

BADANIA MOŻLIWOŚCI ZMNIEJSZENIA PRĘDKOŚCI PROPAGACJI PĘKNIĘCIA ZMĘCZENIOWEGO W BLACHACH DURALOWYCH PRZY UŻYCIU ZGNIOTU

WITOLD B Ł A Ż E W I C Z (WARSZAWA)

1. Wstęp

Zastosowanie do oceny trwałości zmęczeniowej konstrukcji samolotów koncepcji dozorowanej trwałości zmęczeniowej (w literaturze angielskiej *fail safe*) stało się przyczyną powodującą badania propagacji pęknięcia zmęczeniowego. Wystąpienie widocznych pęknięć zmęczeniowych w materiale konstrukcji wykorzystywane jest przy określaniu rezerw samolotów metodą dozorowanej trwałości zmęczeniowej jako wskaźnik wyczerpania przez konstrukcję reprezentowanej przez nią trwałości zmęczeniowej [1, 2, 3, 4, 5].

Wyniki badań propagacji pęknięcia zmęczeniowego dla różnych materiałów przy rozciągających naprężeniach powtarzalnych o stałej amplitudzie podaje szereg publikacji [5 ÷ 14]. Przeprowadzone przez różne ośrodki badania nie zawsze dają zbliżony obraz własności propagacji, często badania nie są porównywalne ze sobą ze względu na różne kształty próbek i sposoby przykładania obciążeń. Badania propagacji przy obciążeniach o zmiennej amplitudzie [15, 16] doprowadziły do stwierdzenia, że dla okresu propagacji pęknięcia w stopach Al hipoteza liniowej kumulacji zmęczenia PALMGRENA-MINERA [17] daje wyniki zawsze po stronie bezpiecznej. Przeprowadzone badania propagacji pęknięcia zmęczeniowego w różnych typach cienkościennych konstrukcji z usztywnieniami wykazały istotny wpływ sposobów łączenia elementów usztywniających z blachą konstrukcji na własności propagacji [18, 19].

Uzyskanie zmniejszenia prędkości propagacji, to jest zmniejszenia przyrostu długości pęknięcia przy określonej liczbie cykli obciążenia, pozwala na zastosowanie w metodzie dozorowanej trwałości zmęczeniowej albo dłuższych okresów międzyprzeglądowych, albo na zmniejszenie prawdopodobieństwa zmęczeniowego zniszczenia rozpatrywanej konstrukcji. Dotychczasowe badania propagacji pęknięcia zmęczeniowego określały parametry propagacji dla poszczególnych materiałów albo konstrukcji nie zajmując się możliwościami zmniejszenia prędkości propagacji.

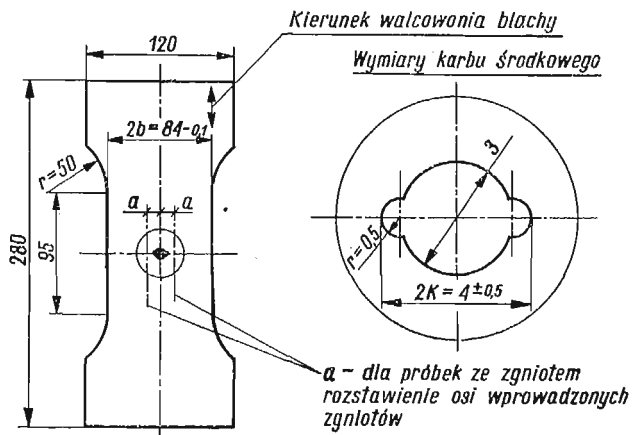
Wpływ zgniotu na całkowitą trwałość zmęczeniową jest ogólnie znany — w konstrukcjach z karbem geometrycznym zgniot zwykle zwiększa trwałość lub pozwala zastosować wyższe poziomy naprężeń. Przyczyny tego polepszenia własności zmęczeniowych upatruje się głównie w korzystnym wpływie naprężeń własnych ściskających wywołanych odkształceniem plastycznym materiału. Nie jest natomiast jednoznacznie ustalony wpływ umocnienia plastycznego — wydaje się on być zależny od rodzaju obciążeń wywołujących zgniot materiału. Po uformowaniu się pęknięcia powoduje ono koncentrację naprężeń w strefie

przesuwającego się w głąb materiału czoła pęknięcia — działa więc w tym względzie w sposób zbliżony do karbu geometrycznego. Umieszczony na drodze propagującego pęknięcia zmęczeniowego zgniot winien zatem zmniejszyć prędkość propagacji pęknięcia. Korzystny wpływ wprowadzonych zgniotem zmian może być znacznie zmniejszony, bo działanie zgniotu zaczyna się po przyłożeniu pewnej liczby cykli obciążeń koniecznych do wywołania pęknięcia i osiągnięcia przez nie obszaru o zmienionych zgniotem własnościach, a rozkłady naprężeń własnych ulegają zmianom w trakcie obciążeń zmęczeniowych [20]. Na podstawie aktualnego stanu wiedzy o zmęczeniu i propagacji pęknięcia zmęczeniowego nie można uzyskać jednoznacznej odpowiedzi na pytanie, czy zgniot wpływa korzystnie na własności propagacji.

Postawiono sobie za cel doświadczeń zbadanie możliwości zmniejszenia prędkości propagacji przy użyciu zgniotu i towarzyszących mu naprężeń własnych. Biorąc pod uwagę brak w tym zakresie jakichkolwiek dostępnych w literaturze wyników badań oraz brak prostych metod określania wprowadzanych w materiał naprężeń własnych i intensywności zgniotu, zdecydowano przeprowadzić badania w oparciu o zewnętrzne parametry zgniotu. Wyniki badań własności propagacji dla próbek ze zgniotem należało porównać z własnościami propagacji dla próbek bez zgniotu, co spowodowało, wobec braku możliwości takiego porównania na podstawie danych z literatury, konieczność przeprowadzenia badań własnych również dla próbek bez zgniotu. Badania wpływu różnego typu zgniotów na własności propagacji prowadzone były przy stałych poziomach naprężeń. Dla wybranego typu zgniotu przeprowadzono próby dla różnych amplitud naprężeń.

2. Zastosowana metoda badań

2.1. Przyjęta do badań konstrukcja próbki. Wymiary próbki podano na rys. 1. Do wykonania próbek użyto blachy platerowanej z duralu PA6-T. Dural PA6 odznacza się większym wydłużeniem plastycznym niż równorzędnie używany w konstrukcjach płatowców PA7. Zastosowano materiał bardziej plastyczny ze względu na spodziewany wyraźniejszy wpływ zgniotu dla takiego materiału na propagację pęknięcia. Grubość użytej na próbki blachy wynosiła 2 mm. (Grubość ta jest najczęściej stosowana do prób propagacji pęknięcia)



Rys. 1. Próbką użytą do badania propagacji pęknięcia zmęczeniowego

Próbki wykonywano z dwóch arkuszy blach frezując je w pakietach po około 15 sztuk. Powierzchnię blachy dla próbek bez zgniotów pozostawiono bez zmian nie stosując żadnych dodatkowych zabiegów. Karb środkowy (w osi symetrii próbki) wykonywano w specjalnym przyrządzie wiertniczym z wymiennymi tulejkami.

Dla przyjętej próbki (bez karbu środkowego) wytrzymałość doraźna wynosiła 41,11 kG/mm², a granica proporcjonalności 25,07 kG/mm². Są to wartości średnie z przebadanych 6 próbek, po 3 z arkusza.

Próbki przeznaczone do badań propagacji oznaczano literą *C* i kolejnym numerem. Od numeru *C-1* do *C-42* próbki wykonano z pierwszego arkusza blachy, pozostałe z drugiego. Dla każdej próbki mierzono rzeczywistą grubość, która służyła do obliczenia przekroju pomiarowego próbki. Naprężenia określano dla przekroju netto części pomiarowej próbki, to jest po odliczeniu ubytku powierzchni spowodowanym karbem. Ze względu na stosunkowo małe rozrzuty etapu propagacji pęknięcia, otrzymywane w doświadczeniach opublikowanych w literaturze, do badań przy stałych parametrach przeznaczano serię trzech próbek.

