć na uwadze, że kolejność następowania poszczególnych stopni naprężenia w przebiegach SM jest inna, niż w przebiegach SR. W związku z tym oddziaływanie tych naprężeń na przebieg pierwszego stadium procesu zmęczenia ma inny charakter. Wyjaśnienie można znaleźć - zdaniem autora - analizując wyniki badań (przeprowadzone przez Müllera-Stocka, Kommersa, Porębskiego i Deję i innych) wpływu przeciążeń i niedociążeń na wytrzymałość zmęczeniową metali.

Wyniki te omówione zostały w pracy [42]. Można je podsumować następująco: przeciążenia i niedociążenia mogą wpływać zarówno na podwyższenie, jak i obniżenie wytrzymałości zmęczeniowej w zależności od ich wartości, czasu trwania i umiejscowienia w przebiegającym procesie zmęczenia. Świadczy to o tym, że analizując wpływ pierwszych stopni naprężenia powinno się brać pod uwagę trzy wymienione wyżej czynniki.

Można więc sądzić, że w przypadku przebiegów b (SM) na rysunku 57 w porównaniu z przebiegami a (SR), wpływ naprężenia $\sigma_{a \min}$ na przebieg procesu zmęczenia (*) został zmieniony wskutek uprzedniego działania naprężenia $\sigma_{a \text{ sr}}$, w stopniu zależnym od wartości tych naprężeń i czasu ich trwania. Dlatego nie stwierdzono istotnej różnicy w żywotnościach uzyskanych przy przebiegach b (SM) i c (SM) w przypadku, gdy naprężenie

$\sigma_{a \max} = 1,6 Z_{go}$, podczas gdy dla $\sigma_{a \max} = 1,36 Z_{go}$ różnice żywotności okazały się istotne. Brak różnic w żywotnościach, uzyskanych przy przebiegu a (SM) i c (SM) dla $\sigma_{a \max} = 1,6 Z_{go}$ tłumaczyć można jedynie bezpośrednim następstwem po stopniu

(*) Przez wpływ naprężenia na przebieg procesu zmęczenia autor rozumie tu wpływ naprężenia na stan struktury dyslokacyjnej mniej lub bardziej sprzyjający powstaniu pierwszych mikro-pęknięć.

naprężenia σ_a min wysokiego przeciążenia σ_a max.

Wychodząc z przyjętego wcześniej założenia, że efekt sekwencji związany jest z początkowym okresem obciążenia, w analogiczny sposób, jak wyżej, można wyjaśnić stwierdzony w badaniach brak wpływu sekwencji na żywotność duralu. Należy w tym celu porównać początkowe fragmenty przebiegów SR, SRM i SM przy tym samym naprężeniu początkowym σ_p (rys. 57). Obowiązuje tu również założenie, że wpływ na żywotność mają tylko początkowe fragmenty przebiegów naprężenia do punktu F, czyli zanim rozpoczną się w materiale procesy destrukcyjne. Brak efektu treningu w przypadku duralu (który mógłby wystąpić przy przebiegach SR i SRM) uzasadnia uzyskanie nieistotnych różnic przy przebiegach a (SR, SM, SRM). Brak korzystnego działania (z punktu widzenia wzrostu żywotności) początkowego fragmentu przebiegu naprężenia b (SM) wyjaśniono już powyżej.

Proponowane jakościowe wyjaśnienie wpływu pierwszego stopnia naprężenia w przebiegu i sekwencji naprężeń na żywotność zmęczeniową duralu PA6N można poprzeć analizą ilościową. W tym celu przyjęto, że rozważany pierwszy okres procesu zmęczenia, w którym nie zachodzą procesy destrukcyjne, określa linia uszkodzeń Frencha. Ponieważ przebieg takiej krzywej wyznaczano w badaniach wstępnych, można sprawdzić słuszność założenia, że pierwsze stopnie naprężenia w przebiegu o wartościach mniejszych od naprężenia σ_a max nie powodują uszkodzenia w sensie obniżenia nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej.

Sprawdzenie takie jest proste w przypadku przebiegów naprężenia, dla których liczba cykli odpowiadająca krzywej uszkodzeń zostaje osiągnięta już na pierwszym stopniu naprężenia (np. przebiegi (c) na rys. 57). W pozostałych przypadkach przebiegów można tego dokonać przy zastosowaniu hipotezy kumulacji uszkodzeń. Przyjęto w tym celu zmodyfikowaną wersję hipotezy Minera, zaproponowaną przez Bucha [61] (popartą wynikami jego badań dla stali) w postaci reguły :

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \geq 1 \quad (13)$$

w której :

n_1 - liczba cykli przeciążenia σ_1 ,

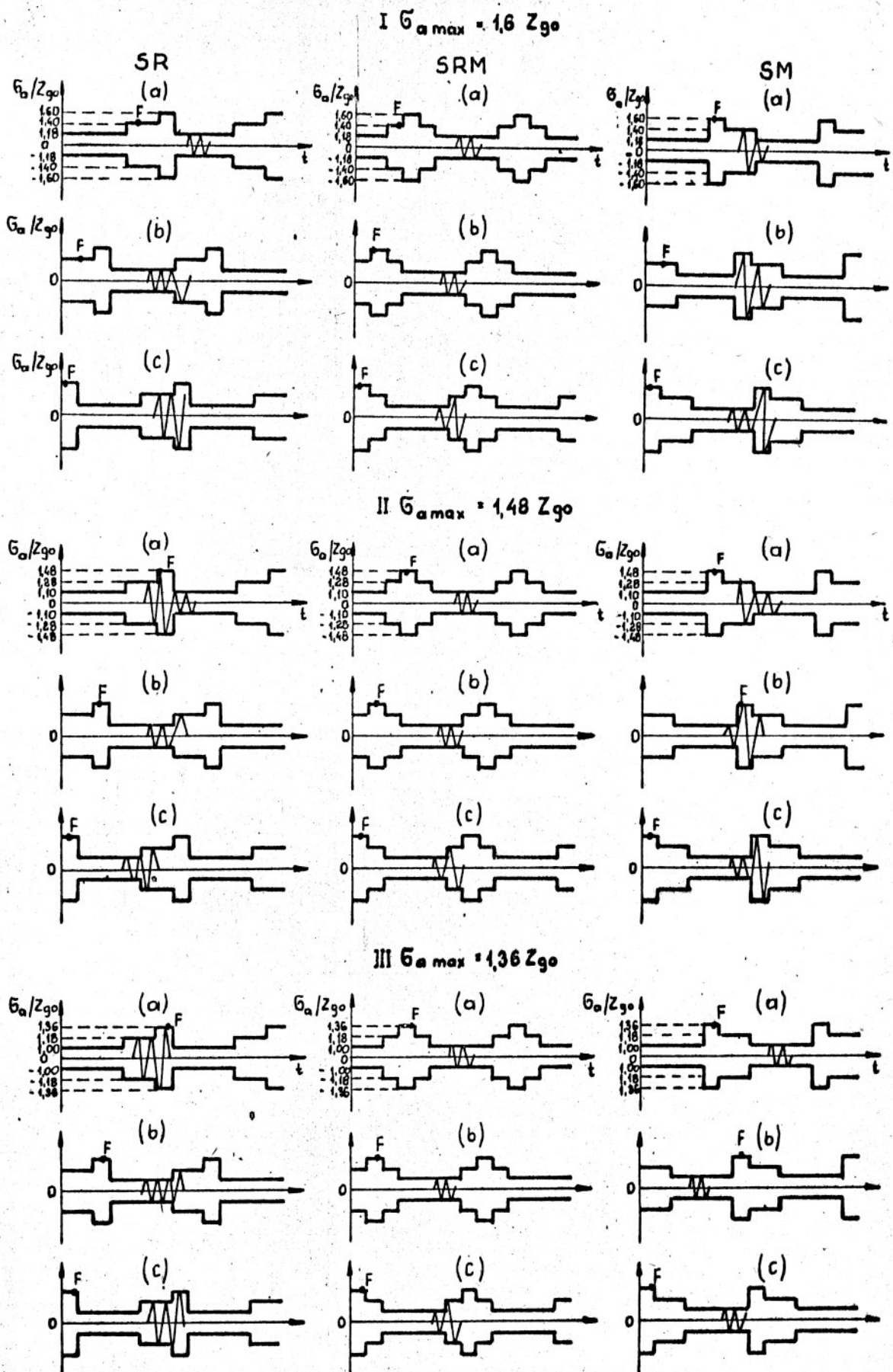
N_{1F} - liczba cykli przeciążenia σ_1 do linii uszkodzeń Frencha.

Spełnienie tej reguły oznacza powstanie w materiale uszkodzenia zmęczeniowego, objawiającego się obniżeniem wartości granicy zmęczenia.

Obliczone z warunku (13) sumy liczby cykli $\sum n_i$, po przekroczeniu których wartość granicy zmęczenia duralu ulega zmniejszeniu, podano w tabeli 72 (w aneksie). Dla ilustracji tego, na którym poziomie naprężenie następowało przekroczenie obliczonej granicznej liczby cykli $(\sum n_i)_F$, na rysunku 58 dla każdego przebiegu orientacyjnie oznaczono ten moment punktem F. Widać, że kumulacja uszkodzeń rozpoczynała się w większości przypadków przebiegów na pierwszym, najwyższym poziomie naprężenia $\sigma_{a \max}$. Fakt ten potwierdza słuszność przeprowadzonego wcześniej rozumowania. Należy zaznaczyć, że nie przeczą mu również te przypadki przebiegów, w których proces kumulacji rozpoczął się wcześniej (przebiegi a (SR, SM), b (SR, SM) z rysunku 58, dla $\sigma_p = 1,6 Z_{go}$).

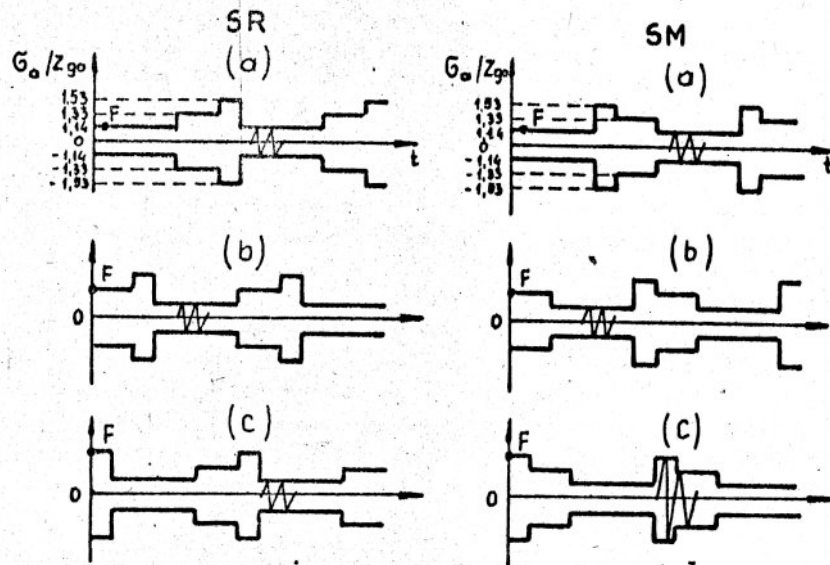
Wyniki badań wpływu pierwszego stopnia naprężenia w przebiegu i sekwencji naprężeń na żywotność zmęczeniową mosiądzu MO58 odbiegają nieco od zaproponowanej w przypadku duralu interpretacji. Należy tu jednak mieć na uwadze, bliskie poziomemu, położenie linii uszkodzeń Frencha mosiądzu (rys. 24). Oznacza to, że w większości przypadków zrealizowanych przebiegów naprężeń, proces kumulacji uszkodzeń rozpoczął się już od pierwszego cyklu przebiegu (rys. 59). To wyjaśnia brak różnic w żywotnościach wyznaczonych przy przebiegach, w których naprężenie $\sigma_{a \max} = 1,53; 1,42 Z_{go}$, przy rozpoczynaniu ich od różnych stopni naprężenia.

Należy również mieć na uwadze, że mosiądz charakteryzuje się, w przeciwieństwie do duralu, dużą zdolnością do cyklicznego umocnienia. Ponadto z badań Deji i Porębskiego [42] dla stali wynika, że zastosowanie przeciążenia w okresie po przekroczeniu linii uszkodzeń może przyczynić się do znacznego wzrostu trwałości zmęczeniowej. Na tej podstawie można przypuszczać, że w przypadku przebiegów a (SR) i b (SR) (rys. 59), w których naprężenie $\sigma_{a \max} = 1,31 Z_{go}$, wystąpił wzrost żywotności (w porównaniu z żywotnością przy przebiegu c (SR)) spowodowany treningiem, mimo wczesnego przekroczenia linii Frencha.

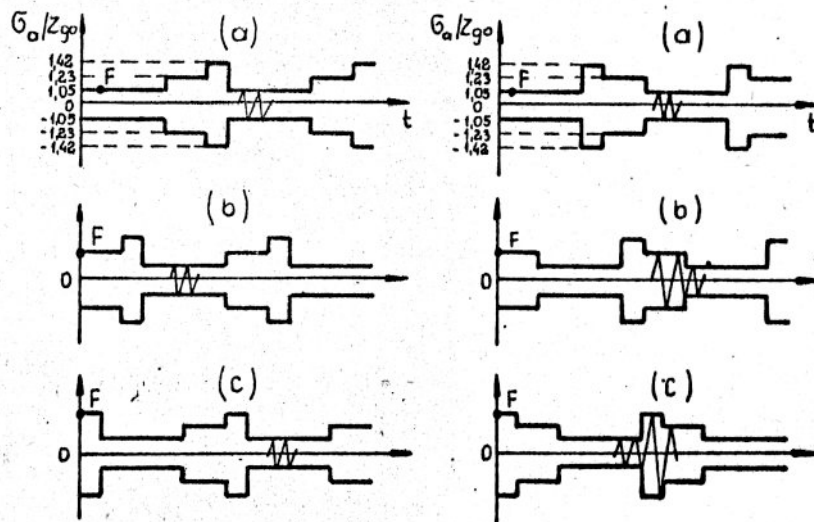


Rys. 58. Schematy programowanych przebiegów naprężenia, zrealizowanych dla duralu PA6N przy trzech wartościach naprężenia $\sigma_{a \max}$, rozpoczynających się od stopnia naprężenia: a) $\sigma_{a \min}$; b) $\sigma_{a \text{ śr}}$; c) $\sigma_{a \max}$

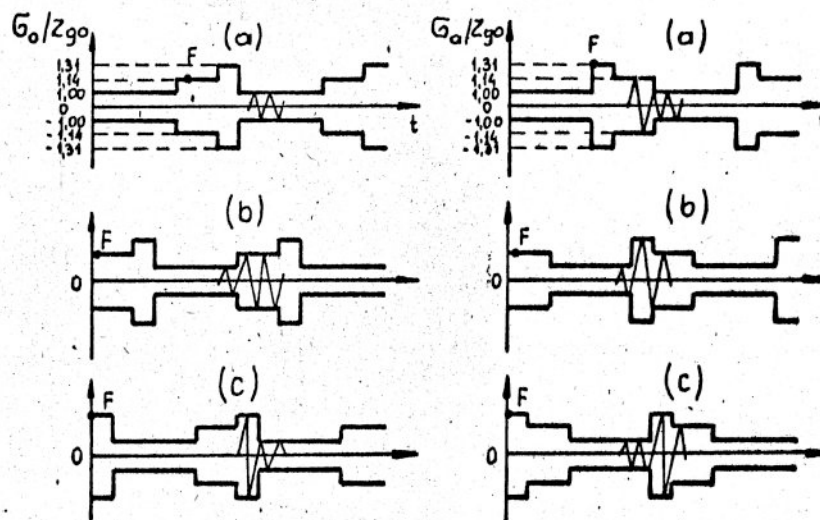
$$I \sigma_{a \max} = 1,53 \sigma_{go}$$



$$II \sigma_{a \max} = 1,42 \sigma_{go}$$



$$III \sigma_{a \max} = 1,31 \sigma_{go}$$



Rys. 59. Schematy programowanych przebiegów naprężenia, zrealizowanych dla mosiądzu MO58 przy trzech wartościach $\sigma_{a \max}$, rozpoczynających się od stopnia naprężenia :
 a) $\sigma_{a \min}$; b) $\sigma_{a \text{ sr}}$; c) $\sigma_{a \max}$

W przypadku przebiegów a (SM) na rysunku 59, podobny efekt mógł nie wystąpić wskutek zbyt dużego przyrostu wartości naprężenia (z $\sigma_{a \min}$ na $\sigma_{a \max}$), który - jak wynika z pracy [70] - niekorzystnie wpływa na trwałość zmęczeniową. W świetle powyższego rozumowanie uzasadniony jest również fakt stwierdzenia wpływu sekwencji na żywotność tylko w przypadku porównywania przebiegów a (SR) i a (SM) na rysunku 59. Można przypuszczać, że wskutek treningu żywotność próbek przy przebiegach naprężenia a (SR) wzrosła w porównaniu z żywotnością przy przebiegach a (SM).

Podobny charakter wpływu sekwencji stwierdzono w pracach [10, 34]. Powiązanie wpływu sekwencji z pierwszym okresem procesu zmęczenia wyjaśnia - zdaniem autora - podawaną w literaturze [13, 36, 37] również odwrotną zależność żywotności zmęczeniowej od rodzaju sekwencji naprężeń. Mianowicie, przyjęcie przez różnych badaczy różnych stopni naprężenia w przebiegu za pierwsze (przy tym samym rodzaju sekwencji), mogło spowodować ich odmienne oddziaływanie na żywotność.

Podkreślenia wymaga fakt, że kolejność następowania poszczególnych stopni naprężenia w przebiegu (przy $\sigma_p = \sigma_{a \text{ sr}}$) nie spowodowała istotnych zmian żywotności obydwu badanych stopów, niezależnie od przyjętej liczby cykli w bloku. Świadczy to o tym, że o pojawieniu się istotnego wpływu sekwencji naprężeń na żywotność zmęczeniową decyduje nie tylko liczba cykli w bloku (jak sądzą autorzy prac [10, 15, 19, 32]), ale również rodzaj materiału i pierwszy stopień naprężenia w przebiegu. Fakt ten ma prawdopodobnie związek ze stwierdzoną doświadczalnie zależnością wpływu przeciążeń i niedociążeń na wytrzymałość zmęczeniową metali od ich wartości i czasu trwania [42, 70, 71]. Potwierdzeniem jej są również wyniki badań Redkovca [18], który stwierdził, że te same początkowe stopnie naprężenia mogą, w zależności od czasu ich trwania, powodować wzrost lub zmniejszenie żywotności zmęczeniowej, albo nie mieć na nią wpływu. Należy przypuszczać, że zastosowany w przypadku mosiądzu wzrost czasu trwania pierwszych stopni naprężenia, przy takiej ich kolejności jak w przebiegach b (SR, SM) (rys. 59),^(*) spowodował podobny

^(*) Jak podano w programie badań, badania wpływu objętości bloku na żywotność przeprowadzono przy przebiegach, w których naprężenie początkowe $\sigma_p = \sigma_{a \text{ sr}}$ (tab. 4).

wzrost żywotności, zarówno w przypadku przebiegów o sekwencji rosnącej, jak i malejącej.

Natomiast w przypadku duralu, biorąc pod uwagę małą zdolność tego materiału do umocnienia, zmiany objętości bloku nie wpłynęły na zmianę żywotności przy żadnym z przebiegów b (SR, SRM, SM) (rys. 58). Potwierdzają to wyniki porównania krzywych trwałości zmęczeniowej, wyznaczonych dla przyjętej liczby cykli w bloku programu $n_0 = \text{const}$ i $n_0 \sim N$, przy poszczególnych rodzajach sekwencji naprężeń. Stwierdzono mianowicie, że wpływ czasu trwania bloku na żywotność jest istotny w przypadku mosiądzu niezależnie od rodzaju sekwencji, natomiast w przypadku duralu - nieistotny (rys. 49, 50). Oznacza to, że w przypadku mosiądzu wzrost liczby cykli w bloku (trzykrotny w stosunku do $n_0 = 1,2 \cdot 10^5$ cykli przy $\sigma_{a \max} = 1,42 Z_{go}$; ośmiokrotny przy $\sigma_{a \max} = 1,31 Z_{go}$)^(*) spowodował istotny wzrost żywotności, który może mieć związek z uzyskaniem większego efektu umocnienia.

Brek wpływu liczby cykli w bloku przebiegu na żywotność duralu tłumaczyć można małą zdolnością tego materiału do cyklicznego umacniania się. Należy również dodać, że wpływ na uzyskane wyniki mógł mieć także fakt, że badanie wpływu liczby cykli w bloku na żywotność duralu zrealizowano stosując mniejsze zmiany liczby cykli w bloku, niż miało to miejsce w przypadku mosiądzu^(**) (na poziomie naprężenia $\sigma_{a \max} = 1,48 Z_{go}$ - 1,4-krotny, w stosunku do $n_0 = 4,2 \cdot 10^5$ cykli, wzrost liczby cykli w bloku; dla $\sigma_{a \max} = 1,36 Z_{go}$ - 2,9-krotny wzrost). Znalazło to swoje odbicie w odpowiednio mniejszych zmianach liczby bloków przebiegu, zrealizowanych do złomu w przypadku próbek

(*) Liczbę cykli w bloku przebiegów oznaczonych symbolem $n_0 \sim N$ (tab. 4) dobierano tak, aby $n_1 \sim N_1$ ($\sum n_1 = n_0$) oraz aby średnia liczba powtórzeń bloku do złomu była równa 3.

(**) Zastosowanie w badaniach różnych dla mosiądzu i duralu zmian liczby cykli związane jest z przyjętą metodą doboru liczby cykli w bloku ($n_1 \sim N_1$), zgodnie z którą liczba ta zależy od nachylenia linii Wöhlera.

duralowych, w porównaniu ze zmianami liczb bloków do złomu w przypadku próbek mosiężnych (tab. 13) .

W świetle dotychczas prowadzonego rozumowania można więc stwierdzić, że dla każdego materiału istnieje pewna charakterystyczna objętość bloku, zależna od pozostałych parametrów programu, przy której uzyskuje się maksymalne umocnienie materiału, objawiające się maksymalnym wzrostem żywotności zmęczeniowej. Potwierdza to charakter przebiegu krzywej żywotności z rysunku 2 oraz wyniki badań, przedstawione we wspomnianych już w przeglądzie literatury pracach [6, 12 - 16] .

2. Ocena przydatności wybranych hipotez kumulacji uszkodzeń do przewidywania żywotności zmęczeniowej

Oceniając przydatność wybranych hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych do przewidywania żywotności zmęczeniowej przy zrealizowanych w badaniach własnych przebiegach naprężenia, przyjęto dwa kryteria :

- bezpieczeństwo obliczeń, tzn. wymaganie, by obliczona żywotność zmęczeniowa była mniejsza od żywotności wyznaczonej eksperymentalnie,
- dokładność obliczeń, tzn. wartość odchylenia żywotności obliczonej od eksperymentalnej.

Stosując do obliczeń żywotności duralu hipotezę Palmgrena-Minera, we wszystkich przypadkach zrealizowanych przebiegów naprężenia uzyskano niebezpieczne oszacowanie żywotności czyli obliczeniowe wartości żywotności większe od wartości wyznaczonych doświadczalnie . Wyniki obliczeń znacznie odbiegają od wartości wyznaczonych eksperymentalnie, szczególnie w przypadkach przebiegów, w których najniższa wartość naprężenia $\sigma_{a \min} = Z_{go}$ nie jest uwzględniana przez hipotezę w obliczeniach.

Należy dodać, że zastosowanie do obliczeń żywotności duralu hipotezy Palmgrena-Minera w przypadku zrealizowanych przebiegów naprężenia wymagałoby przyjęcia odpowiedniej wartości współczynnika 'x', mianowicie :

- $x = 0,6$ dla przebiegów, w których naprężenie $\sigma_{a \min} > Z_{go}$,
- $x = 0,4$ dla przebiegów, w których naprężenie $\sigma_{a \min} = Z_{go}$.

Średnia liczba bloków programu naprężenia, przeniesionych do złomu przez próbki z duralu PA6N i mosiądzu MO58 w zależności od liczby cykli w bloku

MATERIAŁ	STOSUNEK NAPRĘŻEŃ σ_{amax}/Z_{90}	LICZBA CYKLI W BLOKU		SEKWENCJA NAPRĘŻEŃ		
		OZNACZENIE	$n_0 \cdot 10^{-3}$	SR	SRM	SM
PA6N	1,60	$n_0 = \text{const}$	420	1,8	1,7	2,0
		$n_0 \sim N$	420	1,8	1,7	2,0
	1,48	$n_0 = \text{const}$	420	3,5	2,5	3,6
		$n_0 \sim N$	600	2,6	2,1	2,8
	1,36	$n_0 = \text{const}$	420	6,6	5,6	7,5
		$n_0 \sim N$	1 200	2,2	2,9	2,6
MO58	1,53	$n_0 = \text{const}$	120	3,0	-	3,6
		$n_0 \sim N$	120	3,0	-	3,6
	1,42	$n_0 = \text{const}$	120	9,2	-	6,5
		$n_0 \sim N$	360	4,2	-	4,0
	1,31	$n_0 = \text{const}$	120	19,5	-	16,5
		$n_0 \sim N$	960	5,7	-	3,2

Obliczenia, wykonane według hipotezy Palmgren-Minera dla mosiądzu, dały w dziesięciu spośród dwudziestu dwóch przypadków zrealizowanych przebiegów naprężenia wartości żywotności mniejsze od wartości doświadczalnych. W pozostałych przypadkach przebiegów obliczona żywotność była większa od żywotności rzeczywistej. W przypadku mosiądzu jest wyraźnie widoczna wada hipotezy: pomija się w niej wpływ parametrów przebiegu naprężenia na żywotność. Świadczy o tym duży rozrzut doświadczalnych wartości współczynnika "x" (rys. 51 b), zwłaszcza w przypadku przebiegów, w których $\delta_{a \min} = Z_{go}$.

