

WPLYW PRZECIĄŻEŃ NA WZROST SZCZELIN ZMĘCZENIOWYCH\*)

RALPH I. STEPHENS (IOWA CITY)

Spis oznaczeń

- $a$  długość szczeliny — [mm],  
 $a_i$  początkowa długość szczeliny w momencie pierwszego przeciążenia — [mm],  
 $a^*$  zakres występowania opóźniania się szczeliny — [mm],  
 $A$  współczynnik prędkości wzrostu szczeliny — [mm/cykl],  
 $B$  grubość próbki — [mm],  
 $CT$  zwarta próbka rozciągana (*compact tension*),  
 $da/dN$  prędkość wzrostu szczeliny — [mm/cykl],  
 $H$  połowa wysokości próbki — [mm],  
 $K$  współczynnik intensywności naprężeń — [MPa  $\sqrt{m}$ ],  
 $K_c$  odporność na pękanie — [MPa  $\sqrt{m}$ ],  
 $K_{max}$  maksymalny współczynnik intensywności naprężeń dla obciążenia o stałej amplitudzie — [MPa  $\sqrt{m}$ ],  
 $K_{max1}$  początkowy maksymalny współczynnik intensywności naprężeń dla pierwszego cyklu obciążenia, o stałej amplitudzie, występującego po przeciążeniu — [MPa  $\sqrt{m}$ ],  
 $K_{min}$  minimalny współczynnik intensywności naprężeń dla obciążenia o stałej amplitudzie — [MPa  $\sqrt{m}$ ],  
 $+\Delta K$  dodatni zakres współczynnika intensywności naprężeń dla obciążenia o stałej amplitudzie — [MPa  $\sqrt{m}$ ],  
 $K_0$  współczynnik intensywności naprężeń odpowiadający przeciążeniu — [MPa  $\sqrt{m}$ ],  
 $K_{op}$  współczynnik intensywności naprężeń odpowiadający otwarciu szczeliny — [MPa  $\sqrt{m}$ ],  
 $K_{eff}$  efektywny zakres współczynnika intensywności naprężeń =  $(K_{max} - K_{op})$  — [MPa  $\sqrt{m}$ ],  
 $n$  współczynnik prędkości wzrostu szczeliny zmęczeniowej (wykładnik eksponencjalnego wzoru na wzrost pęknięć zmęczeniowych),  
 $N$  liczba cykli obciążenia,  
 $N_f$  liczba cykli do zniszczenia,  
 $N^*$  liczba cykli opóźnienia wzrostu szczeliny zmęczeniowej,  
 $\Delta N$  odległość pomiędzy przeciążeniami w cyklach,  
 $\Delta N_0$  liczba przeciążeń w bloku,  
 $OLR$  współczynnik przeciążenia =  $P_0/P_{max} = K_0/K_{max}$ ,  
 $P_{max}$  maksymalna siła dla obciążenia o stałej amplitudzie — kN,  
 $P_0$  siła odpowiadająca przeciążeniu — [kN],  
 $R$  współczynnik asymetrii cyklu obciążenia =  $P_{min}/P_{max}$ ,  
 $2r_y$  promień (wymiar) strefy uplastycznionej — [mm],  
 $r^*$  promień (wymiar) cyklicznej strefy uplastycznionej — [mm],  
 $RF$  współczynnik opóźnienia lub trwałość unormowana przy przeciążeniu = trwałość przy przeciążeniu/trwałość porównawcza,  
 $SEN$  próbka z pojedynczym karbem krawędziowym,  
 $S_y$  umowna granica plastyczności  $R_{0.2}$  — [MPa],  
 $S_u$  granica wytrzymałości na rozciąganie — [MPa],  
 $W$  szerokość próbki — [mm].

Uwaga: 1 MPa (megapaskal) równa się 1 MN/m<sup>2</sup> (meganiuton na metr kw.). Jednostką współczynnika intensywności naprężeń (MPa  $\sqrt{m}$ ) może być również MNm<sup>-3/2</sup>.