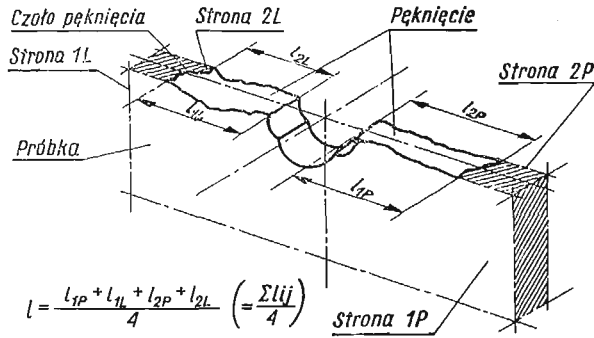
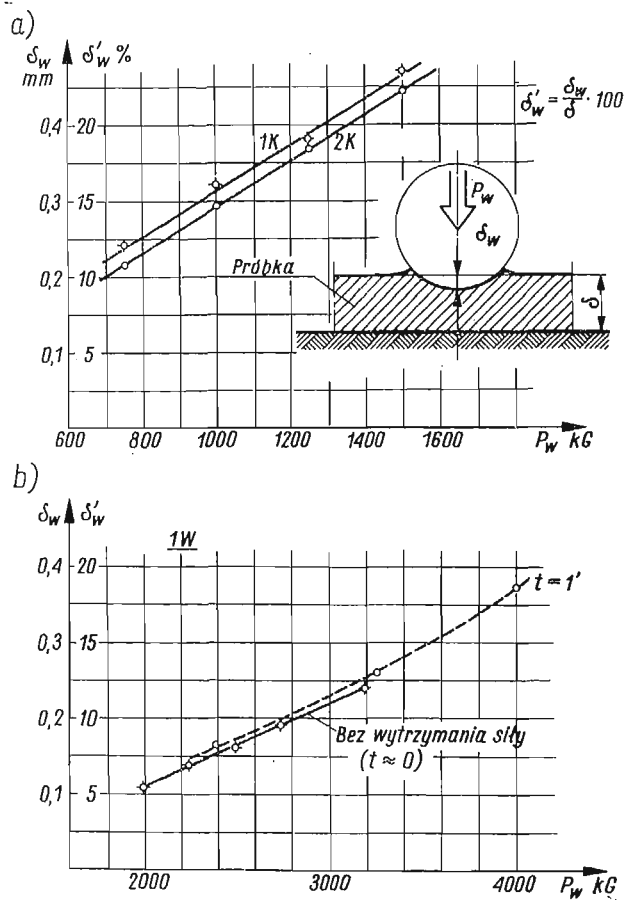
2.2. Zastosowany do badań zgniot. Pierwowzorem zastosowanej metody wykonywania zgniotu stał się odcisk pozostawiany przez końcówkę przyrządu mierzącego twardość materiału. Zwiększając wymiary końcówki w stosunku do grubości blachy można wywołać w blasze znaczny zgniot lokalny, którego wielkość zapewni przyłożona do wciskającego narzędzia siła. Uzyskiwany przy tej metodzie trójwymiarowy stan naprężeń pod działającym na materiał narzędziem umożliwia osiągnięcie dużych lokalnych zgniotów.

Dobór różnych parametrów zgniotu do przeprowadzanych prób został wykonany jedynie w oparciu o jakościowe przesłanki ich wpływu na prędkość propagacji. Zgniot wprowadzano w materiał próbek symetrycznie z obu stron karbu, tak aby pozioma płaszczyzna symetrii narzędzia pokrywała się z poziomą osią karbu.

Pierwszym parametrem wprowadzanego zgniotu jest liczba i kształt narzędzi wciskanych w materiał, zwanych dalej stemplami. Zastosowano dwa kształty stempli — wałeczek o średnicy 3 mm i długości 20 mm oraz kulkę o średnicy 9,5 mm. Stempel wciskano w materiał próbki leżącej albo na płaskim podłożu, albo na drugim identycznym stemple. Uzyskano w ten sposób cztery rodzaje kształtu zgniotu, które dalej oznaczane będą w następujący sposób: *1W* — zgniot wywołany przez jeden wałeczek, *2W* — zgniot wywołany przez dwa wałeczki, *1K* — zgniot wywołany przez jedną kulkę, *2K* — zgniot wywołany przez dwie kulki.

Ośią zgniotu nazwano pionową płaszczyznę symetrii odcisku równoznaczną z płaszczyzną symetrii stempla. Przyjęcie jako stempli tak różnych kształtów, jak wałeczek i kulka o różnych średnicach zostało spowodowane chęcią zaobserwowania wpływu różnych rozkładów zgniotu i naprężeń własnych na własności propagacji. Kształty *2W* i *1K* wprowadzono jako porównawcze do głównych badanych kształtów zgniotu *1W* i *2K*.

Następnym parametrem zgniotu podawanym przy poszczególnych seriach próbek jest siła wciskająca stempel. Jest to dla badanego zakresu sił parametr zastępczy z głębokością odcisku dla poszczególnych kształtów zgniotu. Wpływ poszczególnych kształtów zgniotu badano przy stałej głębokości pojedynczego odcisku δ_w . Z pewnym przybliżeniem można przyjąć, że δ_w/δ , lub $2\delta_w/\delta$ jest miarą maksymalnej intensywności zgniotu (δ oznacza tu grubość blachy próbki). Wyznaczone z pomiarów zależności siły wywołującej

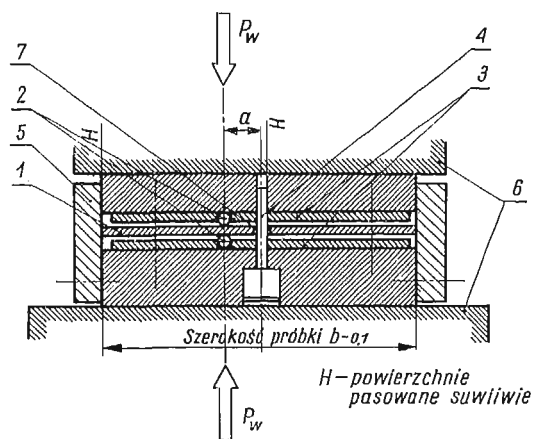
Rys. 2. Sposób pomiaru długości pęknięcia l Rys. 3. Głębokość odcisku w zależności od siły P_w

zgniot $P_w = f(\delta_w)$ podano na wykresach na rys. 3. Podane na wykresach punkty pomiarowe są wartością średnią z pomiarów minimum 6 odcisków. Dla kształtu zgniotu 1K i 2K nie znaleziono zależności głębokości odcisku od czasu działania siły. Kształt zgniotu 2W dawał takie same wartości średnie jak 1W przy większych rozrzutach dla poszczególnych

pomiarów. Pomiary wykonywano przy użyciu przystosowanego do tego celu czujnika warsztatowego. Dokładność odczytu była równa $\pm 0,005$ mm. Dla oznaczenia omawianego parametru zgniotu dla poszczególnych serii próbek podawano wartość siły P_w w kilogramach.

Trzecim parametrem wprowadzanego w materiał próbki zgniotu jest odległość osi zgniotu od osi pionowej próbki określana według oznaczenia na rys. 1 jako a .

W trakcie wykonywania prób spotkano się z dużym wpływem czasu wytrzymywania pod obciążeniem stempla na własności propagacji. Dlatego wprowadzono do oznaczania zgniotu czas wytrzymywania. Nie przeprowadzono szczegółowych badań tego parametru — przybiera on tylko dwie wartości; 0 i 1, gdzie 0 oznacza czas wytrzymywania mniejszy niż 10 sek., a 1 — czas równy 1 min. ± 5 sek. Przy wykonywaniu zgniotów stosowano możliwie stałą szybkość wzrostu siły P_w — około 1000 kG/minutę.



Rys. 4. Przyrząd do wykonywania zgniotów 1 — próbka, 2 — stemple wykonujące zgniot, 3 — płytki ustalające stemple, 4 — kolek ustalający próbkę i płytki 3, 5 — zabezpieczenie 1 i 3 przed obrotem, 6 — płyty maszyny realizującej obciążenie, 7 — karb środkowy próbki

Tak więc pełnym oznaczeniem rodzaju zgniotu będzie: kształt zgniotu; wartość P_w w kG; a w mm; 0 lub 1.

Zgniot wprowadzano w materiał próbki za pomocą hydraulicznej maszyny wytrzymałościowej używając specjalnego przyrządu, którego zasadę działania podaje rys. 4. Przyrząd umożliwiał poprzez wymianę płytek 3 wykonywanie wszystkich badanych rodzajów zgniotu. Zgniot wykonywano najpierw z jednej strony karbu, potem po wyjęciu i obróceniu próbki w przyrządzie z drugiej strony karbu. Zastosowanie takiej metody było spowodowane chęcią uzyskania możliwie małych odchyłek zarówno dla odległości osi zgniotu od osi karbu, jak i siły wywołującej zgniot. Różnice w odległości osi zgniotu od osi karbu dla poszczególnych egzemplarzy próbek wahały się w granicach $\pm 0,05$ mm od wartości nominalnej. W czasie wytrzymywania siły P_w wartość jej utrzymywano w granicach $\pm 0,5\%$ wartości nominalnej.

2.3. Metoda pomiaru długości pęknięcia. Do pomiarów długości pęknięcia posłużono się zdjęciami fotograficznymi. Długość pęknięcia odczytywano z negatywu obejmującego

część pomiarową próbki naświetlanego przy określonej liczbie cykli obciążenia. Stosując powiększenia 10 razy w stosunku do obszaru rzeczywistego (około 12 razy w stosunku do negatywu) określano czoło pęknięcia z dokładnością $\pm 0,05$ mm, którą warunkuje niezbyt ostro zarysowane dla blachy platerowanej czoło pęknięcia. Dla uzyskania żadanego powiększenia na próbce zamocowana była skala z podziałką milimetrową. Negatyw ustawiano do pomiaru długości pęknięcia tak, aby uzyskać wzdłuż całej sfotografowanej podziałki zgodność liniową powiększenia z linijką, którą mierzono pęknięcie.