Przeprowadzając podobną analizę wyników obliczeń według hipotezy Cortena-Dolana (dla współczynnika redukcji $k = 0,7 - 1,0$) stwierdzono, że:

- dla duralu, w 27 spośród 33 przypadków przebiegów naprężenia, obliczona żywotność jest większa od żywotności rzeczywistej,
- dla mosiądzu, we wszystkich przypadkach przebiegów, hipoteza daje bezpieczne oszacowanie żywotności, ze stosunkowo niedużym błędem dla większości przebiegów.

Bezpieczne stosowanie tej hipotezy do przewidywania żywotności duralu wymagałoby przyjęcia do obliczeń innego, niż jest podawany w literaturze, zakresu zmian współczynnika redukcji, mianowicie: $k = 0,3 - 0,6$, zamiast $k = 0,7 - 1,0$.

Obliczenie żywotności zmęczeniowej duralu według hipotezy Serensena-Kogajewa dały wartości zbliżone do rzeczywistych (dla współczynnika $c = 0,6$), ale tylko w przypadku przebiegów, w których wartości naprężenia $\delta_{a \min} > Z_{go}$. Natomiast w przypadku przebiegów, w których naprężenie $\delta_{a \min} = Z_{go}$, obliczenia dały zaniżone wartości żywotności. Bezpieczną ocenę żywotności uzyskano we wszystkich przypadkach przebiegów naprężenia, zrealizowanych dla mosiądzu. Należy jednak dodać, że w 6 przypadkach przebiegów wyniki obliczeń dały wartości żywotności, znacznie przewyższające wartości wyznaczone doświadczalnie.

Porównując obliczone według hipotezy Zakrzewskiego wartości żywotności zmęczeniowej duralu z wyznaczonymi doświadczalnie stwierdzono, że we wszystkich przypadkach przebiegów naprężenia wartości obliczone znacznie odbiegają od doświadczalnych i znajdują się po stronie niebezpiecznej. Stosowanie tej hipotezy

wymagałoby przyjęcie bardzo małej wartości współczynnika $r = 0,1 - 0,2$, zamiast $r = 1$. Wyniki obliczeń dla mosiądzu pokrywają się - jak już wspomniano - z wynikami obliczeń według hipotezy Palmgren-Minera.

Reasumując, z porównania żywotności zmęczeniowej duralu PA6N i mosiądzu MO58, obliczonych według hipotez: Palmgren-Minera, Cortena-Dolana, Serensena-Kogajewa i Zakrzewskiego, z wyznaczonymi doświadczalnie wynikami, że najbardziej bezpieczną i dokładną ocenę żywotności zmęczeniowej daje hipoteza Serensena-Kogajewa.

W przypadku mosiądzu nieco lepsze oszacowanie żywotności uzyskuje się stosując hipotezę Cortena-Dolana, przyjmując podawany w literaturze zakres wartości współczynnika $k = 0,7 - 1$. Biorąc pod uwagę stwierdzoną doświadczalnie małą wrażliwość duralu na zmiany parametrów programowanego przebiegu naprężenia, możliwe wydaje się stosowanie w obliczeniach żywotności zmęczeniowej tego materiału również hipotezy Palmgren-Minera i Cortena-Dolana, ale przy odpowiednim doborze współczynników: $x = 0,4 - 0,6$; $k = 0,3 - 0,6$.

VI. WNIOSKI KOŃCOWE

Parametry programowanego przebiegu naprężenia, takie jak : sekwencja naprężeń, stopień naprężenia rozpoczynającego przebieg i liczba cykli w bloku, mają wpływ na żywotność zmęczeniową materiałów, wyznaczaną w badaniach programowanych. Wpływ każdego z tych parametrów na żywotność zależy od doboru dwóch pozostałych parametrów, a także od wartości naprężeń występujących w przebiegu i rodzaju materiałów. Jest prawdopodobne, że wzajemne powiązanie między wymienionymi parametrami przebiegu ma związek z ich oddziaływaniem na przebieg procesu zmęczenia w pierwszym jego stadium, określonym liczbą cykli (przy określonym poziomie naprężenia) odpowiadającą linii Frencha. Na możliwość taką wskazują wyniki przeprowadzonych badań własnych, na podstawie których stwierdzono, że :

1. Jeżeli w czasie realizacji programowanego przebiegu naprężenia już przy pierwszych cyklach pierwszego stopnia naprężenia w przebiegu zostaje osiągnięta linia uszkodzeń Frencha, to parametry przebiegu : sekwencja naprężeń, stopień naprężenia rozpoczynającego przebieg oraz liczba cykli w bloku, nie mają wpływu na wyznaczoną żywotność zmęczeniową.
2. Jeżeli do chwili osiągnięcia linii uszkodzeń Frencha zostaje zrealizowany pewien fragment (np. kilka stopni) przebiegu naprężenia, parametry tego fragmentu mogą, w zależności od rodzaju materiału, różnie wpływać na wyznaczoną żywotność zmęczeniową.

Porównując wyniki badań uzyskane dla próbek z duralu PA6N i mosiądzu MO58 przy przebiegach naprężenia o takich parametrach, że zachodził drugi z powyższych przypadków, stwierdzono, że :

3. Parametry programowanego przebiegu naprężenia : sekwencja naprężeń oraz liczba cykli w bloku przebiegu nie mają wpływu na żywotność zmęczeniową materiału cyklicznie osłabiającego się w procesie zmęczenia (dural PA6N), natomiast w przypadku materiału cyklicznie umacniającego się (mosiądz MO58), wpływ tych parametrów na żywotność jest istotny.

4. Rozpoczynanie realizacji programowanego przebiegu naprężenia od różnych stopni naprężenia powoduje istotne zmiany żywotności zmęczeniowej duralu PA6N i mosiądzu MO58. W przypadku materiału cyklicznie osłabiającego się zmiany te są związane głównie z istnieniem różnic, spowodowanych rozpoczęciem realizacji przebiegu od różnych stopni naprężenia, w liczbie cykli fragmentu przebiegu naprężenia, zrealizowanego do chwili osiągnięcia linii Frencha; natomiast w przypadku materiału cyklicznie umacniającego się - z efektem treningu.

Potwierdzenie i uściślenie powyższych wniosków wymaga jednak uzupełnienia przeprowadzonych badań dodatkowymi, przy zastosowaniu przebiegów z udziałem naprężeń niższych od nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej.

Weryfikacja wybranych hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych pozwoliła stwierdzić, że :

5. Określanie żywotności zmęczeniowej, w przypadku zrealizowanych w badaniach własnych trzystopniowych przebiegów naprężenia, według hipotezy Palmgren-Minera, Cortena-Dolana, Serensena-Kogajewa i Zakrzewskiego, jest mało dokładne, ponieważ żadna z tych hipotez nie uwzględnia wpływu na żywotność rozważanych w pracy parametrów przebiegu naprężenia : sekwencji naprężeń, stopnie naprężenia rozpoczynającego przebieg oraz liczby cykli w bloku przebiegu.
6. Najlepszą zgodność żywotności obliczonych z żywotnościami rzeczywistymi, dla wszystkich przypadków przebiegów naprężenia i obydwóch stopów, dało zastosowanie do obliczeń hipotezy Serensena-Kogajewa.

VII. BIBLIOGRAFIA

1. CASSNER E., Betriebsfestigkeit. Eine Bemessungsgrundlage für Konstruktionsteile mit statistisch wechselnden Betriebsbeanspruchungen, Konstruktion, vol. 3, nr 6, 1954, s.94-104
2. PRZYBYLSKI J., Metoda opracowywania przyspieszonego programu badań oparte na modelowaniu obciążeń działających na układ, Przegląd Mechaniczny, XXXII, nr 4, 1973, s. 134-137
3. JACOBY G.H., Metody zliczania przebiegów, badania przy obciążeniach programowanych i hipotezy kumulacji uszkodzeń, Nowoczesna metodyka badań wytrzymałościowych, Seminarium SIMP - COBiRTK, Warszawa, luty 1974, s. 1-9
4. BOLLANI G., Fatica con carichi a programma, ATA, nr 11, 1969, s. 561-570
5. HAAS T., Loading Statistics as a Basis of Structural and Mechanical Design, The Engineers' Digest, vol. 23, nr 3, 1962, s. 79-84, nr 4 s. 81-85, nr 5 s. 79-83
6. SZALA J., Badania i obliczenia zmęczeniowe elementów maszyn w warunkach obciążeń losowych i programowanych, Prace IPPT PAN, nr 6, Warszawa, 1979
7. JACOBY G.H., Comparison of Fatigue Lives Under Conventional Program Loading and Digital Random Loading, ASTM, STP, nr 462, 1960, s. 184-202
8. NAUMANN E.C., Fatigue Under Random Loading and Programmed Loads, Langley Research Center, NASA, Langley Station, Hampton, Va., October, 1964, s. 1-25
9. KOCANDA S., Zmęczeniowe niszczenie metali, WNT, Warszawa, 1978
10. GRINGAUZ G.D., O programmirowanii ustalostnykh ispytaniy, Zavodskaya laboratoriya, vol. 27, nr 10, 1961, s. 1282-1287
11. CASSNER E., Programmnye ekspluatatsionnye ustalostnye ispytaniya primenitelno k samoletnym konstrukcijam, Sb. Ustalost' samoletnykh konstrukcij, Oborongiz, 1961, s.207-238

12. LIPP W., Zuverlässigere Lebensdauerangaben durch bessere Vermischung der Lasten im 8-Stufen-Programmversuch, Materialprüfung, vol. 12, nr 11, 1970, s. 381-382
13. KUFAEV V.N., POGREBNJAK A.D., Vlijanie parametrov programm na dolgovečnost žaroprocnogo materiala pri cikličeskom nagruženii, Problemy pročnosti, nr 7, 1970, s. 17-21
14. GIACINTOV E.V., ANDREEV V.V., Soprotivlenie ustalosti spлавov AV pri nestacionernych režimach nagruženija, Mašino-vedenie, nr 1, 1969, s. 82-88
15. ANNO Y., HAYASHI K., AIUCHI S., Bending Fatigue Strength of Gear Teeth Under Random Loading, Bull of JSME, Part 2, vol. 17, nr 112, 1974, s. 1340-1347
16. GASSNER E., Betriebsfestigkeit gekerbter Stahl- und Aluminium-Stäbe unter betriebsähnlichen und betriebsgleichen Belastungsfolgen, Materialprüfung, vol. 11, nr 11, 1969, s. 373-378
17. SZALA J., ZAWIŚLAK K., Wybrane zagadnienia programowanych badań zmęczeniowych, Materiały II Sympozjum Zespołu Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji, Komitet Budowy Maszyn, PAN, Lublin, 1977, s. 10-14
18. REDKOVEC N.F., K voprosu o vybore parametrov programm ustalostnykh ispytaniy detalej samoletnykh konstrukcij, Pročnosť i dolgovečnost aviacionnykh konstrukcij, Vyp. II, Kiev, 1963, s. 174-184
19. KAWAMOTO M., IBUKI Y. i inni, The Effects of Block Size and Cycle Ratio of Peak Load on the Fatigue Strength Under Program Loading, The 13-th Japan Congress of Materials Research Metallic Materials, March, 1970, s. 88-91
20. VASSERMANN N.N., GLADKOVSKIJ V.A. i inni, Issledovanie cikličeskoj pročnosti titanovogo сплава VT6 pri programnom nagruženii, Problemy pročnosti, nr 11, 1976, s. 35-39
21. FILATOV E.Ja., PAVLOVSKIJ V.E., PANFILOV Ju.A., Nakoplenie ustalostnykh povreždenij v svjazi s nižnimi urovnjami naprjaženij ekspluatacionnykh spektrov, Problemy pročnosti, nr 1, 1969, s. 35-37

22. SEKI M., TANAKA T., DENOH S., Estimation of the Fatigue Life Under Program Load Including the Stresses Lower than Endurance Limit, Bull. JSME, vol. 14, nr 69, 1974, s. 183-190
23. GARF M.E., BUGLOV E.G., PAVLOVSKIJ V.E., Ob osobennostjach nakoplenija ustalostnogo povrezhdenija pri spektrach nestacionarnoj naprjazhennosti rasprostranajuschtsijsja niže ischodnogo predela ustalosti, Vestnik mašinostroenija, nr 6, 1964, s. 23-25
24. REDKOVEC N.F., Vlijanie naprazhenij niže predela ustalosti na dolgovečnost' detalej rabotajusščich pri peremennych nagruzkach, Vestnik mašinostroenija, nr 6, 1964, s. 26-69
25. FILATOV E.Ja., DMITRIČENKO S.S. i inni, Programmnye ispytaniya svarnykh obrazcov na ustalost', Problemy pročnosti, nr 3, 1972, s. 17-20
26. BORODAVKO V.A., Vlijanie nizkich urovnej nagruzok na dolgovečnost' tonkostennykh aviacionnykh konstrukcij, Vyp. I, Kiev, 1975, s. 79-83
27. BORODAVKO V.A., SLOBODJANJUK V.Ja., Issledovanie vlijanija na dolgovečnost' nižnego urovnja eksploatacionnogo spektra nagruzok, Zavodskaja laboratorija, nr 9, 1971, s. 1025-1152
28. AMELIN V.I., GRINENKO N.I., ŠEFER L.A., K issledovaniju nekotorych voprosov programmirovannykh ustalostnykh ispytaniy, Zavodskaja laboratorija, nr 10, 1972, s. 1257-1261
29. GARF M.E., PAVLOVSKIJ V.E., O metodike opredelenija nižnej granicy povrezhdajusščich naprjazhenij spektra, Zavodskaja laboratorija, nr 3, 1967, s. 349-352
30. GARF M.E., KRAMARENKO O.Ju., KULIKOVSKAJA O.V., KUBJAK R.F., Rol' nizkich naprjazhenij spektra v razvitii ustalostnogo razrušenija, Sb. Pročnosť materialov i konstrukcij, Kiev, Izd. Naukova Dumka, 1975, s. 55-65
31. SZALA J., Wpływ sekwencji obciążeń na trwałość zmęczenia, Mechanika Teoretyczna i Stosowana, vol. 16, zeszyt 2, Warszawa, 1978, s. 181-196

32. KAWAMOTO M., ISHIKAWA H., SHIBATA T., The Effect of Stress Sequence on the Fatigue Strength Under Program Loading, Mem. Fac. Eng. Kyoto, nr 35, 1973, s. 28-36
33. WILLIAMS T.R.G., HUGHES D.H., Problems Involved in the Development of Programmed Fatigue Testing, The Engineer, nr 28, October, 1960, s. 703-705
34. IBUKI Y., IWAYA T., Effects of Program Load Including Peak Load on Fatigue Life of Materials, J. Soc. Mater. Sc. Japan, vol. 25, nr 276, 1976, s. 870-874
35. BUCH A., Effect of Loading Sequence; Normal and Reversed Sequence Effect, Fracture, vol. 2, ICF4, 1977, Waterloo, Canada, June 19-24, 1977, s. 1057-1063
36. ČEKUROVA G.A., VIGDORČIK V.M., Kinetika ustalostnych razrušenij pri programmnom nagruženii, Problemy pročnosti, nr 8, 1977, s. 46-48
37. KOVAL' Ju., I., Zakonomernosti nakoplenija ustalostnogo povreždenija v splavach EI826 i EI617 pri programmnom nagruženii, Problemy pročnosti, nr 5, 1974, s. 49-51
38. BUCH A., Loading Sequence Effects in Two-Level Program Tests, Materialprüfung, vol. 17, nr 9, September, 1975, s. 307-312
39. SCHIJVE J., JACOBS F.A., Research on Cumulative Damage in Fatigue of Riveted Aluminium Alloy Joints, National Luchtvaartlaboratorium, Report M. 1999, Amsterdam, 1956
40. DYLAŃ G Z., ORŁOS Z., Wytrzymałość zmęczeniowa materiałów, WNT, Warszawa, 1962
41. BUCH A., Zagadnienia wytrzymałości zmęczeniowej, PWN, Warszawa, 1964
42. PORĘBSKI T., DEJA J., Wpływ przeciążeń i niedociążeń na wytrzymałość zmęczeniową metali, Pr. Nauk. Inst. Mater. P. Wr., nr 3, seria : Monografie nr 2, 1970, s. 10-13
43. KIRIN V.V., Soprotivlenie ustalosti žaropročnych splavov pri programmnych režimach nagruženija, Problemy pročnosti, nr 11, 1974, s. 118-122

44. KOGAEV V.P., VANDYŠEV V.P., PETROVA I.M., Nakoplenie ustalostnykh povreždenij i verojatnostnye metody rasčeta detalj mašin na ustalost' pri variruemych amplitudach naprjaženij, Pročnost' materialov i konstrukcij, Izd. Naukova Dumka, Kiev, 1975, s. 26-33
45. SZABELSKI K., BUBIEN W., Przyspieszenie programowanych badań zmęczeniowych, Materiały II Sympozjum Zesp. Zmęcz. Mat. i Konstr., Komitet Budowy Maszyn PAN, Lublin, 1977, s. 54-57
46. SOBCZYKIEWICZ W., Kumulacja uszkodzeń, I Sympozjum Zesp. Zmęcz. i Konstr., Referaty, Lublin, 1973, s. 94-108
47. STALLMEYER J.E., WALKER W.H., Cumulative Damage Theories and Applications, J. of the Structural Division, Proc. of the American Society of Civil Eng., nr 12, 1968, s. 2739-2750
48. KAECHLE L., Review and Analysis of Cumulative-Fatigue-Damage Theories, Memorandum RM-3650-PR, August, 1963, s. 1-81
49. MADAYAG A.F., Cumulative Damage Theories, Metal Fatigue : Theory and Design, New York, 1969, John Wiley and Sons, rozdz. 6
50. MATOLCSY M., Development and Present-Day State of the Fatigue-Damage Theories, Acta Technica Academiae Scientiarum Hungaricae, nr 72, 1972, s. 347-375
51. ZAKRZEWSKI M., Próba modyfikacji zasady Palmgrena-Minera, Pr. Nauk. Inst. Mater. P. Wr., Raport Serii PRE, nr 17, 1979
52. HANKE H., Estimation of Component Life Using Stress Distribution Parameters, SAE Transaction, 700034, nr 78, 1970, s. 87-98
53. DEJA J., OŚWIĘCIMSKI W., Kumulacja uszkodzeń w przypadku wybranych widm naprężeń zmęczeniowych, Pr. Nauk. Inst. Mater. P. Wr., nr 34, seria : Studia i Materiały, nr 20, 1976, s. 3-34.

54. SERENSEN S.V., KOGAEV V.P., Dolgovečnost' detalej mašin s učetom verojatnosti razrušenija pri nestacionarnom pere-mennom nagruženii, Vestnik mašinostroenija, nr 1, 1966, s. 7-12
55. GAZDZIK P., Wpływ częstotliwości zmian naprężeń i powłok z tworzyw sztucznych na wytrzymałość zmęczeniową duralu PA6, Rozprawa doktorska, Inst. Mater. P. Wr., Wrocław, 1976
56. WIERNIK R., Wpływ podwyższonych częstości zmian naprężeń na żywotność mosiądzu M58 i stali 35, Rozprawa doktorska, Inst. Mater. P. Wr., Wrocław, 1970
57. NIEZGODZIŃSKI M.E., NIEZGODZIŃSKI T., Wzory, wykresy i tablice wytrzymałościowe, PWN, Warszawa, 1975
58. VOLK W., Statystyka stosowana dla inżynierów, WNT, Warszawa, 1973
59. OKTABA W., Elementy statystyki matematycznej i metodyka doświadczalnictwa, PWN, Warszawa, 1966
60. KATARZYŃSKI S., KOCANDA S., ZAKRZEWSKI M., Badanie własności mechanicznych metali, WNT, Warszawa, 1967
61. BUCH A., A New Cumulative Damage Concept Based on French's Damage Line, Israel Journal of Technology, vol. 7, nr 4, 1969, s. 361-366
62. ODING I.A., Teoria dyslokacji w metalach i jej zastosowanie, PWT, Warszawa, 1961
63. GOŁASKI L., Badanie nad określeniem stopnia zmęczenia stali, Rozprawa doktorska, Inst. Mater. P. Wr., Wrocław, 1964
64. IVANOVA V.S., Ustalostnoe razrušenje metallov, Metallurgizdat, Moskva, 1963
65. SZPIL J.W., Wpływ powłok z tworzyw sztucznych na żywotność mosiądzu M63, Rozprawa doktorska, IMiMT Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1972
66. CALABRESE C., LAIRD C., Cyclic Stress-Strain Response of Two-Phase Alloys. Part I. Microstructures Containing Particles Penetrable by Dislocations, Materials Science and Engineers, vol. 13, nr 2, 1974, s. 141-157

67. CLARK J.B., McEVILY A.J., Interaction of Dislocations and Structures in Cyclically Strained Aluminium Alloys, Acta Metallurgica, vol. 12, nr 12, 1964, s. 1359-1372
68. ABEL A., HAM R.K., The Cyclic Strain Behaviour of Crystals of Aluminium - 4 WT. % Copper - I. The Bauschinger Effect, Acta Metallurgica, vol. 14, nr 11, 1966, s. 1489-1494
69. GULAJEW A.P., Metaloznawstwo, Wyd. Śląsk, Katowice, 1969, s. 524
70. SINCLAIR G.M., An Investigation of the Coaxing Effect in Fatigue of Metals, Proc. ASTM, nr 52, 1952, s. 743-751
71. DAS P.K., Effect of Coaxing in Fatigue of Metals, Journal of Technology, vol. 9, nr 1, June, 1964, s. 55-64

A N E K S

(t a b e l e 1 - 72)

Oznaczenia niektórych wielkości statystycznych

Σc^2 - suma kwadratów zniesiona przez korelację liniową, określona przy $f_c=1$ stopniach swobody,

$\Sigma \Sigma' y^2$ - suma kwadratów odchylen średnich żywotności $\bar{y}_i$ na i-tym poziomie naprężenia od średniej ogólnej $\bar{y}$, przy $f_b = n - p$ stopniach swobody (oszacowanie błędu),

$\Sigma \hat{y}^2$ - reszkowa suma kwadratów odchylen od prostej regresji $y = f(x)$ przy $f_R = p - 2$ stopniach swobody,

p - ilość poziomów naprężeń,

m - ilość grup w rozpatrywanym zbiorze,

$\Sigma \hat{y}_m^2$ - korelacja średnich przy $(m - 2)$ stopniach swobody,

$\Sigma \hat{y}_{MN}^2$ - różnica sum kwadratów odchylen od najlepiej dobranej prostej przechodzącej przez wszystkie dane i przez każdą grupę oddzielnie przy $(m - 1)$ stopniach swobody,

$\Sigma \hat{y}_b^2$ - suma kwadratów odchylen od oddzielnych prostych o łącznym współczynniku nachylenia przy $\sum_{m=1}^l n_m - 2m$ stopniach swobody (oszacowanie błędu),

$\Sigma \hat{y}_{MG}^2$ - suma kwadratów odchylen między grupami przy $j_{MG} = l - 1$ stopniach swobody,

$\Sigma \hat{y}_{WG}^2$ - suma kwadratów odchylen wewnątrz grup przy $j_{WG} = \sum_{m=1}^l n_m - l$ stopniach swobody,

$\bar{s}^2, s^2(y)_L$ - łączna wariancja oszacowania,

t, F, χ^2, R_p - funkcje testowe.

