

**BADANIA WPŁYWU ZGNIOTU WPROWADZONEGO W OBSZARZE KONCENTRACJI
NAPRĘŻEŃ NA TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWĄ DURALOWEJ KONSTRUKCJI Z KARBEM**

BOHDAN JANCELEWICZ (WARSZAWA)

1. Wstęp

Trwałość zmęczeniowa i niezawodność konstrukcji stały się obecnie tak samo istotnymi wskaźnikami dla konstruktora, jak sztywność i wytrzymałość statyczna. W konstrukcjach lotniczych głównych przyczyn tego należy szukać w dynamicznym rozwoju transportu i komunikacji lotniczej w świecie. Wzrost prędkości lotu samolotów umożliwił przebywanie znacznie większych odległości w czasie użytkowania samolotu, co wyraźnie zwiększyło liczbę obciążeń działających na konstrukcję, np. pochodzących od burzliwości atmosfery. Statyczna analiza konstrukcji przestała więc być wystarczająca z punktu widzenia udokumentowania bezpieczeństwa konstrukcji. Konstrukcja samolotu stała się w wielu przypadkach skomplikowanym, wielokrotnie statycznie niewyznaczalnym ustrojem, w którym obliczenie rzeczywistych wartości naprężeń, szczególnie w licznych fragmentach, zawierających spiętrzenia naprężeń, okazuje się praktycznie niemożliwe. Z drugiej strony dążenie do uzyskania odpowiednich wskaźników ekonomicznych użytkowanego samolotu pociągnęło za sobą wymagania wydłużenia całkowitego okresu użytkowania samolotu oraz okresów międzyprzeglądowych, co, oczywiście, nie może odbywać się kosztem bezpieczeństwa. Stąd, m. in., wynikło prowadzenie obszernych badań i analiz, mających na celu nadanie konstrukcji samolotu niezbędnych cech i własności zmęczeniowych.

W przemyśle maszynowym i środków transportu naziemnego powstała metoda ulepszenia własności zmęczeniowych konstrukcji przez umocnienie przy użyciu zgniotu plastycznego na zimno. Otrzymywana po takiej obróbce warstwa zgniecionego materiału ma lepsze własności zmęczeniowe. Powstaje również, przeważnie bardziej korzystny, układ naprężeń własnych, ściskających w warstwie podpowierzchniowej, skąd najczęściej rozpoczynają się pęknięcia zmęczeniowe. To są w zasadzie dwa główne czynniki, które mogą spowodować podwyższenie trwałości zmęczeniowej konstrukcji. Często w wyniku powierzchniowej obróbki plastycznej otrzymuje się podwyższenie gładkości powierzchni i zlikwidowanie powierzchniowych mikrokarbów, co również poprawia własności zmęczeniowe konstrukcji.

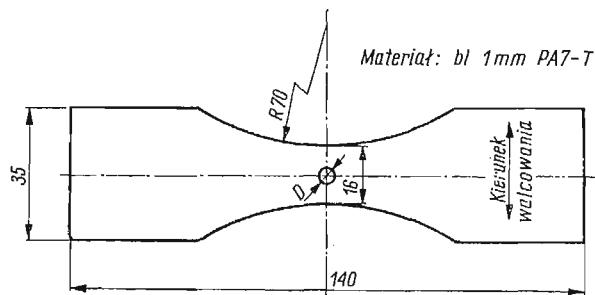
Użycie obróbki zgniotem na zimno w zastosowaniu do konstrukcji ze stopów aluminium jest obecnie znacznie mniej rozpowszechnione i zbadane niż w zastosowaniach do wyro-

bów ze stali. Badania FORRESTA [1], ROSENTHALA i SINESA [2], TEMPLINA [3], HEINRICHA [4] i innych wykazują, że umocnienie konstrukcji przez wstępne rozciągnięcie do naprężeń średnich rzędu granicy plastyczności powoduje wyraźne polepszenie własności zmęczeniowych. Również lokalne lub powierzchniowe umocnienie materiału albo konstrukcji w takich procesach technologicznych, jak rolowanie, śrutowanie i inne pociąga za sobą korzystne ulepszenie przeciwzmęczeniowe. Świadczą o tym wyniki uzyskane przez GLEASONA [5], SERENCENA i in. [6], a także wyniki badań wstępnych [7] do omawianych w tej pracy badań własnych.

Praca zawiera omówienie badań własnych, które miały na celu znalezienie zależności własności zmęczeniowych określonej duralowej konstrukcji cienkościennej z karbem od odpowiednio zwiększanego umocnienia lokalnego. W poszukiwaniu uzasadnień dla otrzymanych wyników zbadano rozkłady i intensywności odkształceń w warstwie umocnionej oraz rozkłady i wartości naprężeń własnych wywołanych przez wprowadzenie umocnienia. Wyniki tych badań pozwoliły również na podjęcie próby rozdzielenia wpływu zgniotu materiału i naprężeń własnych na wzrost trwałości zmęczeniowej badanej konstrukcji.

2. Badania wpływu umocnienia na własności zmęczeniowe duralowej konstrukcji z karbem

2.1. Główne założenia metodyczne. *Wybór rodzaju konstrukcji.* Jednym z wnikliwiej analizowanych fragmentów konstrukcji samolotu jest dolna powłoka skrzydeł, a szczególnie występujące w niej połączenia konstrukcyjne pokryć i usztywnień, leżące wzdłuż cięciwy skrzydła. Przyczyną tego są naprężenia w głównej mierze rozciągające i znaczne ich spię-



Rys. 1. Próbką

trzenia w połączeniach, zwłaszcza wokół nitów. Najczęściej w połączeniach konstrukcji lotniczych stosowany jest nit o średnicy $d = 3$ mm. Postanowiono więc przeprowadzić badania na próbkach płaskich odpowiadających tym warunkom konstrukcyjnym, z karbem w postaci otworu, który po ostatecznej obróbce zgniotem powinien mieć średnicę przyjmowaną zwykle w praktyce dla nita $\varnothing 3$ mm, a więc około $\varnothing 3,1$ mm. Jako materiał wybrano blachę o grubości 1 mm z PA7-T. W obciążonych połączeniach nitowych przy takich wymiarach nita i blachy podziałki nitowania zawierają się w granicach od minimalnej $t = 3d = 9$ mm do $t = 25$ mm.

Dysponując małą maszyną zmęczeniową firmy Schenck, o zakresie obciążeń do 300 kG, dla której kształt próbki maksymalnej (rys. 1) ma szerokość przekroju pomiarowego

równą 16 mm, zdecydowano, że konstrukcja z karbem będzie odwzorowana tą właśnie próbką z otworem wywierconym symetrycznie w przekroju pomiarowym. Półka taka może być uznana za fragment konstrukcji tak dobrany, by przeprowadzone na nim badania mogły stanowić podstawę do podjęcia badań połączeń nitowych zawierających początkowo tylko jeden nit o wymienionej średnicy 3 mm przy podziałce $t = 16$ mm (czyli średniej z wyżej wymienionych).

Wybór obciążeń. Z obciążeń działających na samolot w czasie użytkowania tylko obciążenia pochodzące od burzliwości atmosfery są w pewnym stopniu niezależne od konstrukcji samolotu. Jeżeli zmiana współczynnika obciążenia samolotu wywołana napotkaniem podmuchu o prędkości pionowej w wynosi

$$(2.1) \quad \Delta m = \frac{1}{2} e \frac{S}{Q} \frac{dc_z}{d\alpha} v w \eta$$

(gdzie Q/S obciążenie powierzchni nośnej, $dc_z/d\alpha$ pochylenie krzywej współczynnika siły nośnej, η współczynnik złagodzenia podmuchu) to widać, że przy ustalonej prędkości lotu v , np. prędkości przelotowej dla danego samolotu, obciążenia zmienne w burzliwej atmosferze zależą od prędkości pionowej podmuchu i liczby napotkanych podmuchów. Obciążenia te są najczęściej wymiarującymi, jeśli idzie o trwałość zmęczeniową płatów nośnych większości samolotów transportowych i innych nieakrobacyjnych. Dlatego też, przyjmując do analizy wyników podjętych badań hipotetyczny samolot transportowy, przyjęto jednocześnie, że jego własności zmęczeniowe będą określone na podstawie odpowiedniego widma burzliwości atmosfery.

Wstępne próby wykazały [7], że możliwe są znaczne przyrosty trwałości zmęczeniowej w wyniku ulepszania konstrukcji za pomocą zgniotu na zimno. Zdecydowano więc przyjmując dość wysokie, bo wynoszące $\sigma_m = 15$ kG/mm² naprężenia średnie (po uwzględnieniu poprawek na rzeczywiste wartości obciążeń naprężenia średnie wynosiły nominalnie $\sigma_m = 14,83$ kG/mm²). W lotniczych konstrukcjach duralowych, wykonywanych zgodnie z obowiązującymi wymaganiami międzynarodowymi ICAO oraz niektórymi krajowymi, np. [8], nie można byłoby dopuścić tak wysokich naprężeń średnich, odpowiadających współczynnikowi obciążenia $m = 1$, ze względu na wymagane minimalne współczynniki bezpieczeństwa i współczynniki obciążeń dopuszczalnych. Jednakże umożliwia się w ten sposób znaczne rozszerzenie amplitud naprężeń zmiennych, co jest ważne z punktu widzenia lepszego poznania badanych zjawisk, gdyż obejmuje się doświadczeniem większy odcinek krzywych zmęczenia.

Do przeliczenia widma podmuchów na widmo obciążeń i potem naprężeń przyjęto założenie, że przy prędkości przelotowej podmuch pionowy o prędkości $w = 15$ m/sek powoduje zmianę współczynnika obciążenia samolotu o $\Delta m = 1$. Założenie to jest realne, choć dla samolotów o małych i średnich obciążeniach powierzchni nośnych przyrost Δm w takich warunkach jest przeważnie nieco większy. Założenie to jest konsekwencją przyjęcia dość wysokich naprężeń przy $m = 1$ w stosunku do wytrzymałości doraźnej materiału i wymaganego minimalnego współczynnika bezpieczeństwa $\nu = 1,5$.

Wybór metody wykonywania umocnienia oraz ustalenie parametru niezależnego. Do wykonania umocnienia w materiale w otoczeniu otworu, a więc w strefie spiętrzenia naprę-

żeń, zastosowano przecięnięcie przez otwór kołka o odpowiednio dobranej średnicy. Otrzymane w ten sposób odkształcenie trwałe średnicy może być parametrem ilustrującym w odpowiedni sposób zgniot materiału i naprężenia własne w interesującym w badaniach przekroju pomiarowym. Przyjęto więc tak, jak w [7]

$$(2.2) \quad \mu = \frac{D_k - D_0}{D_0} 100 [\%],$$

jako umowny parametr niezależny, opisujący zmiany wprowadzone przez umocnienie w otoczeniu otworu, zarówno we własnościach materiału, jak i w naprężeniach własnych. Parametr ten nazywa się dalej krótko zgniotem.

Wybór badanych własności zmęczeniowych konstrukcji. Jako główne, interesujące konstruktora, zmęczeniowe cechy konstrukcji wyróżnia się:

- a) zużycie zmęczeniowe konstrukcji,
- b) trwałość zmęczeniową konstrukcji,
- c) przebieg intensywności zużycia zmęczeniowego konstrukcji i jej maksimum,
- d) poziom naprężeń, przy którym występuje maksimum intensywności zużycia zmęczeniowego oraz liczba zmian obciążeń powodująca wówczas zniszczenie konstrukcji.

Wymienione cechy, choć nie obejmują własności propagacji pęknięć zmęczeniowych, charakteryzują dość dokładnie własności zmęczeniowe konstrukcji i pozwalają na wyciągnięcie wniosków, niezbędnych do prawidłowego pokierowania użytkowaniem samolotu.