Zdjęcia wykonywano dwoma aparatami z obu stron próbki. Zastosowano aparaty «Exacta Varex II» z teleobiektywem o ogniskowej 180 mm. Zastosowanie teleobiektywów podyktowane było koniecznością odsunięcia aparatów od próbki, aby umożliwić jej obserwację w czasie próby przy jednoczesnym zachowaniu niezwiększonego obszaru obrazu na negatywie. Zdjęcia naświetlano za pomocą lamp elektronowych o czasie błysku krótszym od 1/400 sek., co dawało, przy częstości przykładania obciążenia 1000 cykli/minutę maksymalny czas naświetlania około 0,04 cykla. Pozwalało to na wykonywanie zdjęć w czasie pracy maszyny zmęczeniowej.

Wyzwolenie migawki i zwarcie obwodu lamp elektronowych następowało przez jednoczesne uruchomienie umieszczonych przy obu aparatach elektromagnesów na sygnał z licznika liczby cykli następujący raz na 1000 cykli. Istniała możliwość odłączenia roboczego obwodu elektromagnesów, zdjęcia wykonywano zatem z wymaganą przez aktualną prędkość propagacji wielokrotnością 1000 cykli.

Dodatnią cechą zastosowanej metody jest możliwość dokonywania pomiaru (wykonywanie zdjęć) w czasie trwania obciążania próbki oraz możliwość wielokrotnego sprawdzania (po zerwaniu próbki) prawidłowości odczytu. Wadą jest stosunkowo żmudny sposób otrzymywania wyników.

2.4. Przebieg prób. Próby przeprowadzono na mimośrodowej maszynie zmęczeniowej skonstruowanej w Katedrze Budowy Samolotów. Maszyna ma zakres obciążania od 3000 do 300 kG siły rozciągającej, przy częstościach przykładania obciążeń 750, 1000 i 1500 cykli/minutę. Do prób zastosowano częstość 1000 cykli/min.

Maszyna do przeprowadzanych prób wyposażona była w dynamometr tensometryczny. Zastosowany mostek tensometryczny zapewniał dokładność ustawienia obciążeń $\pm 1,5\%$ użytego zakresu $\Delta R/R$.

Próbkę obciążano każdorazowo od początku procesu zmęczenia takimi naprężeniami, przy jakich po powstaniu pęknięcia mierzono jego propagację. Po uruchomieniu maszyny obserwowano krawędzie karbu próbki przy użyciu lupy dziesięciokrotnej i od momentu wystąpienia widocznego pęknięcia wykonywano zdjęcia rejestrujące jego długość, zapisując w karcie pomiarowej próbki ilość kilocykli, przy której wykonano zdjęcie.

Spadek siły obciążającej, spowodowany zwiększaniem się podatności próbki ze wzrostem pęknięcia, dla badanej długości pęknięcia był niedostrzegalny. Tak więc można przyjąć, że próby były prowadzone przy niezmiennych wartościach sił obciążających próbkę.

2.5. Metody opracowania wyników prób. Pomiar propagacji pęknięcia zmęczeniowego są bardzo żmudne, a materiał doświadczalny z prób bardzo obszerny. Wyniki przeprowadzonych badań zawierają przeciętnie po 100 odczytów długości pęknięcia dla jednej próbki. Sposób pomiaru długości pęknięcia i określania średniej wartości tej długości l dla danej ilości cykli obciążenia podaje rys. 2.

Dla tak określonych l wykonywano dla poszczególnych próbek wykresy liczby cykli wywołujących długość l ; $N = f(l)$. Następnie dla serii próbek obliczano z powyższych wykresów średnią (arytmetyczną) liczby cykli potrzebną do osiągnięcia przez pęknięcie długości l .

Z otrzymanych w ten sposób dla poszczególnych serii próbek zależności $N = f(l)$ obliczano wartości $\Delta l/\Delta N$ dla przedziałów $\Delta l = 0,5 \div 1$ mm. Tak otrzymana wartość $\Delta l/\Delta N \approx dl/dN$ [mm/kilocykl] wyznacza prędkość propagacji pęknięcia zmęczeniowego. Metoda przyjęta do jej określania jest zbliżona do zastosowanej w pracy [13].

Dla każdej próbki rejestrowano liczbę cykli N_c od początku trwania próby do zniszczenia próbki. Po określeniu zależności $N = f(l)$ dzielono całkowitą trwałość zmęczeniową próbki N_c na etap N_1 — od początku trwania próby do wywołania pęknięcia o długości $l = l_0 = 1$ mm, oraz na etap N_2 — od powstania $l = l_0$ do zniszczenia. Przy obserwacji próbki często zdarzało się, że nie dostrzegano małych pęknięć i rozpoczynało wykonywanie zdjęć przy długości l około 0,8 mm. Aby uniknąć ekstrapolacji uzyskanego z pomiarów wykresu $N = f(l)$ do określenia podziału trwałości całkowitej na odpowiednie etapy przyjęto $l_0 = 1$ mm, co z reguły zapewnia wykonanie przynajmniej jednego zdjęcia dla $l < l_0$.

Wartości N_1 , N_2 i $N_c = N_1 + N_2$ dla każdej serii próbek obliczano również jako średnią arytmetyczną z wyników poszczególnych próbek w serii. Wyjątek stanowi seria nr 5 dla próbek bez zgniotu $\sigma_{sr} = 10$ kG/mm², $\sigma_a = 2$ kG/mm². Dla tej serii najpierw obliczono wartość $(N_2)_{sr}$ z uzyskanych wyników propagacji (dwie próbki fotografowane). Następnie dla pięciu próbek przebadanych określono średnią wartość $\log N$ (średnia geometryczna) dla etapu N_1 . Dla tak określonych N_1 i N_2 podano wartość $N_c = N_1 + N_2$.

Obliczanie całkowitej trwałości zmęczeniowej N_c jako średniej arytmetycznej z uzyskanych dla poszczególnych próbek wyników jest sprzeczne ze stwierdzonym przez badaczy spełnianiem rozkładu normalnego przez $\log N$, a nie przez N (średnia geometryczna, a nie arytmetyczna). Z wyjątkiem jednak serii bez zgniotu nr 5, dla której sposób obliczenia średniej podano poprzednio, rozrzuty otrzymanych wartości N_c dla poszczególnych próbek są niewielkie, co sprawia, że obliczenia wartości średnich N , w stosunku do $\log N$, nie dają dla obliczanych wartości N_c różnic większych niż 0,5%.

3. Wyniki badań

3.1. Próbki bez zgniotu. Dla porównania z wynikami badań wpływu zgniotu wykonano 5 serii próbek bez zgniotu. Przyjęto naprężenia średnie $\sigma_{sr} = 10$ kG/mm²; dla poszczególnych serii zmieniano amplitudę naprężeń. Wyniki badań poszczególnych próbek z rozbićciem na etapy N_1 i N_2 podaje tablica 1, wartości średnie dla poszczególnych serii — tablica 2. Zależność ilości cykli, potrzebnych do wywołania określonej długości pęknięcia (od długości $l_0 = 1$ mm) od amplitudy naprężeń podaje wykres na rys. 5.

Próbki pękały od karbu środkowego. Pęknięcie propagowało się równomiernie w lewą i prawą stronę próbki. Największe różnice dla poszczególnych l_{ij} (według rys. 2) nie przekraczały jednego milimetra na początku etapu propagacji i dwóch milimetrów na ostatnich wykonywanych zdjęciach próbki. Różnice te były największe dla małych amplitud naprężeń.

Tablica 1. Wynik badań próbek bez zgniotu

Nr serii	σ_{sr}	σ_a	Numer próbki	N_1	N_2	N_c	Uwagi
—	kG/mm ²	kG/mm ²	—	<i>k</i> cykli	<i>k</i> cykli	<i>k</i> cykli	
1	10	8	C-23	10,00	11,70	21,70	
			C-32	9,93	10,65	20,58	
			C-39	13,16	11,45	24,61	
2		6	C-1	34,85	23,80	58,65	
			C-4	38,15	27,55	65,70	
			C-5	36,75	27,15	63,90	
3		4,2	C-29	75,13	69,00	145,13	
			C-35	87,40	68,15	155,55	
			C-38	105,35	68,00	173,35	
4		2,8	C-43	374,0	191,7	575,7	
	C-56		337,8	208,2	546,0		
	C-62		314,5	191,7	506,2		
5	2	C-64	6 533,6	632,0	7165,6	Nie wykonano zdjęć	
		C-71			1804,0		
		C-78	1 090,3	598,9	1689,2		
		C-90	10 000,0	bez zapoczątkowania pęknięcia			
		C-89	10 000,0	bez zapoczątkowania pęknięcia			
6	12	4	C-57	105,6	71,95	177,55	
			C-44	113,5	68,30	181,8	
			C-48	111,5	70,80	182,3	
7	8,8	4	C-69	119,0	88,0	199,9	
			C-75	157,9	90,8	248,7	
			C-82	129,6	84,7	214,3	

Nie stwierdzono żadnych przerw i nieciągłości w etapie propagacji. Od momentu powstania pęknięcia propagowało ono w sposób ciągły, zmniejszając jedynie lub zwiększając prędkość propagacji dla poszczególnych odczytów l_{ij} , bez widocznej nieciągłości zależności $N = f(l)$ dla poszczególnych próbek. Wyraźniejsze czoło pęknięcia występowało dla większych amplitud naprężeń.