Wyniki pomiarów żywotności duralu PA6N oraz
ich opracowanie statystyczne

Lp.	OZNA- CZENIE POZIOM i	NR PR. NA I POZIOM j	POZIOM NAPRĘŻ. $\sigma_{ij} = x_{ij}$ [MPa]	LICZBA CYKLI DO ZŁOMU $N_{ij} \cdot 10^{-3}$ [cykle]	$\log N_{ij} = y_{ij}$	WYNIKI POMOCNICZYCH OBLICZEŃ STATYSTYCZNYCH	RÓWNANIE PR. REGRESJI
1 2 3 4 5 6 7 8	1	1 2 3 4 5 6 7 8	260	271,6 289,0 336,4 355,0 418,3 424,0 443,1 469,0	5,4339298 5,4608978 5,5268560 5,5502283 5,6214879 5,6273659 5,6465017 5,6711728	$\Sigma x = 10320$	$\hat{y} = 9,503176 + 0,015571 x$
9 10 11 12 13 14 15 16	2	1 2 3 4 5 6 7 8	240	332,0 369,1 373,3 551,0 562,4 588,3 870,4 1 095,8	5,5211381 5,5671440 5,5720580 5,7411516 5,7500453 5,7695988 5,9397189 6,2611439	$\Sigma y = 295,4596898$ $\Sigma x = 215$ $\Sigma y = 6,1554102$ $\Sigma x^2 = 2256800$	
17 18 19 20 21 22 23 24	3	1 2 3 4 5 6 7 8	220	601,1 640,0 694,6 850,2 1 055,0 1 380,4 1 460,5 1 824,5	5,7789467 5,8061800 5,8417348 5,9295211 6,0232525 6,1400049 6,1645016 6,2611439	$\Sigma y^2 = 1830$ $\Sigma xy = 62932,13518$ $\Sigma x^2 = 38000$ $\Sigma y^2 = 11,666281$	
25 26 27 28 29 30 31 32	4	1 2 3 4 5 6 7 8	200	855,0 905,6 1 351,0 1 397,0 1 531,5 1 625,5 1 914,6 2 422,0	5,9319661 5,9569364 5,1306553 6,1451964 6,1851170 6,2109870 6,2820780 6,3841741	$\Sigma'xy = -591,69811$	
33 34 35 36 37 38 39 40	5	1 2 3 4 5 6 7 8	190	1 491,1 2 861,2 3 400,6 4 341,7 4 752,1 5 931,9 6 842,5 8 093,6	6,1735068 6,4565482 6,5315555 6,6376598 6,6768856 6,7731938 6,8352148 6,9081417		
41 42 43 44 45 46 47 48	6	1 2 3 4 5 6 7 8	180	2 418,7 3 640,4 5 730,6 7 883,7 9 932,0 9 967,7 11 426,3 15 935,4	6,3835820 6,5611491 6,7582001 6,8967301 6,9970367 6,9985950 6,0579056 7,2023630		

Wyniki pomiarów żywotności mosiądzu M058
oraz ich opracowanie statystyczne

Lp.	OZNACZ POZIO- MU i	NR PRÓBK NA I-TYM POZIOHIE j	POZIOM NAPRĘŻENIA $\sigma_{ij} = x_{ij}$ [MPa]	LICZBA CYKLI DO ZŁOMU $N_{ij} \cdot 10^{-3}$ [cykle]	$\log N_{ij} = y_{ij}$	WYNIKI POMOCNICZYCH OBLICZEŃ STATYSTYCZNYCH	RÓWNANIE PRO- STEJ REGRESJI
1 2 3 4 5 6 7	1	1 2 3 4 5 6 7	280	48,3 49,0 52,5 56,1 65,6 72,4 74,9	4,6839471 4,6901961 4,7201593 4,7489629 4,8169038 4,8597386 4,8744818	$\Sigma x = 11375$	$\hat{y} = 11,166310 - 0,023142 x$
8 9 10 11 12 13 14	2	1 2 3 4 5 6 7	260	55,4 70,3 85,8 94,7 130,0 209,0 209,4	4,7435098 4,8469553 4,9334873 4,9766350 5,1139433 5,3201463 5,3209767	$\Sigma y = 283,9290475$ $\Sigma x = 232,1428571$ $\Sigma y = 5,7944704$	
15 16 17 18 19 20 21	3	1 2 3 4 5 6 7	250	100,6 166,0 179,0 188,0 233,7 258,0 451,0	5,0025980 5,2201081 5,2528530 5,2741578 5,3686587 5,4116197 5,6541765	$\Sigma x^2 = 2686075$ $\Sigma y^2 = 1671,32161$ $\Sigma xy = 64860,28118$ $\Sigma x^2 = 45449,898$	
22 23 24 25 26 27 28	4	1 2 3 4 5 6 7	230	249,0 540,0 624,5 946,0 976,8 1 311,6 1 611,6	5,3961993 5,7323938 5,7955324 5,9758911 5,9898056 6,1178014 6,2072573	$\Sigma y^2 = 26,103158$ $\Sigma'xy = -1051,81912$	
29 30 31 32 33 34 35	5	1 2 3 4 5 6 7	215	1 084,0 1 686,7 1 841,4 2 093,6 2 224,5 2 380,0 2 768,5	6,0350293 6,2270378 6,2651481 6,3208937 6,3472324 6,3765770 6,4422445		
36 37 38 39 40 41 42	6	1 2 3 4 5 6 7	200	2 160,0 2 252,7 4 030,3 4 318,0 4 593,0 4 984,6 5 615,2	6,3344537 6,3527034 6,6053374 6,6352826 6,6620964 6,6976303 6,7493652		
43 44 45 46 47 48 49	7	1 2 3 4 5 6 7	190	3 079,0 3 751,4 4 096,2 4 318,1 5 057,6 7 810,8 8 356,1	6,4884097 6,5741934 6,6123811 6,6352927 6,7039445 6,8926955 6,9220036		

Sprawdzenie słuszności przyjęcia korelacji liniowej
wyników badań ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej duralu PA6N
i mosiądzu MO58

MATERIAŁ	WIELKOŚĆ	WARTOŚĆ			ANALIZA			
		Σ'	f	S^2	$F_1^0 = S_c^2/S_b^2$	$F_2^0 = S_R^2/S_b^2$	$F_{f_1; f_2; 901}$	WNIOSEKI
PA6N	$\Sigma' c^2$	9,2133		9,2133	33,1691	1,2987	$F_{1;42;0,01} = 7,27$ $F_{42;4;0,01} = 13,73$	1. Przyjęta korelacja jest istotna 2. Dodatkowa zmienność nie wywołana ani korelacją ani błędem pomiaru jest nieistotna
	f_c		1					
	$\Sigma' \hat{y}^2$	0,8554		0,2139				
	f_R		4					
	$\Sigma \Sigma' y^2$	1,5975		0,2778				
	f_b		42					
	$\Sigma' y^2$	11,6663		0,2430				
	f_o		47					
MO58	$\Sigma' c^2$	24,3416		24,3416	701,4870	1,7637	$F_{1;42;0,01} = 7,27$ $F_{5;42;0,01} = 3,49$	1. Przyjęta korelacja jest istotna 2. Dodatkowa zmienność nie wywołana ani korelacją ani błędem pomiaru jest nieistotna
	f_c		1					
	$\Sigma' \hat{y}^2$	0,3061		0,0612				
	f_R		5					
	$\Sigma' \hat{y}^2$	1,4555		0,0347				
	f_b		42					
	$\Sigma' y^2$	26,1032		0,5438				
	f_o		48					

Tabela 4

Obliczenie wariancji oszacowania oraz 1/2 PU dla średniej
i pojedynczych spostrzeżeń

MATERIAŁ	POZIOM NAPRĘŻENIA $x_i = \delta_i$ [MPa]		LOG. ŻYWIOTNOŚCI WYZN. Z RÓWNAŃ PROSTEJ REGRESJI $\hat{y}_i = \log N_i$		WARIANCJA OSZACOWANIA			1/2 PRZEDZIAŁU UFNOSCI		
					$s^2(\hat{y})$	$s^2(\hat{y}_i) \cdot 10^3$	$s^2(\hat{Y}_i)$	$t_{n-2;\alpha}$	$t_{n-2;\alpha} \cdot s^2(\hat{y}_i)$	$t_{n-2;\alpha} \cdot s^2(\hat{Y}_i)$
PA 6N	x_1	260	y_1	5,454716	0,053325	3,952596	0,057278	$t_{46;0,05} = 2,006$	0,126117	0,480091
	x_2	240	y_2	5,766136		1,987992	0,055313		0,089441	0,471785
	x_3	220	y_3	6,077556		1,146019	0,054471		0,067909	0,468181
	$\bar{x}$	215	$\bar{y}$	6,155410		1,110937	0,054436		0,066861	0,468030
	x_4	200	y_4	6,388976		1,426667	0,054752		0,075769	0,469385
	x_5	190	y_5	6,544686		1,987992	0,055313		0,089441	0,471785
	x_6	180	y_6	6,700396		2,829965	0,056155		0,106714	0,475362
MO 58	x_1	280	y_1	4,68705	0,037488	2,657572	0,040146	$t_{47;0,05} = 2,007$	0,103464	0,402132
	x_2	260	y_2	5,14989		1,407129	0,038896		0,075286	0,395826
	x_3	240	y_3	5,38131		1,029356	0,038518		0,064392	0,393894
	$\bar{x}$	232	$\bar{y}$	5,79555		0,765072	0,038254		0,055513	0,392540
	x_4	230	y_4	5,84415		0,768709	0,038257		0,055645	0,392558
	x_5	215	y_5	6,19128		1,006260	0,038495		0,063665	0,393775
	x_6	200	y_6	6,53841		1,614986	0,039103		0,080655	0,396876
	x_7	190	y_7	6,76983		2,227011	0,039716		0,094713	0,399970

Tabela 5

95 %-owe przedziały ufności dla średniej
i pojedynczych spostrzeżeń

MATERIAŁ	OZNACZENIE POZIOMU L	POZIOM NAPRĘŻE- NIA $x_i = \sigma_i$ [MPa]	ZYWOTNOŚĆ WYZNACZONA Z RÓWNAŃ REGRESJI		95 %- OWE PRZEDZIAŁY UFNOŚCI							
					$\hat{Q}_i \pm 1/2 PU(\hat{Q}_i)$				$\hat{Y}_i \pm 1/2 PU(\hat{Y}_i)$			
			$\hat{Q}_i = \log N_i$	$N_i \cdot 10^{-3}$	$\hat{Q}_{id}$	$N_{id} \cdot 10^{-3}$	$\hat{Q}_{ig}$	$N_{ig} \cdot 10^{-3}$	$\hat{Y}_{id}$	$N_{id} \cdot 10^{-3}$	$\hat{Y}_{ig}$	$N_{ig} \cdot 10^{-3}$
PA 6N	1	260	5,454716	284,9	5,328599	213,1	5,580833	380,9	4,974625	94,3	5,934807	860,6
	2	240	5,766136	583,6	5,676695	475,0	5,855577	717,1	5,294351	196,9	6,237921	1 725,5
	3	220	6,077556	1 195,5	6,009647	1 022,5	6,145465	1 397,9	5,609375	406,8	6,545737	3 513,5
	4	215	6,155410	1 430,2	6,088549	1,226,2	6,222271	1 668,3	5,687380	486,8	6,623440	4 201,8
	5	200	6,388976	2 448,9	6,313207	2 056,9	6,464745	2 915,7	5,917191	826,4	6,858361	7 217,1
	6	190	6,544686	3 505,0	6,455245	2 852,6	6,634127	4 306,5	6,072901	1 182,8	7,016471	10 386,5
	7	180	6,700396	5 016,0	6,593682	3 923,6	6,807110	6 413,7	6,225034	1 678,9	7,175800	14 988,5
MO58	1	280	4,68705	48,6	4,583586	38,3	4,790514	61,7	4,284918	19,3	5,689182	122,8
	2	260	5,14989	141,2	5,074604	118,7	5,225176	167,9	4,754070	56,8	5,545710	351,3
	3	250	5,38131	240,6	5,316918	207,4	5,445702	279,1	4,987416	97,1	5,775204	595,9
	4	232	5,79555	624,5	5,740037	549,6	5,851063	709,7	5,403010	252,9	6,168090	1 542,0
	5	230	5,84415	698,5	5,788505	615,5	5,899795	794,0	5,451592	282,9	6,236708	1 724,7
	6	215	6,19128	1 553,4	6,127515	1 341,6	6,254945	1 798,6	5,797505	627,3	6,585055	3 846,4
	7	200	6,53841	3 454,7	6,457755	2 869,2	6,619065	4 159,7	6,141534	1 385,3	6,935286	8 615,6
	8	190	6,76983	5 886,1	6,675117	4 732,8	6,864543	7 320,5	6,369860	2 343,5	7,169800	14 784,3

Tabela 6

Wyniki pomiarów do wyznaczania nieograniczonej
wytrzymałości zmęczeniowej stopów PA6N i MO58

MATERIAŁ	Lp.	OZNACZENIE PRÓBK	POZIOM NAPRĘŻE- NIA σ_{Lj} [MPa]	LICZBA CYKLI DO ZŁOMU $N_{Lj} \cdot 10^{-3}$ [cykle]	UWAGI
PA6N	1	1	180	2 418,7	złom
	2	2		5 730,6	"
	3	3		7 883,7	"
	4	1	170	6 921,2	"
	5	2		23 450,0	"
	6	3		35 153,7	"
	7	4		50 000,0	brak złomu
	8	5		50 000,0	"
	9	6		50 000,0	"
	10	1	160	11 946,0	złom
	11	2		17 410,0	"
	12	3		23 400,0	"
	13	4		25 304,0	"
	14	5		50 000,0	brak złomu
	15	6		50 000,0	"
	16	7		50 000,0	"
	17	1	150	23 454,0	złom
	18	2		50 000,0	brak złomu
	19	3		50 000,0	"
	20	4		50 000,0	"
	21	5		50 000,0	"
	22	1	140	50 000,0	"
MO58	1	1	200	4 318,0	złom
	2	1	190	3 079,0	"
	3	2		3 751,4	"
	4	3		4 096,2	"
	5	4		4 318,1	"
	6	5		5 057,6	"
	7	6		7 810,8	"
	8	7		20 000,0	brak złomu
	9	1	180	12 543,0	złom
	10	2		15 082,0	"
	11	3		17 150,0	"
	12	4		20 000,0	brak złomu
	13	5		20 000,0	"
	14	6		20 000,0	"
	15	7		20 000,0	"
	16	8		20 000,0	"
	17	9		20 000,0	"
	18	1	170	20 000,0	"
	19	2		20 000,0	"
	20	3		20 000,0	"

Tabela 7

Wyznaczenie 95 %-owych granic przedziałów ufności średniej i pojedynczych wyników badań w zakresie nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej duralu PA6N i mosiądzu M058

MATERIAŁ	PA6N		M058	
	WARTOŚCI DLA POJEDYNCZYCH SPOSTRZEŻEŃ	WARTOŚCI DLA ŚREDNIEJ	WARTOŚCI DLA POJEDYNCZYCH SPOSTRZEŻEŃ	WARTOŚCI DLA ŚREDNIEJ
Wartość średnia $\bar{x} = Z_{go}$	162,3	162,3	183,0	183,0
Odchylenie standardowe s	15,4645	-	6,3018	-
Błąd odchylenia standardowego s_s	7,4556	-	-	2,1921
Błąd standardowy średniej $s_{\bar{x}}$	-	4,1938	2,3914	-
$t_{n-1;\alpha}$	$t_{10;0,05}=2,228$	$t_{10;0,05}=2,228$	$t_{9;0,05}=2,262$	$t_{9;0,05}=2,262$
$t_{n-1;\alpha} \cdot s$	34,4549	-	14,2547	-
$t_{n-1;\alpha} \cdot s_{\bar{x}}$	-	9,3438	-	4,9585
$\bar{x} + t_{n-1;\alpha} \cdot s$	196,8	-	197,3	-
$\bar{x} - t_{n-1;\alpha} \cdot s$	127,8	-	168,7	-
$\bar{x} + t_{n-1;\alpha} \cdot s_x$	-	171,6	-	188,0
$\bar{x} - t_{n-1;\alpha} \cdot s_x$	-	153,0	-	178,0

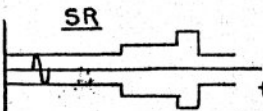
Tabela 8

Wyniki badań przeprowadzonych w celu wyznaczenia
krzywych Frencha stopów PA6N i MO58

MATERIAŁ	Lp.	NUMER PROBK	NAPRĘŻE- NIE WSTĘP- NE σ_{wi} [MPa]	LICZBA CYKLI NAPRĘŻENIA WSTĘPNEGO n_{wi} [cykle]	Z_{90}	N_6	LICZBA CYKLI NAPRĘŻENIA $\sigma_k = Z_{90}$	UWAGI
PA6N	1	1	240	$40 \cdot 10^3$	162	$5 \cdot 10^7$	$1570,0 \cdot 10^3$	złom
	2	2	230				$6684,7 \cdot 10^3$	złom
	3	3	220				$5 \cdot 10^7$	brak złomu
	4	4	210				$5 \cdot 10^7$	brak złomu
	5	1	230	$100 \cdot 10^3$			$3704,0 \cdot 10^3$	złom
	6	2	220				$5 \cdot 10^7$	brak złomu
	7	3	210				$5 \cdot 10^7$	brak złomu
	8	1	220	$350 \cdot 10^3$			$5692,0 \cdot 10^3$	złom
	9	2	210				$32600,0 \cdot 10^3$	złom
	10	3	200				$5 \cdot 10^7$	brak złomu
	11	4	190				$5 \cdot 10^7$	brak złomu
	12	1	210	$500 \cdot 10^3$			$6155,0 \cdot 10^3$	złom
	13	2	200				$5 \cdot 10^7$	brak złomu
	14	3	190				$5 \cdot 10^7$	brak złomu
MO58	1	1	210	$50 \cdot 10^3$	183	$2 \cdot 10^7$	$3352,4 \cdot 10^3$	złom
	2	2	200				$6513,2 \cdot 10^3$	złom
	3	3	195				$2 \cdot 10^7$	brak złomu
	4	4	190				$10465,0 \cdot 10^3$	złom
	5	5	185				$2 \cdot 10^7$	brak złomu
	6	1	210	$216 \cdot 10^3$			$2310,4 \cdot 10^3$	złom
	7	2	200				$4612,1 \cdot 10^3$	złom
	8	3	195				$7216,0 \cdot 10^3$	złom
	9	4	190				$2 \cdot 10^7$	brak złomu
	10	5	185				$2 \cdot 10^7$	brak złomu
	11	1	200	$500 \cdot 10^3$			$2025,1 \cdot 10^3$	złom
	12	2	195				$3108,9 \cdot 10^3$	złom
	13	3	190				$9270,5 \cdot 10^3$	złom
	14	4	185				$2 \cdot 10^7$	brak złomu
	15	1	200	$800 \cdot 10^3$			$1084,0 \cdot 10^3$	złom
	16	2	195				$2451,5 \cdot 10^3$	złom
	17	3	190				$6728,2 \cdot 10^3$	złom
	18	4	185				$2 \cdot 10^7$	brak złomu

Tabela 9

Wyniki pomiarów żywotności duralu PA6N przy programowanych przebiegach naprężenia oraz ich opracowanie statystyczne. Przebieg o rosnącej sekwencji naprężeń, naprężeniu początkowym $\sigma_p = \sigma_{a \min}$, liczbie cykli w bloku $n_0 \sim N$.

PA6N								$\sigma_p = \sigma_{amin} ; n_o \sim N$
Lp.	OZNACZ. POZIOMU	NUMER PRÓBK	POZIOM NAPRĘŻ. $\sigma_{amax} = x_{ij}$ [MPa]	LICZBA BŁOKÓW DO ZŁOMU λ_{ij}	LICZBA CYKLI DO ZŁOMU $N_{ij} \cdot 10^{-3}$ [cykle]	$\log N_{ij} = y_{ij}$	WYNIKI POMOCNICZYCH OBLICZEŃ STATYSTYCZNYCH	
1	1	1	260	1,960	823,0	5,9153998	$\Sigma x = 5760$ $\Sigma y = 152,7192998$ $\Sigma x = 240$ $\Sigma y = 6,3633042$ $\Sigma x^2 = 1388800$ $\Sigma y^2 = 973,5187051$ $\Sigma xy = 36556,77406$ $\Sigma x^2 = 6400$ $\Sigma y^2 = 1,7193497$ $\Sigma xy = -95,85789$	
2		2		2,210	928,4	5,9677351		
3		3		2,408	1 011,2	6,0048371		
4		4		2,722	1 143,2	6,0581222		
5		5		2,905	1 220,0	6,0863598		
6		6		3,000	1 260,2	6,1004395		
7		7		3,717	1 561,1	6,1934307		
8		8		3,984	1 673,5	6,2236257		
9	2	1	240	2,820	1 692,1	6,2284260		
10		2		2,858	1 715,0	6,2342641		
11		3		2,976	1 786,5	6,2520030		
12		4		3,922	2 352,9	6,3716035		
13		5		3,933	2 360,0	6,3729120		
14		6		3,992	2 395,1	6,3793236		
15		7		4,761	2 856,4	6,4558190		
16		8		5,676	3 405,3	6,5321554		
17	3	1	220	2,681	3 217,4	6,5075050		
18		2		2,880	3,456,1	6,5385863		
19		3		3,414	4 096,6	6,6124236		
20		4		3,625	4 349,6	6,6384493		
21		5		3,772	4 526,2	6,6557337		
22		6		3,932	4 718,5	6,6738040		
23		7		5,750	6 900,0	6,8388491		
24		8		6,285	7 542,1	6,8774923		

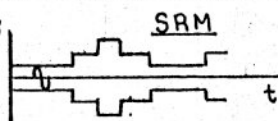
Równanie prostej regresji:

$$\hat{y} = 9,9579750 - 0,0149778 x$$

Tabela 10

Wyniki pomiarów żywotności duralu PA6N przy programowanych przebiegach naprężenia oraz ich opracowanie statystyczne.

Przebieg o rosnąco-malejącej sekwencji naprężeń, naprężeniu początkowym $\sigma_p = \sigma_{e \text{ min}}$, liczbie cykli w bloku $n_0 \sim N$.

PA6N				$\sigma_p = \sigma_{amin} ; n_o \sim N$			
Lp.	ZNACZ. POZIOMU	NUMER PRÓBK	POZIOM NAPRĘŻEN. $\sigma_{amax} = X_{ij}$ [MPa]	LICZBA BLOKÓW DO ZŁOMU λ_{ij}	LICZBA CYKLI DO ZŁOMU $N_{Lij} \cdot 10^{-3}$ [cykle]	$\log N_{Lij} = Y_{ij}$	WYNIKI POMOCNICZYCH OBLICZEŃ STATYSTYCZNYCH
1	1	1	260	1,256	527,5	5,7222225	$\Sigma x = 5760$ $\Sigma y = 149,0530663$ $\Sigma x = 240$ $\Sigma y = 6,2105444$ $\Sigma x^2 = 1388800$ $\Sigma y^2 = 927,8579756$ $\Sigma xy = 35662,0$ $\Sigma'x^2 = 6400$ $\Sigma'y^2 = 2,1572852$ $\Sigma'xy = -110,71392$
2		2		1,448	608,0	5,7839036	
3		3		1,476	620,1	5,7924617	
4		4		1,822	765,1	5,8837182	
5		5		2,045	859,1	5,9340437	
6		6		2,246	943,2	5,9746038	
7		7		2,256	947,4	5,9765334	
8		8		2,353	988,2	5,9948448	
9	2	1	240	1,896	1 137,5	6,0559514	
10		2		2,215	1 329,2	6,1235903	
11		3		2,267	1 360,1	6,1335708	
12		4		2,310	1 386,1	6,1417946	
13		5		2,394	1 436,2	6,1572149	
14		6		2,640	1 584,3	6,1998374	
15		7		2,754	1 652,4	6,2181152	
16		8		3,841	2 304,8	6,3626332	
17	3	1	220	2,272	2 726,6	6,4356214	
18		2		2,336	2 805,0	6,4479329	
19		3		2,570	3 084,0	6,4891144	
20		4		2,817	3 380,9	6,5290323	
21		5		3,393	4 071,2	6,6097224	
22		6		3,772	4 526,7	6,6557817	
23		7		4,250	5 100,4	6,7076042	
24		8		4,406	5 287,1	6,7232175	

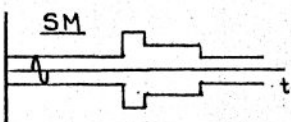
Równanie prostej regresji:

$$\hat{y} = 10,3623164 - 0,0172991 x$$

Table 11

Wyniki pomiarów żywotności duralu PA6N przy programowanych przebiegach naprężenia oraz ich opracowanie statystyczne.

Przebieg o malejącej sekwencji naprężeń, naprężeniu początkowym $\sigma_p = \sigma_{a \text{ min}}$, liczbie cykli w bloku $n_0 \sim N$

PA6 N				$\sigma_p = \sigma_{amin} ; n_0 \sim N$			
Lp.	OZNACZ. POZIOMU	NUMER PRÓBK	POZIOM NAPRĘŻENIE $\sigma_{amax} = x_{ij}$ [MPa]	LICZBA BŁOKÓW DO ZŁOMU λ_{ij}	LICZBA CYKLI DO ZŁOMU $N_{ij} \cdot 10^{-3}$ [cykle]	$\log N_{ij} = y_{ij}$	WYNIKI POMOCNICZYCH OBLICZEŃ STATYSTYCZNYCH
1	1	1	260	1,686	708,3	5,8502172	$\Sigma x = 5760$ $\Sigma y = 151,902536$ $\Sigma x = 240$ $\Sigma y = 6,3292723$ $\Sigma x^2 = 1388800$ $\Sigma y^2 = 963,8267912$ $\Sigma xy = 36341,70674$ $\Sigma x'^2 = 6400$ $\Sigma y'^2 = 2,3942729$ $\Sigma xy = -114,90189$
2		2		1,758	738,4	5,8682917	
3		3		2,148	902,3	5,9553510	
4		4		2,608	1 095,4	6,0395727	
5		5		2,677	1 122,9	6,0503411	
6		6		2,680	1 125,8	6,0514612	
7		7		2,681	1 126,2	6,0516155	
8		8		2,734	1 148,3	6,0600554	
9	2	1	240	1,913	1 147,6	6,0597905	
10		2		2,265	1 358,8	6,1331555	
11		3		2,962	1 777,4	6,2497852	
12		4		3,208	1 925,0	6,2844307	
13		5		3,799	2 279,4	6,3578205	
14		6		3,917	2 350,1	6,3710863	
15		7		4,178	2 506,7	6,3991024	
16		8		4,681	2 808,4	6,4484590	
17	3	1	220	2,757	3 308,1	6,5195786	
18		2		3,002	3 602,3	6,5565799	
19		3		3,669	4 402,8	6,6437290	
20		4		3,740	4 488,2	6,6520722	
21		5		4,668	5 601,1	6,7482733	
22		6		5,671	6 805,4	6,8328537	
23		7		5,792	6 950,2	6,8419973	
24		8		6,277	7 532,1	6,8769161	

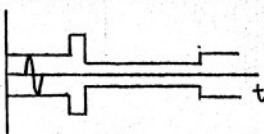
Równanie prostej regresji:

$$\hat{y} = 10,6380931 - 0,0179534 x$$

Tabela 12

Wyniki pomiarów żywotności duralu PA6N przy programowanych przebiegach naprężenia oraz ich opracowanie statystyczne.