2.2. Badania zmęczeniowe. Przebieg prób i ich wyniki. Do wykonania próbek użyto materiału D16A-T (produkcji ZSRR), odpowiadającego polskiemu PA7-T. Przeprowadzono kontrolę zgodności własności materiału z polskimi normami. Skład chemiczny materiału zbadany metodą spektralną był zgodny (tablica 1) ze składem podanym dla stopu PA7 w

Tablica 1. Skład chemiczny materiału PA7

Nr próbki	skład w %							
	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ti	Al
1	4,00	1,25	0,63	0,25	0,3	śl.	0,04	reszta
2	3,80	1,26	0,64	0,23	0,3	śl.	0,04	reszta

normie PN-59/H-88026. Próba rozciągania wykonana na próbkach dziesięciokrotnych dała wyniki zgodne z atestem materiału (tablica 2). Pomiary grubości blachy dały wyniki zawierające się w zakresie 0,92 ÷ 0,97 mm. Zarówno własności mechaniczne, jak i wymiary

Tablica 2. Własności mechaniczne materiału PA7

R_m	$Q_{0,2}$	Q_{10}	E
kG/mm ²	kG/mm ²	%	kG/mm ²
45,0	29,0	17	$7,2 \cdot 10^3$

grubości odpowiadały warunkom normy PN-59/H-92746 dla materiału PA7-T. Blacha była platerowana obustronnie czystym aluminium, warstwami o grubości około 0,1 mm. Próbki (rys. 1) wykonano z jednego arkusza blachy tak, by kierunek walcowania był

prostopadły do kierunku obciążeń zewnętrznych. Obrys zewnętrzny próbek wykonano na frezarce w zespołach po 30 próbek. Szerokość przekroju pomiarowego utrzymywano w tolerancji $-0,1$ mm. Wiercenie, rozwiercanie i umacnianie otworu wykonywano z jednego założenia próbki w przyrządzie, który zapewniał współosiowość wszystkich operacji przez użycie zespołu tulejek wiertarskich pilotujących kolejno wiertło, rozwiertak i kołek (schemat wg [7]).

Poprzez odpowiednie kojarzenia ostatniego rozwiertaka i kołka otrzymano pięć różnych wartości zgniotu μ . Otwór tylko rozwiercony odpowiadał zgniotowi $\mu = 0$. Rozwiercanie otworów wykonywano ręcznie, umacnianie zaś na maszynie statycznej przy stałej prędkości posuwu wynoszącej 5 mm/min. W tabelicy 3 podano średnie wyniki pomiarów odpowiednich średnic i obliczone stąd wartości zgniotu μ .

Tabela 3. Wyniki pomiarów zgniotu μ

Seria	Obróbka otworu			$\mu = \frac{D_k - D_0}{D_0} \cdot 100$
	D_0	d_k	D_k	
oznacz.	mm	mm	mm	%
D_0	3,011	—	—	0
16	3,080	3,150	3,130	1,62
24	3,011	3,100	3,084	2,42
37	3,011	3,150	3,125	3,79
57	2,902	3,100	3,070	5,79
74	2,902	3,150	3,119	7,48
D	próbki bez otworu			—

Oznaczenia: D_g — średnica otworu po rozwierceniu

d_k — średnica kołka

D_k — średnica otworu po umocnieniu

W celu zmniejszenia odkształcenia płaszczyzny próbki w czasie umacniania objęto próbkę w otoczeniu otworu obustronnie okładzinami dobranymi doświadczalnie. Zmniejszało to dodatkowo oddziaływania wejścia i wyjścia kołka na materiał samej próbki. Przed przystąpieniem do zasadniczych prób zmęczeniowych przeprowadzono próby informacyjne uwzględniające wpływ czasu «ležakowania» próbek po wykonaniu umocnienia na trwałość zmęczeniową. Jak widać z uzyskanych wyników, (tablica 4, rys. 2) istnieje dość wyraźny spadek trwałości zmęczeniowej w ciągu pierwszych 24 godzin «ležakowania». Postanowiono więc rozpoczynać próby zmęczeniowe w 24 godziny po wykonaniu umocnienia. Sądząc z charakteru zależności trwałości zmęczeniowej od czasu «ležakowania» uzyskane w ten sposób wyniki będą bardziej zbliżone do asymptotycznych.

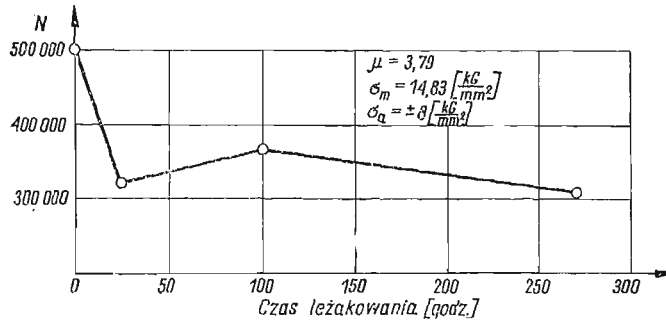
Selekcję próbek do każdego punktu krzywej zmęczenia prowadzono przestrzegając następujące kryteria (z odchyłkami):

- stałość powierzchni przekroju poprzecznego w przestrzeni pomiarowej,
- wartość zgniotu $\mu_{nom} \pm 5\% \mu_{nom}$,
- wartość siły przeciskania kołka przez otwór, zarówno maksymalnej w czasie wchodzenia kołka, jak i bieżącej w czasie przepychania części cylindrycznej $P_{sr} \pm 10\% P_{sr}$,
- ugięcie płaszczyzny próbki w przekroju pomiarowym mniejsze niż $0,1$ mm,
- czas «ležakowania» 24 ± 1 godz.

Tablica 4. Wyniki badań zmęczeniowych ($\sigma_m = 1483 \text{ kG/mm}^2$)

Numer serii prób	Nazwa serii prób	Liczność	czas	σ_α	N_{sr}	$\frac{S_{10gN}}{\log_{sr} N} \cdot 100$	$\frac{S_{10gN}}{\sqrt{m} \log_{sr} N} \cdot 100$
		(<i>m</i>)	«leżakowania»				
		sztuk	godz.	kG/mm ²	cykli obc.	%	%
0—37	Badania wpływu czasu «leżakowania» na trwałość zmęczeniową $\mu = 3,79$	10	0	8,00	499 000	3,33	1,05
24—37		10	24	8,00	318 200	1,45	0,45
100—37		10	100	8,00	366 350	3,87	1,22
270—37		7	270	8,00	309 600	1,39	0,53
D_0	Badania wpływu umocnienia na własności zmęczeniowe $\mu = 0$	7	—	9,89	36 690	3,06	1,16
$3D_0$		7	—	6,50	134 770	1,08	0,41
$4D_0$		7	—	5,00	328 000	0,68	0,26
$5D_0$		7	—	3,50	4 638 500	6,02	2,28
16	$\mu = 1,62$	7	24	10,00	80 130	2,46	0,93
		8	„	8,00	223 050	1,28	0,45
		10	„	6,00	548 210	7,69	2,43
		7	24	4,50	4 679 500	7,45	2,83
24	$\mu = 2,42$	7	24	10,00	92 660	1,21	0,46
		7	„	8,00	281 650	1,72	0,65
		7	„	6,00	1 012 000	8,61	3,26
		7	24	5,00	5 471 400	6,64	2,51
37	$\mu = 3,79$	7	24	10,00	106 000	1,70	0,64
		10	„	8,00	318 200	1,45	0,45
		7	„	6,50	799 100	5,86	2,22
		7	24	5,50	7 422 300	3,79	1,43
57	$\mu = 5,79$	7	24	10,00	128 410	3,29	1,24
		10	„	8,00	479 520	4,21	1,33
		7	„	6,50	1 553 500	7,78	2,94
		8	24	5,80	4 505 100	10,15	3,59
74	$\mu = 7,49$	8	24	10,00	114 100	2,25	0,80
		7	„	8,00	325 760	1,43	0,54
		7	„	7,20	472 720	1,34	0,51
		8	„	6,50	2 300 900	10,40	3,68
		7	24	5,80	3 435 600	5,86	2,22
D	Konstrukcja ciągła bez karbu	7	—	9,56	221 260	1,66	0,63
$2D$		15	—	8,10	482 350	2,99	0,80
$3D$		15	—	6,79	1 505 700	6,09	1,63
$4D$		10	—	6,05	2 751 700	6,69	2,12
$5D$		10	—	5,47	6 537 400	6,15	1,95
24S	Badanie wpływu naprężeń własnych na trwałość zmęcz.	10	24	9,00	87 900	0,90	0,35
		10	„	6,50	242 300	2,03	0,64
		10	24	5,10	858 600	4,89	1,55

Próby zmęczeniowe wykonano na maszynach zmęczeniowych firmy Schenck o zakresie obciążeń do 300 kG i częstości zmian obciążeń równej 3000 1/min. Zbadano łącznie siedem rodzajów próbek, odpowiadających kolejno: konstrukcji ciągłej z karbem bez umocnienia, konstrukcji ciągłej z karbem umocnionym przy użyciu pięciu różnych wartości zgniotu oraz konstrukcji ciągłej bez karbu. Oznaczenie poszczególnych serii — zgodne z tablicą 3.



Rys. 2. Wpływ czasu «leżakowania» próbek po wykonaniu zgniotu (umocnienia) na trwałość zmęczeniową

Przy opracowaniu wyników oparto się na najczęściej przyjmowanym, przybliżonym do rzeczywistości założeniu, że logarytmy trwałości próbek na danym poziomie naprężeń spełniają warunki rozkładu normalnego. Średnią trwałość konstrukcji na danym poziomie naprężeń obliczano więc jako

$$(2.3) \quad \log N_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^m \log N_i}{m}$$

gdzie N_i trwałość i -tej próbki wyrażona w cyklach obciążeń, m liczba próbek zbadanych na danym poziomie naprężeń.

Odchyłki standardowe, będące miarą rozrzutu wyników, obliczano wg wzoru

$$(2.4) \quad S_{\log N} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \left[\sum_{i=1}^m (\log N_i)^2 - \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^m \log N_i \right)^2 \right]}$$

Błąd standardowy średniej równa się

$$(2.5) \quad S_{\log N_{sr}} = \frac{S_{\log N}}{\sqrt{m}}$$

Średnie wyniki prób wraz z wymienionymi wskaźnikami zestawiono w tablicy 4. Odchyłkę standardową i błąd standardowy średniej odniesiono do wartości $\log N_{sr}$ w celu lepszej porównywalności otrzymanych rozrzutów wyników z podobnymi wskaźnikami innych już opublikowanych badań.

Do przeprowadzenia analizy własności zmęczeniowych konstrukcji niezbędne jest analityczne wyrażenie krzywej zmęczenia. Zdecydowano przyjąć funkcję w postaci hiper-

boli w układzie (σ_a, N) , zaproponowanej przez WEIBULLA [9] i uzyskanej na podstawie teorii dyslokacji przez ODINGA [10]

$$(2.6) \quad N = \alpha'(\sigma_a - \sigma_{az})^{-\beta},$$

gdzie α' i β stałe parametry funkcji określane doświadczalnie, σ_{az} pozioma asymptota funkcji w przyjętym ogólnie układzie współrzędnych.

Funkcja ta dobrze odwzorowuje charakter zjawiska w zakresie $N \geq 10^4$ i ze względu na swoją prostotę jest często stosowana. Funkcję (2.6) w postaci logarytmicznej stosuje się często ze względu na liniowy jej charakter w układzie współrzędnych dwulogarytmicznych $[\log N, \log(\sigma_a - \sigma_{az})]$.

$$(2.7) \quad \log N = \alpha - \beta \log(\sigma_a - \sigma_{az})$$

gdzie $\alpha = \log \alpha'$.

Obliczenie parametrów α , β i σ_{az} dla poszczególnych badanych serii prób wykonywano przy użyciu metody minimum sumy kwadratów błędów. Zestawienie wyników tych obliczeń zawiera tablica 5. Ilustracją graficzną odwzorowania wyników doświadczeń przez

Tablica 5. Parametry krzywych zmęczenia: $\log N = \alpha - \beta \log(\sigma_a - \sigma_{az})$

Oznaczenie próby (krzywej)		α	β	σ_{az}	F_{min}	Δ
μ [%]	nr rys.			kG/mm ²		[%]
0	1	6,0452	1,7686	3,060	0,00164	0,19
1,62	2	6,5678	1,9918	3,560	0,01010	0,44
2,42	3	6,6282	2,1083	4,105	0,00727	0,38
3,79	4	6,1470	1,5787	5,150	0,00848	0,40
5,79	5	7,4255	2,9412	3,950	0,00374	0,28
7,49	6	7,2642	2,9135	4,100	0,00728	0,29
konstr. ciągła	7	7,7376	3,0496	3,450	0,00289	0,18

funkcje o tak obliczonych parametrach są wykresy naniesione zbiorczo wraz z odpowiednio oznaczonymi punktami doświadczalnymi wartości średnich na rys. 3.