Złom zmęczeniowy miał ten sam charakter jak w badaniach podawanych w literaturze. Przejście ze złomu prostopadłego do powierzchni próbki na złom o kącie około 45° nie powodowało żadnych dostrzegalnych różnic w prędkości propagacji. Długość złomu zmęczeniowego prostopadłego była większa dla mniejszych amplitud naprężeń.

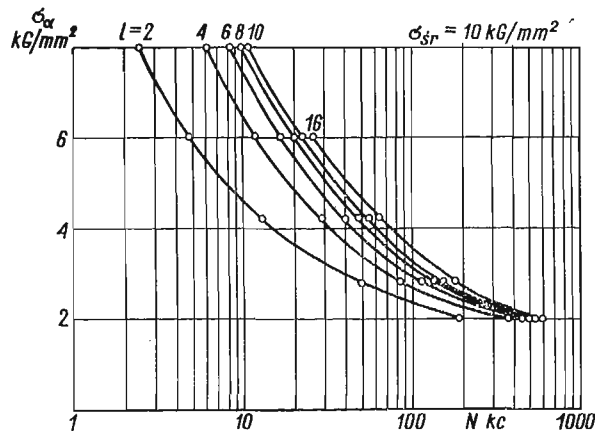
3.2. Próbkę ze zgniotem. Badania wpływu różnych parametrów zgniotu przeprowadzono przy stałych naprężeniach średnich i stałej amplitudzie naprężeń $\sigma_{sr} = 10 \text{ kG/mm}^2$ $\sigma_a = 6 \text{ kG/mm}^2$. Ze względu na dużą liczbę zmiennych parametrów przeprowadzono jedynie badania charakteru ich wpływu, rezygnując w czasie omawianych badań z wyznaczania zależności funkcyjnych dla poszczególnych parametrów. Dla zgniotu 1W/3260/7/1 przeprowadzono badania przy pięciu amplitudach naprężeń.

Tablica 2. Wartości średnie dla serii bez zgniotu

Nr serii	σ_{sr}	σ_a	N_1	N_2	N_c	R_1	R_2	R_c	$\Delta\sigma$
	kG/mm ²	kG/mm ²	K_c	K_c	K_c	%	%	%	kG/mm ²
1	10	8	11,03	11,27	22,30	29,3	9,3	18,1	±0,4
2		6	36,6	26,2	62,8	9,0	14,3	10,7	
3		4,2	89,3	68,4	157,7	30,8	1,5	18,5	
4		2,8	342,1	197,2	539,3	17,4	8,4	11,0	
5		2	>3854,4	615,4	>4469,8	—	—	—	±0,2 Obliczenie N_i w/g uwag w rozdz. 4
6	12	4	110,2	70,4	180,6	7,2	5,2	2,6	
7	8,8		133,1	87,8	220,9	34,6	7,0	22,1	

$$R_i = \frac{(N_i)_{max} - (N_i)_{min}}{(N_i)_{sr}} 100\%$$

Otrzymane wartości etapów N_1 , N_2 i N_c podaje dla przebadanych próbek tablica 3 i tablica 6, wartości średnie dla poszczególnych serii — tablice 4 i 7. W tablicach wartości średnich podano wartości pola rozrzutu wyników dla poszczególnych serii. Tablica 5 podaje stosunek wartości odpowiedniego etapu poszczególnych serii ze zgniotem do tego samego etapu serii nr 2 bez zgniotu.



Rys. 5. Liczba cykli σ_a do osiągnięcia długości pęknięcia l od wartości $l_0 = 1$ mm (bez zgniotu)

Z wyników badań widać duże możliwości przedłużania etapu propagacji i wpływania na wartości prędkości propagacji dla różnych długości pęknięcia przy użyciu zgniotu. Pęknięcie rozpoczynało się tak jak w próbkach bez zgniotu od karbu środkowego. Nie stwierdzono większej niż dla próbek bez zgniotu niesymetrii propagacji przy $l < 1$ mm. Po osiągnięciu obszaru odcisków, pęknięcie dla większości typów zgniotów nie propagało symetrycznie.

Tablica 3. Wyniki badań próbek ze zgięciem dla stałego poziomu naprężeń; $\sigma_{sr} = 10 \text{ kG/mm}^2$; $\sigma_n = 6 \text{ kG/mm}^2$

Nr serii	Parametry zgięciu	Nr próbki	Dób leżak.	N_1	N_2	N_c	Uwagi
				KC	KC	KC	
1	1W/3260/7/0	C-22	1	28,15	194,25	222,40	
		C-36	23	28,65	223,40	252,05	
		C-40	24	31,1	173,5	204,60	
2	1K/800/7/0	C-9	27	20,45	73,75	94,20	
		C-14	28	17,25	60,40	77,65	
		C-11	28	19,12	77,50	96,62	
3	2K/870/7/0	C-10	29 ÷ 30	24,55	278,10	302,65	
		C-13	35	18,40	388,55	406,95	
		C-20	36	27,93	358,00	385,93	
4	1W/3260/7/1	C-45	21 ÷ 22	30,2	468,5	498,7	
		C-47	23 ÷ 24	34,9	481,1	516,0	
		C-49	25 ÷ 27	38,2	421,1	459,3	
5	2K/870/7/1	C-3	30 ÷ 31	31,9	815,1	847,0	2)
		C-18	32	21,9	541,8	563,7	
		C-41	35 ÷ 38	25,2	766,3	791,5	3)
6	2W/3260/7/1	C-46	77 ÷ 78	30,8	275,70	306,50	
		C-72	79	34,8	337,80	372,60	
		C-79	80	43,1	294,35	337,45	
7	2K/1200/7/1	C-12	8 ÷ 10	23,35	656,05	679,4	1)
		C-15	11 ÷ 14	24,40	863,30	887,7	2)
		C-16	15 ÷ 16	24,70	618,60	643,3	
8	1W/2400/7/1	C-65	28	39,20	93,80	133,00	
		C-68	28	37,10	90,85	127,90	
		C-76	29	44,70	97,65	142,35	
9	1W/4000/7/1	C-52	30	30,8	293,5	324,3	
		C-53	31	34,4	318,5	352,9	
		C-55	32	37,5	425,8	463,3	
10	2K/870/10/1	C-27	17	21,40	57,65	79,05	
		C-34	17	19,85	61,85	81,70	przed N_1 obciążona statycznie $\sim 2 \sigma_{max}$
		C-37	28	37,58	43,20	80,78	
11	2K/870/16/1	C-24	29	30,30	31,95	62,25	
		C-28	29	30,05	30,75	60,80	
		C-31	30	35,65	31,45	67,10	
12	1W/3260/6/1	C-59	34 ÷ 42	39,70	695,50	735,20	
		C-64	43 ÷ 44	39,65	524,50	564,15	
		C-67	44 ÷ 45	39,90	655,80	695,70	
13	1W/3260/8/1	C-70	45	40,0	233,6	273,6	
		C-74	47	35,3	227,3	262,6	
		C-83	48	40,4	237,9	278,3	

Zniszczenie próbek spowodowane pęknięciem poza częścią pomiarową:

- 1) przez karb zewnętrzny ($r = 50 \text{ mm}$),
 - 2) przez zamocowanie w szczękach,
 - 3) przez wadę materiałową (wtrącenie niemetaliczne).
- Oznaczenia zgięciu podano w podrozdziale 2.2.

Tablica 4. Wartości średnie dla serii ze zgniotem (wg tabl. 3). $\sigma_{sr} = 10 \text{ kG/mm}^2$; $\sigma_a = 6 \text{ kG/mm}^2$

Nr serii	Parametry zgniotu	N_1	N_2	N_c	R_1	R_2	R_c	Uwagi
1	1W/3260/7/0	29,30	197,10	226,40	10,0	25,8	21,0	
2	1K/800/7/0	18,94	70,55	89,49	16,9	24,3	21,2	
3	2K/870/7/0	23,65	341,55	365,20	40,3	32,4	28,6	
4	1W/3260/7/1	34,40	456,90	491,30	23,3	13,1	11,5	
5	2K/870/7/1	26,33	707,74	734,07	38,0	38,6	38,05	Różne miejsca zniszcz. próbek
6	2W/3260/7/1	36,33	202,62	338,85	34,0	20,5	19,5	
7	2K/1200/7/1	24,15	712,65	736,80	5,6	35,2	33,2	Różne miejsca zniszcz. próbek
8	1W/2400/7/1	40,33	94,08	134,41	18,9	7,3	10,8	
9	1W/4000/7/1	34,23	345,93	380,16	19,6	38,3	36,9	
10	2K/870/10/1	26,28	54,23	80,51	67,5	31,2	3,3	Różne warunki próby
11	2K/870/16/1	32,00	31,38	63,38	17,5	3,8	9,9	
12	1W/3260/6/1	39,75	625,27	665,02	0,6	27,4	25,7	
13	1W/3260/8/1	38,57	232,93	271,50	13,2	4,6	5,8	

R_1 — oznaczenie wg tablicy 2.