Przebieg o rosnącej sekwencji naprężeń, naprężeniu początkowym $\sigma_n = \sigma_{a\text{sr}}$, liczbie cykli w bloku $n_0 \sim N$.

PA6N				$\sigma_p = \sigma_{adr} ; n_0 \sim N$			
Lp.	OZNACZ. POZIOMU	NUMER PRÓBK	POZIOM NAPRĘŻENIA $\sigma_{amax} = x_{ij}$ [MPa]	LICZBA BŁOKÓW DO ZŁOMU λ_{ij}	LICZBA CYKLI DO ZŁOMU $N_{ij} \cdot 10^{-3}$ [cykle]	$\log N_{ij} = y_{ij}$	WYNIKI POMOCNICZYCH OBLICZEŃ STATYSTYCZNYCH
1	1	1	260	1,273	543,8	5,7281914	$\Sigma x = 5760$ $\Sigma y = 148,0889043$ $\Sigma x = 240$ $\Sigma y = 6,1703710$ $\Sigma x^2 = 1388800$ $\Sigma y^2 = 915,544047$ $\Sigma xy = 35454,23458$ $\Sigma x'^2 = 6400$ $\Sigma y'^2 = 1,780565$ $\Sigma xy = -87,10244$
2		2		1,302	546,9	5,7379079	
3		3		1,784	749,4	5,8747137	
4		4		1,795	753,9	5,8773137	
5		5		2,069	869,1	5,9390697	
6		6		2,141	899,2	5,9538563	
7		7		2,238	940,0	5,9731278	
8		8		2,300	966,0	5,9849771	
9	2	1	240	1,977	1 186,1	6,0741213	
10		2		2,006	1 203,9	6,0805904	
11		3		2,044	1 226,2	6,0885613	
12		4		2,109	1 265,4	6,1022278	
13		5		2,257	1 354,0	6,1316187	
14		6		3,172	1 903,5	6,2795529	
15		7		4,217	2 530,4	6,4031892	
16		8		4,544	2 726,5	6,4356055	
17	3	1	220	1,013	1 215,7	6,0848264	
18		2		1,255	1 506,2	6,1778826	
19		3		1,650	1 980,4	6,2967529	
20		4		2,232	2 798,9	6,4469874	
21		5		2,638	3 166,0	6,5005109	
22		6		3,088	3 705,0	6,5687882	
23		7		3,372	4 046,8	6,6071117	
24		8		4,594	5 513,4	6,7414195	

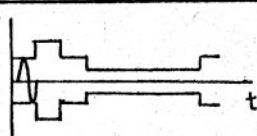
Równanie prostej regresji:

$$\hat{y} = 9,4367125 - 0,0136098 x$$

Tabela 13

Wyniki pomiarów żywotności duralu FA6N przy programowanych przebiegach naprężenia oraz ich opracowanie statystyczne.

Przebieg o rosnąco-malejącej sekwencji naprężeń, naprężeniu początkowym $\sigma_p = \sigma_a$ śr, liczbie cykli w bloku $n_0 \sim N$.

PA6N				$\sigma_p = \sigma_{asr} ; n_0 \sim N$			
Lp.	OZNACZ. POZIOMU	NUMER PRÓBK	POZIOM NAPRĘŻENIA $\sigma_{omax} = x_{ij}$ [MPa]	LICZBA BŁOKÓW DO ZŁOMU λ_{ij}	LICZBA CYKLI DO ZŁOMU $N_{ij} \cdot 10^{-3}$ [cykle]	$\log N_{ij} = y_{ij}$	WYNIKI POMOCNICZYCH OBLICZEŃ STATYSTYCZNYCH
1	1	1	260	1,139	478,3	5,6797004	$\Sigma x = 5760$ $\Sigma y = 148,0380877$ $\Sigma x = 240$ $\Sigma y = 6,1682537$ $\Sigma x^2 = 1388800$ $\Sigma y^2 = 915,5498894$ $\Sigma xy = 35418,50407$ $\Sigma x'^2 = 6400$ $\Sigma y'^2 = 2,4134144$ $\Sigma xy' = -110,63697$
2		2		1,211	508,8	5,7065471	
3		3		1,739	730,4	5,8635608	
4		4		1,783	748,9	5,8744238	
5		5		1,919	806,1	5,9063889	
6		6		1,940	814,8	5,9110510	
7		7		2,060	865,2	5,9371165	
8		8		2,061	865,6	5,9373172	
9	2	1	240	1,555	933,3	5,9698816	
10		2		1,796	1 077,5	6,0324173	
11		3		1,970	1 182,2	6,0726909	
12		4		2,038	1 223,1	6,0874620	
13		5		2,275	1 365,0	6,1351326	
14		6		2,427	1 456,3	6,1632508	
15		7		2,682	1 609,1	6,2065830	
16		8		2,682	1 609,2	6,2066100	
17	3	1	220	1,189	1 427,0	6,1544240	
18		2		2,129	2 555,0	6,4073909	
19		3		2,280	2 736,2	6,4371478	
20		4		2,687	3 224,6	6,5084758	
21		5		3,160	3 792,0	6,5788683	
22		6		4,073	4 888,0	6,6891312	
23		7		4,197	5 036,1	6,7020943	
24		8		6,100	7 420,3	6,8704215	

Równanie prostej regresji:

$$\hat{y} = 10,3171399 - 0,0172870 x$$

Tabela 14

Wyniki pomiarów żywotności duralu PA6N przy programowanych przebiegach naprężenia oraz ich opracowanie statystyczne..

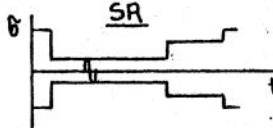
Przebieg o malejącej sekwencji naprężeń, naprężeniu początkowym $\sigma_p = \sigma_{a\text{ sr}}$, liczbie cykli w bloku $n_0 \sim N$.

Lp.	OZNACZ. POZIOMU σ	NUMER PRÓBK i	POZIOM NAPRĘŻENIA $\sigma_{amax} = x_{ij}$ [MPa]	LICZBA BLOKÓW DO ZŁOMU λ_{ij}	LICZBA CYKLI DO ZŁOMU $N_{ij} \cdot 10^{-3}$ [cykle]	$\log N_{ij} = y_{ij}$	WYNIKI POMOCNICZYCH OBLICZEŃ STATYSTYCZNYCH
1	1	1	260	1,375	577,6	5,7616272	$\Sigma x = 5760$ $\Sigma y = 149,0919811$ $\Sigma x = 240$ $\Sigma y = 6,2121659$ $\Sigma x^2 = 1388800$ $\Sigma y^2 = 927,8324617$ $\Sigma xy = 35689,06328$ $\Sigma'x^2 = 6400$ $\Sigma'y^2 = 1,6483442$ $\Sigma'xy = -93,01218$
2		2		1,726	724,9	5,8602781	
3		3		1,920	806,2	5,9064428	
4		4		1,928	809,8	5,9083778	
5		5		1,937	813,7	5,9104643	
6		6		2,021	849,0	5,9289077	
7		7		2,189	919,5	5,9635517	
8		8		2,944	1 236,5	6,0921941	
9	2	1	240	2,220	1 331,7	6,1244064	
10		2		2,305	1 383,1	6,1408222	
11		3		2,410	1 446,1	6,1601983	
12		4		2,563	1 537,6	6,1868434	
13		5		2,827	1 696,4	6,2295283	
14		6		2,924	1 754,4	6,2441286	
15		7		3,242	1 945,2	6,2889643	
16		8		4,212	2 528,1	6,4027942	
17	3	1	220	1,618	1 941,9	6,2882269	
18		2		1,631	1 957,4	6,2916796	
19		3		2,369	2 843,3	6,4538227	
20		4		2,522	3 026,2	6,4808976	
21		5		2,808	3 369,1	6,5275139	
22		6		2,922	3 506,0	6,5448119	
23		7		3,378	4 485,4	6,6518012	
24		8		4,619	5 542,4	6,7436979	

Tabela 15

Wyniki pomiarów żywotności duralu PA6N przy programowanych przebiegach naprężenia oraz ich opracowanie statystyczne.

Przebieg o rosnącej sekwencji naprężeń, naprężeniu początkowym $\sigma_p = \sigma_{a \max}$, liczbie cykli w bloku $n_0 \sim N$.

PA6N						$\sigma_p = \sigma_{amax} ; n_0 \sim N$	
Lp.	OZNACZ. POZIOMU	NUMER PRÓBK	POZIOM NAPRĘŻENIA $\sigma_{amax} \cdot x_{ij}$ [MPa]	LICZBA BLOKÓW DO ZŁOMU λ_{ij}	LICZBA CYKLI DO ZŁOMU $N_{ij} \cdot 10^{-3}$ [cykle]	$\log N_{ij} = y_{ij}$	WYNIKI POMOCNICZYCH OBLICZEŃ STATYSTYCZNYCH
1	1	1	260	1,545	649,0	5,8122447	$\Sigma x = 5760$ $\Sigma y = 148,7763412$ $\Sigma x = 240$ $\Sigma y = 6,1990142$ $\Sigma x^2 = 1388800$ $\Sigma y^2 = 923,8769177$ $\Sigma xy = 35619,16262$ $\Sigma x'^2 = 6400$ $\Sigma y'^2 = 1,6102636$ $\Sigma xy' = -87,15926$
2		2		1,765	741,2	5,8699354	
3		3		1,965	825,5	5,9167171	
4		4		1,982	832,6	5,9204364	
5		5		1,998	839,2	5,9238655	
6		6		2,322	975,1	5,9890492	
7		7		2,792	1 172,5	6,0691128	
8		8		3,272	1 374,2	6,1380499	
9	2	1	240	1,623	973,7	5,9884252	
10		2		1,826	1 095,5	6,0396124	
11		3		1,918	1 150,6	6,0609244	
12		4		2,012	1 207,5	6,0818871	
13		5		2,024	1 214,1	6,0842545	
14		6		2,914	1 748,6	6,2426905	
15		7		3,067	1 840,4	6,2649122	
16		8		3,969	2 381,5	6,3768506	
17	3	1	220	1,608	1 930,1	6,2855798	
18		2		1,764	2 116,4	6,3255977	
19		3		2,159	2 590,8	6,4134339	
20		4		2,547	3 056,8	6,4852670	
21		5		2,785	3 342,4	6,5240584	
22		6		2,947	3 536,0	6,5485123	
23		7		3,794	4 552,9	6,6582881	
24		8		4,758	5 710,0	6,7566361	

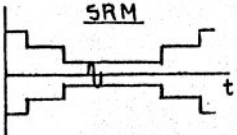
Równanie prostej regresji:

$$\hat{y} = 9,4674864 - 0,0136186 x$$

Tabela 16

Wyniki pomiarów żywotności duralu PA6N przy programowanych przebiegach naprężenia oraz ich opracowanie statystyczne.

Przebieg o rosnąco-malejącej sekwencji naprężeń, naprężeniu początkowym $\sigma_p = \sigma_{a \max}$, liczbie cykli w bloku $n_0 \sim N$.

PA6N				$\sigma_p = \sigma_{amax} ; n_0 \sim N$			
Lp.	OZNACZ. POZIOMU	NUMER PROBKI	POZIOM NAPREŻENIA $\sigma_{amax} \cdot x_{ij}$ [MPa]	LICZBA BŁOKÓW DO ZŁOMU λ_{ij}	LICZBA CYKLI DO ZŁOMU $N_{ij} \cdot 10^{-3}$ [cykle]	$\log N_{ij} = y_{ij}$	WYNIKI POMOCNICZYCH OBLICZEŃ STATYSTYCZNYCH
1	1	1	260	1,015	426,4	5,6298172	$\Sigma x = 5760$ $\Sigma y = 145,5620195$ $\Sigma x = 240$ $\Sigma y = 6,0650841$ $\Sigma x^2 = 1388800$ $\Sigma y^2 = 884,6937325$ $\Sigma xy = 34865,97705$ $\Sigma x'^2 = 6400$ $\Sigma y'^2 = 1,8478359$ $\Sigma xy = -88,90762$
2		2		1,044	438,7	5,6421676	
3		3		1,345	565,0	5,7520484	
4		4		1,560	655,4	5,8165064	
5		5		1,612	676,9	5,8305245	
6		6		1,722	723,4	5,8593785	
7		7		1,998	839,4	5,9239690	
8		8		2,035	854,7	5,9318137	
9	2	1	240	1,137	682,4	5,8340390	
10		2		1,202	721,2	5,8580567	
11		3		1,884	1 130,1	6,0531169	
12		4		1,913	1 147,7	6,0598284	
13		5		2,010	1 206,2	6,0814193	
14		6		2,016	1 209,5	6,0826059	
15		7		2,183	1 309,8	6,1172050	
16		8		3,018	1 811,0	6,2579184	
17	3	1	220	1,012	1 213,9	6,0841829	
18		2		1,021	1 225,5	6,0883133	
19		3		1,134	1 360,5	6,1336985	
20		4		1,786	2 142,9	6,3310019	
21		5		2,149	2 579,0	6,4414513	
22		6		2,890	3 468,4	6,5401292	
23		7		3,054	3 654,2	6,5627923	
24		8		3,974	4 786,7	6,6800362	

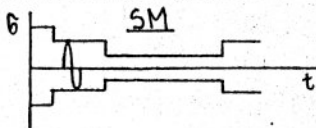
Równanie prostej regresji:

$\hat{y} = 9,3991197n - 0,0138918 x$

Tabela 17

Wyniki pomiarów żywotności duralu PA6N przy programowanych przebiegach naprężenia oraz ich opracowanie statystyczne.

Przebieg o malejącej sekwencji naprężeń, naprężeniu początkowym $\sigma_p = \sigma_{a \max}$, liczbie cykli w bloku $n_0 \sim N$.

PA6N				$\sigma_p = \sigma_{amax} ; n_o \sim N$			
Lp.	OZNACZ. POZIOMU	NUMER PRÓBK	POZIOM NAPRĘŻENIA $\sigma_{amax} = x_{ij}$ [MPa]	LICZBA BLOKÓW DO ŻŁOMU λ_{ij}	LICZBA CYKLI DO ŻŁOMU $N_{ij} \cdot 10^{-3}$ [cykle]	$\log N_{ij} = y_{ij}$	WYNIKI POMOCNICZYCH OBLICZEŃ STATYSTYCZNYCH
1	1	1	260	1,295	544,0	5,7355998	$\Sigma x = 5760$ $\Sigma y = 146,5169$ $\Sigma x = 240$ $\Sigma y = 6,1048718$ $\Sigma x^2 = 1388800$ $\Sigma y^2 = 895,6901398$ $\Sigma xy = 35091,83747$ $\Sigma x^2 = 6400$ $\Sigma y^2 = 1,2233907$ $\Sigma xy = -72,21853$
2		2		1,321	554,7	5,7440582	
3		3		1,562	656,2	5,8170362	
4		4		1,719	721,9	5,8584770	
5		5		2,004	841,6	5,9251057	
6		6		2,020	848,3	5,9285495	
7		7		2,040	857,0	5,9329808	
8		8		2,076	872,1	5,9405663	
9	2	1	240	1,593	955,6	5,9802761	
10		2		1,869	1 120,1	6,0492568	
11		3		2,100	1 260,0	6,1003705	
12		4		2,205	1 323,1	6,1215927	
13		5		2,236	1 341,6	6,1276230	
14		6		2,509	1 505,3	6,1776231	
15		7		3,254	1 952,3	6,2905465	
16		8		3,278	1 966,5	6,2936939	
17	3	1	220	0,885	1 062,5	6,0263289	
18		2		1,056	1 266,6	6,1026395	
19		3		1,442	1 730,0	6,2380461	
20		4		1,605	1 926,5	6,2847690	
21		5		1,863	2 236,1	6,3494912	
22		6		2,095	2 514,2	6,4003998	
23		7		2,591	3 109,7	6,4927185	
24		8		3,311	3 973,5	6,5991732	

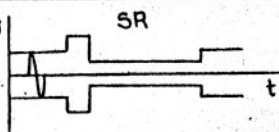
Równanie prostej regresji:

$$\hat{y} = 8,8130666 - 0,0112841 x$$

Tabela 18

Wyniki pomiarów żywotności duralu PA6N przy programowanych przebiegach naprężenia oraz ich opracowanie statystyczne.

Przebieg o rosnącej sekwencji naprężeń, naprężeniu początkowym $\sigma_p = \sigma_{a\text{ gr}}$, liczbie cykli w bloku $n_0 = \text{const.}$

PA6N				$\sigma_p = \sigma_{asr} ; n_0 = \text{const}$			
Lp.	OZNACZ. POZIOMU	NUMER PRÓBK	POZIOM NAPRĘŻENIA $\sigma_{amax} = x_{ij}$ [MPa]	LICZBA BŁOKÓW DO ZŁOMU λ_{ij}	LICZBA CYKLI DO ZŁOMU $N_{ij} \cdot 10^{-3}$ [cykle]	$\log N_{ij} = y_{ij}$	WYNIKI POMOCNICZYCH OBLICZEŃ STATYSTYCZNYCH
1	1	1	260	1,273	534,8	5,7281914	$\Sigma x = 5760$ $\Sigma y = 147,9412471$ $\Sigma x = 240$ $\Sigma y = 6,1642186$ $\Sigma x^2 = 1388800$ $\Sigma y^2 = 913,842249$ $\Sigma xy = 35416,14976$ $\Sigma x'^2 = 6400$ $\Sigma y'^2 = 1,9000578$ $\Sigma xy = -89,74954$
2		2		1,302	546,9	5,7379079	
3		3		1,784	749,4	5,8747137	
4		4		1,795	753,9	5,8773137	
5		5		2,069	869,1	5,9390967	
6		6		2,141	899,2	5,9538563	
7		7		2,238	940,0	5,9731278	
8		8		2,300	966,0	5,9849771	
9	2	1	240	2,366	993,8	5,9972990	
10		2		2,950	1 239,2	6,0931414	
11		3		3,184	1 337,1	6,1261639	
12		4		3,291	1 382,1	6,1405395	
13		5		3,295	1 384,1	6,1411675	
14		6		3,989	1 675,5	6,2241444	
15		7		4,249	1 784,7	6,2515652	
16		8		5,226	2 195,0	6,3414345	
17	3	1	220	2,935	1 232,6	6,0908222	
18		2		3,445	1 446,9	6,1604385	
19		3		5,052	2 121,9	6,3267249	
20		4		5,287	2 220,7	6,3464899	
21		5		7,794	3 273,7	6,5150389	
22		6		8,064	3 387,0	6,5298152	
23		7		13,015	5 466,4	6,7377014	
24		8		16,840	7 073,0	6,8496031	

Równanie prostej regresji:

$$\hat{y} = 9,5298262 - 0,0140234 x$$

Tabela 19

Wyniki pomiarów żywotności duralu PA6N przy programowanych przebiegach naprężenia oraz ich opracowanie statystyczne.

Przebieg o rosnąco-malejącej sekwencji naprężeń, naprężeniu początkowym $\sigma_p = \sigma_a$ gr, liczbie cykli w bloku $n_0 = \text{const.}$

PAGN		SRM		$\theta_p = \theta_{adr} ; n_0 = \text{const}$		
lp.	OZNACZ. POZIOMU	NUMER PRÓBK	POZIOM NAPRĘŻENIA $\theta_{amax} = x_{ij}$ [MPa]	LICZBA BŁOKÓW DO ZŁOMU λ_{ij}	LICZBA CYKLI DO ZŁOMU $N_{ij} \cdot 10^{-3}$ [cykle]	$\log N_{ij} = y_{ij}$
1	1	1	260	1,139	478,3	5,6797004
2		2		1,211	508,8	5,7065471
3		3		1,739	730,4	5,8635608
4		4		1,783	748,9	5,8744238
5		5		1,919	806,1	5,9063889
6		6		1,940	814,8	5,9110510
7		7		2,060	865,2	5,9371165
8		8		2,061	865,6	5,9373172
9	2	1	240	1,389	583,4	5,7659664
10		2		2,134	896,2	5,9524049
11		3		2,193	921,1	5,9643068
12		4		2,692	1 130,6	6,0533090
13		5		3,022	1 269,2	6,1035301
14		6		3,065	1 287,3	6,1096798
15		7		3,115	1 307,7	6,1165081
16		8		3,149	1 322,4	6,1213628
17	3	1	220	2,399	1 007,7	6,0033313
18		2		2,675	1 123,7	6,0506504
19		3		2,687	1 128,4	6,0524631
20		4		4,615	1 938,5	6,2874658
21		5		6,920	2 906,2	6,4633255
22		6		9,055	3 803,2	6,5801492
23		7		13,006	5 462,4	6,7373835
24		8		15,166	6 369,6	6,8041212

WYNIKI POMOCNICZYCH OBLICZEŃ STATYSTYCZNYCH

$\sum x = 5760$

$\sum y = 145,9820546$

$\sum x^2 = 240$

$\sum y^2 = 6,0825856$

$\sum x^2 = 1388800$

$\sum y^2 = 889,9740481$

$\sum xy = 34952,43759$

$\sum x^2 = 6400$

$\sum y^2 = 2,025704$

$\sum xy = 83,25551$

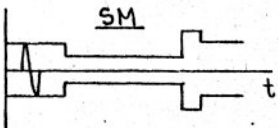
Równanie prostej regresji:

$\hat{y} = 9,2046671 - 0,0130087 x$

Table 20

Wyniki pomiarów żywotności duralu PA6N przy programowanych przebiegach naprężenia oraz ich opracowanie statystyczne.

Przebieg o malejącej sekwencji naprężeń, naprężeniu początkowym $\sigma_p = \sigma_{gr}$, liczbie cykli w bloku $n_0 = \text{const.}$

PA6N				$\sigma_p = \sigma_{adr} ; n_0 = \text{const}$			
Lp.	OZNACZ. POZIOMU	NUMER PRÓBK	POZIOM NAPRĘŻENIA $\sigma_{amax} = x_{ij}$ [MPa]	LICZBA BLOKÓW DO ZŁOMU λ_{ij}	LICZBA CYKLI DO ZŁOMU $N_{ij} \cdot 10^{-3}$ [cykle]	$\log N_{ij} = y_{ij}$	WYNIKI POMOCNICZYCH OBLICZEŃ STATYSTYCZNYCH
1	1	1	260	1,375	577,6	5,7616272	$\Sigma x = 5760$ $\Sigma y = 148,7778924$ $\Sigma x = 240$ $\Sigma y = 6,1990788$ $\Sigma x^2 = 1388800$ $\Sigma y^2 = 923,9961984$ $\Sigma xy = 35623,32325$ $\Sigma x^2 = 6400$ $\Sigma y^2 = 1,7103126$ $\Sigma xy = -83,37092$
2		2		1,726	724,9	5,8602781	
3		3		1,920	806,2	5,9064428	
4		4		1,928	809,8	5,9083778	
5		5		1,937	813,7	5,9104643	
6		6		2,021	849,0	5,9289077	
7		7		2,189	919,5	5,9635517	
8		8		2,944	1 236,5	6,0921941	
9	2	1	240	2,923	1 227,6	6,0890569	
10		2		2,930	1 230,8	6,0901875	
11		3		2,934	1 232,4	6,0907517	
12		4		3,205	1 346,0	6,1290451	
13		5		3,892	1 634,5	6,2133849	
14		6		3,999	1 679,5	6,2251800	
15		7		4,025	1 690,7	6,2280665	
16		8		5,763	2 420,4	6,3838871	
17	3	1	220	4,183	1 757,0	6,2447718	
18		2		4,852	2 038,0	6,3092042	
19		3		6,378	2 678,9	6,4279565	
20		4		6,696	2 812,4	6,4490771	
21		5		8,770	3 683,6	6,5662725	
22		6		8,956	3 761,7	6,5753842	
23		7		11,249	4 724,6	6,6743650	
24		8		14,836	6 231,0	6,7494577	

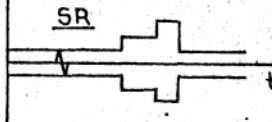
Równanie prostej regresji:

$\hat{y} = 9,3254483 - 0,0130267 x$

Tabela 21

Wyniki pomiarów żywotności mosiądzu M058 przy programowanych przebiegach naprężenia oraz ich opracowanie statystyczne.

Przebieg o rosnącej sekwencji naprężeń, naprężeniu początkowym $\sigma_p = \sigma_a \min$, liczbie cykli w bloku $n_0 \sim N$.

M058		SR 		$\sigma_p = \sigma_{amin} ; n_0 \sim N$			
Lp.	OZNACZ. POZIOMU	NUMER PRÓBK	POZIOM NAPRĘŻENIA $\sigma_{amax} = x_{ij}$ [MPa]	LICZBA BLOKÓW DO ZŁOMU λ_{ij}	LICZBA CYKLI DO ZŁOMU $N_{ij} \cdot 10^{-3}$ [cykle]	Log $N_{ij} = y_{ij}$	WYNIKI POMOCNICZYCH OBLICZEŃ STATYSTYCZNYCH
1	1	1	280	1,953	234,4	5,3699576	$\Sigma x = 3900$ $\Sigma y = 91,8153448$ $\Sigma x = 260$ $\Sigma y = 6,121023$ $\Sigma x^2 = 1018000$ $\Sigma y^2 = 564,6877263$ $\Sigma xy = 23772,84619$ $\Sigma' x^2 = 4000$ $\Sigma' y^2 = 2,6898903$ $\Sigma' xy = -99,14345$
2		2		3,221	386,5	5,5871495	
3		3		3,680	441,6	5,6450291	
4		4		4,692	563,0	5,7505084	
5		5		5,704	684,5	5,8353734	
6	2	1	260	2,647	953,0	5,9790929	
7		2		2,890	1 040,5	6,0172421	
8		3		2,938	1 057,5	6,0242804	
9		4		3,951	1 422,3	6,1529912	
10		5		5,654	2 035,4	6,3086498	
11	3	1	240	3,674	3 527,2	6,5474301	
12		2		3,926	3 769,5	6,5762837	
13		3		4,253	4 082,5	6,6109262	
14		4		4,996	4 796,4	6,6809154	
15		5		5,588	5 364,2	6,7295050	

Równanie prostej regresji:

$\hat{y} = 12,5653471 - 0,0247859 x$

Tabela 22

Wyniki pomiarów żywotności mosiądzu M058 przy programowanych przebiegach naprężenia oraz ich opracowanie statystyczne.