Ażeby lepiej zdać sprawę z dokładności odwzorowania wyników doświadczeń za pomocą przyjętej funkcji opisującej krzywą zmęczenia, wprowadzono dodatkowy wskaźnik, wiążący minimum sumy kwadratów błędów F_{min} z sumą trwałości średnich na poszczególnych poziomach naprężeń. Wartość tego wskaźnika wyrażonego stosunkiem

$$(2.8) \quad \Delta = \frac{\sqrt{F_{min}}}{\sum_{i=1}^n \log N_{sr}}$$

umieszczono wraz z wartościami minimum sumy kwadratów błędów również w tablicy 5.

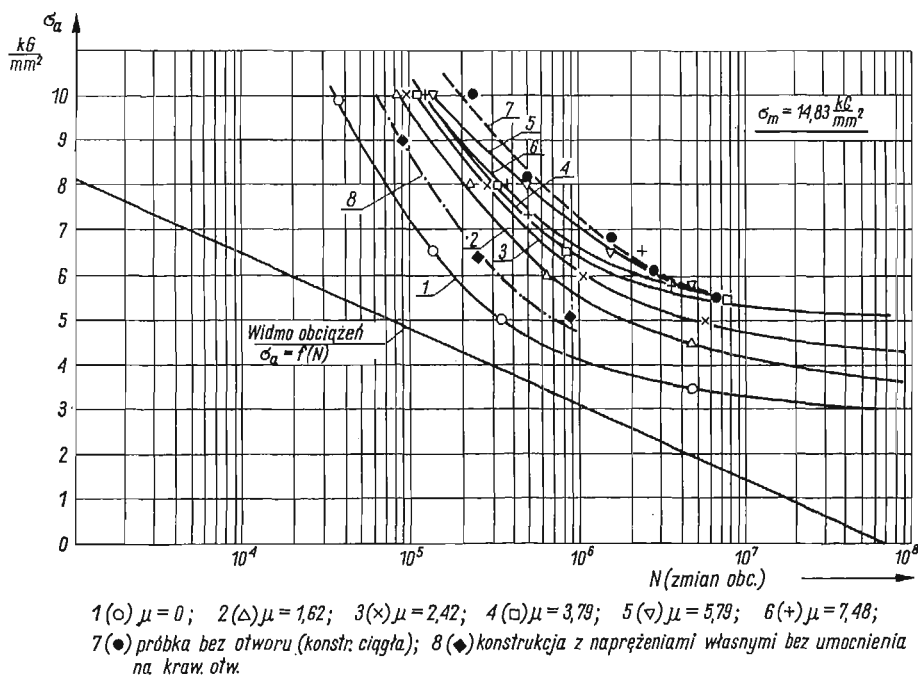
Analiza wyników badań zmęczeniowych. Analizę wyników badań zmęczeniowych wykonanych przy użyciu opisanych próbek wykonuje się w założeniu przynależności tych próbek, jako fragmentów konstrukcji do określonego samolotu hipotetycznego i dla przyjętego widma obciążeń zmiennych, pochodzących wyłącznie od burzliwości atmosfery.

Kierując się chęcią wyboru widma, które odpowiadałoby środkowoeuropejskim warunkom meteorologicznym i wysokością lotu zbliżonym do średniej stosowanej w transporcie lotniczym, przyjętej jako 2000 m, zdecydowano się na wybór widma podanego przez TAYLORA [11]. Widmo to opisuje się funkcją

$$(2.9) \quad H = H_0 e^{-h_1 w},$$

gdzie H liczba podmuchów pionowych o prędkości przewyższającej $\pm w$, H_0 i h_1 parametry funkcji, lub w przypadku przejścia z prędkości podmuchów na wartość amplitudy naprężeń, powstałych w wyniku napotkania przez samolot podmuchu oraz przedstawienia widma w postaci zlogarytmowanej

$$(2.10) \quad \log H = \log H_0 - h \sigma_a \log e.$$



Rys. 3. Wykres zbiorczy wyników badań zmęczeniowych oraz obciążeń

Przyjmując dane liczbowe tego widma odniesione do $1,6 \cdot 10^7$ km lotu na średniej wysokości lotu około 2000 m, związek między prędkością podmuchu a logarytmem liczby podmuchów dodatnich lub ujemnych można napisać w postaci

$$w = 1,715 \log H + 13,339 \text{ [m/sek]}.$$

W oparciu o założenia omówione w 2.1. przeliczono widmo na układ związany z badanymi próbkami, uwzględniając fakt, że pełny cykl obciążeń realizowany w próbach składa się z jednego obciążenia dodatniego i jednego ujemnego. Wówczas

$$(2.11) \quad \log H = 7,4763 - 0,5892 \sigma_a.$$

Obliczenia głównych własności zmęczeniowych konstrukcji wykonuje się korzystając z analizy podanej przez LUNDBERGA [12] i in. Jeżeli, mianowicie, na jakimś poziomie naprężeń σ_a , przy stałych naprężeniach średnich σ_m zużycie zmęczeniowe określić jako stosunek

$$(2.12) \quad D = \frac{n}{N},$$

gdzie n liczba cykli obciążeń przyłożonych do konstrukcji, N liczba cykli tych obciążeń, potrzebnych do zniszczenia danej konstrukcji, to dla naprężeń $d\sigma_a$ przy danym widmie obciążeń otrzymuje się dla danej krzywej zmęczenia przyrost zużycia zmęczeniowego

$$(2.13) \quad dD = -\frac{dH}{N}.$$

Określając intensywność zużycia zmęczeniowego przez

$$(2.14) \quad D' = \frac{dD}{d\sigma_a} = -\frac{dH}{d\sigma_a} \frac{1}{N}$$

oraz przyjmując podane już poprzednio funkcje opisujące krzywą zmęczenia i widmo obciążeń otrzymuje się

$$(2.15) \quad D' = \frac{H_0 h}{\alpha'} e^{-h\sigma_a} (\sigma_a - \sigma_{az})^\beta.$$

Wartość naprężeń, przy których wystąpi maksimum intensywności zużycia zmęczeniowego określa się z warunku $dD'/d\sigma_a = 0$ i wynosi

$$(2.16) \quad \sigma_{aD'_{\max}} = \frac{\beta}{h} + \sigma_{az},$$

a stąd maksimum intensywności zużycia zmęczeniowego

$$(2.17) \quad D' = \frac{H_0 h}{\alpha'} e^{-h\sigma_a} (\sigma_a - \sigma_{az})^\beta$$

odpowiadająca $\sigma_{aD'_{\max}}$ liczba cykli obciążeń

$$(2.18) \quad N_{D'_{\max}} = \alpha' \left(\frac{h}{\beta} \right)^\beta.$$

Jeżeli całkowite zużycie zmęczeniowe wyrazić całką w granicach od σ_{az} do ∞ , co jest możliwe wobec pomijalnie małych zużyć zmęczeniowych przy trwałościach mniejszych niż $N = 10^4$

$$(2.19) \quad D = \int_{\sigma_{az}}^{\infty} D' d\sigma_a,$$

to po wykonaniu podstawień i przekształceń otrzymuje się

$$(2.20) \quad D = \frac{H_0}{\alpha'} h^{-\beta} e^{-h\sigma_{az}} \Gamma(\beta+1)$$

oraz całkowitą trwałość zmęczeniową

$$(2.21) \quad R = \frac{1}{D}.$$

Zgodnie bowiem z zaadoptowaną przez MINERA [13] do konstrukcji lotniczych hipotezą Pallmgrena o kumulacji zmęczenia, zniszczenie zmęczeniowe powinno wystąpić wówczas, gdy całkowite zużycie zmęczeniowe na wszystkich poziomach naprężeń wyniesie 1. Warunek ten, jak wykazują liczne badania, może być użyty tylko dość zgrubsza jako kryterium. Może on jednak z powodzeniem służyć jako wskaźnik porównawczy we względnym analizowaniu własności zmęczeniowych konstrukcji.

Jeżeli więc przedstawić wyniki badań w sposób względny, np. w odniesieniu do konstrukcji ze zgniotem $\mu = 0$, traktowanej jako konstrukcję podstawową, to obok uwzględnienia powyższego zastrzeżenia widoczne staje się pewne uogólnienie uzyskanych wyników, gdyż uniezależnia się je od parametru H_0 , reprezentującego liczbę przelecianych kilometrów. Pozostaje zależność od pochylenia krzywej widma (parametr h), który to parametr dla większości opublikowanych widm burzliwości atmosfery w zakresie obciąż-

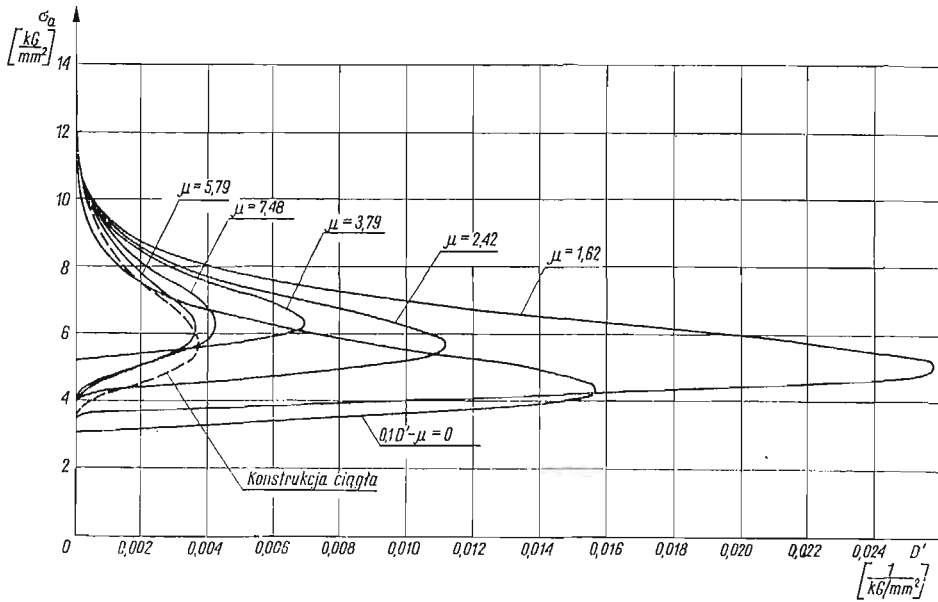
Tablica 6. Bezwzględne własności zmęczeniowe

Oznaczenie próby	$\sigma_{aD'}_{max}$	ND'_{max}	D'_{max}	D
μ [%]	kG/mm ²	zmian obc.	1/kG/mm ²	
0	4,360	640 200	0,15725	0,4049
1,62	5,030	1 721 000	0,02575	0,0700
2,42	5,659	1 677 700	0,01125	0,0313
3,79	6,310	1 104 100	0,00700	0,0173
5,79	6,120	2 737 200	0,00366	0,0121
7,49	6,247	1 982 400	0,00425	0,0139
Konstr. ciągła	5,700	4 624 900	0,00386	0,0126

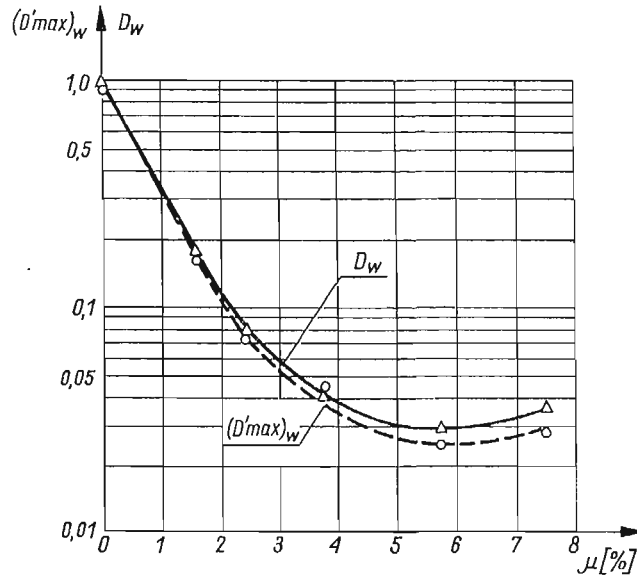
żeń, leżących w otoczeniu maksimum intensywności zużycia zmęczeniowego, zmienia się bardzo nieznacznie. Rozumowanie powyższe spowodowało, że główną analizę wyników badań zmęczeniowych prowadzi się w ujęciu względnym w odniesieniu do konstrukcji z karbem nieumocnionym ($\mu = 0$).