Tablica 5. Porównanie serii ze zgniotem (wg tabl. 4) z serią bez zgniotu (seria nr 2) $\sigma_{sr} = 10 \text{ kG/mm}^2$; $\sigma_a = 6 \text{ kG/mm}^2$

Nr serii ze zgniotem	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\frac{N_{1z}}{N_{10}}$	0,8	0,5	0,6	0,9	0,7	1,0	0,7	1,1	0,9	0,7	0,9	1,1	1,1
$\frac{N_{2z}}{N_{20}}$	7,5	2,9	13,0	17,4	27,0	11,6	27,3	3,6	13,2	2,1	1,2	23,9	8,9
$\frac{N_{cz}}{N_{ca}}$	3,6	1,4	5,8	7,8	11,7	5,4	11,7	2,1	6,1	1,3	1,0	10,6	4,3

N_{10} ; N_{20} ; N_{c0} — wartości dla serii bez zgniotu
 N_{1z} ; N_{2z} ; N_{cz} — wartości dla serii ze zgniotem.

Wpływ czasu wytrzymywania siły wykonującej zgniot okazał się bardzo znaczny zarówno na wartość etapu N_2 , jak i na przebieg propagacji. Wykazują to serie 3, 5 i serie 1, 4. Dla obu par porównywanych serii widać wyraźny wzrost etapu N_2 ze wzrostem czasu wytrzymywania siły P_w . Dla serii 4 wzrost czasu wytrzymywania siły spowodował zmianę w charakterze propagacji; seria 1 miała symetryczny przebieg propagacji — zgodny z obserwacjami dla próbek bez zgniotu, a seria 4 wyraźnie większą prędkość propagacji od

Tablica 6. Wyniki badań próbek ze zgniotem 1W/3260/7/1 dla różnych σ_a przy $\sigma_{sr} = 10$ kG/mm²

Nr serii	σ_a	Nr próbki	Dób leżak.	N_1	N_2	N_c	Uwagi
	kG/mm ²			k_c	k_c	k_c	
14	8	C-60	33	17,60	87,40	105,00	
		63	34	14,20	72,30	86,55	
		77	34	16,15	82,00	98,15	
15	4	C-81	22÷24	110,1	1023,4	1133,5	
		84	26÷28	105,9	1154,5	1260,4	
		87	28÷31	119,9	1226,1	1346,0	
16	2,8	C-58	83÷86	290,5	2821,9	3112,4	
		80	86÷91	327,7	3149,0	3476,7	
		61	99÷102	359,6	2526,5	2886,1	
17	2	C-66	36÷48	1732,5	> 8627,5	> 10 000,0	} bez zniszczenia
		73	48÷58	1692,0	> 8308,0		
		85	112÷119	1060,7	> 3941,7		

Tablica 7. Wartości średnie dla serii ze zgniotem 1W/3260/7/1 (wg tab. 6) dla różnych σ_a

Nr serii	σ_a	N_1	N_2	N_c	R_1	R_2	R_c	Uwagi
	kG/mm ²	k_c	k_c	k_c	%	%	%	
14	8	15,98	80,57	96,55	21,3	18,7	19,2	
4	6	34,40	456,90	491,30	23,3	13,1	11,5	powtórzenie z tab. 7
15	4	112,0	1134,6	1246,6	12,5	17,9	17,1	
16	2,8	325,9	2832,5	3158,4	21,2	22,0	18,7	
17	2	1495,0	> 8505	> 10 000	45	—	—	

R_1 — oznaczenie wg tablicy 2.

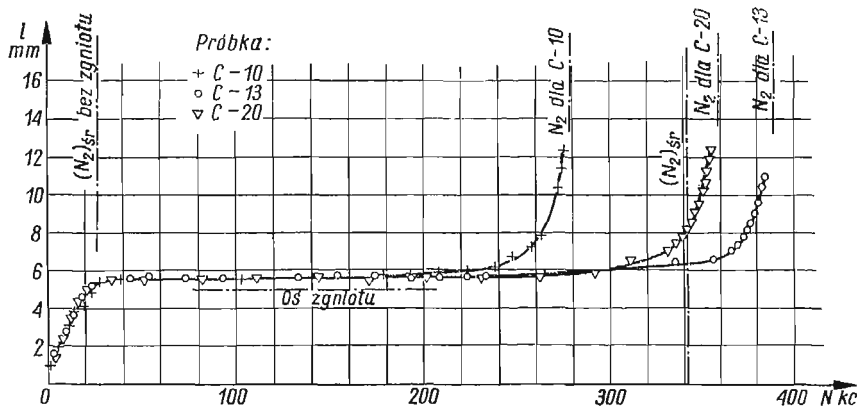
strony prawej karbu środkowego (zgniot wykonany w pierwszej kolejności). Różnica $l_p - l_i$ dla $l = 15$ mm osiągała średnio wartość 5 mm. Przyczyną zmniejszającego wpływu czasu wytrzymywania siły na prędkość propagacji wydaje się być zwiększenie wartości i obszaru zgniotu przez lokalne pełzanie materiału pod stałym obciążeniem o bardzo dużej wartości.

Wpływ kształtu zgniotu na własności propagacji (przy przyjętej metodzie porównywania kształtów) wskazuje na możliwość uzyskania zupełnie różnych przebiegów propagacji.

Dla kształtów 2K i 1K widać wyraźnie lokalny wpływ wprowadzonych zmian. Dla wszystkich serii dla tych kształtów zgniotu, przy różnych pozostałych parametrach, średnia prędkość propagacji dla długości pęknięcia w zakresie 1÷5 mm jest zbliżona do średniej wartości dla próbek bez zgniotu. Zmiana prędkości propagacji następuje dopiero po osiągnięciu przez pęknięcie odcisku stempla w materiale próbki. Lokalny wpływ tych

kształtów zgniotu tłumaczyć można małym obszarem wprowadzanych w materiał dużych naprężeń własnych ściskających i małym obszarem zgniotu. Stwierdzenie małego obszaru zalegania naprężeń własnych ściskających nie jest podważone przy rozważaniu wpływu kształtów zgniotu $2K$ i $1K$ na etap N_2 . Znaczny spadek (do 50%) tego etapu w porównaniu do próbki bez zgniotu świadczy o wprowadzeniu na krawędzi karbu rozciągających naprężeń własnych. Naprężenia własne rozciągające mogą zalegać dla tak wprowadzonych zgniotów w bardzo dużym obszarze materiału, równoważąc małe pole dużych naprężeń ściskających.

Dla próbek $2K/870/7/0$ (seria 3, rys. 6) po okresie «postoju» pęknięcia przez około 250 kilocykli obciążenia następował dalszy wzrost długości pęknięcia z prawej lub lewej



Rys. 6. $N = f(l)$ dla zgniotu $2K/870/7/0$; seria nr 3 ($\sigma_{sr} = 10 \text{ kG/mm}^2$; $\sigma_a = 6 \text{ k/Gmm}^2$)

strony próbki doprowadzając do zniszczenia próbki przy nieznacznym wzroście pęknięcia z przeciwnej strony. Przepuszczalnie następowało to w wyniku różnic we wprowadzanych do próbek zgniotach.

Próbki $2K/870/7/1$ (seria 5) miały duży rozrzut wartości etapu N_2 , podobnie jak $2K/1200/7/1$ (seria 7). Zniszczenie próbek tych serii następowało najczęściej poza przestrzenią pomiarową. Część próbek po około 500 kilocyklach obciążenia postoju pęknięcia zaczynała dalej pękać w podobny sposób jak próbki serii 3. Obserwacje pęknięcia w czasie jego propagacji i analiza wykonanych zdjęć doprowadziły do stwierdzenia, że propagujące z obszaru odcisku pęknięcie nie łączyło się w początkowym okresie swojej propagacji z czołem pęknięcia, które doszło do odcisku od krawędzi karbu. Obserwacje te wywołują przypuszczenie, że propagujące po okresie postoju pęknięcie nie jest przedłużeniem pęknięcia zatrzymanego w obszarze zgniotu, lecz powstaje niezależnie na skutek działania krawędzi odcisku jako karbu przy istniejącym pęknięciu. Przypuszczenie to potwierdzają obserwacje złomu zmęczeniowego tego typu próbek.