Przebieg o malejącej sekwencji naprężeń, naprężeniu początkowym $\sigma_p = \sigma_{a \min}$, liczbie cykli w bloku $n_0 \sim N$.

Lp.		OZNACZ. POZIOMU	NUMER PROBKI	POZIOM NAPRĘŻENIA $\sigma_{amax} = x_{ij}$ [MPa]	LICZBA BŁOKÓW DO ZŁOMU λ_{ij}	LICZBA CYKLI DO ZŁOMU $N_{ij} \cdot 10^{-3}$ [cykle]	$\log N_{ij} = y_{ij}$	WYNIKI POMOCNICZYCH OBLICZEŃ STATYSTYCZNYCH
1		1	1	280	1,862	223,5	5,3492775	$\sum x = 3900$ $\sum y = 89,1712716$ $\sum x = 260$ $\sum y = 5,9447514$ $\sum x^2 = 4018000$ $\sum y^2 = 531,9775631$ $\sum xy = 23103,54419$
2			2		1,983	238,4	5,3373062	
3			3		2,713	325,6	5,5126844	
4			4		3,436	412,3	5,6152133	
5			5		4,196	503,5	5,7019995	
6		2	1	260	1,924	692,8	5,8406079	$\sum x^2 = 4018000$ $\sum y^2 = 531,9775631$ $\sum xy = 23103,54419$ $\sum x^2 = 4000$ $\sum y^2 = 1,8765179$ $\sum xy = -80,98642$
7			2		2,231	803,1	5,9047696	
8			3		2,676	963,2	5,9837165	
9			4		3,707	1 334,5	6,1253186	
10			5		3,965	1 427,5	6,1545761	
11		3	1	240	1,782	1 711,1	6,2332754	$\sum x^2 = 4000$ $\sum y^2 = 1,8765179$ $\sum xy = -80,98642$
12			2		1,845	1 771,6	6,2483657	
13			3		1,988	1 908,6	6,2807149	
14			4		2,304	2 212,1	6,3448047	
15			5		3,284	3 152,4	6,4986413	

Równanie prostej regresji:

$$\hat{y} = 11,2088674 - 0,0202466 x$$

Tabela 23

Wyniki pomiarów żywotności mosiądzu M058 przy programowanych przebiegach naprężenia oraz ich opracowanie statystyczne.

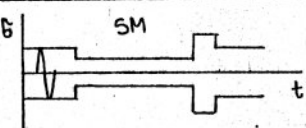
Przebieg o rosnącej sekwencji naprężeń, naprężeniu początkowym $\sigma_p = \sigma_{gr}$, liczbie cykli w bloku $n_0 \sim N$.

[illegible]

Table 24

Wyniki pomiarów żywotności mosiądzu M058 przy programowanych przebiegach naprężenia oraz ich opracowanie statystyczne.

Przebieg o malejącej sekwencji naprężeń, naprężeniu początkowym $\sigma_p = \sigma_{gr}$, liczbie cykli w bloku $n_0 \sim N$.

MD58				$\sigma_p = \sigma_{atr} ; n_o \sim N$			
Lp.	OZNACZ. POZIOMU	NUMER PRÓBK	POZIOM NAPRĘŻEN $\sigma_{amax} \cdot x_{ij}$ [MPa.]	LICZBA BŁOKÓW DO ZŁOMU λ_{ij}	LICZBA CYKLI DO ZŁOMU $N_{ij} \cdot 10^{-3}$ [cykle]	$\log N_{ij} = y_{ij}$	WYNIKI POMOCNICZYCH OBLICZEŃ STATYSTYCZNYCH
1	1	1	280	2,482	297,9	5,4740705	$\Sigma x = 5460$ $\Sigma y = 128,6158739$ $\Sigma x = 260$ $\Sigma y = 6,1245654$ $\Sigma x^2 = 1425200$ $\Sigma y^2 = 791,3290155$ $\Sigma xy = 33308,01056$ $\Sigma x^2 = 5600$ $\Sigma y^2 = 3,6126817$ $\Sigma xy = -132,11664$
2		2		2,720	326,4	5,5137501	
3		3		3,300	396,0	5,5976952	
4		4		3,936	472,3	5,6742179	
5		5		4,252	510,2	5,7077404	
6		6		4,331	519,7	5,7157527	
7		7		4,920	590,4	5,7711463	
8	2	1	260	2,212	796,2	5,9010222	
9		2		2,240	806,5	5,9066044	
10		3		2,787	1 003,2	6,0013875	
11		4		3,830	1 378,8	6,1395013	
12		5		6,028	2 170,0	6,3364597	
13		6		6,766	2 435,9	6,3866594	
14		7		7,470	2 689,3	6,4296392	
15	3	1	240	2,935	2 817,9	6,4499256	
16		2		3,095	2 971,6	6,4729903	
17		3		3,135	3 009,3	6,4784655	
18		4		3,527	3 386,2	6,5839012	
19		5		4,010	3 850,0	6,5854607	
20		6		5,125	4 920,1	6,6919739	
21		7		6,535	6 273,5	6,7975099	

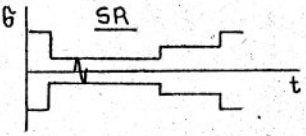
Równanie prostej regresji:

$\hat{y} = 12,2585522 - 0,0235923 x$

Tabela 25

Wyniki pomiarów żywotności mosiądzu MO58 przy programowanych przebiegach naprężenia oraz ich opracowanie statystyczne.

Przebieg o rosnącej sekwencji naprężeń, naprężeniu początkowym $\sigma_p = \sigma_{a \max}$, liczba cykli w bloku $n_0 \sim N$.

M058				$\sigma_p = \sigma_{amax} ; n_0 \sim N$			
Lp.	OZNACZ. POZIOMU	NUMER PRÓBK	POZIOM NAPRĘŻENIA $\sigma_{amax} = x_{ij}$ [MPa]	LICZBA BLOKÓW DO ZŁOMU λ_{ij}	LICZBA CYKLI DO ZŁOMU $N_{ij} \cdot 10^{-3}$ [cykle]	$\log N_{ij} = y_{ij}$	WYNIKI POMOCNICZYCH OBLICZEŃ STATYSTYCZNYCH
1	1	1	280	2,054	246,5	5,3918169	$\sum x = 3900$ $\sum y = 88,3348694$
2		2		2,370	284,4	5,4539296	
3		3		3,009	361,1	5,5576275	
4		4		3,106	372,7	5,5713594	
5		5		3,798	455,8	5,6587743	
6	2	1	260	1,361	490,0	5,6901961	$\sum x = 260$ $\sum y = 5,8889913$ $\sum x^2 = 1018000$ $\sum y^2 = 521,8285914$ $\sum xy = 22891,03933$
7		2		1,876	675,3	5,8294967	
8		3		1,941	698,7	5,8442907	
9		4		2,003	721,1	5,8579955	
10		5		3,078	1 108,0	6,0445398	
11	3	1	240	1,408	1 351,5	6,1308150	$\sum x^2 = 4000$ $\sum y^2 = 1,6253147$ $\sum xy = -76,02671$
12		2		1,945	1 867,5	6,2711443	
13		3		1,945	1 867,5	6,2712606	
14		4		1,982	1 903,3	6,2795072	
15		5		3,161	3 034,7	6,4821158	

Równanie prostej regresji:

$$\hat{y} = 10,8307273 - 0,0190067 x$$

Tabela 26

Wyniki pomiarów żywotności mosiądzu M058 przy programowanych przebiegach naprężenia oraz ich opracowanie statystyczne.

Przebieg o malejącej sekwencji naprężeń, naprężeniu początkowym $\sigma_p = \sigma_{a \max}$, liczbie cykli w bloku $n_0 \sim N$.

M058

$$\sigma_p = \sigma_{amax} \quad ; \quad n_o \sim N$$

Lp.	OZNACZ. POZIOMU i	NUMER PRÓBK j	POZIOM NAPRĘŻENIA $\sigma_{amax} = x_{ij}$ [MPa]	LICZBA BLOKÓW DO ZŁOMU λ_{ij}	LICZBA CYKLI DO ZŁOMU $N_{ij} \cdot 10^{-3}$ [cykle]	$\log N_{ij} = y_{ij}$	WYNIKI POMOCNICZYCH OBLICZEŃ STATYSTYCZNYCH
1	1	1	280	1,260	151,2	5,1795518	$\Sigma x = 3900$ $\Sigma y = 88,2764352$ $\Sigma x^2 = 260$ $\Sigma y^2 = 5,8850957$ $\Sigma xy = 22851,40332$
2		1,817		218,0	5,3384665		
3		2,027		243,2	5,3859636		
4		2,601		312,1	5,4942938		
5		4,067		488,0	5,6884198		
6	2	1	260	1,148	413,2	5,6161603	$\Sigma x^2 = 1018000$ $\Sigma y^2 = 522,4182319$ $\Sigma xy = 22851,40332$ $\Sigma'x^2 = 4000$ $\Sigma'y^2 = 2,9029645$ $\Sigma'xy = -100,46982$
7		1,315		473,5	5,6753200		
8		1,767		636,2	5,8035937		
9		2,259		813,4	5,9103042		
10		3,295		1 186,3	6,0741945		
11	3	1	240	1,902	1 826,3	6,2615721	
12		2		2,309	2 217,1	6,3457853	
13		3		2,704	2 595,8	6,4142712	
14		4		3,316	3 183,6	6,5029185	
15		5		4,012	3 851,5	6,5856299	

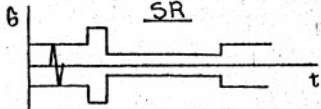
Równanie prostej regresji:

$$\hat{y} = 12,4156340 - 0,0251175 x$$

Tabela 27

Wyniki pomiarów żywotności mosiądzu M058 przy programowanych przebiegach naprężenia oraz ich opracowanie statystyczne.

Przebieg o rosnącej sekwencji naprężeń, naprężeniu początkowym $\sigma_p = \sigma_{a\text{sr}}$, liczbie cykli w bloku $n_0 = \text{const.}$

M058  $\sigma_p = \sigma_{a\text{sr}} ; n_0 = \text{const}$							
Lp.	OZNACZ. POZIOMU	NUMER PROBKI	POZIOM NAPRĘŻENIA $\sigma_{\text{amax}} = x_{ij}$ [MPa]	LICZBA BLOKÓW DO ZŁOMU λ_{ij}	LICZBA CYKLI DO ZŁOMU $N_{ij} \cdot 10^{-3}$ [cykle]	$\log N_{ij} = y_{ij}$	WYNIKI POMOCNICZYCH OBLICZEŃ STATYSTYCZNYCH
1	1	1	280	2,168	260,2	5,4153073	$\Sigma x = 5460$ $\Sigma y = 125,7142723$ $\Sigma x = 260$ $\Sigma y = 5,9863939$ $\Sigma x^2 = 1425200$ $\Sigma y^2 = 755,5952742$ $\Sigma xy = 32571,09192$ $\Sigma x'^2 = 5600$ $\Sigma y'^2 = 3,0201195$ $\Sigma x'y' = -114,61887$
2		2		2,315	277,8	5,4437322	
3		3		3,042	365,1	5,5624118	
4		4		3,242	389,1	5,5900612	
5		5		3,269	392,3	5,5936183	
6		6		3,341	400,9	5,6030361	
7		7		3,639	436,7	5,6401832	
8	2	1	260	4,660	559,2	5,7475672	
9		2		5,422	650,6	5,8133141	
10		3		6,303	756,4	5,8787515	
11		4		8,288	984,6	5,9976484	
12		5		13,036	1 564,3	6,1943200	
13		6		17,302	2 076,2	6,3109481	
14		7		18,138	2 176,5	6,3377587	
15	3	1	240	12,134	1 456,1	6,1631912	
16		2		12,208	1 465,0	6,1658376	
17		3		15,328	1 839,4	6,2646762	
18		4		15,360	1 843,2	6,2655725	
19		5		25,593	3 071,2	6,4873081	
20		6		31,404	3 768,5	6,5761685	
21		7		37,788	4 534,6	6,6565390	

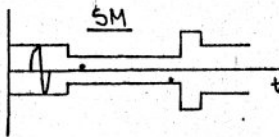
Równanie prostej regresji:

$$\hat{y} = 11,3079699 - 0,0204676 x$$

Tabela 28

Wyniki pomiarów żywotności mosiądzu M058 przy programowanych przebiegach naprężenia oraz ich opracowanie statystyczne.

Przebieg o malejącej sekwencji naprężeń, naprężeniu początkowym $\sigma_0 = \sigma_a$ gr, liczbie cykli w bloku $n_0 = \text{const.}$

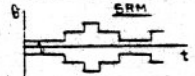
M05B				$\sigma_p = \sigma_{adr} ; n_0 = const$			
Lp.	OZNACZ. POZIOMU I	NUMER PROBKI	POZIOM NAPRĘŻENIA $\sigma_{amax} = x_{ij}$ [MPa]	LICZBA BLOKÓW DO ZŁOMU λ_{ij}	LICZBA CYKLI DO ZŁOMU $N_{ij} \cdot 10^{-3}$ [cykle]	$\log N_{ij} = y_{ij}$	WYNIKI POMOCNICZYCH OBLICZEŃ STATYSTYCZNYCH
1	1	1	280	2,482	297,9	5,4740705	$\Sigma x = 5460$ $\Sigma y = 124,7600473$ $\Sigma x = 260$ $\Sigma y = 5,9409546$ $\Sigma x^2 = 1425200$ $\Sigma y^2 = 743,4530147$ $\Sigma xy = 32345,08565$ $\Sigma x'^2 = 5600$ $\Sigma y'^2 = 2,2592338$ $\Sigma x'y = -92,52664$
2		2		2,720	326,4	5,5137501	
3		3		3,300	396,0	5,5976952	
4		4		3,936	472,3	5,6742179	
5		5		4,252	510,2	5,7077404	
6		6		4,331	519,7	5,7157527	
7		7		4,920	580,4	5,7711463	
8	2	1	260	2,994	359,3	5,5554572	$\Sigma x = 260$ $\Sigma y = 5,9409546$ $\Sigma x^2 = 1425200$ $\Sigma y^2 = 743,4530147$ $\Sigma xy = 32345,08565$ $\Sigma x'^2 = 5600$ $\Sigma y'^2 = 2,2592338$ $\Sigma x'y = -92,52664$
9		2		4,078	489,4	5,6896640	
10		3		5,219	626,3	5,7967824	
11		4		7,700	924,0	5,9656720	
12		5		8,097	971,6	5,9874875	
13		6		9,024	1 082,9	6,0345883	
14		7		13,066	1 567,9	6,1953184	
15	3	1	240	8,203	984,4	5,9931716	$\Sigma x = 260$ $\Sigma y = 5,9409546$ $\Sigma x^2 = 1425200$ $\Sigma y^2 = 743,4530147$ $\Sigma xy = 32345,08565$ $\Sigma x'^2 = 5600$ $\Sigma y'^2 = 2,2592338$ $\Sigma x'y = -92,52664$
16		2		10,110	1 213,2	6,0839324	
17		3		10,166	1 219,9	6,0863242	
18		4		18,754	2 250,5	6,3522790	
19		5		26,238	3 148,6	6,4981175	
20		6		26,998	3 239,7	6,5105048	
21		7		30,005	3 600,6	6,5563749	

Równanie prostej regresji:

$$\hat{y} = 10,2368342 - 0,0165226 x$$

Wyznaczenie 95 %-owych obszarów ufności :
 A - obliczenie wariancji oszacowania oraz 1/2 PU,
 B - 95 %-owe przedziały ufności wartości średnich i pojedynczych spostrzeżeń,
 C - sprawdzenie istotności korelacji liniowej

A.

PA6N				$\hat{\sigma}_p = \hat{\sigma}_{0min} : \sigma_0 \sim N$					
POZIOM NAPRĘŻENIA x_i [MPa]	106. ZYWIOTNOŚCI W6 RÓWNANIA REGRÉSJI $\hat{y}_i$	WARIANCJA OSZACOWANIA				1/2 PRZEDZIAŁU UFNOŚCI			
		$s^2(\hat{y})$	$s^2(b)$	$s^2(\hat{y}) \cdot 10^3$	$s^2(\hat{y}_i)$	$t_{n-2; \frac{\alpha}{2}}$	$t_{n-2; \frac{\alpha}{2}} \cdot s(\hat{y}_i)$	$t_{n-2; \frac{\alpha}{2}} \cdot s(\hat{y}_i)$	
$x_1 = 260$	5,8645634	0,0110018	$1,719 \cdot 10^{-6}$	1,1460208	0,0121478	$t_{23; 0,05} = 2,074$	0,0702110	0,2285902	
$\bar{x}_2 = 240$	6,2105444			0,4584083	0,0114602		0,0444053	0,2220265	
$x_3 = 220$	6,5565254			1,1460208	0,0121478		0,0702110	0,2285902	

B.

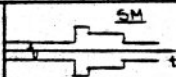
POZIOM NAPRĘŻENIA x_i [MPa]	95%-OWE PRZEDZIAŁY UFNOŚCI									
	$b \pm 1/2 \text{ PU}(b)$		$\hat{y}_i \pm 1/2 \text{ PU}(\hat{y}_i)$				$\hat{y}_i \pm 1/2 \text{ PU}(\hat{y}_i)$			
	b_d	b_g	$\hat{y}_{id}$	N_{id}	$\hat{y}_{ig}$	N_{ig}	$\hat{y}_{id}$	N_{id}	$\hat{y}_{ig}$	N_{ig}
$x_1=260$	-0,0145798	-0,0200184	5,7943524	622,8	5,9347744	860,5	5,6359732	432,5	6,0931536	1239,2
$\bar{x}_2=240$			6,1664914	1467,2	6,2549497	1798,7	5,9885179	973,9	6,4325709	2707,5
$x_3=220$			6,4863144	3064,2	6,6267364	4233,9	6,3279352	2127,8	6,7851156	6097,0

C.

WIELKOŚĆ	WARTOŚĆ			ANALIZA	
	$\sum'$	f	s^2	$F_{\alpha/2; f; n-f}$	WNIOSEK
$\sum e^2$	1,9152456		1,9152456	$F_{1; 21; 0,05} = 4,32$	1. Frejżeta korelacja jest istotna. 2. Dodatková zmienność nie wywołana ani korelacją ani błędem pomiaru jest nieistotna.
f_e		1			
$\sum \hat{y}^2$	0,0159477		0,0159477		
f_B		1			
$\sum \sum y^2$	0,2260919		0,0118996		
f_b		21			
$\sum y^2$	2,1572852		0,0937950		
f_o		23			

Wyznaczenie 95 %-owych obszarów ufności :
 A - obliczenie wariancji oszacowania oraz 1/2 PU
 B - 95 %-owe przedziały ufności wartości średnich oraz pojedynczych spostrzeżeń
 C - sprawdzenie istotności korelacji liniowej

Tabela 31

PA6N		$\hat{\sigma}_p = \hat{\sigma}_{amm} ; n_0 \sim N$							
POZIOM NAPREŻENIA x_i [MPa]	LOG. ZWYKŁOŚCI WŁ. OSZACOWANIA REGRESJI $\hat{y}_i$	WARIANCJA OSZACOWANIA				1/2 PRZEDZIAŁU UFNOŚCI			
		$\hat{\sigma}^2(\hat{y}_i)$	$\hat{\sigma}^2(b)$	$\hat{\sigma}^2(\hat{y}_i) \cdot 10^3$	$\hat{\sigma}^2(\hat{y}_i)$	$t_{n-2, \alpha/2}$	$t_{n-2, \alpha/2} \cdot \hat{\sigma}(\hat{y}_i)$	$t_{n-2, \alpha/2} \cdot \hat{\sigma}(\hat{y}_i)$	$t_{n-2, \alpha/2} \cdot \hat{\sigma}(\hat{y}_i)$
$x_1=260$	5,9702038	0,0150632	$2,354 \cdot 10^{-6}$	1,5690833	0,0166323	2,074	0,0821546	0,0821546	0,2674761
$\bar{x}_2=240$	6,3292723			0,6276333	0,0156908		0,0519591	0,0519591	0,2597953
$x_3=220$	6,6883406			1,5690833	0,0166323		0,0821546	0,0821546	0,2674761

B.

POZIOM NAPREŻENIA x_i [MPa]	95 %-OWE PRZEDZIAŁY UFNOŚCI									
	$b \pm 1/2 PU(b)$		$\hat{y}_i \pm 1/2 PU(\hat{y}_i)$				$\hat{y}_i \pm 1/2 PU(\hat{y}_i)$			
	b_d	b_g	$\hat{y}_{id}$	N_{id}	$\hat{y}_{ig}$	N_{ig}	$\hat{y}_{id}$	N_{id}	$\hat{y}_{ig}$	N_{ig}
$x_1=260$	0,0147716	0,0211352	5,8880492	772,8	6,0523584	1128,1	5,7027277	504,3	6,2376799	1728,5
$\bar{x}_2=240$			6,2773132	1893,7	6,3812314	2405,6	6,0694770	1173,6	6,5890676	3882,1
$x_3=220$			6,6061860	4038,2	6,7704952	5895,2	6,4208645	2635,5	6,9558167	9032,7

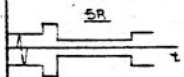
C.

WIELKOŚĆ	WARTOŚĆ			ANALIZA			
	Σ'	f	S^2	$\frac{r_{12}^2}{\frac{r_{11}}{n_1} \frac{r_{22}}{n_2}}$	$\frac{r_{13}^2}{\frac{r_{11}}{n_1} \frac{r_{33}}{n_3}}$	$\frac{r_{23}^2}{\frac{r_{22}}{n_2} \frac{r_{33}}{n_3}}$	$F_{1;21;0,05}$
$\Sigma' e^2$	2,0628819		2,0628819	139,3368	1,3837	$F_{1;21;0,05} = 4,32$	1. Przyjęta korelacja jest istotna. 2. Dodatkowa zmienność nie wywołana ani korelacją ani błędem pomiaru jest nieistotna.
f_e		1					
$\Sigma' \hat{y}^2$	0,0204864		0,0204864				
f_R		1					
$\Sigma \Sigma' \hat{y}^2$	0,3109046		0,014805				
f_b		21					
$\Sigma \hat{y}^2$	2,3942729		0,1040988				
f_o		23					

Wyznaczenie 95 %-owych obszarów ufności :
 A - obliczenie wariancji oszacowania oraz 1/2 PU,
 B - 95 %-owe przedziały ufności wartości średnich oraz pojedynczych spostrzeżeń,
 C - sprawdzenie istotności korelacji liniowej

Tabela 32

A.

PA6N				$\sigma_p = \sigma_{asr} ; n_0 \sim N$			
POZIOM NAPRĘŻENIA X_i [MPa]	LOG. ZWROTNOŚCI WŚ RÓWNANIA REGRESJI $\hat{y}_i$	WARIANCJA OSZACOWANIA				1/2 PRZEDZIAŁU UFNOŚCI	
		$s^2(\hat{y})$	$s^2(b)$	$s^2(\hat{y}_i) \cdot 10^3$	$s^2(\hat{y}_i)$	$t_{n-2; \alpha/2} \cdot s(\hat{y}_i)$	$t_{n-2; \alpha/2} \cdot s(\hat{y}_i)$
$x_1 = 260$	5,8981759	0,0270510	4,227 · 10 ⁻⁶	2,8178124	0,0298688	$t_{2,1000} = 2,074$ 4,264 · 10 ⁻³	0,1100943
$\bar{x}_2 = 240$	6,1703710			1,1271249	0,0281781		0,0696297
$x_3 = 220$	6,4425661			2,8178124	0,0298688		0,1100943

B.

POZIOM NAPRĘŻENIA X_i [MPa]	95 %-OWE PRZEDZIAŁY UFNOŚCI									
	$b \pm 1/2 PU(b)$		$\hat{y}_i \pm 1/2 PU(\hat{y}_i)$				$\hat{y}_i \pm 1/2 PU(\hat{y}_i)$			
	b_d	b_g	$\hat{y}_{id}$	N_{id}	$\hat{y}_{ig}$	N_{ig}	$\hat{y}_{id}$	N_{id}	$\hat{y}_{ig}$	N_{ig}
$x_1 = 260$	0,0093459	0,0178737	5,7880816	613,9	6,0082702	1019,2	5,5397349	346,5	6,2566169	1805,6
$\bar{x}_2 = 240$			6,1007413	1261,1	6,2400007	1737,8	5,8222224	664,1	6,5185196	3300,0
$x_3 = 220$			6,3324718	2150,2	6,5526604	3569,9	6,0841251	1213,7	6,8010071	6324,2

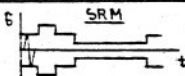
C.