\*) Tłumaczył dr inż. Grzegorz Glinka, Politechnika Warszawska

## 1. Wstęp

W 1960 roku SCHIFFE [1] wykazał, że pojedyncze rozciągające przeciążenia cienkich blach aluminiowych ze szczelinami mogą powodować znaczne zmniejszenie i opóźnienie dalszego zmęczeniowego wzrostu tych szczelin. W 1961 roku HUDSON i HARDRATH [2] przeprowadzili bardziej obszerne badania, które także wykazały, że w przypadku cienkich blach aluminiowych wysokie przeciążenia rozciągające wyraźnie opóźniają wzrost szczelin zmęczeniowych. Jednak w ciągu następných lat stosunkowo niewiele prac poświęcono temu zjawisku. Nic było ono dostatecznie dokładnie badane ani też opisywane aż do roku 1970.

W 1975 roku odbyło się w Montrealu, w Kanadzie, sympozjum na temat: «Wzrost szczelin zmęczeniowych pod widmem obciążeń» [3], które było finansowane przez Komitety E-9 i E-24 American Society for Testing and Materials, zajmujące się problematyką zmęczenia i badań na pęknięcie. Sympozjum to jest przykładem największego skoncentrowanego wysiłku poświęconego oddziaływaniu prostych i złożonych widm obciążeń o zmiennych amplitudach na wzrost szczelin zmęczeniowych. Sympozjum wykazało także złożoność zagadnienia, jakim jest przewidywanie trwałości na etapie wzrostu szczelin zmęczeniowych, zarówno przy prostych, jak i złożonych widmach obciążeń o zmiennych amplitudach.

W roku 1971 w University of Iowa rozpoczęto badania dotyczące zarówno strony poznawczej, jak i przewidywania charakteru wzrostu szczelin zmęczeniowych w metalach przy różnych prostych widmach obciążeń. Niniejszy artykuł stanowi przegląd sześciolletnich badań wykonanych na tym uniwersytecie pod kierownictwem autora. Całość składa się z trzynastu różnych prac badawczych, których wyniki opublikowano w jedenastu artykułach, podanych chronologicznie w literaturze [4÷14]. Badania dotyczą dziewięciu różnych materiałów, wśród których znajdowały się stopy aluminium, stali i żeliwo sferoidalne. Własności mechaniczne oraz składy chemiczne tych materiałów podano w tabl. 1 i 2. Były to materiały w stanie surowym, walcowane na zimno, walcowane na gorąco oraz w stanie łąnym. Granice plastyczności tych materiałów zawarte były w granicach 358÷1412 MPa i znajdowały się wśród nich zarówno materiały cyklicznie umacniające się, jak i osłabiające. Stosowano głównie próbki rozciągane zwarte (*CT*), rys. 1a, lecz dla zweryfikowania wyników otrzymanych z próbek *CT* i pomiaru obciążeń, przy których następowało zamykanie się szczeliny, wykorzystywano także próbki z pojedynczym karbem krawędziowym (*SEN*), rys. 1b. Na końcach próbek wywiercono po trzy otwory w celu zamocowania kulkowych uchwytów umożliwiających zarówno ściskanie, jak i rozciąganie bez wprowadzenia dodatkowych momentów zginających. Szerokość próbek rozciąganych zwartych zmieniano w granicach  $W = 80 \div 90$  mm przy stosunku wymiarów  $H/W = 0,48 \div 0,60$ . Natomiast szerokość wszystkich próbek z pojedynczym karbem krawędziowym była jednakowa i wynosiła  $W = 25,4$  mm. Grubości próbek rozciąganych zwartych zmieniały się w zakresie  $B = 5,7 \div 10,1$  mm natomiast próbek z pojedynczym karbem krawędziowym w przedziale  $B = 3,2 \div 6,3$  mm.