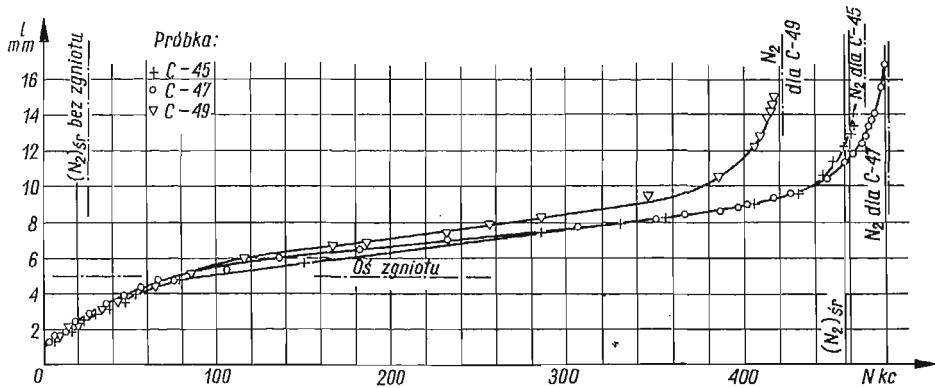
Przyczyną długiego okresu postoju pęknięcia w pobliżu osi zgniotu, oprócz wpływu ujemnych naprężeń własnych i umocnienia plastycznego, może być również wpływ zwiększającego się przekroju materiału na drodze pęknięcia po przekroczeniu przez czoło pęknięcia osi zgniotu. Sugerowany wpływ zmian w przekroju materiału można wyraźnie dostrzec dla próbek typu $2K/870/10/1$ (seria 10), gdzie zachodziło przyspieszenie pęknię-

cia przed osią zgniotu i opóźnienie po przekroczeniu osi. Przebieg kierunku propagacji pęknięcia dla kształtu zgniotu 2K potwierdza również wpływ zmian przekroju materiału na prędkość propagacji. Pęknięcie z reguły dochodziło stycznie do kołowej krawędzi odcisku, a po przejściu krawędzi zmieniało kierunek propagacji zmierzając do osi odcisku zgodnie ze zmniejszającym się przekrojem materiału.

Kształt zgniotu 1K (seria 2) różnił się od 2K wyraźnie wolniejszą propagacją pęknięcia po stronie z odciskiem w stosunku do strony gładkiej oraz bardzo krótkim okresem postępu pęknięcia, zaznaczonym praktycznie tylko od strony odcisku. Zostało to spowodowane dwukrotnie mniejszą intensywnością wprowadzonego zgniotu (dla 1K; δ_w/δ , dla 2K; $2\delta_w/\delta$).

Wpływ kształtu zgniotu 1W (serie 1, 4, 8, 9, 12 i 13) wyraźnie różnił się od skutków wywołanych kształtem 2K czy 1K. Dla przykładu podano na rys. 7 zależność $N = f(l)$ dla zgniotu 1W/3260/7/1 (seria 4).

Wpływ wprowadzonych zmian zaznaczał się tutaj od długości $l = 1 \div 1,5$ mm. Pęknięcie zachowywało zbliżony do liniowego przebieg propagacji do obszaru wykonanego



Rys. 7. $N = f(l)$ dla zgniotu 1W/3260/7/1; seria nr 4 ($\sigma_{sr} = 10$ kG/mm²; $\sigma_a = 6$ kG/mm²)

odcisku. Następnie występowało dość szybkie (ale ciągłe) zmniejszenie prędkości propagacji i od obszaru osi zgniotu pęknięcie propagowało znowu ze stałą (ale znacznie mniejszą od poprzedniej) prędkością do długości przekraczającej położenie osi zgniotu o około 3 mm. Przyczyną tego jest zapewne rozleglejsze pole naprężeń własnych ściskających wprowadzone większym niż dla 2K stemplem. Utrzymywanie się tutaj stałej prędkości propagacji przy wzrastającej długości pęknięcia sugeruje «odciążający» wpływ istniejących w już pękniętym materiale własnych naprężeń ściskających na naprężenia na czole pęknięcia. Przypuszczenie to potwierdzają obserwacje plastycznych odkształceń plateru w pobliżu czoła pęknięcia. Po przekroczeniu przez pęknięcie obszaru odcisku, przy stałej jeszcze prędkości propagacji, obszar zmatowiałego plateru nie wyprzedzał czoła pęknięcia, a powstawał z obu stron istniejącego pęknięcia.

Występujący dla próbek typu 1W niesymetryczny przebieg propagacji zdradza pewną prawidłowość. Pęknięcie propagujące z większą prędkością (ma to miejsce w obszarze od osi zgniotu do zniszczenia próbki) występuje zawsze po stronie próbki, gdzie zgniot był wykonywany jako pierwszy. Wykonane pomiary wykazały, że głębokość odcisku δ_w , wykonywanego na próbce jako pierwszy jest zawsze nieco większa od δ_w drugiego od-

cisku. Średnia wartość różnicy wynosi około 6% δ_w . Dowodzi to istnienia dla kształtu 1W wpływu pierwszego wykonywanego zgniotu na obszar, w który wprowadza się zgniot drugi. Stanowi to wadę metody przyjętej do wprowadzania w materiał zgniotów. Należy sądzić, że dla tego kształtu zgniotu niesymetrię w przebiegu propagacji można by zmniejszyć stosując do wykonywania zgniotów przyrząd umożliwiający wprowadzanie odkształceń plastycznych równocześnie z obu stron karbu.

Porównując dla kształtu zgniotu 1W pomiary czoła pęknięcia po stronie gładkiej i po stronie zawierającej odcisk widać, że czoło pęknięcia po stronie gładkiej wyprzedza średnio o około 1 mm czoło pęknięcia po stronie z odciskiem, osiągając największe różnice już po wyjściu pęknięcia z obszaru odcisku.

Etap do powstania pęknięcia N_1 nie różnił się dla kształtów zgniotu 1W i 2W od tego etapu dla próbek bez zgniotu (tablica 5).

Wyniki badań wpływu kształtu zgniotu 2W (seria 6) wykazały jeszcze dobitniej wpływ kolejności wykonywania zgniotów. Jest to zrozumiałe ze względu na dwukrotnie większą intensywność wprowadzonego zgniotu ($2 \times \delta_w$). Zgniot wykonywany jako pierwszy dawał prawie stałą prędkość propagacji dla zakresu pomiarowego długości pęknięcia, zgniotowi drugiemu odpowiadał rozkład prędkości propagacji zbliżony do uzyskiwanego dla kształtu 2K. Powodowało to bardzo dużą niesymetrię propagacji pęknięcia; przy $l \approx 13$ mm $l_p - l_1 \approx 10$ mm.

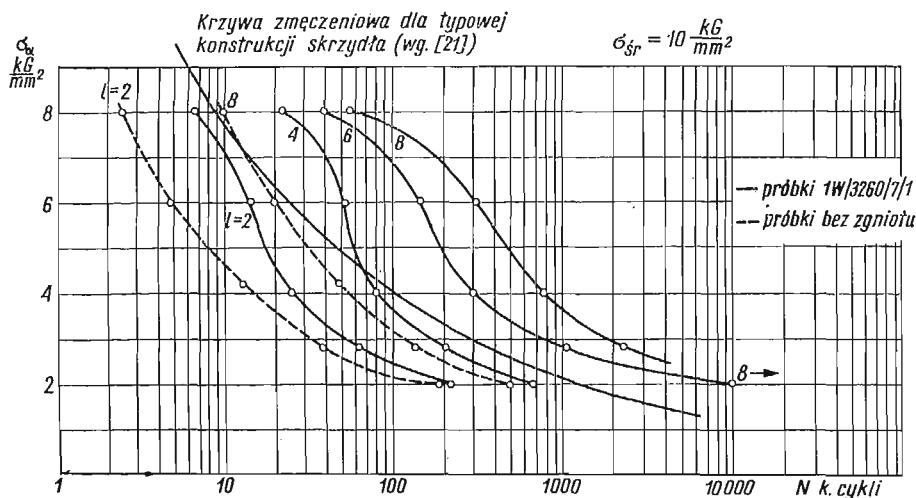
Wpływ wartości siły wciskającej stempel w materiał próbki badano dla dwóch kształtów zgniotu: 2K i 1W (serie 5, 7 i 4, 8, 9). Wyniki badań tego parametru dla kształtu 2K nie pozwoliły wyciągnąć nowych wniosków ze względu na opisane już sposoby zniszczenia próbek poza przekrojem pomiarowym. Dla kształtu 1W badano próbki przy trzech wartościach siły P_w . Uzyskano największą wartość etapu N_2 dla pośredniej wartości siły P_w . Udowodnia to istnienie maksimum wpływu dokonywanego tą metodą zgniotu na własności propagacji.

Spadek własności propagacji dla większych wartości siły P_w wytłumaczyć można wprowadzeniem bardzo dużych zgniotów dających w efekcie przekroczenie dostrzeżonego już wcześniej dla badań zmęczeniowych tzw. zgniotu granicznego. Wniosek ten znajduje potwierdzenie w porównaniu kształtów 2W i 1W: etap N_2 dla 2W (seria 6) jest ponad 2 razy mniejszy od N_2 dla 1W (seria 4) przy około dwukrotnie większej intensywności zgniotu dla 2W. Spostrzeżenie to wydaje się być o tyle cenne, że i w zakresie wpływu samego umocnienia plastycznego zbliża własności etapu propagacji pęknięcia do poznanych lepiej własności całkowitego procesu zmęczenia materiałów.