WIELKOŚĆ	WARTOŚĆ			ANALIZA	
	Σ'	f	S^2	$F_{1;21;0,05}$	WNIOSEK
Σc^2	1,7854430		1,1854430	42,5553 2,7484	1. Przyjęta korelacja jest istotna. 2. Dodatkowa zmienność nie wywołana ani korelacją ani błędem pomiaru jest nieistotna.
f_c		1			
$\Sigma \hat{y}^2$	0,0101356		0,0101356		
f_R		1			
$\Sigma \Sigma \hat{y}^2$	0,5849864		0,0278565		
f_b		21			
Σy^2	1,7805650		0,0774159		
f_o		23			
				$F_{1;21;0,05} = 4,32$ $F_{21;1;0,05} = 248$	

Wyznaczenie 95 %-owych obszarów ufności :
 A - obliczenie wariancji oszacowania oraz 1/2 PU,
 B - 95 %-owe przedziały ufności wartości średnich oraz pojedynczych spostrzeżeń,
 C - sprawdzenie istotności korelacji liniowej

Tabela 33

A.

PA6N				$\sigma_p = \sigma_{a_{sr}}; n_0 \sim N$					
POZIOM NAPRĘŻENIA x_i [MPa]	LOG. ZWYKŁOŚCI W RÓWNANIA REGRES. $\hat{y}_i$	WARIANCJA OSZACOWANIA			$1/2$ PRZEDZIAŁU UFNOŚCI				
		$S^2(\hat{y})$	$S^2(b)$	$S^2(\hat{y}_i) \cdot 10^3$	$S^2(\hat{y}_i)$	$t_{n-2; \alpha/2}$	$t_{n-2; \alpha/2} \cdot S(\hat{y}_i)$	$t_{n-2; \alpha/2} \cdot S(\hat{y}_i)$	
$x_1 = 260$	5,8225131	0,0227650	$3,557 \cdot 10^{-6}$	2,3713541	0,0251364	$t_{22; 0,05} = 2,074$	$3,912 \cdot 10^{-3}$	0,1009966	0,3288216
$\bar{x}_2 = 240$	6,1682537			0,9485416	0,0237135			0,0636759	0,3193792
$x_3 = 220$	6,5139941			2,3713541	0,0251364			0,1009966	0,3288216

B.

POZIOM NAPRĘŻENIA x_i [MPa]	95% - DWE PRZEDZIAŁY UFNOŚCI									
	$b \pm 1/2 PU(b)$		$\hat{y}_i \pm 1/2 PU(\hat{y}_i)$				$\hat{y}_i \pm 1/2 PU(\hat{y}_i)$			
	b_d	b_e	$\hat{y}_{id}$	N_{id}	$\hat{y}_{ig}$	N_{ig}	$\hat{y}_{id}$	N_{id}	$\hat{y}_{ig}$	N_{ig}
$x_1 = 260$	-0,013754	-0,0211986	5,7215165	526,6	5,9235097	838,5	5,4936915	311,7	6,1513147	1416,8
$\bar{x}_2 = 240$			6,1043778	1271,7	6,2321296	1706,6	5,8488745	706,1	6,4876329	3073,5
$\bar{x}_3 = 220$			6,4129975	2588,2	6,6149907	4120,9	6,1851725	1531,7	6,8422101	6953,6

C.

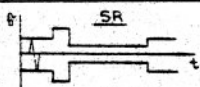
WIELKOŚĆ	WARTOŚĆ			ANALIZA	
	Σ'	f	S^2	$F_{1; 2; 10; 05} = 4,32$	WNIOSEK
Σe^2	1,9125842		1,9125842	87,4928	1,9110
f_e		1			
$\Sigma \hat{y}^2$	0,0417721		0,0417721		
f_R		2			
$\Sigma \hat{y}^2$	0,4590581		0,0218599		
f_b		21			
$\Sigma \hat{y}^2$	2,4134144		0,1049311		
f_o		23			

1. Przyjęta korelacja jest istotna.
 2. Dodatkowa zmienność nie wywołana ani korelacją ani błędem pomiaru jest nieistotna.

Wyznaczenie 95 %-owych obszarów ufności :
 A - obliczenie wariancji oszacowania oraz 1/2 PU,
 B - 95 %-owe przedziały ufności wartości średnich oraz pojedynczych spostrzeżeń,
 C - sprawdzenie istotności korelacji liniowej

Tabela 38

PABN



$\sigma_p = 6_{atr}$
 $n_0 = \text{const} = 4,2 \cdot 10^4 \text{ cykli}$

POZIOM NAPRĘŻENIA x_i [MPa]	LOG TYMOTNOŚCI WIE RÓWNIANIA REGRESYJ $\hat{y}_i$	WARIANCJA OSZACOWANIA				1/2 PRZEDZIAŁU UFNOŚCI			
		$s^2(\hat{y}_i)$	$s^2(b)$	$s^2(\hat{y}_i) \cdot 10^3$	$s^2(\hat{y}_i)$	$t_{n-2;0,5}$	$t_{n-2;0,5}$	$t_{n-2;0,5} \cdot s(\hat{y}_i)$	$t_{n-2;0,5} \cdot s(\hat{y}_i)$
$x_1 = 260$	5,8837422	0,0291575	$1,6$	3,0372395	0,0321947	$t_{21;0,05} = 2,074$	$t_{21;0,05} = 2,074$	0,1143005	0,3721354
$\bar{x}_2 = 240$	6,1642102			1,2148958	0,0303724			0,0722900	0,3614501
$x_3 = 220$	6,4446762			3,0372395	0,0321947			0,1143005	0,3721354

B.

POZIOM NAPRĘŻENIA x_i [MPa]	95 %-OWE PRZEDZIAŁY UFNOŚCI							
	$b \pm 1/2 \text{ PU}(b)$		$\hat{y}_i \pm 1/2 \text{ PU}(\hat{y}_i)$				$\hat{y}_i \pm 1/2 \text{ PU}(\hat{y}_i)$	
	b_d	b_g	$\hat{y}_{ia}$	N_{ia}	$\hat{y}_{ig}$	N_{ig}	$\hat{y}_{ia}$	N_{ia}
$x_1 = 260$	0,0095966	0,0184502	5,7694417	588,1	5,9980427	995,5	5,5116068	324,8
$\bar{x}_2 = 240$			6,0919202	1235,7	6,2365002	1723,9	5,8027601	635,0
$x_3 = 220$			6,4332482	2711,7	6,5589787	3622,3	6,0725428	1181,8

C.

WIELKOŚĆ	WARTOŚĆ			ANALIZA			
	Σ'	f	s^2	F_0^0	F_2^0	$F_{1;21;0,05}$	WNIOSEK
Σc^2	1,2585906		1,2585906	41,2655	15,2730	$F_{1;21;0,05} = 4,32$ $F_{21;1;0,05} = 248$	1. Przyjęta korelacja jest istotna. 2. Dodatkowa zmienność nie wywołana ani korelacją ani błędem pomiaru jest istotna.
f_c		1					
$\Sigma \hat{y}^2$	0,0000002		0,0000002				
f_R		1					
$\Sigma \Sigma \hat{y}^2$	0,6414670		0,0305460				
f_b		21					
$\Sigma \hat{y}^2$	1,9000578		0,0826112				
f_o		23					

Table 40

A

POZIOM NAPRĘŻENIA $\bar{x}_i$ [MPa]	LOG. ZWYKŁOŚCI WŁ. RÓWNIANNA REGRESJI $\bar{y}_i$	WARIANCJA OSZACOWANIA				$\frac{1}{2}$ PRZEDZIAŁU WFNOSCI			
		$s^2(\bar{y})$	$s^2(b)$	$s^2(\bar{y}) \cdot 40^2$	$s^2(\bar{y}_i)$	$t_{n-2; \alpha}$	$t_{n-2; \alpha} \cdot s(b)$	$t_{n-2; \alpha} \cdot s(\bar{y}_i)$	$t_{n-2; \alpha} \cdot s(\bar{y}_i)$
$x_1 = 260$	5,9385063	0,0283357	$4,434 \cdot 10^{-6}$	2,9537187	0,0313094	$t_{02,005} = 2,074$	$4,367 \cdot 10^{-3}$	0,1127180	0,3669832
$\bar{x}_2 = 240$	6,1990403			1,1814874	0,0295372			0,0712891	0,356446
$x_3 = 220$	6,4595743			2,9537187	0,0313094			0,1127180	0,3669832

B.

POZIOM NAPRĘŻENIA X_i [MPa]	95% - OWE PRZEDZIAŁU UFNOŚCI									
	$b \pm 1/2 PU(b)$		$\hat{Q}_i \pm 1/2 PU(\hat{Q}_i)$				$\hat{Y}_i \pm 1/2 PU(\hat{Y}_i)$			
	b_d	b_g	$\hat{Q}_{id}$	N_{id}	$\hat{Q}_{ig}$	N_{ig}	$\hat{Y}_{id}$	N_{id}	$\hat{Y}_{ig}$	N_{ig}
$x_1 = 260$	-0,0086596	-0,0173938	5,8257883	669,6	6,0512243	1125,2	5,5715231	372,8	6,3054895	2020,6
$\bar{x}_2 = 240$			6,1277512	1342,0	6,2703294	1863,5	3,8425943	696,0	6,5554663	3593,2
$x_3 = 220$			6,3468563	2222,6	6,4622923	2899,3	6,0925911	1237,6	6,8265575	6707,4

C.

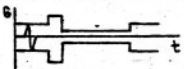
WIELKOŚĆ	WARTOŚĆ			ANALIZA			
	Σ	f	S^2	$\frac{\Sigma f^2}{n}$	$\frac{\Sigma f^3}{n^2}$	$\frac{\Sigma f^4}{n^3}$	$F_{f;f;dos}$
Σc^2	1,0860485		1,0860485	65,8182	16,8363	$F_{1;21;0,05} = 4,22$	1. Przyjęta korelacja jest istotna. 2. Dodatkowa zmienność nie wywołana ani korelacją ani błędem pomiaru jest istotna.
f_c		1					
Σy^2	0,2777219		0,2777219				
f_R		1					
$\Sigma \Sigma y^2$	0,3465422		0,0165020				
f_b		21					
Σy^2	1,7103126		0,0743614				
f_o	1	23					

- Wyznaczenie 95 %-owych obszarów ufności :
- A - obliczenie wariancji oszacowanie oraz 1/2 PU ,
- B - 95 %-owe przedziały ufności wartości średnich oraz pojedynczych spostrzeżeń ,
- C - sprawdzenie istotności korelacji liniowej

Tablica 43

A.

M058



$\sigma_p = \sigma_{asr} ; n_0 \sim N$

POZIOM NAPREŻENIA x_i [MPa]	LOG. ŻYWIOTNOŚCI WE RÓWNANIA REGRESJI $\hat{y}_i$	WARIANCJA OSZACOWANIA				1/2 PRZEDZIAŁU UFNOŚCI			
		$s^2(\hat{y})$	$s^2(b)$	$s^2(\hat{y}_i) \cdot 10^3$	$s^2(\hat{y}_i)$	$t_{n-2; \alpha/2} \cdot s(\hat{y}_i)$	$t_{n-2; \alpha/2} \cdot s(b)$	$t_{n-2; \alpha/2} \cdot s(\hat{y}_i)$	$t_{n-2; \alpha/2} \cdot s(\hat{y}_i)$
$x_1 = 280$	5,5762828	0,0216224	$3,861 \cdot 10^{-6}$	2,5740952	0,0241965	$t_{n-2; \alpha/2} = 2,093$	$4,113 \cdot 10^{-3}$	0,1061895	0,3255708
$\bar{x}_2 = 260$	6,1237468			1,0296380	0,0226520			0,0671601	0,3150067
$x_3 = 240$	6,6712108			2,5740952	0,0241965			0,1061895	0,3255708

B.

POZIOM NAPREŻENIA x_i [MPa]	95%-OWE PRZEDZIAŁY UFNOŚCI									
	$b \pm 1/2 PU(b)$		$\hat{y}_i \pm 1/2 PU(\hat{y}_i)$				$\hat{y}_i \pm 1/2 PU(\hat{y}_i)$			
	b_d	b_g	$\hat{y}_{id}$	N_{id}	$\hat{y}_{ig}$	N_{ig}	$\hat{y}_{id}$	N_{id}	$\hat{y}_{ig}$	N_{ig}
$x_1 = 280$	0,0232605	0,0314859	5,4700933	295,2	5,6824723	481,4	5,2507120	178,1	5,9018536	797,7
$\bar{x}_2 = 260$			6,0565867	1139,2	6,1909069	1552,1	5,8087381	643,8	6,4387555	2746,3
$x_3 = 240$			6,5650213	3673,0	6,7774003	5989,6	6,3456400	3216,4	6,9967816	9926,2

C.

WIELKOŚĆ	WARTOŚĆ			ANALIZA	
	Σ'	f	s^2	r_{01}^2 r_{02}^2 r_{12}^2	$F_{1;18;0,05} = 4,41$
$\Sigma' c^2$	4,1960510		4,1960510		
f_c		1			
$\Sigma' \hat{y}^2$	0,0565264		0,0565264		
f_R		1			
$\Sigma \Sigma' y^2$	0,3812906		0,0211828		
f_b		18			
$\Sigma' y^2$	4,6068680		0,2303434		
f_o		20			
				198,0876	2,6685
					$F_{1;18;0,05} = 4,41$

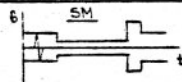
1. Przyjęta korelacja jest istotna.
2. Dodatkowa zmienność nie wywołana ani korelacją ani błędem pomiaru jest nieistotna.

Wyznaczenie 95 %-owych obszarów ufności :
 A - obliczenie wariancji oszacowania oraz 1/2 PU,
 B - 95 %-owe przedziały ufności wartości średnich oraz pojedynczych spostrzeżeń,
 C - sprawdzenie istotności korelacji liniowej

Tabela 44

A.

M05B



$\sigma_p = \sigma_{\text{osr}} ; n_0 \sim N$

POZIOM NAPRĘŻENIA x_i [MPa]	LOG. ZMIENNOŚCI (wg RÓWNIANIA REGRESJI) $\hat{y}_i$	WARIANCJA OSZACOWANIA				1/2 PRZEDZIAŁU		UFNOŚCI
		$s^2(\hat{y}_i)$	$s^2(b)$	$s^2(\hat{y}_i) \cdot 10^3$	$s^2(\hat{y}_i)$	$t_{n-2; \alpha/2} \cdot s(b)$	$t_{n-2; \alpha/2} \cdot s(\hat{y}_i)$	$t_{n-2; \alpha/2} \cdot s(\hat{y}_i)$
$x_1 = 280$	5,6527082	0,0260919	4,659 · 10 ⁻⁶	3,1061785	0,0291981	$t_{18; 0,05} = 2,093$ 4,518 · 10 ⁻³	0,1166434	0,3576404
$\bar{x}_2 = 260$	6,1245654			1,2424714	0,0273344		0,0737755	0,3460382
$x_3 = 240$	6,5964002			3,1061785	0,0291981		0,1166494	0,3576404

B.

POZIOM NAPRĘŻENIA x_i [MPa]	95 %-OWE PRZEDZIAŁY UFNOŚCI									
	$b \pm 1/2 \text{ PU}(b)$		$\hat{y}_i \pm 1/2 \text{ PU}(\hat{y}_i)$				$\hat{y}_i \pm 1/2 \text{ PU}(\hat{y}_i)$			
	b_d	b_g	$\hat{y}_{id}$	N_{id}	$\hat{y}_{ig}$	N_{ig}	$\hat{y}_{id}$	N_{id}	$\hat{y}_{ig}$	N_{ig}
$x_1 = 280$	5,5360745	5,8081101	5,5360588	343,6	5,7693576	588,0	5,2950678	197,3	6,0103486	1024,1
$\bar{x}_2 = 260$	6,0190745	6,2381101	6,0507899	1124,1	6,1983409	1578,8	5,7785272	600,5	6,4706036	2955,3
$x_3 = 240$	6,4797508	6,7018101	6,4797508	3018,2	6,7130496	5164,8	6,2387598	1732,8	6,9540406	8995,8

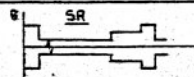
C.

WIELKOŚĆ	WARTOŚĆ			ANALIZA			
	Σ'	f	S^2	$F_{1;18;0,05}$	$F_{18;1;0,05}$	$F_{1;1;0,05}$	WNIOSKI
$\Sigma' e^2$	3,1169297		3,1169297	115,8064	2,3841	$F_{1;18;0,05} = 4,41$ $F_{18;1;0,05} = 247$	1. Przyjęta korelacja jest istotna. 2. Dodatkowa zmienność nie wywołana ani korelacją ani błędem pomiaru jest nieistotna.
f_e		1					
$\Sigma' \hat{y}^2$	0,0112892		0,0112892				
f_R		1					
$\Sigma \Sigma y^2$	0,4844628		0,0269150				
f_b		18					
Σy^2	3,6126817		0,1806341				
f_0		20					

- Wyznaczenie 95 %-owych obszarów ufności :
 A - obliczenie wariancji oszacowania oraz 1/2 PU,
 B - 95 %-owe przedziały ufności wartości średnich oraz pojedynczych spostrzeżeń,
 C - sprawdzenie istotności korelacji liniowej

Tablica 45

A.

M058		$\hat{\sigma}_p = \hat{\sigma}_{amax}$; $n_0 \sim N$						
POZIOM NAPRĘŻENIA x_i [MPa]	LOG. ZYMNOTOŚCI WG RÓWANIA REGRESJI $\hat{y}_i$	WARIANCJA OSZACOWANIA				1/2 PRZEDZIAŁU UFNOŚCI		
		$s^2(\hat{y}_i)$	$s^2(b)$	$s^2(\hat{y}_i) \cdot 10^3$	$s^2(\hat{y}_i)$	$t_{n-2; \alpha/2} \cdot s(b)$	$t_{n-2; \alpha/2} \cdot s(\hat{y}_i)$	$t_{n-2; \alpha/2} \cdot s(\hat{y}_i)$
$x_1 = 280$	5,5088513	0,0130691	$3,467 \cdot 10^{-6}$	2,3115166	0,0161806	$t_{n-2; \alpha/2} = 2,160$	0,1038490	0,2747585
$\bar{x}_2 = 260$	5,8869913			0,9246066	0,0147937	$4,022 \cdot 10^{-3}$	0,0656799	0,2627194
$x_3 = 240$	6,2691193	0,0130691		2,3115166	0,0161806		0,1038490	0,2747585

B.

POZIOM NAPRĘŻENIA x_i [MPa]	95 %-OWE PRZEDZIAŁY UFNOŚCI							
	$b \pm 1/2 PU(b)$		$\hat{y}_i \pm 1/2 PU(\hat{y}_i)$				$\hat{y}_i \pm 1/2 PU(\hat{y}_i)$	
	b_a	b_g	$\hat{y}_{ia}$	N_{ia}	$\hat{y}_{ig}$	N_{ig}	$\hat{y}_{ia}$	N_{ig}
$x_1 = 280$	5,0149846	5,0230288	5,4050023	254,1	5,6127003	409,9	5,2340928	171,4
$\bar{x}_2 = 260$			5,8233114	665,8	5,9546712	900,9	5,6262719	422,9
$x_3 = 240$			6,1652703	1463,1	6,3729682	2360,3	5,9943608	987,1

C.

WIELKOŚĆ	WARTOŚĆ			ANALIZA		
	Σ	f	S^2	$F_{0,05;1;12}$	$F_{0,05;12;14}$	WNIOSKI
Σc^2	1,4450152		1,4450152			1. Przyjęta korelacja jest istotna. 2. Dodatkowa zmienność nie wywołana ani korelacją ani błędem pomiaru jest nieistotna.
f_c		1				
$\Sigma \hat{y}^2$	0,0095517		0,0095517			
f_R		1				
$\Sigma \Sigma y^2$	0,1707478		0,0142290			
f_b		12				
Σy^2	1,6253147		0,1160939			
f_o		14				

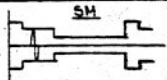
$F_{1;12;0,05} = 4,72$
 $F_{12;14;0,05} = 2,44$

Wyznaczenie 95 %-owych obszarów ufności :
 A - obliczenie wariancji oszacowania oraz 1/2 PU,
 B - 95 %-owe przedziały ufności wartości średnich oraz pojedynczych spostrzeżeń,
 C - sprawdzenie istotności korelacji liniowej

Tabela 46

A.

M058



$\sigma_p = \sigma_{amax}$
 $n_0 \sim N$

POZIOM NAPRĘŻENIA x_i [MPa]	LOG. ZWYKŁOŚCI W RÓWNIANIA REGRESYJNE $\hat{y}_i$	WARIANCJA OSZACOWANIA				1/2 PRZEDZIAŁU		UFNOŚCI
		$s^2(\hat{y}_i)$	$s^2(b)$	$s^2(\hat{y}_i) \cdot 10^3$	$s^2(\hat{y}_i)$	$t_{n-2; \frac{\alpha}{2}} \cdot s(\hat{y}_i)$	$t_{n-2; \frac{\alpha}{2}} \cdot s(\hat{y}_i)$	$t_{n-2; \frac{\alpha}{2}} \cdot s(\hat{y}_i)$
$x_1 = 280$	5,3827340	0,0291857	$7,296 \cdot 10^{-6}$	4,8642833	0,0340500	$t_{13; 0,05} = 2,160$	0,1506479	0,3985771
$\bar{x}_2 = 260$	5,8850840			1,9457133	0,0311314		0,0952781	0,3811124
$x_3 = 240$	6,3874340			4,8642833	0,0340500		0,1506479	0,3985771

B.

POZIOM NAPRĘŻENIA x_i [MPa]	95 %- OWE PRZEDZIAŁY UFNOŚCI							
	$b \pm 1/2 PU(b)$		$\hat{y}_i \pm 1/2 PU(\hat{y}_i)$				$\hat{y}_i \pm 1/2 PU(\hat{y}_i)$	
	b_d	b_g	$\hat{y}_{id}$	N_{id}	$\hat{y}_{ig}$	N_{ig}	$\hat{y}_{id}$	N_{id}
$x_1 = 280$	0,0192830	0,0305021	5,2320651	170,6	5,5333819	341,5	4,9841569	96,4
$\bar{x}_2 = 260$			5,7898059	616,3	5,9803621	955,8	5,5039716	319,1
$x_3 = 240$			6,2367864	1725,0	6,5380819	3452,1	5,9888569	974,7

C.

WIELKOŚĆ	WARTOŚĆ			ANALIZA			
	Σ'	f	s^2	$F_{1; 12; 0,05}$	$F_{1; 12; 0,05}$	$F_{1; 12; 0,05}$	WNIOSEK
$\Sigma' c^2$	2,5235462		2,5235462				
f_c		1					
$\Sigma' \hat{y}^2$	0,0358954		0,0358954				
f_R		1					
$\Sigma \Sigma' y^2$	0,3435229		0,0286269				
f_b		12					
$\Sigma' y^2$	2,9029645		0,2073546				
f_o		14					

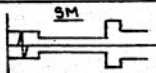
78,7213
1,2539
 $F_{1; 12; 0,05} = 4,72$

1. Przyjęta korelacja jest istotna.
 2. Dodatkowa zmienność nie wywołana ani korelacją ani błędem pomiaru jest nieistotna.

- Wyznaczenie 95 %-owych obszarów ufności :
- A - obliczenie wariancji oszacowania oraz $1/2$ PU,
 B - 95 %-owe przedziały ufności wartości średnich oraz pojedynczych spostrzeżeń,
 C - sprawdzenie istotności korelacji liniowej

A.

M058



$\sigma_p = \sigma_{asr}$; $n_0 = \text{const} = 1,2 \cdot 10^4$ cykli

POZIOM NAPRĘŻENIA x_i [MPa]	LOG. ZWYKŁOŚCI WE RÓWNIANIU REGRESJI $\hat{y}_i$	WARIANCJA OSZACOWANIA				1/2 PRZEDZIAŁU UFNOŚCI			
		$s^2(\hat{y})$	$s^2(b)$	$s^2(\hat{y}_i) \cdot 10^3$	$s^2(\hat{y}_i)$	$t_{0,2;n}$	$t_{0,2;n}(b)$	$t_{n-2;n} \cdot s(\hat{y})$	$t_{n-2;n} \cdot s(\hat{y}_i)$
$x_1 = 280$	5,6105062	0,0384449	$6,865 \cdot 10^{-6}$	4,5767737	0,0430217	$t_{0,2;n} = 2,093$	$5,484 \cdot 10^{-3}$	0,1415953	0,4341232
$\bar{x}_2 = 260$	5,9409546			1,8307095	0,0402756			0,0895528	0,4200396
$x_3 = 240$	6,2714102			4,5767737	0,0430217			0,1415953	0,4341232

B.

POZIOM NAPRĘŻENIA x_i [MPa]	95 %-OWE PRZEDZIAŁY UFNOŚCI									
	$b \pm 1/2 \text{ PU}(b)$		$\hat{y}_i \pm 1/2 \text{ PU}(\hat{y}_i)$				$\hat{y}_i \pm 1/2 \text{ PU}(\hat{y}_i)$			
	b_d	b_g	$\hat{y}_{id}$	N_{id}	$\hat{y}_{ig}$	N_{ig}	$\hat{y}_{id}$	N_{id}	$\hat{y}_{ig}$	N_{ig}
$x_1 = 280$	0,0110386	0,0220066	5,4689109	299,4	5,7521015	565,1	5,1763830	150,1	6,0446294	1108,2
$\bar{x}_2 = 260$			5,8514018	710,2	6,0305074	1072,8	5,5209150	331,8	6,3609942	2296,1
$x_3 = 240$			6,1298149	1348,4	6,4130055	2588,2	5,8372870	687,5	6,7055334	5076,1

C.