Przebiegi obciążeń realizowane w czasie prób przedstawiono na rys. 1c÷1j. Wyniki prób pod obciążeniami o zmiennych amplitudach porównywano z tzw. wynikami porównawczymi, otrzymanymi z próby z obciążeniem o stałej amplitudzie, pokazanym na rys. 1c.

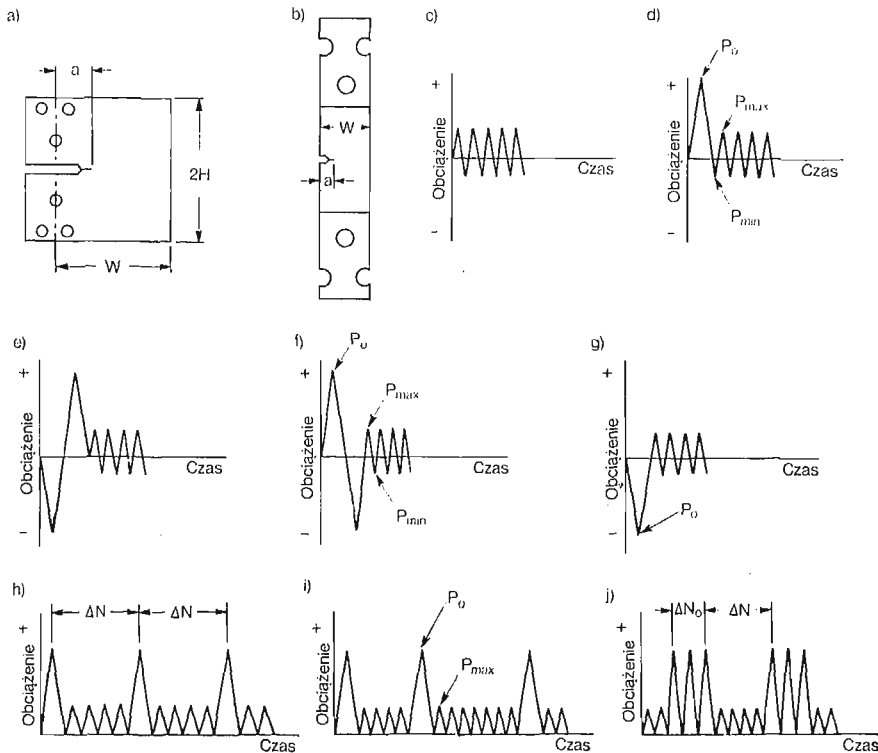
Tablica 1. Monotoniczne własności mechaniczne materiałów oraz kształt próbek zmęczeniowych

Material	Granica plastyczności [MPa]	Granica wytrzymałości na rozciąganie [MPa]	Kształt próbki	Grubość [mm]	Stan materiału
Stop aluminium 2024-T3	358	475	CT, SEN	3,2—9,1	w stanie surowym
Stop aluminium 7075-T6	503	572	CT, SEN	3,2—9,1	w stanie surowym
Stal ASTM A440	372	524	CT	5,7	walcowana na gorąco
Stal AISI walcowana na zimno	636	681	CT	6,3	walcowana na zimno
Stal Hadfielda	426	1062	CT	6,3	walcowana na gorąco
Stal AISI 4140	757	799	CT	8,3	ulepszana cieplnie
	1136	1184	CT	8,3	
	1412	1502	CT	8,3	
Żeliwo sferoidalne	410	677	CT	10,1	w stanie lanym

Tablica 2. Wagowy skład chemiczny materiałów [%]

Material	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Cu	Mg	Zn
Stop aluminium 2024-T3		0,6			0,5	0,1		4,3	1,5	0,25
Stop aluminium 7075-T6		0,3			0,5	0,3		1,6	2,5	5,6
Stal ASTM A440	0,16	0,96			0,07	0,08	0,05			
Stal AISI 1020 walcowana na zimno	0,20	0,45	0,04	0,05						
Stal Hadfielda	1,1	12,5	0,028	0,0009	0,24					
Stal AISI 4140	0,39	0,76	0,002	0,015	0,082	0,86	0,14	0,12		
Żeliwo sferoidalne	3,7	0,48	0,02	0,01	2,6	0,06	0,001	0,07		