Wpływ odległości wprowadzanego zgniotu od miejsca rozpoczęcia się pęknięcia zmęczeniowego (parametr a) na własności propagacji zbadano dla dwóch kształtów zgniotu: 2K i 1W (serie 5, 10, 11 i 4, 12, 13 odpowiednio). Dla obu grup serii zwiększanie rozstawienia osi zgniotów powodowało szybki spadek wartości etapu N_2 , aż do wartości odpowiadającej próbkom bez zgniotu (seria 11). Oprócz zmniejszającego efekt zgniotu wpływu coraz to większych naprężeń na czole pęknięcia w miarę oddalania miejsca zgniotu od początku pęknięcia, zjawisko to można dodatkowo dla kształtu 1W uzasadnić zmianami w rozkładzie, a może i wielkości własnych naprężeń ściskających w miarę zmniejszania się wpływu jednego zgniotu na drugi przy wzroście odległości. Dla większych parametrów a (8 dla 1W; 10, 16 dla 2K) pęknięcie propagowało symetrycznie.

W czasie przeprowadzonych prób nie badano wpływu zjawiska relaksacji naprężeń własnych wprowadzonych zgniotem. Nie ma w literaturze publikacji traktujących wyczerpująco o przebiegu tych zjawisk w stopach lekkich.

W czasie prób starano się, aby po wykonaniu zgniotu próbki leżały ponad 20 dób, co w świetle posiadanych na ten temat informacji winno zapewnić uwolnienie próbki od zanikającej stosunkowo szybko części naprężeń własnych. W tablicach 3 i 6 podano okres leżakowania dla każdej badanej próbki od czasu wykonania zgniotu do próby. W przypadku, gdy badania próbki trwały ponad 1 dobę podano w tablicach czas leżakowania do rozpoczęcia i do zakończenia próby. Nieliczne próbki wykonywane dla poszczególnych badanych serii z czasem krótszym od przyjętego jako podstawowy nie wykazały żadnych wyraźnych różnic w etapie propagacji.



Wydaje się prawdopodobne, że wpływ liczby obciążeń przeniesionych przez próbki zanim pęknięcie osiągnie obszar ściskających naprężeń własnych na wartości tych naprężeń może być, zgodnie z sugestiami w [20], tak duży, że zmienny okres relaksacji nie odgrywa w tym przypadku większej roli.

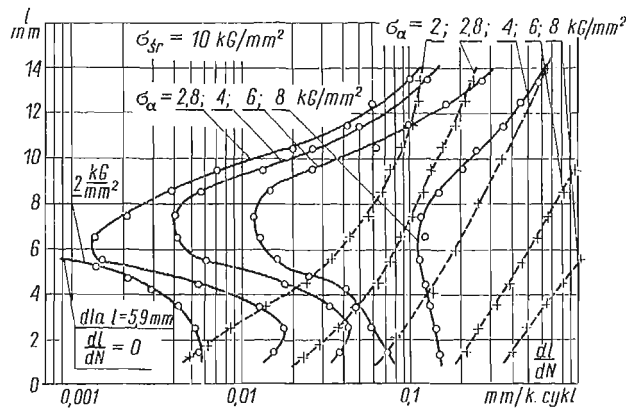
Dla próbek ze zgniotem 1W/3260/7/1 wykonano badania przy różnych amplitudach naprężeń. Próby te przeprowadzono w celu określenia skuteczności wprowadzanego zgniotu dla różnych amplitud naprężeń po porównaniu z wynikami badań dla próbek bez zgniotu. Do prób tych przyjęto kształt zgniotu 1W, który dawał bardziej interesujący autorowi wpływ na własności propagacji niż 2K. Umożliwił poza tym prowadzenie badań bez obawy występowania pęknięć zmęczeniowych poza przestrzenią pomiarową próbki. Na tę część badań składają się serie: 4, 14÷17 (tablice 6 i 7).

Zależność liczby cykli potrzebnej do wywołania określonej długości pęknięcia l (od długości $l_0 = 1$ mm) od amplitudy naprężeń podaje wykres na rys. 8. Na wykresie naniesiono linie $l = \text{const}$ dla $l = 2, 4, 6, 8$ mm dla próbek ze zgniotem i linie $l = 2, 8$ mm dla próbek bez zgniotu. Dla porównania podano wartość średnią krzywej zmęczeniowej dla typowych konstrukcji skrzydeł i usterzeń samolotów projektowanych w latach 1941-

-1943, według danych z [21]. Z porównania widać, że próbki ze zgniotem mają sam etap propagacji pęknięcia znacznie większy niż całkowita trwałość zmęczeniowa konstrukcji lotniczych z lat czterdziestych.

Porównując liczbę cykli potrzebną do wywołania danej długości pęknięcia dla próbek bez zgniotu i ze zgniotem przy różnych wartościach amplitudy naprężeń, można stwierdzić nieliniowy wpływ zmian wprowadzonych zgniotem na zmniejszenie prędkości propagacji (rys. 8). Jest to przypuszczalnie wynikiem zmiennych wpływów naprężeń własnych i umocnienia plastycznego w funkcji amplitudy naprężeń — prób rozdziału tych parametrów i badań z tym związanych nie przeprowadzono.

Na rys. 9 podano zależności $dl/dN = f(l)$ przy $\sigma_a = \text{const}$. Z wykresów widać duży spadek prędkości propagacji dla próbek ze zgniotem w stosunku do próbek bez zgniotu. Charakter zależności dla próbek ze zgniotem jest zupełnie inny niż dla próbek bez zgniotu.

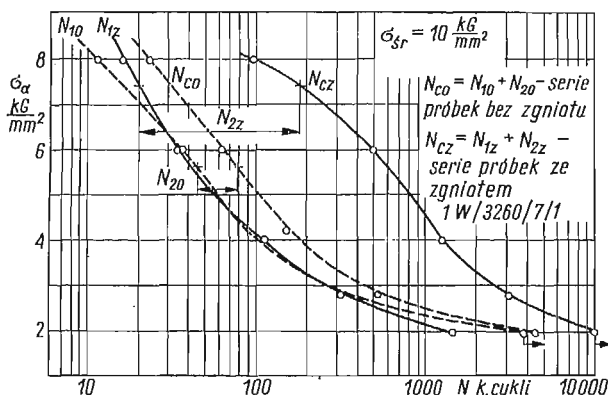


Rys. 9. $dl/dN = f(l)$ dla $\sigma_a = \text{const}$, linie ciągłe — dla próbek ze zgniotem 1W/3260/7/1, linie przerywane — dla próbek bez zgniotu

Dla próbek ze zgniotem w przedziale amplitudy naprężeń od 6 do 2,8 kG/mm² przy wzroście długości pęknięcia do około 5 mm następuje spadek prędkości propagacji. W przedziale $l = 5 \div 8$ mm prędkość propagacji osiąga minimum. Dla $\sigma_a = 2$ kG/mm² przy $l = 5,8$ mm pęknięcie zostało zatrzymane aż do wartości $N_c = 10^7$ cykli przyjętej w badaniach jako trwałość nieograniczona. Dla długości pęknięcia 1 mm prędkość propagacji przy $\sigma_a = 2$ kG/mm² jest zbliżona do prędkości dla próbek bez zgniotu. Ze wzrostem amplitudy naprężeń stosunek wartości prędkości propagacji dla próbek bez zgniotu do wartości prędkości propagacji dla próbek ze zgniotem wzrasta, osiągając przy $\sigma_a = 8$ kG/mm² wartość około 3.

Porównanie etapu N_1 i N_c dla próbek ze zgniotem i bez zgniotu podano na rys. 10. W zakresie $\sigma_a = 8 \div 2,8$ kG/mm² etap N_1 nie wykazuje istotnych różnic dla obu typów próbek. Dla naprężeń $\sigma_a = 2$ kG/mm² widać wyraźnie większą wartość etapu N_1 dla próbek bez zgniotu. Etap ten dla próbek ze zgniotem miał znacznie mniejsze rozrzuty i jego wartości dla poszczególnych próbek zawarte są w polu rozrzutu etapu N_1 dla próbek bez zgniotu. Na zmianę wartości etapu N_1 próbek ze zgniotem w stosunku do próbek bez zgniotu mogą wpływać dwa czynniki; różnice w prędkości propagacji do $l_0 = 1$ mm i wpływ

naprężeń własnych w materiale przy krawędzi karbu na powstanie pęknięcia. W przypadku gdy dla próbek ze zgniotem prędkość propagacji do l_0 jest mniejsza niż dla próbek bez zgniotu (ma to miejsce w zakresie $\sigma_a = 8 \div 2,8$ kG/mm²) i istnieją przy krawędzi karbu naprężenia własne rozciągające — są to dwa czynniki o przeciwnym kierunku działania na etap N_1 . Z uzyskanych wyników można sądzić, że przy krawędzi karbu istnieją niewielkie rozciągające naprężenia własne, których wpływ zaczyna się uwidaczniać dla $\sigma_a = 2$ kG/mm², gdzie prędkości propagacji próbek bez zgniotu i ze zgniotem przy l_0 są sobie równe.