WIELKOŚĆ	WARTOŚĆ			ANALIZA			
	Σ'	f	s^2	$\frac{\sum x_i^2}{n}$	$\frac{\sum y_i^2}{n}$	$F_{\alpha; f_1; f_2; 0,05}$	WNIOSEKI
$\Sigma' x^2$	1,5287820		1,5287820	39,1763	1,3919	$F_{1; 18; 10; 0,05} = 4,41$	1. Przyjęta korelacja jest istotna. 2. Dodatkowa zmienność nie wywołana ani korelacją ani błędem pomiaru jest nieistotna.
f_c		1					
$\Sigma' \hat{y}^2$	0,0280356		0,0280356				
f_R		1					
$\Sigma \Sigma' y^2$	0,7024162		0,0390231				
f_b		18					
$\Sigma' y^2$	2,2592338		0,1129617				
f_a		20					

analiza wpływu sekwencji naprężeń na zmianę współczynnika
regresji szeregu F_{0.6N} przy przebiegach naprężenia,
w których $\sigma_p = \sigma_s \text{ min}$, $n_0 \sim N$:

Tabela 49

A, B - zestawienie danych oraz obliczenia częściowe,
C - analiza wariancyjna istotności wpływu

A.

SEKWENCJA NAPRĘŻEN	m	N _m	$\sum x$	$\sum x^2$	$\sum y$	$\sum y^2$	$\sum xy$
SR	1	24	5760	1388800	152,7192998	973,5167051	36556,77406
SRM	2	24	5760	1388800	149,0530663	927,8579756	35662,02196
SM	3	24	5760	1388800	151,9025360	963,8267912	36341,70674
$\sum_{m=1}^3$		72	17280	4166400	453,6749021	2865,2034719	108560,50278

B.

SEKWENCJA NAPRĘŻEN	$\sum x^2$	$\sum y^2$	$\sum xy$	$\sum c^2$	$\sum \hat{y}^2 + \sum \Sigma y^2$	b
SR	6400	1,7193497	-95,85789	1,4357399	0,2836098	-0,0149778
SRM	6400	2,1572852	-110,71392	1,9152456	0,2420396	-0,0172990
SM	6400	2,3942729	-114,90189	2,0628819	0,3313910	-0,0179534
$\sum_{m=1}^3$	19200	6,2709078	-321,47370	5,4138674	0,8570404	-
Ogółem	19200	6,5796280	-321,47380	5,3825731	1,1970549	-0,0167434
średnie	0	0,3087200	0	-	0,3087200	-
różnica	19200	6,2709080	-321,47380	5,3825731	0,8883349	0,0167434

C.

ŹRÓDŁO ZMIENNOŚCI			STOPNIE SWOBOD- DY	OSZACOWANIE WARIANCJI	$F_0 = \frac{s_p^2}{s_{RM}^2}$
OPIS	OZNACZE- NIE	WARTOŚĆ			
Korelacja	$\sum \hat{y}_m^2$	0,3087200	1	0,3087200	1,2050
Różnica między nachyleniami	$\sum \hat{y}_{mN}^2$	0,0312945	2	0,0156472	
Błąd	$\sum \hat{y}_b^2$	0,8570404	66	0,0129855	
Suma	$\sum \hat{y}^2$	1,1970549	69		
$F_{2;66;0,05}=3,14$ $F_{66;2;0,05}^{-1}=0,51$		wniosek	Proste są równoległe o łącznym nachyleniu $b_L = -0,0167434$		

Tabela 50

Analiza wariancyjna wpływu sekwencji naprężeń na żywotność duralu PA6N przy przebiegach naprężenia, w których $\sigma_p = \sigma_a \min$, $n_o \sim N$.

[illegible]

analize wpływu sekwencji naprężeń na zmianę współczynnika
regresji duralu PA6N przy przebiegach naprężenia,
w których $\theta_p = \theta_e$ gr, $n_0 \sim N$:

Tabela 51

A, B - zestawienie danych oraz obliczenia częściowe,
C - analiza wariancyjna istotności wpływu

A.

SEKWENCJA NAPRĘŻEN	m	N _m	$\sum x$	$\sum x^2$	$\sum y$	$\sum y^2$	$\sum xy$
SR	1	24	5760	1388800	148,0889043	915,5440470	35454,23458
SRM	2	24	5760	1388800	148,0360877	915,5496894	35418,50407
SM	3	24	5760	1388800	149,0919811	927,6324617	35689,06328
$\sum_{m=1}^3$		72	17280	4166400	445,2189731	2758,9263981	106561,80193

B.

SEKWENCJA NAPRĘŻEN	$\sum' x^2$	$\sum' y^2$	$\sum' xy$	$\sum' c^2$	$\sum' y^2 + \sum \sum' y^2$	b
SR	6400	1,7805650	-87,10244	1,1854430	0,5951220	-0,0136098
SRM	6400	2,4134144	-110,63697	1,9125842	0,5006302	-0,0172870
SM	6400	1,6483442	-93,01218	1,3517603	0,2965839	-0,0145332
$\sum_{m=1}^3$	19200	5,8423236	-290,75159	4,4497875	1,39225361	
Ogółem	19200	5,8717590	-290,75160	4,4029423	1,4688167	-0,0151433
średnie	0	0,0294360	0	-	0,0294360	-
różnica	19200	5,8423230	-290,75160	4,4029423	1,4393807	-0,0151433

C.

ŹRÓDŁO ZMIENNOŚCI			STOPNIE SWOBOD- NY	OSZACOWANIE WARIANCJI	$F_0 = \frac{S_{MN}^2}{S_b^2}$
OPIS	OSZACOWA- NIE	WARTOŚĆ			
Korelacje	$\sum' \hat{\beta}_m^2$	0,0294360	1	0,0294360	
Różnice między nachyleniami	$\sum' \hat{\beta}_{MN}^2$	0,0468446	2	0,0234223	
Błąd	$\sum' \hat{\beta}_b^2$	1,3925361	66	0,0210990	
Suma	$\sum' \hat{\beta}^2$	1,4688177	69		1,1101
$F_{2;66;0,05} = 3,14$ $F_{0,05}^{-1} = 0,51$	wnioski	Proste są równoległe o łącznym nachyleniu $b_L = -0,0151433$			

Tabela 52

Analiza wariancyjna wpływu sekwencji naprężeń na żywotność duralu PA6N
przy przebiegach naprężeń, w których $\sigma_p = \sigma_a$ śr, $n_0 \sim N$

[illegible]

Analiza wpływu sekwencji naprężeń na zmianę współczynnika
regresji duralu PA6N przy przebiegach naprężenia,
w których $\sigma_p = \sigma_a \max$, $n_0 \sim N$:

Tabela 53

A, B - zestawienie danych oraz obliczenia częściowe,
C - analiza wariacyjna istotności wpływu

A.

SEKWENCJA NAPRĘŻEN	m	N _m	$\sum x$	$\sum x^2$	$\sum y$	$\sum y^2$	$\sum xy$
SR	1	24	5760	1368800	148,7763412	923,8769177	35619,16262
SRM	2	24	5760	1388800	145,7763412	884,6937325	34845,97705
SM	3	24	5760	1388800	146,5169000	895,6901396	35091,83747
$\sum_{m=1}^3$		72	17280	4166400	440,8552607	2704,2607890	105556,97714

B.

SEKWENCJA NAPRĘŻEN	$\sum' x^2$	$\sum' y^2$	$\sum' xy$	$\sum' c^2$	$\sum' y^2 + \sum' y^2$	b
SR	6400	1,6102636	-87,15926	1,1869901	0,4232735	-0,0136186
SRM	6400	1,8478359	-88,90762	1,2350882	0,6127477	-0,0138918
SM	6400	1,2233907	-72,21853	0,8149244	0,4084663	-0,0112841
$\sum_{m=1}^3$	19200	4,6814902	-248,28540	3,2370027	1,4444875	
Ogółem	19200	4,9085560	-248,28540	3,2107104	1,6978456	-0,0129315
średnie	0	0,2270666	0	-	0,2270660	-
różnica	19200	4,6814900	-248,28540	3,2107104	1,4707796	-0,0129315

C.

ŹRÓDŁO ZMIENNOŚCI			STOPNIE SWOBOD- DY	OSZACOWANIE WARIANCJI	$F_0 = \frac{s_p^2}{s_{MN}^2}$
OPIS	OZNACZE- NIE	WARTOŚĆ			
Korelacja	$\sum \hat{y}_m^2$	0,2270660	1	0,227066	1,6649
Różnice między nachyleniami	$\sum \hat{y}_{MN}^2$	0,0262921	2	0,0131460	
Błąd	$\sum \hat{y}_b^2$	1,4444875	66	0,0218862	
Suma	$\sum \hat{y}^2$	1,6978456	69		
$F_{66;2;0,05}=19,47$ $F_{2;66;0,05}^{-1}=0,32$	Wnioski		Proste są równoległe o łącznym nachyleniu $b_L = -0,0129315$		

Tabela 54

Analiza wariancyjna wpływu sekwencji naprężeń na żywotność duralu PA6N przy przebiegach naprężenia, w których $\sigma_p = \sigma_{a \max}$, $n_0 \sim N$

[illegible]

Analiza wpływu sekwencji naprężeń na zmianę współczynnika
regresji szeregu Pa6N przy przebiegach naprężenia,
w których $\sigma_p = \sigma_e$ i $\sigma_0 = \text{const.}$:

Tabela 55

A, B - zestawienie danych oraz obliczenia częściowe,
C - analiza wariacyjna istotności wpływu

A.

SEKWENCJA NAPRĘŻEN	m	N _m	$\sum x$	$\sum x^2$	$\sum y$	$\sum y^2$	$\sum xy$
SR	1	24	5760	1388800	147,9412471	913,842249	35416,14976
SRM	2	24	5760	1388800	145,9820546	889,974048	34952,43759
SM	3	24	5760	1388800	148,7778924	923,996198	35623,32325
$\sum_{m=1}^3$		72	17280	4166400	442,7011941	2727,812495	105991,91040

B.

SEKWENCJA NAPRĘŻEN	$\sum x^2$	$\sum y^2$	$\sum xy$	$\sum c^2$	$\sum y^2 + \sum \sum y^2$	b
SR	6400	1,9000578	-89,74954	1,2585906	0,6414672	-0,0140234
SRM	6400	2,0257040	-83,25551	1,0830437	0,9426603	-0,0130087
SM	6400	1,7103126	-83,37082	1,0860485	0,6242641	-0,0130267
$\sum_{m=1}^3$	19200	5,8076744	-256,37597	3,4276828	2,2083916	
Ogółem	19200	5,8076750	-256,37610	3,4233666	2,3843084	-0,0133529
średnie	0	0,01715990	0	-	0,01715990	-
różnica	19200	5,6360750	-256,37610	3,4233666	2,2127084	-0,0133529

C.

ŹRÓDŁO ZMIENNOŚCI			STOPNIE SWOBO- DY	OSZACOWANIE WARIANCJI	$F_0 = s_b^2 : s_{MN}^2$
OPIS	OSZACOWA- NIE	WARTOŚĆ			
Korelacja	$\sum \hat{y}_m$	0,1715990	1	0,01715990	
Różnice między nachyleniami	$\sum \hat{y}_{MN}$	0,0043168	2	0,0021584	
Błąd	$\sum \hat{y}_b$	2,2127084	66	0,0335259	
Suma	$\sum \hat{y}^2$	2,3886242	69		15,5327
$F_{66;2;0,05}=19,47$ $F_{66;2;0,05}^{-1}=0,51$	wnioski		Proste są równoległe o łącznym nachyleniu $b_L = 0,0133529$		

Tabela 56

Analiza wariancyjna wpływu sekwencji naprężeń na żywotność duralu PA6N
przy przebiegach naprężenia, w których $\bar{\sigma}_p = \bar{\sigma}_a$ sr, $n_0 = \text{const}$.

[illegible]

Tabela 57

Analiza wpływu sekwencji naprężeń na położenie prostych regresji
mosiadzu M058 przy przebiegach naprężenia, w których $n_0 \sim N$:

- A - sprawdzenie jednorodności wariancji,
B - analiza wpływu sekwencji na zmianę współczynnika regresji,
C - analiza wpływu sekwencji na żywotność

A.

WIELKOŚĆ	$\sigma_p = \sigma_{amin}$		$\sigma_p = \sigma_{atr}$		$\sigma_p = \sigma_{amax}$	
	SR	SM	SR	SM	SR	SM
N_m	15	15	21	21	15	15
$s^2(\hat{y})$	0,0174254	0,0182168	0,0216224	0,0260919	0,0138691	0,0291857
$F = s_1^2(\hat{y}) : s_2^2(\hat{y})$	0,0178211		0,02385715		1,8625900	
$F_{n_1-2; n_2-2; \alpha}$	$F_{13;13;0,05} = 2,575$		$F_{19;19;0,05} = 2,165$		$F_{13;13;0,05} = 2,575$	
Wnioski	Wariancje jednorodne		Wariancje jednorodne		Wariancje jednorodne	

B.

WIELKOŚĆ	$\sigma_p = \sigma_{amin}$		$\sigma_p = \sigma_{atr}$		$\sigma_p = \sigma_{amax}$	
	SR	SM	SR	SM	SR	SM
b	-0,0247859	-0,0202466	-0,0273732	-0,0235923	-0,0190067	-0,0251175
$s^2(\hat{y})$	0,0174254	0,0182168	0,0216224	0,0260919	0,0138691	0,0291857
$s^2(\hat{y})_L$	0,0178211		0,0238572		0,0215274	
t	1,5206758		1,2952838		1,8625900	
$t_{\alpha; n_1+n_2-4}$	$t_{0,05;26} = 2,056$		$t_{0,05;38} = 2,025$		$t_{0,05;26} = 2,056$	
Wnioski	Proste są równoległe o łącznym nachyleniu $b_L = -0,0225162$		Proste są równoległe o łącznym nachyleniu $b_L = -0,0254828$		Proste są równoległe o łącznym nachyleniu $b_L = -0,0220621$	

C.

WIELKOŚĆ	$\sigma_p = \sigma_{amin}$		$\sigma_p = \sigma_{atr}$		$\sigma_p = \sigma_{amax}$	
	SR	SM	SR	SM	SR	SM
$\bar{y}$	6,1210230	5,9447514	6,1237468	6,1245654	5,8889913	5,8850957
$s^2(\hat{y})$	0,0174254	0,0182168	0,0216224	0,0260919	0,0138691	0,0291857
$s^2(\hat{y})_L$	0,0178211		0,0238572		0,0215274	
t	3,366		0,017		0,068	
$t_{\alpha; n_1+n_2-4}$	$t_{0,05;26} = 2,056$		$t_{0,05;38} = 2,025$		$t_{0,05;26} = 2,056$	
Wnioski	Wpływ sekwencji na żywotność jest istotny		Wpływ sekwencji na ży- wotność jest nieistotny		Wpływ sekwencji na ży- wotność jest nieistotny	

Tabela 58

Analiza wpływu sekwencji naprężeń na położenie prostych regresji mosiądzu M05B przy przebiegach naprężenia, w których $\hat{\sigma}_p = \hat{\sigma}_s$ dr, $n_0 = \text{const}$!

- A - sprawdzenie jednorodności wariancji,
 B - analiza wpływu sekwencji na zmianę współczynnika regresji,
 C - analiza wpływu sekwencji na żywotność

A.

WIELKOŚĆ	SEKWENCJA NAPRĘŻEŃ	
	SR	SM
N_m	21	21
$s^2(\hat{y})$	0,0354814	0,0384449
$F=s_1^2(\hat{y}) ; s_2^2(\hat{y})$	1,084	
$F_{0,05;19;19}$	2,165	
Wnioski	Wariancje jednorodne	

B.

WIELKOŚĆ	SEKWENCJA NAPRĘŻEŃ	
	SR	SM
b	-0,0204676	-0,0165226
$s^2(\hat{y})$	0,0354814	0,0384449
$s^2(\hat{y})_t$	0,0369631	
t	1,086	
$t_{\alpha;n_1+n_2-4}$	$t_{0,05;38} = 2,025$	
Wnioski	Proste są równoległe o łącznym nachyleniu $b_L = -0,0184951$	

C.

WIELKOŚĆ	SEKWENCJA NAPRĘŻEŃ	
	SR	SM
y	5,9863939	5,9409546
$s^2(\hat{y})$	0,0354814	0,0384449
$s^2(\hat{y})_t$	0,0369631	
t	0,766	
$t_{\alpha;n_1+n_2-4}$	$t_{0,05;38} = 2,025$	
Wnioski	Wpływ sekwencji na żywotność jest nieistotny	

Analiza wpływu naprężenie początkowe na zmianę współczynnika
regresji durability Pa6N przy przecięgach o rosnącej sekwencji
naprężeń: $n_0 \sim N$:

Tabela 59

A, B - zestawienie danych oraz obliczenia częściowe
C - analiza wariancyjna istotności wpływu

A.

NAPRĘŻENIE POCZĄTKOWE	m	N _m	$\sum x$	$\sum x^2$	$\sum y$	$\sum y^2$	$\sum xy$
$\sigma_p = \sigma_a \text{ min}$	1	24	5760	1388800	152,7192998	973,5187051	36556,77406
$\sigma_p = \sigma_a \text{ śr}$	2	24	5760	1388800	148,0888043	915,5440470	35454,23458
$\sigma_p = \sigma_a \text{ max}$	3	24	5760	1388800	148,7763412	923,8769177	35619,16262
$\sum_{m=1}^3$		72	17280	4166400	449,5845453	2812,9396698	107630,17126

B.

NAPRĘŻENIE POCZĄTKOWE	$\sum' x^2$	$\sum' y^2$	$\sum' xy$	$\sum' c^2$	$\sum' y + \sum \sum' y$	b
$\sigma_p = \sigma_a \text{ min}$	6400	1,7193497	-95,85789	1,4357399	0,2836098	-0,0149778
$\sigma_p = \sigma_a \text{ śr}$	6400	1,7805650	-87,10244	1,1854430	0,5951220	-0,0136098
$\sigma_p = \sigma_a \text{ max}$	6400	1,6102636	-87,15926	1,1869901	0,4232735	-0,0136186
$\sum_{m=1}^3$	19200	5,1101783	-270,11959	3,8081730	1,3020053	
Ogółem	19200	5,6304570	-270,11960	3,8002395	1,8302175	-0,0140687
średnie	0	0,5202790	0	0	0,5202780	-
różnica	19200	5,1101780	-270,11960	3,8002395	1,3099385	-0,0140687

C.

ŹRÓDŁO ZMIENNOŚCI			STOPNIE SWOBO- DY	OSZACOWANIE WARIANCJI	$F = S_b^2 : S_{MN}^2$
OPIS	OZNACZE- NIE	WARTOŚĆ			
Korelacja	$\sum' \hat{y}_m^2$	0,5202790	1	0,5202790	4,9734
Różnice między nachyleniami	$\sum' \hat{y}_{MN}^2$	0,0079332	2	0,0039666	
Błąd	$\sum' \hat{y}_b^2$	1,3020053	66	0,0197274	
Suma	$\sum' \hat{y}^2$	1,8302175	69		
$F_{66;2;0,05}=19,48$ $F_{2;66;0,05}^{-1}=0,32$		Wnioski	Proste są równoległe o łącznym nachyleniu $b_L = -0,0140687$		

Tabela 60

Analiza wpływu naprężenia początkowego na żywotność łożysk FA6N
przy przebiegach o rosnącej sekwencji naprężeń i $n_0 \sim N$.

A - analiza wariancyjna istotności wpływu,

B - sprawdzenie jednorodności wariancji,

C - określenie istotności różnic między średnimi żywotnościami

A.

NAPRĘŻENIE POCZĄTKOWE	m	N _m	($\sum y$) _m	$\sum y^2$	$\sum y^2$	L	S^2_{HG}	S^2_{WG}	$F \cdot S^2_{HG} / S^2_{WG}$	$F_{0.05; m; L}$	WNIOSEKI
$\sigma_p = \sigma_{amin}$	1	24	152,7192998	0,5203	5,6305	$J_{MG} = 2$ $J_{WG} = 69$	0,2601	0,0816	3,1880	3,13	Wpływ naprężenia początkowego na żywotność jest istotny
$\sigma_p = \sigma_{asr}$	2	24	148,0889043								
$\sigma_p = \sigma_{amax}$	3	24	148,7763412								
$\sum_{m=1}^L$		72	449,5845453								

B.

NAPRĘŻENIE POCZĄTKOWE	N _m	$\sum \hat{y} + \sum \sum y$	$j_a + j_b$	WARIANCJA OSZACOWANIA $\hat{S}^2(\hat{y})_m$	$\log S^2(\hat{y})_m$	j^{-1}
$\sigma_p = \sigma_{amin}$	24	0,2836098	22	0,0128914	-1,8896999	0,0454545
$\sigma_p = \sigma_{asr}$	24	0,5951220	22	0,0270510	-1,5678167	0,0454545
$\sigma_p = \sigma_{amax}$	24	0,4232435	22	0,0192397	-1,7156017	0,0454545
$\sum_{m=1}^L$	72	1,3020053	66	0,0591821	-5,1733183	0,1363636
		$\bar{S}^2$	$\log \bar{S}^2$	χ^2	$\chi^2_{0.05; 2}$	WNIOSEKI
		0,0157036	-1,8039999	0,5868849	5,991	Wariancje jednorodne

C.

NAPRĘŻENIE POCZĄTKOWE	m	$\bar{y}_m$	j_{WG}	S^2_{WG}	$D_{0.05; p; j_{WG}}$	R'_p	ŚREDNIE	RÓŻNICA	R_p	WNIOSEKI
$\sigma_p = \sigma_{asr}$	2	6,1703710	69	0,0816	$D_{0.05; 2; 69} = 2,856$ $D_{0.01; 2; 69} = 2,913$	$R'_3 = 0,0807271$ $R'_1 = 0,0849265$	$\bar{y}_2, \bar{y}_3$	0,0286432	0,1647835	Różnica nieistotna
$\sigma_p = \sigma_{amax}$	3	6,1990142					$\bar{y}_3, \bar{y}_1$	0,1647800	0,1647835	Różnica istotna
$\sigma_p = \sigma_{amin}$	1	6,3633042					$\bar{y}_2, \bar{y}_1$	0,1929332	0,1733550	Różnica istotna

Analiza wpływu naprężenia początkowego na żywotność duralu PA6N przy przebiegach o rosnącej sekwencji naprężeń i $n_0 \sim N$:

- A - analiza wariancyjna istotności wpływu,
B - sprawdzenie jednorodności wariancji,
C - określenie istotności różnic między średnimi żywotnościami

Tabela 61

A.

NAPRĘŻENIE POCZĄTKOWE	m	N _m	$\sum x$	$\sum x^2$	$\sum y$	$\sum y^2$	$\sum xy$
$\sigma_p = \sigma_a \text{ min}$	1	24	5760	1388800	149,0530663	927,0579756	35662,02198
$\sigma_p = \sigma_a \text{ śr}$	2	24	5760	1388800	148,0380677	915,5498894	35418,50407
$\sigma_p = \sigma_a \text{ max}$	3	24	5760	1388800	145,5620195	884,6937325	34845,97705
$\sum_{m=1}^3$		72	17280	4166400	442,6532635	2728,1015975	105926,50310

B.

NAPRĘŻENIE POCZĄTKOWE	$\sum' x^2$	$\sum' y^2$	$\sum' xy$	$\sum' c^2$	$\sum' y^2 + \sum \sum' y^2$	b
$\sigma_p = \sigma_a \text{ min}$	6400	2,1572852	-110,71392	1,9152456	0,2420396	-0,0172990
$\sigma_p = \sigma_a \text{ śr}$	6400	2,4134144	-110,63697	1,9125842	0,5008302	-0,01728703
$\sigma_p = \sigma_a \text{ max}$	6400	1,8478359	-88,90762	1,2350802	0,6127477	-0,0138918
$\sum_{m=1}^3$	19200	6,4185355	-310,25851	5,0629180	1,3556175	
$\sigma_{\text{ogółem}}$	19200	6,8681590	-310,28010	5,0142573	1,6719017	-0,0161604
średnie	0	0,2676230	0	-	0,2676230	-
różnica	19200	6,4185355	-310,28010	5,0142573	1,4042782	-0,0161604

C.

ŹRÓDŁO ZMIENNOŚCI			STOPNIE SWOBOD- DY	OSZACOWANIE WARIANCJI	$F = \frac{s_{MN}^2}{s_b^2}$
OPIS	OZNACZE- NIE	WARTOŚĆ			
Korelacja	$\sum \hat{y}_m^2$	0,2676235	1	0,2676235	1,1846
Różnice między nachyleniami	$\sum \hat{y}_{MN}^2$	0,0486607	2	0,0243304	
Błąd	$\sum \hat{y}_b^2$	1,3556175	66	0,0205397	
Suma	$\sum \hat{y}^2$	1,6719017	69		
$F_{2;66;0,05}=3,14$ $F_{66;2;0,05}^{-1}=0,51$		wnioski	Proste są równoległe o łącznym nachyleniu $b_L = -0,0161604$		

Analiza wpływu naprężenia początkowego na zmianę współczynnika regresji curveu Pa6N przy przebiegach o rosnąco-malejącej sekwencji naprężeń oraz $n_0 \sim N$:

Tabela 63

A, B - zestawienie danych oraz obliczenia częściowe,
C - analiza wariancyjna istotności wpływu

A.

NAPRĘŻENIE POCZĄTKOWE	m	N _m	$\sum x$	$\sum x^2$	$\sum y$	$\sum y^2$	$\sum xy$
$\sigma_p = \sigma_a \text{ min}$	1	24	5760	1385600	151,9025360	963,6267912	36341,70674
$\sigma_p = \sigma_a \text{ śr}$	2	24	5760	1385600	149,0919811	927,8324617	35689,06328
$\sigma_p = \sigma_a \text{ max}$	3	24	5760	1385600	146,5169000	895,6901396	35091,83747
$\sum_{m=1}^3$		72	17280	4166400	447,5114177	2787,3493927	107122,60749

B.