Na rys. 1d ÷ 1g pokazano przebiegi obciążeń (widma) z przeciążeniami pojedynczymi. Wartość przeciążenia oznaczono symbolem  $P_0$ , natomiast maksymalną i minimalną wartość realizowanego po nim obciążenia o stałej amplitudzie oznaczono odpowiednio przez  $P_{max}$  i  $P_{min}$ . Próby prowadzono przy stałych współczynnikach asymetrii cyklu  $R = P_{min}/P_{max}$  o wartościach z przedziału  $+0,5 \div -2$ . Cykle przeciążeniowe, jak i następujące po nich cykle obciążenia o stałej amplitudzie mogły więc zawierać zarówno obciążenia ściskające, jak i rozciągające. Współczynnik przeciążenia ( $OLR$ ) zdefiniowano jako stosunek  $P_0/P_{max}$ , którego wartość zmieniano w granicach  $1,25 \div 3,0$ . Obciążenie z pojedynczymi periodycznymi przeciążeniami rozciągającymi pokazano na rys. 1h, na-



Rys. 1. Próbki zmęczeniowe i widma obciążeń

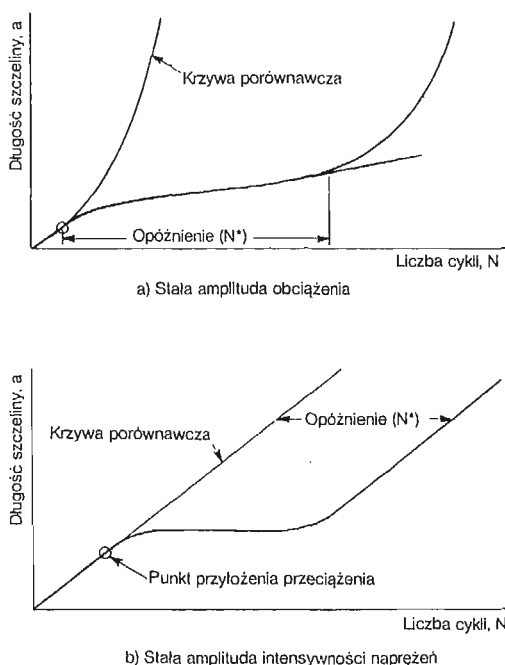
tomiast obciążenie z pojedynczymi przeciążeniami rozciągającymi występującymi nieregularnie widoczne jest na rys. 1i. Liczbę cykli obciążeń realizowaną pomiędzy kolejnymi przeciążeniami, zwaną dalej odstępem, oznaczono symbolem  $\Delta N$ . Zmieniała się ona w przedziale  $10^3 \div 4 \cdot 10^3$  cykli. Obciążenie z periodycznymi przeciążeniami wielokrotnymi przedstawia rys. 1j, gdzie  $\Delta N_0$  oznacza liczbę przeciążeń przyłożoną jednorazowo, zmieniającą się w zakresie  $1 \div 200$  cykli. Wszystkie przeciążenia przedstawione na rys. 1h ÷ 1j miały współczynnik asymetrii cyklu  $R = 0$ .

Wszystkie badania wykonano na elektrohydraulicznej maszynie zmęczeniowej z automatycznym układem sterującym. Przeciążenia realizowano z częstotliwością  $0,01 \div 0,5$  Hz, natomiast obciążenie o stałej amplitudzie — z częstotliwością  $5 \div 25$  Hz, zależnie od współ-

czynnika asymetrii cyklu  $R$ . Przed przyłożeniem przeciążenia we wszystkich próbkach inicjowano najpierw szczelinę zmęczeniową. Obciążenie, przy którym inicjowano wstępną szczelinę zmęczeniową charakteryzowało się współczynnikiem asymetrii cyklu  $R = 0$ , a jego wartość maksymalna  $P_{max}$  była zawsze równa wartości maksymalnej obciążenia o stałej amplitudzie realizowanego po przyłożeniu przeciążenia. Długość szczeliny mierzono za pomocą stroboskopu i podziałki o dokładności 0,25 mm.