Tablica 7. Względne własności zmęczeniowe

Oznaczenie próby	$(\sigma_{aD'}_{max})_w$	$(ND'_{max})_w$	$(D'_{max})_w$	D_w	R_w
μ [%]					
0	1	1	1	1	1
1,62	1,154	2,688	0,1638	0,1729	5,78
2,42	1,297	2,640	0,0715	0,0773	12,94
3,79	1,447	1,723	0,0445	0,0427	23,40
5,79	1,404	4,275	0,0239	0,0299	33,46
7,49	1,434	3,095	0,0270	0,0343	29,13
Konstr. ciągła	1,307	7,221	0,0245	0,0311	32,13

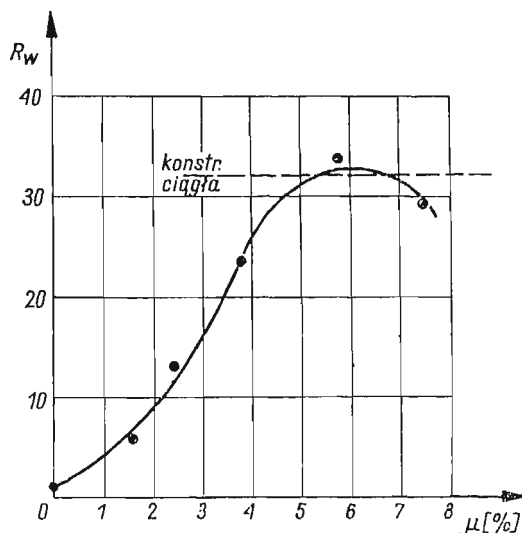


Rys. 4. Wykresy intensywności zużycia zmęczeniowego

Rys. 5. Zależność maksymalnej względnej intensywności zużycia zmęczeniowego i względnego zużycia zmęczeniowego od zgniotu μ

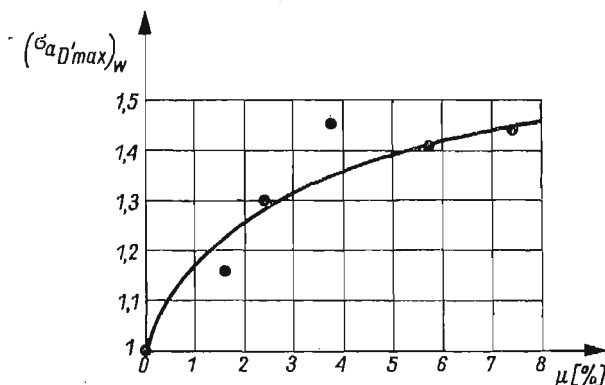
Wyniki obliczeń bezwzględnych własności zmęczeniowych konstrukcji podano w tabelicy 6, a rozkłady intensywności zużycia zmęczeniowego na rys. 4. Obliczenia względnych własności zmęczeniowych konstrukcji zawiera tabelica 7 i ilustrują wykresy (rys. 5—7)

Właściwości zmęczeniowe konstrukcji ciągłej bez karbu podane również w tablicach 6 i 7 umożliwiają dodatkową ocenę uzyskanych wyników ulepszenia własności zmęczeniowych konstrukcji z karbem. Dla wyjaśnienia należy dodać, że ze względu na ograniczenia zakresu obciążeń możliwych do realizacji na używanych maszynach, zmniejszo-



Rys. 6. Zależność względnej trwałości zmęczeniowej od zgniotu μ

no szerokość przekroju pomiarowego próbek konstrukcji ciągłej do 13 mm, zachowując podobieństwo geometryczne pozostałych wymiarów. Nie uległa zmianie ilość materiału w przekroju pomiarowym i to ma tu zasadnicze znaczenie.



Rys. 7. Zależność względnej amplitudy naprężeń przy maksimum intensywności zużycia zmęczeniowego od zgniotu μ

3. Pomiary rozkładu warstwy umocnionej i naprężeń własnych powstałych po umocnieniu otworu

Wprowadzenie zgniotu plastycznego przez umocnienie otworu pociąga za sobą zmiany jakościowe w konstrukcji, z których zmiany własności materiału zgnieczonego oraz zmiany w postaci wprowadzenia pewnego rozkładu naprężeń własnych można uznać za głównie

oddziaływające na zmiany własności zmęczeniowych badanych konstrukcji. Przepchnięcie kołka przez otwór powodowało jeszcze znaczny wzrost gładkości powierzchni w otworze. Wpływ ten można jednak pominąć ze względu na praktycznie niezmienną ostrość krawędzi otworu, która w olbrzymiej większości prób była ogniskiem pęknięcia zmęczeniowego.

3.1. Pomiary rozkładu warstwy umocnionej. Metoda badań. Badania rozkładu warstwy umocnionej oparto na założeniu, że umocnienie materiału próbki w tego rodzaju konstrukcjach, jakimi były badane zmęczeniowo próbki, związane jest ściśle z rozkładem odkształceń trwałych materiału wokół otworu. Odkształcenie materiału w otoczeniu otworu odbywało się w stanie trójosiowego ściskania ze względu na użycie obustronnych okładzin. Wszystkie zmiany w materiale, które z punktu widzenia teorii dyslokacji [10] mogą wpłynąć na własności zmęczeniowe konstrukcji, jak liczba wakansów i dyslokacji, możliwość ich przemieszczeń itp. występują więc w całej objętości materiału zgniatanego i trudno wyróżnić któryś z kierunków jako uprzywilejowany.

W przypadku ogólnym, definiując odkształcenie względne w kierunku głównym jako stosunek przyrostu długości jakiegoś wymiaru w tym kierunku do aktualnej długości tego wymiaru, czyli

$$(3.1) \quad d\varphi = \frac{dl}{l}$$

otrzymamy wydłużenie całkowite wymiaru od początkowego l_0 do końcowego l'_0

$$(3.2) \quad \varphi = \int_{l_0}^{l'_0} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l'_0}{l_0}.$$

W kierunku trzech osi głównych 1, 2, 3 odpowiednio

$$(3.3) \quad \varphi_1 = \ln \frac{l'_1}{l_1}; \quad \varphi_2 = \ln \frac{l'_2}{l_2}; \quad \varphi_3 = \ln \frac{l'_3}{l_3}.$$

Przyjęto, że materiał w procesie odkształcenia nie zmienia swojej objętości, choć doświadczenia, np. GULAJEWA [14] wskazują, że założenia takie w niektórych przypadkach dużych odkształceń mogą być podważone.

Z przyjęcia wymienionego założenia wynika, że suma odkształceń względnych w trzech kierunkach głównych musi być równa zero, czyli

$$(3.4) \quad \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0.$$

Miernikiem ogólnym odkształcenia materiału jest intensywność odkształceń plastycznych wyrażona np. [15] wzorem

$$(3.5) \quad \varphi_i = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_3^2}.$$

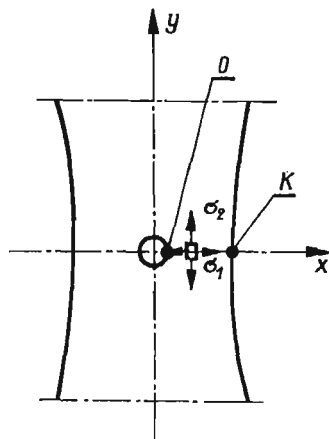
Wielkość ta, ujmująca w sobie wszystkie trzy odkształcenia główne, jest dobrym parametrem porównawczym, ilustrującym zmiany wprowadzone w materiale w wyniku umocnienia, istotne z punktu widzenia własności zmęczeniowych materiału.

Jeśli więc w badanych próbkach pomierzyć odkształcenia w kierunkach osi x i y , odpowiadających kierunkom głównym 1 i 2 (rys. 8) czyli φ_1 i φ_2 , to z (3.4) wynika

$$(3.6) \quad \varphi_3 = -(\varphi_1 + \varphi_2),$$

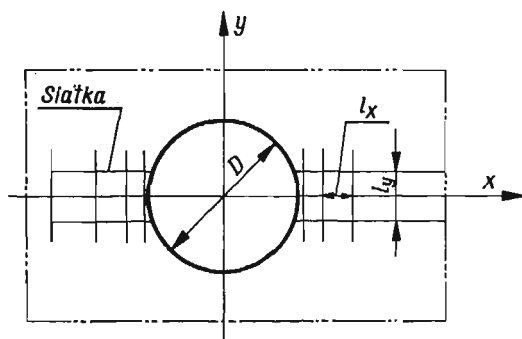
a po podstawieniu (3.6) w (3.5)

$$(3.7) \quad \varphi_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_1 \varphi_2}.$$



Rys. 8. Kierunki główne w przekroju pomiarowym

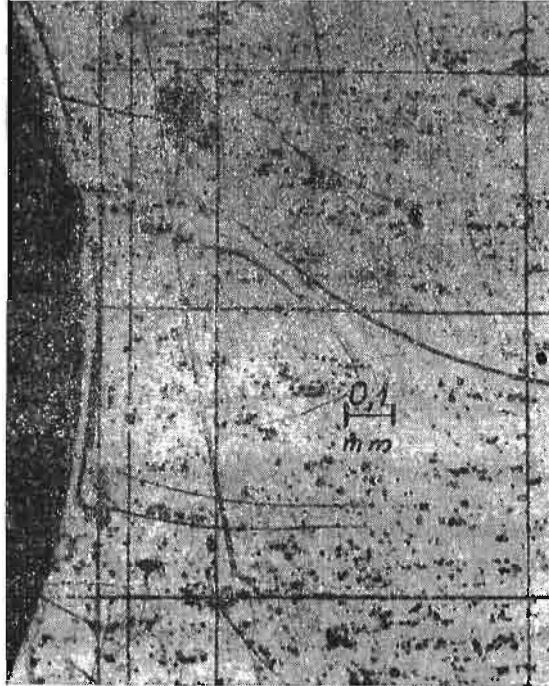
Tak określoną intensywnością odkształceń trwałych posłużono się jako parametrem charakteryzującym warstwę umocnioną w otoczeniu otworu. Do pomiaru odkształceń skorzystano z metody siatek elementarnych (rys. 9, 10) nanoszonych ręcznie w otoczeniu otworu przy użyciu ostrza płaskiego (żyłетки). Pomiaru odkształceń są tu obarczone błę-



Rys. 9. Schemat nanoszenia siatki

dem wywołanym istnieniem w materiale naprężeń własnych. Jednakże odkształcenia związane z naprężeniami własnymi, w szczególności naprężeniami w kierunku promieniowym (x) są pomijalnie małe w stosunku do mierzonych odkształceń trwałych.