NAPRĘŻENIE POCZĄTKOWE	$\sum' x^2$	$\sum' y^2$	$\sum xy$	$\sum' c^2$	$\sum' \hat{y}^2 + \sum \sum' y^2$	b
$\sigma_p = \sigma_a \text{ min}$	6400	2,3942729	-114,90189	2,0628819	0,3313910	-0,0179534
$\sigma_p = \sigma_a \text{ śr}$	6400	1,6483442	-93,01218	1,3517603	0,2965839	-0,0145332
$\sigma_p = \sigma_a \text{ max}$	6400	1,2233907	-72,21853	0,8149244	0,4084663	-0,0112841
$\sum_{m=1}^3$	19200	5,2660078	-280,13260	4,2295666	1,0364412	
Ogółem	19200	5,8706650	-280,13250	4,0871988	1,7834662	-0,0145902
średnie	0	0,6046570	0	-	0,6046570	-
różnica	19200	5,2660080	-280,13250	4,0871988	1,1786092	-0,0145902

C.

ŹRÓDŁO ZMIENNOŚCI			STOPNIE SWOBOD- NY	OSZACOWANIE WARTOŚCI	$F = \frac{s_{MN}^2}{s_b^2}$
OPIS	OWIACZE- NIE	WARTOŚĆ			
Korelacja	$\sum' \hat{y}_m^2$	0,6046570	1	0,6046570	
Różnice między nachyleniami	$\sum' \hat{y}_{MN}^2$	0,1423680	2	0,0711840	
Błąd	$\sum' \hat{y}_b^2$	1,0364412	66	0,0157037	
Suma	$\sum' \hat{y}^2$	1,7834662	69		4,5329
$F_{2;66;0,05} = 3,14$ $F_{60;2;0,05} = 0,51$			wniosek: wpływ naprężenia początkowego na nachylenie prostych jest istotny		

Tabela 64

Analiza wpływu naprężenia początkowego na żywotność duralu PA6N przy przebiegach o malejącej sekwencji naprężeń oraz $n_0 \sim N$.

A - sprawdzenie jednorodności wariancji,

B - określenie różnic między średnimi żywotnościami

A.

NAPRĘŻENIE POCZĄTKOWE	N_m	$\sum \hat{y}^2 + \sum \sum \hat{y}^2$	$j_R + j_b$	WARIANCJA OSZACOWANIA $s^2(\hat{y})_m$	$\log s^2(\hat{y})_m$	j^{-1}
$\sigma_p - \sigma_{amin}$	24	0,3313910	22	0,0150632	-1,8220819	0,0454545
$\sigma_p - \sigma_{atr}$	24	0,2965831	22	0,0134811	-1,8702751	0,0454545
$\sigma_p - \sigma_{amax}$	24	0,4084663	22	0,0185666	-1,7312676	0,0454545
$\sum_{m=1}^L$	72	1,0364412	63	0,0471109	-5,4236246	0,0454545
$\bar{s}^2$		$\log \bar{s}^2$		χ^2	$\chi^2_{0,05;2}$	Wnioski
0,0157036		-1,8039999		0,5888849	5,991	Wariancje jednorodne

B.

POZIOM NAPRĘŻENIA σ_{amax} [MPa]	NAPRĘŻENIE POCZĄTKOWE	m	$\bar{y}_m$	j_{we}	s^2_{we}	$D_{0,05;P;j_{we}}$	R'_p	ŚREDNIE	RÓŻNICA	R_p	WNIOSEKI
260	$\sigma_p - \sigma_{amax}$	3	5,8791889	69	0,0850821	$D_{0,05;2;69}=2,826$ $D_{0,05;3;69}=2,973$	$R'_2 = 0,8243113$ $R'_1 = 0,8671895$	$\bar{y}_3, \bar{y}_2$	0,0423139	0,1682618	Różnica nieistotna
	$\sigma_p - \sigma_{atr}$	2	5,9215028					$\bar{y}_2, \bar{y}_1$	0,0487010	0,1682618	Różnica nieistotna
	$\sigma_p - \sigma_{amin}$	1	5,9700238					$\bar{y}_3, \bar{y}_1$	0,0910149	0,1770143	Różnica nieistotna
240	$\sigma_p - \sigma_{amax}$	3	6,1048718	69	0,0850821	$D_{0,05;2;69}=2,826$ $D_{0,05;3;69}=2,973$	$R'_2 = 0,8243113$ $R'_1 = 0,8671895$	$\bar{y}_3, \bar{y}_2$	0,1072941	0,1682618	Różnica nieistotna
	$\sigma_p - \sigma_{atr}$	2	6,2121569					$\bar{y}_2, \bar{y}_1$	0,1170613	0,1682618	Różnica nieistotna
	$\sigma_p - \sigma_{amin}$	1	6,3292723					$\bar{y}_3, \bar{y}_1$	0,2244005	0,1770143	Różnica istotna
220	$\sigma_p - \sigma_{amax}$	3	6,3305547	69	0,0850821	$D_{0,05;2;69}=2,826$ $D_{0,05;3;69}=2,973$	$R'_2 = 0,8243113$ $R'_3 = 0,8671895$	$\bar{y}_1, \bar{y}_2$	0,1722742	0,1682618	Różnica istotna
	$\sigma_p - \sigma_{atr}$	2	6,5028289					$\bar{y}_2, \bar{y}_3$	0,1855117	0,1682618	Różnica istotna
	$\sigma_p - \sigma_{amin}$	1	6,6883406					$\bar{y}_1, \bar{y}_3$	0,3577859	0,1770143	Różnica istotna

analiza wpływu naprężenia początkowego na zmianę współczynnika regresji mosiadzu MO58 przy przebiegach o rosnącej sekwencji naprężeń oraz $n_0 \sim N$:

Tabela 65

A, B - zestawienie danych oraz obliczenia częściowe,
C - analiza wariancyjna istotności wpływu

A.

NAPRĘŻENIE POCZĄTKOWE	m	N _m	$\sum x$	$\sum x^2$	$\sum y$	$\sum y^2$	$\sum xy$
$\sigma_p = \sigma_a \text{ min}$	1	15	3900	1018000	91,8153448	564,6877263	23772,84619
$\sigma_p = \sigma_a \text{ śr}$	2	21	5460	1425200	128,5986818	792,1126260	33282,36706
$\sigma_p = \sigma_a \text{ max}$	3	15	3900	1018000	88,3348694	521,8285914	22891,03933
$\sum_{m=1}^3$		51	13260	3461200	308,7488960	1678,6289457	79946,25258

B.

NAPRĘŻENIE POCZĄTKOWE	$\sum' x^2$	$\sum' y^2$	$\sum' xy$	$\sum' c^2$	$\sum' y^2 + \sum \sum' y^2$	b
$\sigma_p = \sigma_a \text{ min}$	4000	2,6838903	-99,14345	2,4573559	0,1917064	-0,0247859
$\sigma_p = \sigma_a \text{ śr}$	5600	4,6068680	-153,29020	4,1960510	0,2303434	-0,0273732
$\sigma_p = \sigma_a \text{ max}$	4000	1,6253147	-76,02671	1,4450152	0,1160939	-0,0190067
$\sum_{m=1}^3$	13600	8,9160730	-328,46036	8,0935589	0,5381437	
Ogółem	13600	9,4940280	-328,46036	7,9328094	1,5612186	-0,0241515
średnie	0	0,5779550	0	-	0,5779550	-
różnica	13600	8,9160730	-328,46036	8,0935589	0,8225141	-0,0241515

C.

ŹRÓDŁO ZMIENNOŚCI			WSPÓŁ- CZYNNY	OSZACOWANIE WARIANCJI	$F = s_{MN}^2 : s_D^2$
OPIS	OZNACZE- NIE	WARTOŚĆ			
Korelacja	$\sum' \hat{y}_m^2$	0,5779550	1	0,5779550	11,890
Różnica między nachyleniami	$\sum' \hat{y}_{MN}^2$	0,2843704	2	0,1421852	
Błąd	$\sum' \hat{y}_D^2$	0,5381437	45	0,0119587	
Suma	$\sum' \hat{y}^2$	1,4004691	48		
$F_{2;45;0,05}=3,205$ $F_{45;2;0,05}^{-1}=0,051$		wnioski	Wpływ naprężenia początkowego na nachylenie prostych jest istotny.		

Tabela 66

Analiza wpływu naprężenia początkowego na żywotność mosiądzu MO58
przy przebiegach o rosnącej sekwencji naprężeń oraz $n_0 \sim N$:

A - sprawdzenie jednorodności wariancji,

B - określenie różnic między średnimi żywotnościami

A.

NAPRĘŻENIE POCZĄTKOWE	N_m	$\sum \hat{y}^2 + \sum \sum y^2$	$j_A + j_B$	WARIANCJA OSZACOWANIA $s^2(\hat{y})_m$	$\log s^2(\hat{y})_m$	j^{-1}
$\hat{\sigma}_p = \hat{\sigma}_{amin}$	15	0,01917064	13	0,0147467	-1,8313052	0,0769231
$\hat{\sigma}_p = \hat{\sigma}_{aśr}$	21	0,2303434	19	0,0121233	-1,9163791	0,0476190
$\hat{\sigma}_p = \hat{\sigma}_{amax}$	15	0,1160939	13	0,0089303	-2,0491340	0,0769231
$\sum_{m=1}^3$	51	0,5381437	45	0,0358003	-5,7968183	0,2014652
$\bar{s}^2$		$\log \bar{s}^2$	χ^2	$\chi^2_{0,05,12}$	Wnioski	
0,0119334		-1,9232346	2,8095231	5,991	Wariancje jednorodne	

B.

POZIOM NAPRĘŻENIA E _{max} [MPa]	NAPRĘŻENIE POCZĄTKOWE	m	$\bar{y}_m$	j_{we}	s^2_{we}	$D_{0,05;p;j_{we}}$	R'_p	ŚREDNIE	RÓŻNICA	R_p	WNIOSEKI
280	$\hat{\sigma}_p = \hat{\sigma}_{amax}$	3	5,5088513	48	0,1857515	$D_{0,05;2;48}=2,847$ $D_{0,05;2;48}=2,991$	$R_2 = 1,2270256$ $R_1 = 1,2890880$	y_3, y_2	0,0674315	0,2933152	Różnica nieistotna
	$\hat{\sigma}_p = \hat{\sigma}_{aśr}$	2	5,5762828					y_2, y_1	0,0490123	0,2933152	Różnica nieistotna
	$\hat{\sigma}_p = \hat{\sigma}_{amin}$	1	5,6252951					y_3, y_1	0,1164438	0,3328411	Różnica nieistotna
260	$\hat{\sigma}_p = \hat{\sigma}_{amax}$	3	5,8889913	48	0,1857515	$D_{0,05;2;48}=2,847$ $D_{0,05;2;48}=2,991$	$R_1 = 1,2270256$ $R_2 = 1,2890880$	y_3, y_1	0,2320218	0,2933152	Różnica nieistotna
	$\hat{\sigma}_p = \hat{\sigma}_{amin}$	1	6,1210131					y_1, y_2	0,0027337	0,2933152	Różnica nieistotna
	$\hat{\sigma}_p = \hat{\sigma}_{aśr}$	2	6,1237468					y_3, y_2	0,2347555	0,3328411	Różnica nieistotna
240	$\hat{\sigma}_p = \hat{\sigma}_{amax}$	3	6,2691193	48	0,1857515	$D_{0,05;2;48}=2,847$ $D_{0,05;3;48}=2,991$	$R_1 = 1,2270256$ $R_2 = 1,2890880$	y_3, y_2	0,3476118	0,2933152	Różnica istotna
	$\hat{\sigma}_p = \hat{\sigma}_{amin}$	1	6,6167311					y_1, y_2	0,0544797	0,2933152	Różnica nieistotna
	$\hat{\sigma}_p = \hat{\sigma}_{aśr}$	2	6,6712108					y_3, y_1	0,4020915	0,3328411	Różnica istotna

Analiza wpływu naprężenia początkowego na zmianę współczynnika regresji mosiadzu M058 przy przebiegach o malejącej sekwencji naprężeń oraz $n_0 \sim N$:

Tabela 67

A, B - zestawienie danych oraz obliczenia częściowe
C - analiza wariacyjna istotności wpływu

A.

NAPRĘŻENIE POCZĄTKOWE	m	N _m	$\sum x$	$\sum x^2$	$\sum y$	$\sum y^2$	$\sum xy$
$\sigma_p = \sigma_a \text{ min}$	1	15	3900	1018000	89,1712716	531,9775631	23103,54419
$\sigma_p = \sigma_a \text{ śr}$	2	21	5460	1425200	126,6156739	791,3290155	33308,01056
$\sigma_p = \sigma_a \text{ max}$	3	15	3900	1018000	88,2764352	522,4182319	22851,40332
$\sum_{m=1}^3$		51	13260	3461200	306,0635807	1845,7246095	79262,95807

B.

NAPRĘŻENIE POCZĄTKOWE	$\sum x^2$	$\sum y^2$	$\sum xy$	$\sum c^2$	$\sum y^2 + \sum \sum y^2$	b
$\sigma_p = \sigma_a \text{ min}$	4000	1,8765179	-80,98642	1,6397000	0,2368179	-0,0202466
$\sigma_p = \sigma_a \text{ śr}$	5600	3,6126817	-132,11664	3,1169287	0,4957220	-0,0235923
$\sigma_p = \sigma_a \text{ max}$	4000	2,9029645	-100,46982	2,5235462	0,3794183	-0,0251175
$\sum_{m=1}^3$	13600	8,3921641	-313,57288	7,2801759	1,1119582	
Ogółem	13600	8,9617620	-313,57288	7,2299978	1,7317642	-0,0230568
średnie	0	0,5695990	0	-	0,5695990	-
różnica	13600	8,3921630	-313,57288	7,2299978	1,1621322	-0,0230568

C.

ŹRÓDŁO ZMIENNOŚCI			STOPNIE SWOBO- DNY	OSZACOWANIE WARIANCJI	$F = \frac{s_{\text{num}}^2}{s_{\text{den}}^2}$
OPIS	OSZACOWA- NIE	WARTOŚĆ			
Korelacje	$\sum \hat{y}_{\text{m}}^2$	0,5695990	1	0,5695990	1,015
Różnice między nachyleniami	$\sum \hat{y}_{\text{m}}^2$	0,0501740	2	0,0250870	
Błąd	$\sum \hat{y}_{\text{b}}^2$	1,1119582	45	0,0247102	
Suma	$\sum \hat{y}^2$	1,7317312	48		
$F_{2;45;0,05} = 3,205$ $F_{45;2;0,05} = 0,051$		Wnioski	Proste są równoległe o łącznym nachyleniu $b_L = -0,0230568$		

Tabela 68

Analiza wariancyjna wpływu naprężenia początkowego na żywotność mosiądzu M058
przy przebiegach o malejącej sekwencji naprężeń oraz $n_0 \sim N$

[illegible]

Tabela 69

Analiza wpływu liczby cykli w bloku programu na położenie prostych regresji duralu PA6N przy przebiegach naprężenia, w których $\delta_p \approx \delta_{a\text{ dr}}$:

- A - sprawdzenie jednorodności wariancji;
 B - analiza wpływu liczby cykli w bloku na zmianę współczynnika regresji,
 C - analiza wpływu liczby cykli w bloku na żywotność

A.

WIELKOŚĆ	SR		SRM		SM	
	$n_0 = 4,2 \cdot 10^4$ cykli	$n_0 \sim N$	$n_0 = 4,2 \cdot 10^4$ cykli	$n_0 \sim N$	$n_0 = 4,2 \cdot 10^4$ cykli	$n_0 \sim N$
N_m	24	24	24	24	24	24
$s^2(\hat{y})$	0,0291575	0,0270510	0,0428507	0,0227650	0,0283557	0,0134811
$F = s_1^2(\hat{y}) : s_2^2(\hat{y})$	1,88		1,08		2,10	
$F_{\alpha; n_1-2; n_2-2}$	$F_{0,05; 22; 22} = 2,05$		$F_{0,05; 22; 22} = 2,05$		$F_{0,05; 22; 22} = 2,05$	
Wnioski	Wariancje jednorodne		Wariancje jednorodne		Wariancje niejednorodne	

B.

WIELKOŚĆ	SR		SRM		SM (*)	
	$n_0 = 4,2 \cdot 10^4$ cykli	$n_0 \sim N$	$n_0 = 4,2 \cdot 10^4$ cykli	$n_0 \sim N$	$n_0 = 4,2 \cdot 10^4$ cykli	$n_0 \sim N$
b	-0,0142336	-0,0136098	-0,0130087	-0,0172870	-0,0130267	-0,0145332
$s^2(\hat{y})$	0,0291575	0,0270510	0,0428507	0,0227650	$4,33 \cdot 10^{-6}$	$2,11 \cdot 10^{-6}$
$s^2(y)_L$	0,028104		0,032807		-	
t	0,140		1,336		0,839	
$t_{\alpha; n_1+n_2-4}$	$t_{0,05; 44} = 2,021$		$t_{0,05; 44} = 2,021$		$t_{0,05; 22} = 2,074$	
Wnioski	Proste są równoległe o łącznym nachyleniu $b_L = -0,0138166$		Proste są równoległe o łącznym nachyleniu $b_L = -0,0151478$		Proste są równoległe o łącznym nachyleniu $b_L = -0,0137799$	

C.

WIELKOŚĆ	SR		SRM		SM (*)	
	$n_0 = 4,2 \cdot 10^4$ cykli	$n_0 \sim N$	$n_0 = 4,2 \cdot 10^4$ cykli	$n_0 \sim N$	$n_0 = 4,2 \cdot 10^4$ cykli	$n_0 \sim N$
$\bar{y}$	6,1642186	6,1703710	6,0825856	6,1682537	6,1990788	6,2121659
$s^2(\hat{y})$	0,0291575	0,0270510	0,0428507	0,0227650	0,0283750	0,0134811
$s^2(\hat{y})_L$	0,028104		0,032807		-	
t	0,122		1,569		0,090	
$t_{\alpha; n_1+n_2-4}$	$t_{0,05;44} = 2,010$		$t_{0,05;44} = 2,010$		$t_{0,05;22} = 2,074$	
Wnioski	Wpływ liczby cykli w bloku na żywotność jest nieistotny					

(*) Ponieważ wariancje okazały się niejednorodne, porównania ich dokonano stosując odpowiedni dla tego przypadku test t , zgodnie ze wskazówkami podanymi w pracy [59/, (str. 132)]

Tabela 7o

Analiza wpływu liczby cykli w bloku programu
na zmianę współczynnika regresji mosiadzu MO58,
przy przebiegach naprężenia, w których $\sigma_p = \sigma_a$ śr :

A - sprawdzenie jednorodności wariancji,

B - analiza istotności wpływu

A.

WIELKOŚĆ	SR		SM	
	$n_0 = 1,2 \cdot 10^4$ cykli	$n_0 \sim N$	$n_0 = 1,2 \cdot 10^4$ cykli	$n_0 \sim N$
N_m	21	21	21	21
$s^2(\hat{y})$	0,0354814	0,0216224	0,0384449	0,0260919
$F = s_1^2(\hat{y}) ; s_2^2(\hat{y})$	1,641		1,473	
$F_{n_1-2; n_2-2; \alpha}$	$F_{19; 19; 0,05} = 2,165$		$F_{19; 19; 0,05} = 2,165$	
Wnioski	Wariancje jednorodne		Wariancje jednorodne	

B.

WIELKOŚĆ	SR		SM	
	$n_0 = 1,2 \cdot 10^4$ cykli	$n_0 \sim N$	$n_0 = 1,2 \cdot 10^4$ cykli	$n_0 \sim N$
b	-0,0204676	-0,0273732	-0,0165226	-0,0235923
$s^2(\hat{y})$	0,0354814	0,0216224	0,0384449	0,0260919
$s^2(\hat{y})_L$	0,0285519		0,0322684	
t	2,162		2,082	
$t_{\alpha; n_1+n_2-4}$	$t_{0,05; 38} = 2,025$		$t_{0,05; 38} = 2,025$	
Wnioski	Wpływ liczby cykli w bloku na nachylenie prostych jest istotny		Wpływ liczby cykli w bloku na nachylenie prostych jest istotny	

Tabela 71

Analiza wpływu liczby cykli w bloku programu
na żywotność mosiądzu M058 przy przebiegach, w których $\delta_p = \delta_a$ śr

POZIOM NAPRĘŻENIA σ_{amax} [MPa]	SEKWENCJA NAPRĘŻEN	LICZBA CYKLI w BLOKU n_0	N_m	$\bar{y}$	$s^2(\hat{y})$	$s^2(\hat{y})_t$	t	$t_{\alpha; n_1+n_2-4}$	WNIOSKI
260	SR	$n_0 = 120\ 000$	21	5,9863939	0,0354814	0,0285519	2,634	$t_{0,05;48} = 2,025$	Różnica istotna
		$n_0 \sim N$	21	6,1237468	0,0216224				
	SM	$n_0 = 120\ 000$	21	5,9409540	0,0384449	0,0322684	3,150		Różnica istotna
		$n_0 \sim N$	21	6,1245654	0,0260919				
240	SR	$n_0 = 120\ 000$	21	6,3957459	0,0354814	0,0285519	5,582		Różnica istotna
		$n_0 \sim N$	21	6,6712108	0,0216224				
	SM	$n_0 = 120\ 000$	21	6,2414102	0,0384449	0,0322684	5,862		Różnica istotna
		$n_0 \sim N$	21	6,5964002	0,0260919				

Tabela 72

Wyniki obliczeń granicznych liczb cykli naprężenia, powodujących obniżenie nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej duralu PA6N i mosiądzu MO58

MATERIAŁ	NAPRĘŻENIE MAKSYMALNE σ_{amax}	NAPRĘŻENIE POCZĄTKOWE σ_p	SR			SRM			SM		
			LICZBA CYKLI PRZE- NIESIONYCH DO LINII FRENCHA ($\sum n_i$) _F	POZIOM NAPR. NA KTÓRYM ZOS- TAŁA PRZEKROCZ- LONIA FRENCHA σ_{if}	LICZBA CYKLI NAPRĘŻENIA n_{if}	LICZBA CYKLI PRZE- NIESIONYCH DO LINII FRENCHA ($\sum n_i$) _F	POZIOM NAPR. NA KTÓRYM ZOS- TAŁA PRZEKROCZ- LONIA FRENCHA σ_{if}	LICZBA CYKLI NAPRĘŻENIA n_{if}	LICZBA CYKLI PRZE- NIESIONYCH DO LINII FRENCHA ($\sum n_i$) _F	POZIOM NAPR. NA KTÓRYM ZOS- TAŁA PRZEKROCZ- LONIA FRENCHA σ_{if}	LICZBA CYKLI NAPRĘŻENIA n_{if}
PA 6N	1,6 Z_{go}	$\sigma_{amin} = 1,18 Z_{go}$	319 300	σ_a śr	39 300	328 600	σ_a śr	48 600	282 600	σ_a max	2600
		$\sigma_{asr} = 1,40 Z_{go}$	57 900	σ_a śr	57 900	52 900	σ_a max	400	57 900	σ_a śr	57900
		$\sigma_{amax} = 1,60 Z_{go}$	3 800	σ_a max	3 800	3 800	σ_a max	3 800	3 800	σ_a max	3800
	1,48 Z_{go}	$\sigma_{amin} = 1,10 Z_{go}$	554 400	σ_a max	4 400	286 700	σ_a max	11 700	416 100	σ_a max	16100
		$\sigma_{asr} = 1,28 Z_{go}$	157 200	σ_a max	7 200	88 100	σ_a max	13 100	554 400	σ_a max	4400
		$\sigma_{amax} = 1,48 Z_{go}$	18 900	σ_a max	18 900	18 900	σ_a max	18 900	18 900	σ_a max	18900
	1,36 Z_{go}	$\sigma_{amin} = 1,00 Z_{go}$	1153 500	σ_a max	53 500	623 400	σ_a max	73 400	885 600	σ_a max	85600
		$\sigma_{asr} = 1,18 Z_{go}$	361 300	σ_a max	61 300	227 300	σ_a max	77 300	1153 500	σ_a max	53500
		$\sigma_{amax} = 1,36 Z_{go}$	93 400	σ_a max	93 400	93 400	σ_a max	93 400	93 400	σ_a max	93400
MO 58	1,53 Z_{go}	$\sigma_{amin} = 1,14 Z_{go}$	1 800	σ_a min	1 800	-	-	-	1 800	σ_a min	1800
		$\sigma_{asr} = 1,33 Z_{go}$	1	σ_a śr	1	-	-	-	1	σ_a śr	1
		$\sigma_{amax} = 1,53 Z_{go}$	1	σ_a max	1	-	-	-	1	σ_a max	1
	1,42 Z_{go}	$\sigma_{amin} = 1,05 Z_{go}$	34 100	σ_a min	34 100	-	-	-	34 100	σ_a min	34100
		$\sigma_{asr} = 1,23 Z_{go}$	1	σ_a śr	1	-	-	-	1	σ_a śr	1
		$\sigma_{amax} = 1,42 Z_{go}$	1	σ_a max	1	-	-	-	1	σ_a max	1
	1,31 Z_{go}	$\sigma_{amin} = 1,00 Z_{go}$	641 800	σ_a śr	1 800	-	-	-	641 100	σ_a max	1
		$\sigma_{asr} = 1,14 Z_{go}$	1 800	σ_a śr	1 800	-	-	-	1 800	σ_a śr	1800
		$\sigma_{amax} = 1,31 Z_{go}$	1	σ_a max	1	-	-	-	1	σ_a max	1

O t r z y m u j ą :

1. Biblioteka Główna P. Wr.	1
2. Biblioteka J-19	1
3. Promotor	1
4. Recenzenci	3
5. Autor	2

razem 8