Rys. 10. Porównanie próbek bez zgniotu z próbkami ze zgniotem 1W/3260/7/1 (serie nr 4, 14–17)

Dla badanego zgniotu niesymetria w propagacji pęknięcia była mniejsza dla większych amplitud naprężeń. Dla $\sigma_a = 2$ kG/mm² pęknięcie zatrzymywało się z obu stron próbki symetrycznie. Istniała jedynie różnica o wartości około 1 mm między położeniem czoła pęknięcia zatrzymanego po stronie gładkiej i po stronie z odciskiem stempla.

Przy niskich amplitudach naprężeń (2 i 2,8 kG/mm²) obserwacja pęknięcia na wykonywanych zdjęciach była bardzo utrudniona ze względu na bardzo mały wymiar poprzeczny propagującego pęknięcia i wymagała od prowadzącego obserwacje dużej wprawy w określaniu położenia czoła pęknięcia.

Obserwacje złomu zmęczeniowego nie wykazały żadnych nowych zjawisk; pęknięcie prostopadłe do płaszczyzny próbki było dłuższe dla mniejszych amplitud naprężeń zgodnie z wynikami dla próbek bez zgniotu.

4. Ogólne wnioski z przeprowadzonych badań

Przeprowadzone badania udowadniają możliwość znacznej poprawy własności propagacji pęknięcia zmęczeniowego przez zgniot wprowadzony na drodze propagującego pęknięcia.

Wywołane w materiale odkształcenia plastyczne i stowarzyszone z nimi naprężenia własne mogą spowodować dwa jakościowo odmienne skutki:

a. Zmniejszyć prędkość propagacji zmieniając jednocześnie jej zależność od długości pęknięcia.

b. Zatrzymać propagację pęknięcia zmęczeniowego o makroskopowej długości w konstrukcjach poddanych działaniu znacznych naprężeń powtarzalnych.

W pracy przebadano dokładniej skutek a., co doprowadziło do stwierdzenia, że i tu istnieje możliwość zatrzymania propagacji pęknięcia, ale przy znacznie mniejszych naprężeniach.

Stwierdzono znaczną zależność charakteru zmian prędkości propagacji od kształtu zgniotu, siły wykonującej zgniot i czasu jej działania na narzędzie, oraz odległości wprowadzanego zgniotu od początku pęknięcia.

Zwiększenie siły wykonującej zgniot powyżej określonej wartości może spowodować zmniejszenie korzystnego wpływu wprowadzanych zmian.

W badanym zakresie odległości zgniotu od początku pęknięcia stwierdzono szybki spadek korzystnego wpływu wprowadzanych zmian wraz ze zwiększaniem tej odległości.

Zmiana przekroju materiału (lokalne zmniejszenie się grubości blachy spowodowane głębokością wykonanego odcisku) wydaje się również wpływać na prędkość propagacji; prędkość zwiększa się, gdy pęknięcie propaguje się w kierunku zmniejszania się przekroju materiału, zmniejsza się natomiast w przypadku propagowania pęknięcia od środka do krawędzi odcisku.

Przeprowadzone badania stanowią jedynie pierwszy krok na drodze «sterowania» własnościami propagacji, udowadniając istnienie takiej możliwości i wskazując kierunki dalszych badań.

Literatura cytowana w tekście

1. B. LUNDBERG, *Notes on the level of safety and the repair rate with regard to fatigue in civil aircraft structures*, FFA, Mem. PE-15, 1962.
2. B. LUNDBERG, *Fatigue life of airplane structures*, FFA, Report 60.
3. B. LUNDBERG, *A statistical method for fail safe design with respect to aircraft fatigue*, International Council of the Aeronautical Sciences, Second Intern. Congress, Zürich 1960.
4. R. R. SCHAW, *The level of safety achieved by periodic inspection for fatigue cracks*, JRAS, 1954, October.
5. W. WEIBULL, *The propagation of fatigue cracks in light — alloy plates*, SAAB TN 25, 1954 (fragmenty w/g H. Hertel), *Leichtbau Flugzeuge und andere Leichtbauwerke*, Springer Verlag, 1960.
6. W. WEIBULL, *Effect of crack length and stress amplitude on growth of fatigue cracks*, FFA, Rep. 65.
7. W. WEIBULL, *Size effects on fatigue crack initiation and propagation in aluminium sheet specimens subjected to stresses of nearly constant amplitude*, FFA, Rep. 86, 1960.
8. N. E. FROST, D. S. DUGDALE, *The propagation of fatigue cracks in sheet specimens*, Journ. of the Mech. and Phys. of Solids, 6 (1958).
9. N. E. FROST, *Propagation of fatigue cracks in various sheet materials*, The Journ. of Mech. Eng. Sciences, 1 (1959).
10. N. E. FROST i in., *Experimental studies into the behaviour of fatigue cracks*, Conference on Dimensioning and Strength Calculation, Budapeszt 1961.
11. J. SCHIJVE, *Fatigue crack propagation in light alloy sheet material and structures*, Advances in Aeronautical Sciences, Proc. of Second Int. Congress, Zürich 1960.
12. J. SCHIJVE, F. A. JACOBS, *Fatigue crack propagation in unnotched and notched aluminium alloy specimens*, NLR, TRM, 2128, 1964.
13. D. BROEK, J. SCHIJVE, *The influence of the mean stress on the propagation of fatigue cracks in aluminium alloy sheet*, NLR, TRM, 2111, 1963.

14. D. BROEK, J. SCHIJVE, *The effect of sheet thickness on the fatigue crack propagation in 2024-T3 alclad sheet material*, NLR, TRM, 2129, 1963.
15. J. SCHIJVE, D. BROEK, *Crack Propagation*, Aircraft Engineering, 1962, November.
16. S. H. SMITH, *Fatigue crack growth under axial narrow and broad random loading*, Acoustical Fatigue in Aerospace Structures, Proc. of the Second Int. Conference, Dayton 1964.
17. MINER, *Cumulative damage in fatigue*, Journal of Applied Mech., 1945, September.
18. H. F. HARDRATH i in., *Fatigue crack propagation in aluminium — alloy box beams*, NACA, TN-3856e.
19. N. F. HARPUR, *Fail safe structural design*, JRAS, 1958, May.
20. G. FORREST, *Internal or residual stresses in wrought aluminium alloys and their structural significance*, JRAS, April, 1954.
21. Data Sheets, Fatigue, RAS, 1958.

Резюме

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УМЕНЬШЕНИЯ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В ДУРАЛЮМИНИЕВЫХ ЛИСТАХ ПРИ ПОМОЩИ НАКЛЕПА

Целью излагаемых исследований было опытное определение возможностей уменьшения скорости распространения трещин в конструкции самолета с определенным усталостным ресурсом, при наличии в этой конструкции трещин уловимой длины.

Испытания проводились на образцах из плакированного листового дуралюминия PA6-T толщиной 2 мм, путем приложения растягивающих напряжений. Длина трещины измерялась с обеих сторон образца, причем мерное поле образца фотографировалось при определенном числе циклов нагрузки. Наклеп материала образцов производился путем вдавливания штампов различной формы с обеих сторон центрального выреза образца. Опыты выполнены для 13 различных типов наклепа, при одинаковых средних нагрузках и одинаковом уровне амплитуды нагрузок. Для выбранного на основе этих опытов типа наклепа производились исследования распространения трещины при различных уровнях амплитуд нагрузки (с постоянными средними нагрузками). С целью сравнения процесса распространения трещин в образцах с наклепом с их распространением в материале без наклепа изучался процесс развития трещин в образцах без наклепа.

Результаты испытаний указывают на возможности значительного увеличения при помощи наклепа долговечности конструкций с наличием трещин. Можно задержать распространение трещин уловимой величины, появляющихся в конструкциях самолетов, или уменьшить скорость их распространения до весьма малого постоянного значения в широком диапазоне длин трещин

Summary

INVESTIGATIONS ON THE POSSIBILITY OF DECREASING THE FATIGUE CRACK GROWTH RATE IN ALUMINIUM ALLOY THIN SHEET MATERIAL BY USING LOCAL PLASTIC DEFORMATION

The experimental studies of the possibility of the decreasing of crack growth rate at the detectable crack length in aircraft structure which was designed with the use of «fail safe» concept were the aim of the investigations described in this paper. The material of specimens used for the investigations was aluminium alloy PA6-T, alclad. The thickness of each specimen was 2 mm. Tests were carried out under tension stresses. Crack length was measured on both sides of the specimen from photograph of cracked area exposed at the determined number of loading cycles. Plastic deformations were effected in the material of the specimen from both sides of the central notch with the help of the punches with different shapes. Tests were made for specimens with 13 different kinds of plastic deformations under constant mean load and

one level of alternating load. Specimens with one kind of plastic deformation selected from previous tests resulting were tested under different alternating load (under constant mean load). For comparison of crack propagation in the specimens with plastic deformation with propagation without plastic deformation, tests were made for specimens without plastic deformation.

Test results indicate the possibility of considerable increase in the fatigue life of cracked structures by the use of plastic deformations. It is possible to stop crack propagation at the crack length of detectable value in aircraft structures, or to decrease the rate of growth at the large extent of crack length to a very small constant value.

KATEDRA BUDOWY SAMOLOTÓW
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

Praca została złożona w Redakcji dnia 5 stycznia 1968 r.