Przebieg badań i ich wyniki. Do pomiaru rozkładu odkształceń materiału w otoczeniu otworu po umocnieniu użyto łącznie trzynastu próbek wykonanych identycznie, jak próbki do badań zmęczeniowych. Na spolerowaną powierzchnię próbki nanoszono siatkę, której wymiary charakterystyczne mierzono przed umocnieniem otworu i w 24 godziny po wykonaniu umocnienia (bez okładziny od strony siatki), obliczając stąd odkształcenia φ_1 i φ_2 w przekroju pomiarowym próbki. W celu znalezienia maksymalnej wartości φ_1 na krawędzi otworu ekstrapolowano wykres $\log \varphi_1 = f(x_\varphi)$ (gdzie x_φ jest współrzędną mie-

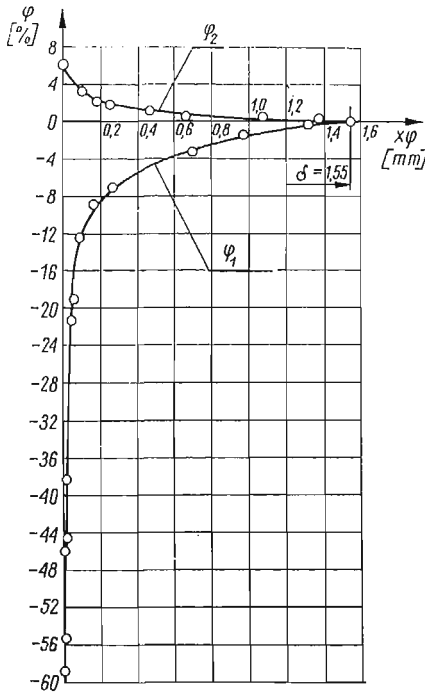


Rys. 10. Obraz linii siatki

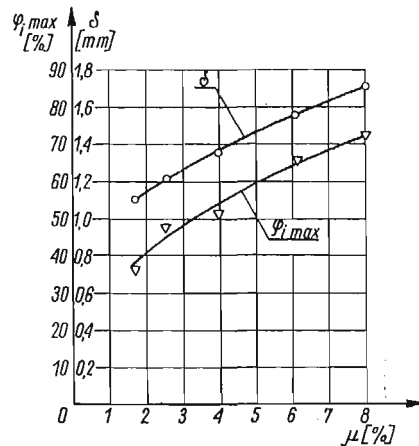
rzoną od krawędzi otworu wzdłuż osi x w kierunku krawędzi zewnętrznej próbki), linią prostą do przecięcia z osią $\log \varphi_1$ w układzie półlogarytmicznym ($\log \varphi_1, x_\varphi$). Podobnie z ekstrapolacji wyników $\varphi_1(x_\varphi)$ i $\varphi_2(x_\varphi)$ do przecięcia z poziomymi osiami, odpowiadającymi wartości $\varphi_{1,2} = \pm 0,1\%$ otrzymano średnią wartość szerokości zalegania odkształcenia trwałego, reprezentującą szerokość warstwy umocnionej. Charakter rozkładu φ_1 i φ_2 w przekroju pomiarowym próbki był powtarzalny dla wszystkich badanych umocnień. Przykładowy rozkład φ_1 i φ_2 w zależności od x_φ podano na rys. 11.

Z otrzymanych wyników wybiera się dwa parametry charakteryzujące umocnienie materiału badanych konstrukcji. Jest to maksimum intensywności odkształcenia plastycznego na krawędzi otworu $\varphi_{i \max}$ oraz szerokość strefy umocnionej, której miernikiem jest tu parametr δ (rys. 11). Maksimum intensywności odkształcenia $\varphi_{i \max}$ obliczano, korzystając z wartości φ_1 , otrzymanej z omówionej ekstrapolacji oraz pomierzonej na kra-

wędzi otworu wartości φ_2 . Zależność $\varphi_{i \max}$ i δ od zgniotu μ pokazano na wykresie (rys. 12). Widoczna jest dobra ciągłość i niewielkie rozrzuty otrzymanych wyników.



Rys. 11. Zależność odkształceń φ_1 i φ_2 od x_φ ($x_\varphi = 0$ na kraw. otw.) $\mu = 6.12$; wyniki średnie z czterech pomiarów (dwie próbki: strona lewa i strona prawa)



Rys. 12. Zależność intensywności odkształcenia na krawędzi otworu ($\varphi_{i \max}$) i szerokości zalegania warstwy umocnionej δ od zgniotu μ

3.2. Pomiary naprężeń własnych. Metoda pomiarów. Do pomiaru naprężeń własnych zastosowano opanowaną przy pomiarach rozkładu warstwy umocnionej metodę siatek elementarnych. Z pomierzonego rozkładu odkształceń siatki, wyznaczonego z pomiarów odpowiednich jej parametrów przed rozcięciem i po rozcięciu próbki w sposób wyodrębniający obszar pomiarowy, można z podstawowych zależności wyznaczyć rozkład naprężeń własnych w tym obszarze. W punktach 0 i K (rys. 8), gdzie istnieje jednoosiowy stan napięcia przy założeniu płaskiego charakteru doświadczenia, co w tym przypadku jest uzasadnione:

$$(3.8) \quad \sigma_{1S} = 0; \quad \sigma_{2S} = E \varepsilon_{2S}.$$

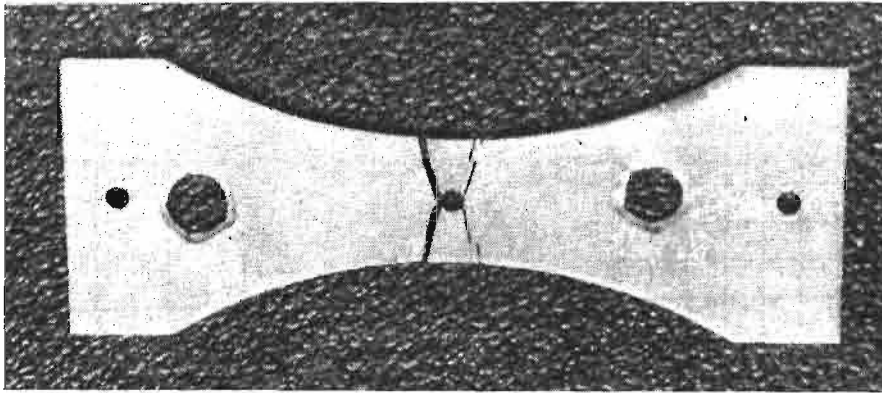
W dowolnym punkcie przekroju pomiarowego, leżącym na osi x

$$(3.9) \quad \sigma_{1S} = \frac{E}{1-\nu^2} [\varepsilon_{1S} + \nu \varepsilon_{2S}],$$

$$\sigma_{2S} = \frac{E}{1-\nu^2} [\varepsilon_{2S} + \nu \varepsilon_{1S}],$$

gdzie ε_{1S} i ε_{2S} odkształcenia w kierunkach głównych 1(x) i 2(y), ν liczba Poissona, E moduł sprężystości.

Przebieg badań i ich wyniki. Pomiar rozkładów odkształceń, umożliwiających wyznaczenie naprężeń własnych, wykonano na dwóch próbkach o zgniocie odpowiadającym $\mu = 3,79$ w próbach zmęczeniowych. Próbki wykonano identycznie, jak wszystkie próbki użyte w zasadniczych badaniach zmęczeniowych. Wiercenie, rozwiercanie i umacnianie otworu wykonywano z jednego założenia próbki w przyrządzie, przy czym operacje te wykonywano bez okładziny górnej w celu uzyskania porównywalności z rozkładami warstwy umocnionej. Powodowało to, jak otrzymano w pomiarach warstwy umocnionej, nieco większe wartości zgniotu μ (tu $\mu = 3,99$). W 24 godziny po umocnieniu nanoszono w przekroju pomiarowym na spolerowanej powierzchni próbki siatkę, uwzględniając spodziewane gradienty naprężeń własnych. Po pomiarze siatki i kontrolnych po-

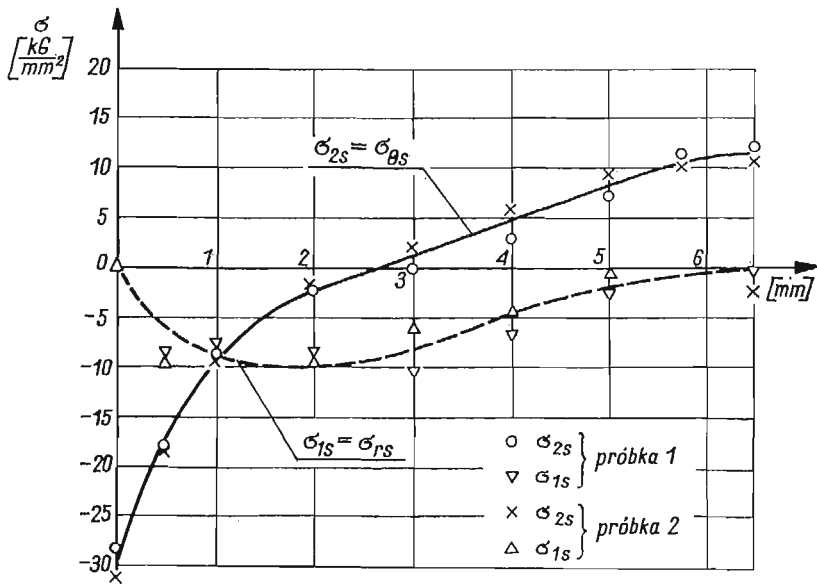


Rys. 13. Widok próbki rozciętej do pomiaru rozkładu naprężeń własnych

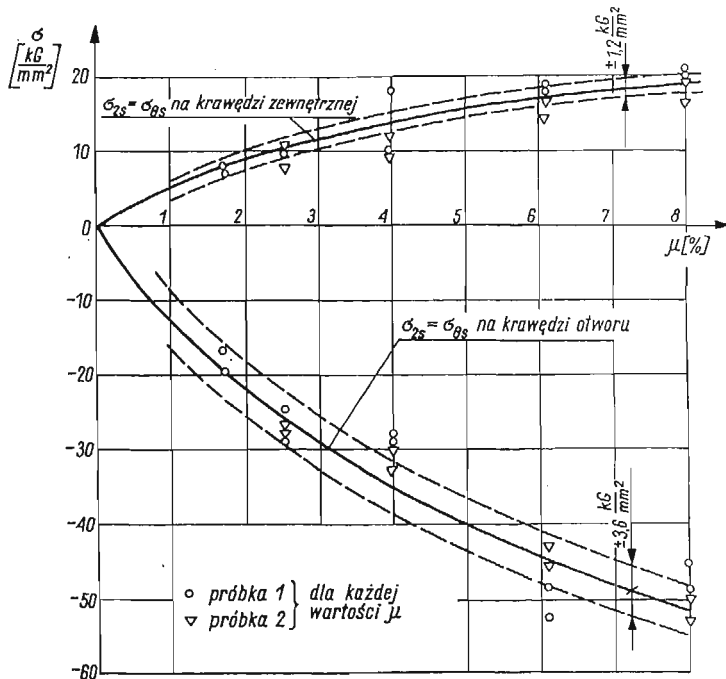
miarach średnicy otworu w celu określenia wartości zgniotu μ rozcinano delikatnie próbkę przy użyciu piłki ręcznej i nacinano fragment z naniesioną siatką tak, by go oddzielić od pozostałego materiału próbki. Rozcięte próbki (rys. 13) «leżakowały» ponownie przez 24 godziny w temperaturze pokojowej, a następnie ponownie mierzono te same parametry siatek. Odkształcenia uwolnione w ten sposób obliczano jako

$$(3.10) \quad \varepsilon_{1S} = \frac{\Delta l_x}{l_x}; \quad \varepsilon_{2S} = \frac{\Delta l_y}{l_y}$$

ze względu na małe ich wartości. Dla uśrednionych wyników pomiarów z lewej i prawej strony przekroju pomiarowego wyrysowywano linie odkształceń, a następnie z tak interpolowanych linii odczytywano dane do obliczenia wartości naprężeń. Tu należy podkreślić, że interpolowanie linii odkształceń nie nastęrczało trudności ze względu na bardzo dobrą symetrię otrzymanych wyników pomiarów. Rozkład naprężeń własnych w przekroju pomiarowym pokazano na rys. 14. Charakter rozkładu jest zgodny ze spodziewanym i zbliżony do rozkładów naprężeń własnych w rurach grubościennych po odkształceniu trwałym średnicy wewnętrznej.



Rys. 14. Rozkład naprężeń własnych w przekroju pomiarowym
 $\sigma_{1s} \approx \sigma_{r s}$ — naprężenia w kierunku osi x ; $\sigma_{2s} \approx \sigma_{\theta s}$ — naprężenia w kierunku osi y



Rys. 15. Zależność naprężeń własnych w kierunku osi y (rys. 8) na krawędzi otworu ($\sigma_{2s} \approx \sigma_{\theta s}$)_o i na krawędzi zewnętrznej ($\sigma_{2s} \approx \sigma_{\theta s}$)_k od zgniotu μ . Liniami przerywanymi naniesiono granice dokładności pomiarów

Dalsze pomiary naprężeń własnych ograniczono do zmierzenia naprężeń σ_{2S} na krawędzi otworu (punkt 0) i na krawędzi zewnętrznej próbki (punkt K) po obu stronach przekroju pomiarowego, jako najbardziej istotnych z punktu widzenia wpływu naprężeń własnych na własności zmęczeniowe badanych konstrukcji. Wyniki tych pomiarów w zależności od wartości zgniotu μ , mierzonego również w czasie pomiarów odkształceń, pokazano na wykresie (rys. 15).

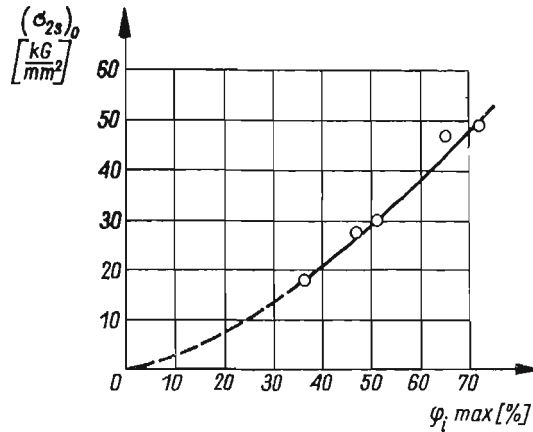
3.3. Analiza wyników pomiarów rozkładu warstwy umocnionej i naprężeń własnych. Wyniki pomiarów rozkładu warstwy umocnionej wykazują kilka charakterystycznych cech. Rozkład odkształceń φ_1 i φ_2 dowodzi, że dominującym czynnikiem powodującym odkształcenie jest rozpychanie materiału przez kołek, a nie rozciąganie włókien materiału wokół otworu, jak np. podczas zwiększania w ten sposób średnic pierścienia. Intensywności odkształceń φ_i w warstwie podpowierzchniowej materiału w otworze są bardzo duże i wynikają przede wszystkim z dużych odkształceń φ_1 . Znamienne jest, że mimo blisko pięciokrotnego wzrostu μ ($1,62 \div 8,02$) maksymalna intensywność odkształcenia $\varphi_{i\max}$ na krawędzi otworu wzrasta tylko około dwukrotnie. Powiększa się jednak odkształcenie włókien sąsiednich, choć szerokość warstwy umocnionej wzrasta zaledwie o 55% ($1,1 \div 1,7$ mm).

Drugim charakterystycznym zjawiskiem są duże gradienty $d\varphi/dx_\varphi$ w materiale leżącym bardzo blisko krawędzi otworu. Nie wnikając jeszcze w dokładność pomiarów można spodziewać się kilku fizycznych przyczyn tego faktu. Pierwszą z nich może być ścieranie pewnej ilości materiału przez kołek, drugą — łatwiejsze odkształcanie materiału zawierającego nierówności po obróbce rozwiertakiem niż materiału leżącego już poza wpływem obróbki wiórowej, a trzecią — możliwość pewnego wypłynięcia materiału w kierunku zwiększenia grubości, gdyż użycie okładzin i nawet silne ich dociśnięcie nie jest równoważne z zachowaniem ciągłości materiału. Należy tu dodać, że rozkład φ_i dla próbek badanych zmęczeniowo może mieć nieco inne wartości $\varphi_{i\max}$ i również nieco mniejsze gradienty $d\varphi/dx_\varphi$ ze względu na użycie tam okładzin dwustronnych, podczas gdy do pomiarów rozkładów odkształceń (i naprężeń) nie używano okładziny górnej, ponieważ powodowała ona uszkodzenie linii siatek. Przyczyny omówione wyżej nie mogą jednak zmienić charakteru zbadanego zjawiska.

Pomiary naprężeń własnych wskazują na powstawanie bardzo wysokich naprężeń ściskających σ_{2S} na krawędzi otworu i rozciągających na krawędzi zewnętrznej. Wysokie naprężenia na krawędzi otworu mogą budzić wątpliwości, czy nie przekracza się granicy stosowalności przyjętej metody, ze względu na wyjście poza zakres sprężystych odkształceń. Jednakże, jeżeli zauważy się, że materiał w otoczeniu otworu jest bardzo odkształcony właśnie w kierunku ściskania, oraz że materiały tego rodzaju, jak badany PA7-T, posiadają [16] wyraźnie lepsze własności mechaniczne przy ściskaniu niż przy rozciąganiu tak, iż $R_c \approx 1,7 R_m$, to dla PA7-T otrzymuje się (z braku danych bezpośrednich) $R_c \approx 1,7 \cdot 45 = 76$ kG/mm². Maksymalne mierzone wartości naprężeń własnych wynosiły na krawędzi otworu $\sigma_{2S} = 52,7$ kG/mm², czyli około 69% R_c , co, przy występujących przy takich umocnieniach znacznych wzrostach granicy sprężystości, przekonuje do otrzymanych wyników.

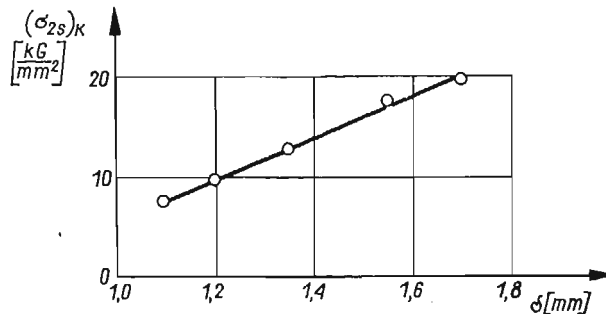
Wypadkowe naprężenia w przekroju pomiarowym wynikają z nałożenia się naprężeń własnych i naprężeń powstających w czasie obciążania zewnętrznego. Mowa tu, oczy-

wiście, o naprężeniach w pierwszym cyklu obciążania, gdyż w dalszych cyklach następuje nierównomierne nagromadzenie się odkształceń trwałych, co pociąga za sobą zmiany w rozkładzie naprężeń. Można jednak uznać, że ilościowa analiza rozkładów naprężeń wypadkowych nie ma dla wykonanych badań zmęczeniowych większego znaczenia, gdyż przy prawdziwości założenia o kumulacji zmęczenia, należy spodziewać się rozkładów naprężeń spowodowanych obciążeniami w całym zakresie obciążeń eksploatacyjnych.



Rys. 16. Zależność naprężeń własnych σ_{25} na krawędzi otworu od maksimum intensywności odkształcenia $\varphi_{i \max}$

Porównanie układów wyników pomiarów naprężeń własnych σ_{25} na krawędzi otworu z odpowiednimi wynikami $\varphi_{i \max}$ w zależności od zgniotu μ oraz naprężeń σ_{25} na krawędzi zewnętrznej i szerokości warstwy umocnionej δ skłania do przypuszczenia, że wartości naprężeń własnych σ_{25} na krawędzi otworu zależą głównie od maksimum intensywności



Rys. 17. Zależność naprężeń własnych σ_{25} na krawędzi zewnętrznej od szerokości warstwy wzmocnionej δ

odkształceń $\varphi_{i \max}$, a naprężenia na krawędzi zewnętrznej σ_{25} od szerokości warstwy umocnionej. Zależności te pokazano na wykresach rys. 16, 17.

Ważnym wnioskiem, wypływającym z wyników pomiarów warstwy umocnionej i naprężeń własnych, jest dobra ciągłość i łagodny charakter obu zależności od zgniotu μ . Pozwala to na stwierdzenie, że rzeczywiście odkształcenie trwałe średnicy otworu (względ-

ne) można uznać za parametr niezależny, całkujący w sobie w sposób jednoznaczny obie te zasadnicze zmiany konstrukcji — zgniot materiału i naprężenia własne.

Taki sam układ rozrzutu wyników $\varphi_{i_{\max}} = f(\mu)$ oraz $(\sigma_{2S})_0 = f(\mu)$ w stosunku do interpolowanej linii średniej prowadzi do wniosku, że jest to skutkiem rozrzutów technologicznych, wynikłych przede wszystkim ze stosowania do umacniania dwóch różnych kołków. Świadczy to dodatkowo o wystarczającej czułości zastosowanych metod pomiarowych i upewnia co do miarodajności uzyskanych wyników.

4. Próba rozdzielenia wpływów umocnienia materiału oraz naprężeń własnych na trwałość zmęczeniową konstrukcji

4.1. Cel i metoda badań. Dotychczasowe próby wyodrębnienia wpływów umocnienia materiału i naprężeń własnych na własności zmęczeniowe konstrukcji prowadzono w oparciu o założenia związane z otrzymywaniem próbek z materiałem umocnionym przez usunięcie z nich naprężeń własnych. W żadnej z prac nie udokumentowano jednak miarodajnym pomiarem skuteczności zastosowanych zabiegów [17, 18].

Stawiając sobie za cel wyodrębnienie wpływów zgniotu materiału i naprężeń własnych w miejscach będących źródłami pęknięć zmęczeniowych na trwałość zmęczeniową konstrukcji umocnionej lokalnie zgniotem plastycznym na zimno oparto się na nieco innym podejściu. Założono mianowicie, że:

a) trwałość zmęczeniowa konstrukcji (próbki) z karbem zależy w pierwszym rzędzie od wartości naprężeń spiętrzonych w okolicy karbu, albo, ogólniej, od poziomu naprężeń maksymalnych w miejscu, skąd może rozpocząć się niszczenie zmęczeniowe w postaci propagującego pęknięcia,

b) liczba zmian obciążeń przenoszonych przez próbkę od momentu pojawienia się pęknięcia zmęczeniowego do całkowitego zniszczenia próbki jest dla próbek takich, jak badane w tej pracy próbki nieumocnione, pomijalna w stosunku do całkowitej trwałości, co potwierdzają przeprowadzone doświadczenia,

c) umocnienie materiału nie ma wpływu na efektywność działania naprężeń własnych, jeśli idzie o zmianę trwałości zmęczeniowej, choć przyjęcie tego założenia wymaga właściwie osobnych badań.

Przy tak postawionych założeniach wprowadza się próbki o obrysie zewnętrznym takim samym, jak obrys próbek badanych dotychczas (rys. 1), ale z inaczej wykonanym zgniotem materiału. Wprowadza się również lokalne umocnienie, ale o kształcie pierścieniowym, współosiowym z otworem w próbce, co, po odpowiednim dobraniu średnicy pierścienia, profilu narzędzia oraz siły i czasu nacisku wprowadzających umocnienie, powoduje sprężyste ściśnięcie materiału wewnątrz pierścienia, a rozciągnięcie na zewnątrz pierścienia. Rozkład naprężeń własnych uzyskiwany z takiego przygotowania próbek, choć jest nieco odmienny niż po umocnieniu stosowanym w omawianych badaniach, to jednak w bezpośrednim otoczeniu otworu wykazuje również znaczne gradienty [19], co przy zachowaniu takich samych wartości maksymalnych naprężeń własnych na krawędzi otworu pozwala na porównywanie wyników z obu rodzajów obróbki.

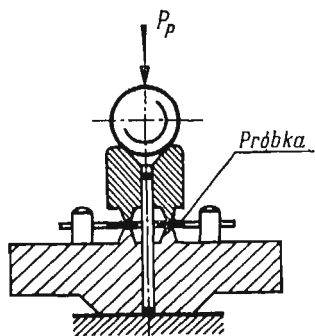
Trwałość zmęczeniowa próbek ze zgniotem pierścieniowym po powstaniu pęknięcia nie będzie już jednak pomijalna w stosunku do trwałości całkowitej ze względu na inten-

sywniejsze hamowanie propagacji pęknięcia na dość długim cdcinku, a w szczególności w materiale objętym zgniotem. Doświadczalnie ustalono, że liczba cykli obciążeń od momentu powstania pęknięcia w próbce umocnionej przez przecięnięcie kołka przez otwór do momentu całkowitego zniszczenia próbki jest w przybliżeniu równa liczbie cykli obciążeń od momentu powstania pęknięcia w próbce ze zgniotem pierścieniowym do momentu osiągnięcia przez pęknięcie to łącznej długości około 1 mm. Przyjęto więc, że trwałość zmęczeniowa próbek ze zgniotem pierścieniowym reprezentowana będzie przez liczbę cykli obciążeń liczonych od początku obciążenia do pojawienia się pęknięcia zmęczeniowego o łącznej długości 1 mm.

Osobnym zagadnieniem metodycznym jest wybór własności zmęczeniowych konstrukcji, na których opierać się będzie próba wyodrębnienia obu omawianych wpływów. Dotychczasowe badania w tej dziedzinie, wykonywane na próbkach stalowych, dawały łatwy do przyjęcia wskaźnik, którym była odpowiednia granica zmęczenia. Jednakże w konstrukcjach, w których obciążenia występujące w czasie ich użytkowania mogą wywołać naprężenia przewyższające odpowiednie granice zmęczenia przyjęcie jako wskaźnika porównawczego granicy zmęczenia (rzeczywistej czy też umownej) znacznie zawęża zagadnienie. Miarodajnym wskaźnikiem jest więc ponownie całkowita trwałość zmęczeniowa lub całkowite zużycie zmęczeniowe obliczane w sposób względny lub bezwzględny na podstawie znanego widma obciążeń konstrukcji i zbadanej krzywej zmęczenia.

Dla tak postawionego zagadnienia przeprowadzono próby zmęczeniowe.

4.2. Przebieg prób i ich wyniki. Uwzględniając ograniczenie, jakim może stać się granica sprężystości do prób wybrano serię o zgniocie $\mu = 2,42$, dla której naprężenia własne



Rys. 18. Przyrząd do wykonywania zgniotu pierścieniowego

na krawędzi otworu $\sigma_{2S} = -26 \text{ kG/mm}^2$, a na krawędzi zewnętrznej $\sigma_{2S} = +10 \text{ kG/mm}^2$. Badania wykonano na trzech poziomach naprężeń $\sigma_a = 9; 6,5; 5,1 \text{ kG/mm}^2$ przy $\sigma_m = 14,83 \text{ kG/mm}^2$, przeznaczając na każdy poziom po 10 próbek. 24 próbki wykonano już z nowego arkusza materiału. Różnice własności mechanicznych obu arkuszy nie przekraczały $\pm 1\%$ wartości średnich.

Do wykonywania zgniotu pierścieniowego zaprojektowano przyrząd, pozwalający na równoczesne wykonywanie zgniotu na obu powierzchniach próbki (rys. 18). Wyskalowanie przyrządu (dobór siły i czasu działania nacisku) wykonano przy użyciu próbek, na których w przekroju pomiarowym nanoszono siatki przy krawędzi otworu i przy kra-

wędzi zewnętrznej po obu stronach przekroju pomiarowego. Skalowanie to wykazało, że wywołując na krawędzi otworu naprężenia własne równe $-26,2 \text{ kG/mm}^2$ powoduje się powstanie na krawędzi zewnętrznej próbki naprężeń $+19,7 \text{ kG/mm}^2$. Wynik świadczy o nieco za dużej średnicy przyjętego pierścienia. Ze względu jednak na uzyskanie właściwych naprężeń na krawędzi otworu i drugorzędą, w tych próbach, rolę naprężeń na krawędziach zewnętrznych postanowiono przeprowadzić badania zmęczeniowe dla tak przygotowanych próbek.

Badania wykonano na tych samych maszynach zmęczeniowych, odczytując trwałość zmęczeniową próbek, gdy pęknięcie zmęczeniowe, mierzone w powiększeniu pięciokrotnym, osiągało łączną długość 1 mm. Otrzymane wyniki opracowano statystycznie zgodnie z ujęciem omówionym w części 2.2. i umieszczono w tablicy 4. Punkty odpowiadające średnim trwałościom na danym poziomie naprężeń naniesiono na wykres (rys. 3). Parametry α , β oraz σ_{az} równania krzywej zmęczenia obliczono korzystając z metody minimum sumy kwadratów błędów. Otrzymano równanie

$$(4.1) \quad \log N = 5,8263 - 1,3105 \log(\sigma_n - 4,35).$$

Krzywą opisaną tym równaniem naniesiono również na wykres wyników (rys. 3).

Po założeniu tego samego widma obciążeń (2.11) obliczono, korzystając z wzorów (2.16), (2.17), (2.18), (2.20), (2.21)

$$\begin{aligned} (\sigma_{aD'_{\max}})_S &= 5,32 \text{ kG/mm}^2; & (N_{D'_{\max}})_S &= 701\,600 \text{ cykli obc.}, \\ (D'_{\max})_S &= 0,0429 \text{ 1/kG/mm}^2; & D_S &= 0,0963. \end{aligned}$$

W ujęciu względnym w odniesieniu do własności konstrukcji o zgnioście $\mu = 0$:

$$(D'_{\max})_{sw} = 0,273; \quad D_{sw} = 0,238; \quad R_{sw} = 4,2.$$

Ponieważ dla konstrukcji o zgnioście $\mu = 2,42$ całkowita względna trwałość zmęczeniowa wynosi $R_{w2,42} = 12,9$, procentowy udział względnej trwałości wniesiony do trwałości całkowitej przez naprężenia własne równa się

$$(4.2) \quad \frac{R_{sw}}{R_{w2,42}} \cdot 100 = \frac{4,2}{12,9} \cdot 100 = 32,6 \text{ \%}.$$

Jak stąd wynika około 1/3 całkowitej zmiany trwałości zmęczeniowej powodują naprężenia własne, a 2/3 zmiana własności materiału w wyniku umocnienia.

5. Ocena dokładności badań

Dokładność realizowanych w czasie prób zmęczeniowych naprężeń zależy od błędów pomiarowych pola przekroju pomiarowego próbek oraz błędów realizacji obciążenia na maszynie zmęczeniowej. Pomiar grubości próbek wykonywano mikromierzem. Dokładność pomiarów można więc ocenić na $\pm 0,005 \text{ mm}$, co stanowi $\pm 0,54\%$ najmniejszej grubości i jest błędem dominującym. Uwzględniając dokładności pomiaru szerokości próbek i średnicy otworu dokładność określenia pola przekroju pomiarowego można ocenić na $\pm 0,6\%$. Ze skalowania dynamometru maszyny wynika, że przy okularze $\times 500$, używanym do zakresu obciążeń 300 kG, jednej działce na skali odpowiada wartość 4,4 kG siły. Przy pewnej wprawie w ostrym ustawianiu smugi świetlnej w dynamomtrze można

ustawić obciążenia minimalne i maksymalne z dokładnością do $\pm 0,5$ działki, czyli $\pm 2,2$ kG. Największe błędy względne wystąpią dla najmniejszych realizowanych amplitud naprężeń, czyli w serii $5D_0$, gdzie $\sigma_a = 3,5$ kG/mm². Maksymalny błąd względny dla tego punktu (najmniejszy możliwy przekrój i największe obciążenia) wynosi 0,22 kG/mm² naprężeń, czyli 6,3%. Błąd względny realizacji naprężeń średnich wynosił około $\pm 1,9\%$ i był mniej więcej stały dla wszystkich serii prób. Uwzględniając wszystkie realizowane amplitudy naprężeń, jak również wartości naprężeń średnich, można wykazać, że średni błąd względny realizacji naprężeń wynosił około $\pm 3\%$, nie powinien więc budzić zastrzeżeń do uzyskanych wyników.

Pomiary średnic otworów wykonywano na mikroskopie firmy Zeiss (działka — —0,001 mm) ze względu na chęć dokładnego określenia wartości parametru niezależnego μ . Błąd wartości μ wynika z nałożenia się błędów dwóch serii pomiarów średnicy: przed umocnieniem i po umocnieniu. Pomiary skalujące wykonano na próbkach nie przeznaczonych później do badań zmęczeniowych. Wykazały one niewielką, nie przekraczającą 0,1%, owalizację otworu. Tym niemniej jako wymiar nominalny średnicy otworu przyjmowano średnią arytmetyczną wartość z dziesięciu pomiarów, wykonywanych po pięć z każdej strony próbki, zarówno dla pomiarów przed umocnieniem, jak i po umocnieniu. Największy błąd względny wystąpi przy najmniejszym mierzonym zgniocie $\mu = 1,62$. Po wykonaniu 50 pomiarów skalujących przed umocnieniem i po umocnieniu oraz 128 pomiarów kontrolnych na trzydziestu dwóch próbkach zbadanych w tej serii obliczono odchylenie standardowe wartości średniej μ , przy założeniu spełniania przez μ warunków rozkładu normalnego, co wystarczająco wykazał test graficzny. Odchylenie to nie przekraczało 0,3% średniej wartości μ przy mierzonym odkształceniu 0,050 mm. Dla pozostałych serii odchylenia te były jeszcze mniejsze ze względu na większe wartości mierzonych odkształceń.

Statystyczne opracowanie wyników prób zmęczeniowych pozwoliło na określenie dla każdego poziomu naprężeń badanych serii odchylenia standardowego i standardowego błędu średniej. Jak widać z wyników tylko w dwóch przypadkach odchylenie standardowe nieznacznie przekroczyło 10% wartości średniej. Te duże rozrzuty zaobserwowano na niskich poziomach naprężeń przy dużych zgniotach, gdzie można spodziewać się niekorzystnych wpływów dużych odkształceń materiału w czasie umacniania i znacznie większej czułości na rozrzut wartości naprężeń własnych. Błąd standardowy średniej tylko w trzech przypadkach przekroczył wartość 3% wartości średniej (tablica 4).

Dokładność odwzorowania analitycznego wyników badań doświadczalnych za pomocą funkcji Weibulla-Odinga można zilustrować wskaźnikiem Δ (tablica 5). Wskaźnik ten dla żadnej serii prób nie przekracza wartości 0,5%. Obliczenie parametrów α , β oraz σ_{az} wykonano numerycznie przy zachowaniu skoku $\Delta\sigma_{az} = 0,005$ kG/mm², a więc 0,16% najmniejszej obliczonej wartości $\sigma_{az} = 3,06$ kG/mm². Skok ten pozwalał na obliczenie parametru α z dokładnością $\pm 0,1\%$, a parametru β z dokładnością $\pm 0,4\%$ w przypadku najbardziej niekorzystnym. Wynika stąd, że dokładność obliczenia parametrów krzywych zmęczenia, jak i odwzorowanie wyników doświadczeń wybraną funkcją nie ma istotnego wpływu na uzyskane wyniki.

W obliczeniach własności zmęczeniowych główne zagadnienie wiąże się z przyjęciem granic całkowania przy obliczaniu całkowitego zużycia zmęczeniowego. Pole objęte krzywą

$\sigma_a = f(D')$ (rys. 4) jest graficzną ilustracją zużycia zmęczeniowego konstrukcji. Widoczne jest, że przedłużenie granic całkowania do ∞ obejmuje tak małe intensywności zużycia zmęczeniowego, że wpływ tego na zasadniczy wynik, zależny głównie od maksimum intensywności zużycia, można pominąć.

Użycie nowego arkusza blachy w próbie rozdzielania wpływów naprężeń własnych i zgniotu materiału na własności zmęczeniowe nie spowodowało wypaczenia wyników. Średnia trwałość próbek wykonanych ze starego arkusza blachy wynosiła, przy $\sigma_a = 6,5 \text{ kG/mm}^2$, gdzie zbadano dla porównania sześć próbek z tego arkusza i cztery próbki z nowego arkusza, $N_{sr} = 237\,900$ cykli obciążeń, a dla próbek wykonanych z nowego arkusza $N_{sr} = 249\,200$ cykli. Różnica między nimi wynosi tylko około 4,7 % średniej wartości trwałości obliczonej dla wszystkich próbek zbadanych na tym poziomie naprężeń.

Z wykonanej analizy wynika, że miarodajność wyników badań zmęczeniowych i obliczonych stąd własności zmęczeniowych badanych konstrukcji nie powinna budzić wątpliwości, gdyż łatwo można zauważyć, że dokładność realizacji poszczególnych etapów badań utrzymywała się tego samego rzędu co odpowiednie dokładności badań zmęczeniowych wykonanych przez wielu innych autorów, których wyniki uznano za miarodajne i znalazły praktyczne zastosowania.

Wszystkie pomiary odkształceń wykonano na mikroskopie firmy Zeiss o najmniejszej działce równej 0,001 mm. Współmierność grubości linii nanoszonych siatek z grubością linii w układzie pomiarowym mikroskopu dawała bardzo dobrą powtarzalność odczytów, szczególnie w pomiarach odkształceń do wyznaczenia rozkładów naprężeń własnych, gdzie po nacięciu siatki nie stosowano już żadnej obróbki powodującej odkształcenie trwałe płaszczyzny próbki. Można uznać, że bezwzględny błąd pomiaru wydłużeń siatki utrzymywał się w zakresie $\pm 0,0005$ mm. W pomiarach rozkładu warstwy umocnionej mierzono odkształcenia wynoszące $0,007 \div 0,050$ mm. Błędy względne wynoszą więc $\pm 7\% \div \pm 1\%$, a średnio dla odkształceń zawierających się w przedziale $0,014 \div 0,018$ mm, gdyż tak dobierano parametry siatki, błąd względny wynosi około $\pm 3\%$ mierzonych wartości. Jeśli podobnie podejść do pomiarów naprężeń własnych, to po uwzględnieniu użytych tam baz pomiarowych $1 \div 3$ mm, bezwzględne błędy pomiaru naprężeń zawierają się w zakresie $3,6 \div 1,2 \text{ kG/mm}^2$. Na rys. 15 obrazującym zależność naprężeń σ_{2S} na krawędzi otworu i na krawędzi zewnętrznej od zgniotu μ naniesiono odpowiednie zakresy dokładności pomiarów w odniesieniu do linii średniej interpolowanej między uzyskanymi wynikami. Widoczne jest, że większość wyników pomiarów leży w strefie objętej tak określonymi granicami dokładności pomiaru.

6. Wnioski

Przeprowadzone badania wskazują, że wprowadzenie lokalnego umocnienia w obszarze spiętrzenia naprężeń w cienkościennej konstrukcji duralowej powoduje znaczne ulepszenie własności zmęczeniowych konstrukcji. Uzyskanie w maksimum ponad trzydziestokrotnie większej trwałości zmęczeniowej dla konstrukcji umocnionej niż dla konstrukcji z karbem bez umocnienia jest wynikiem bardzo zachęcającym do dalszych badań, a nawet do podjęcia prób praktycznych. Ogólniejszym wnioskiem jest tu stwierdzenie możli-

wości całkowitego zlikwidowania ujemnego działania karbu na trwałość zmęczeniową konstrukcji ciągłej. Uzyskana bowiem trwałość konstrukcji z karbem umocnionym jest nawet nieco większa niż trwałość konstrukcji ciągłej bez karbu, choć bezpieczniej jest mówić o porównywalnych trwałościach w obu przypadkach.

Otrzymana zależność trwałości zmęczeniowej konstrukcji od zgniotu μ posiada wyraźne, choć niezbyt ostre, maksimum, świadczące o istnieniu zgniotu optymalnego (w danym przypadku $\mu_{opt} \approx 5,8$). Powyżej tego zgniotu zaczyna się spadek trwałości zmęczeniowej konstrukcji. Niewielka różnica między wartościami naprężeń własnych na krawędzi otworu w próbkach o zgniocie $\mu = 5,79$ i $\mu = 7,49$, wynosząca około $1,5 \text{ kG/mm}^2$ (z rys. 15) przy uwzględnieniu rozrzutów technologicznych, a wyraźna różnica między maksymalnymi intensywnościami odkształceń trwałych $\varphi_{i,max}$, wynosząca około 7% (rys. 12) skłania do przypuszczenia, że przyczyną zmniejszania się trwałości zmęczeniowej dla zgniotów powyżej optymalnego jest w pierwszym rzędzie naruszenie spójności materiału spowodowane bardzo dużą intensywnością odkształcenia płytkiej, bo sięgającej najwyżej do 0,1 mm warstwy podpowierzchniowej.

Z punktu widzenia zmęczenia konstrukcji wzrost trwałości zmęczeniowej spowodowany jest przede wszystkim zmniejszeniem się maksimum intensywności zużycia zmęczeniowego, więc przesunięciem krzywych zmęczenia w kierunku większych trwałości. Jedynie wówczas, gdy maksima intensywności zużycia są zbliżone, istotną rolę zaczyna odgrywać pozioma asymptota krzywej zmęczenia (lub granica zmęczenia). Wynika stąd, że dla miarodajnego określenia trwałości zmęczeniowej i ewentualnych zmian wynikających z ulepszenia konstrukcji konieczna jest znajomość krzywej zmęczenia w zakresie do naprężeń występujących w konstrukcji przy obciążeniach dopuszczalnych dla danej konstrukcji. Spadek maksimum intensywności zużycia zmęczeniowego związany jest ze wzrostem naprężeń, przy których to maksimum występuje. Zależność $(\sigma_{ad,max})_w$ od zgniotu μ ma charakter asymptotyczny (rys. 7), zdążający do wartości około 1,5. Wskazówka ta ma o tyle istotne znaczenie, że jeden z badanych poziomów naprężeń krzywej zmęczenia powinien odpowiadać spodziewanym naprężeniom $\sigma_{ad,max}$.

Zmiany fizyczne w konstrukcji wywołane umocnieniem, to przede wszystkim bardzo duże intensywności odkształcenia materiału przy otworze, charakteryzujące się ponadto bardzo dużymi gradientami i płytkim, bo zaledwie sięgającym 0,1 mm, ich zaleganiem. Wysokie są również, przy danej geometrii próbek, naprężenia własne w konstrukcji i to zarówno ściskające na krawędzi otworu, jak rozciągające na krawędzi zewnętrznej. Wspólną cechą, zarówno rozkładu warstwy umocnionej, jak i naprężeń własnych, są duże gradienty ich wartości przy małych zgniotach μ , malejące ze wzrostem wartości zgniotu μ . Tu leży przyczyna takiego samego charakteru zmian zarówno zużycia, jak i intensywności zużycia zmęczeniowego.

Próba rozdzielenia wpływów zgniotu materiału i naprężeń własnych wykazuje, że około 2/3 ogólnej zmiany trwałości pochodzi od zgniotu materiału, a tylko 1/3 od naprężeń własnych. Mimo szczupłego programu tej próby można wnioskować, że ewentualne dalsze zmiany trwałości, spowodowane relaksacją naprężeń własnych, nie spowodują zasadniczych zmian tej trwałości, gdyż zmiany te zależą od czynnika o mniejszym oddziaływaniu.

Literatura cytowana w tekście

1. G. FORREST, *Some experiments on the effects of residual stresses on the fatigue of aluminium alloys*, J. of Inst. of Metals, vol. 72, 1946.
2. D. ROSENTHAL, G. SINES, *Effect of residual stress on the fatigue strength of notched specimens*, Proc. ASTM, vol. 51, 1954.
3. R. L. TEMPLIN, *Fatigue of aluminium*, Proc. ASTM, vol. 54, 1954.
4. B. HEINRICH, *Zweistufige Kaltverformung und Alterung ein Verfahren zur Verhinderung von Abbaueffekten bei oberflächenverfestigten Bauteilen aus weichen Werkstoffen*, Inst. für Leichtbau, 5, 1966.
5. G. B. GLEASON, *Influence of shot peening on fatigue strength of 14S-T Alloy*, Iron Age 1/1947.
6. С. СЕРЕНСЕН и др., *Конструкционная прочность авиационных сплавов*, Труды МАТИ, вып. 54, 1962.
7. B. JANCELEWICZ, *Badania wpływu zgniotu plastycznego na trwałość zmęczeniową duralowych blach z karbem*, Arch. Budowy Maszyn, 1, 13 (1966).
8. British Civil Airworthiness Requirements, section D Airplanes, London 1963.
9. W. WEIBULL, *A statistical representation of fatigue failures of solids*, Trans. of Royal Inst. of Technol., Stockholm 1949.
10. I. A. ODING, *Teoria dyslokacji w metalach i jej zastosowania*, PWT, Warszawa 1961 (tłum. z rosyjskiego).
11. J. TAYLOR, *Measurements of gust loads in aircraft*, J. of Royal Aer. Soc., vol. 57, nr 506, 1953.
12. B. LUNDBERG, *Fatigue life of airplane structures*, FFA Rep. 60, Stockholm 1955.
13. M. MINER, *Cumulative damage in fatigue*, J. of Applied Mechanics, 9, 1945.
14. А. ГУЛАЕВ, *Металловедение*, Оборонгиз, Москва 1949.
15. Z. MARCINIAK, *Mechanika procesów tłoczenia blach*, WNT, Warszawa 1961.
16. G. WÄLGRÉN, *Direct fatigue tests with tensile and compressive mean stress on 24S-T aluminium plain specimens and specimens notched by drilled hole.*, FFA Rep. 48, Stockholm 1953.
17. И. В. КУДРЯВЦЕВ, *Внутренние напряжения как резерв прочности в машиностроении*, Машгиз, Москва 1951.
18. W. WARSZYŃSKI *Badania wpływu zgniotu powierzchniowego na wytrzymałość zmęczeniową*, (praca doktorska w AGH) Kraków 1962.
19. P. W. KASGARD, *Exploratory study on optimum coining for improvement of fatigue life*, Experimental Mechanics, 10/1964.

Резюме

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ, ВЫЗВАННОЙ В РАЙОНЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ, НА УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ ИЗ АЛЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА С НАДРЕЗОМ

В работе описаны исследования по улучшению противоусталостной прочности тонкостенной конструкции из алюминниевоего сплава PA 7 T, при испытаниях образцов с центрально расположенным отверстием. Образцы упрочнены пластическим деформированием диаметра отверстия; посредством продавливания через отверстие цилиндрического штифта. Анализ результатов усталостных испытаний, произведенный по соответственно адаптированному методу Лундберга-Эргвертца, показал возможность значительного повышения усталостной долговечности исследуемой конструкции.

Описаны и переанализированы результаты измерений распределения упрочненного слоя, а также распределения остаточных напряжений в измеряемом сечении. Из этих измерений следует, что снижение усталостной долговечности в условиях, превышающих оптимальные параметры упрочнения, обусловлено изменениями декогерентного типа, вызванными большой интенсивностью пластических деформаций вокруг отверстия.

Описаны также испытания проведенные для выделения влияний упрочнения материала и остаточных напряжений на усталостную долговечность. Из этих испытаний очевидно доминирующее влияние упрочнения материала. Это свидетельствует о стабильности повышения усталостной долговечности, полученной в исследуемой конструкции.

S u m m a r y

INVESTIGATIONS OF INFLUENCE OF LOCAL PLASTIC STRAIN INDUCED IN STRESS CONCENTRATION REGION ON FATIGUE LIFE OF ALUMINIUM ALLOY NOTCHED STRUCTURE

In this paper are reported experiments on the antifatigue improvement of thin-sheet aluminium alloy PA 7 T structure represented by specimens with central hole. Specimens are strengthened by plastic deformation of the diameter of hole induced by the forcing of cylindrical pin through the hole. Analysis of fatigue tests results performed by applying the properly adapted the Lundberg-Eggwertz method shows the possibility of marked increase of fatigue life of the structure tested.

The results of measurements of strengthened layer distribution and residual stress distribution in the section tested are described and analysed. From these measurements it developed that the decrease of fatigue life beyond the optimal parameters of strengthening is caused by the decohesional type changes induced by the high intensity of plastic strain in the vicinity of the edge of hole.

Experiments carried out for the separation of the effects of material strengthening as well as of the residual stress on the fatigue life are also dealt with. They clearly show the dominating effect of the strengthening of material. This testifies to the fact of good stability of the achieved fatigue life increases of the structure tested.

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
KATEDRA BUDOWY SAMOLOTÓW

Praca została złożona w Redakcji dnia 5 stycznia 1968 r.