## 2. Pojedyncze przeciążenia rozciągające i ściskające, $R = 0$

Typowy przykład wzrostu szczeliny zmęczeniowej po przyłożeniu pojedynczego przeciążenia rozciągającego przedstawiono na rys. 2. Dla porównania pokazano także wzrost szczeliny zmęczeniowej pod obciążeniem o stałej amplitudzie. Nie zaczernione kółka oznaczają punkt przyłożenia przeciążenia. Rys. 2a przedstawia typowy przykład wzrostu



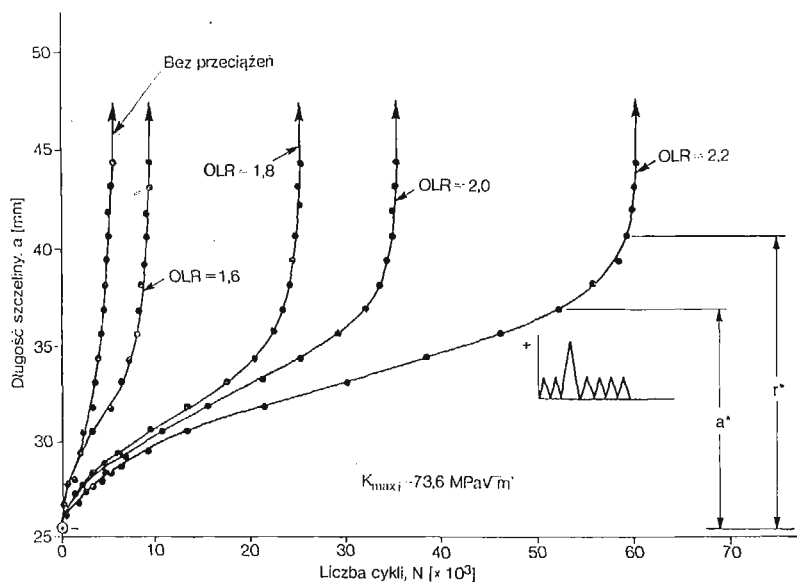
Rys. 2. Schematyczny obraz opóźnienia wzrostu szczeliny zmęczeniowej

szczeliny zmęczeniowej przy stałej amplitudzie obciążenia, natomiast rys. 2b wzrost szczeliny zmęczeniowej przy stałej amplitudzie współczynnika intensywności naprężeń. Jedyną różnicą w obydwóch przykładach jest stała prędkość wzrostu szczeliny rosnącej przy stałej amplitudzie intensywności naprężeń. W obydwóch przypadkach zdefiniowano także to, co się rozumie przez termin — opóźnienie wzrostu szczeliny zmęczeniowej  $N^*$ . Zgodnie z rys. 2a przyjęto także, że opóźnienie wzrostu szczeliny zmęczeniowej po przyłożeniu przeciążenia jest zakończone, gdy zależność  $a-N$  przestaje być prostoliniowa.

Innym wskaźnikiem opóźnienia jest także stosunek trwałości do zniszczenia, mierzonej od momentu przyłożenia przeciążenia do trwałości porównawczej uzyskanej przy stałej amplitudzie obciążenia. Stosunek ten nazywany jest trwałością unormowaną lub współczynnikiem opóźnienia  $R.F.$  Autor stosował obydwie definicje.

Pęknięcia zmęczeniowe zaraz po przyłożeniu przeciążenia rozciągającego często charakteryzują się stosunkowo wysoką prędkością przejściową — rys. 2a i 2b. Ten przejściowy okres wzrostu nazywany jest często «spóźnionym występowaniem opóźnionego wzrostu szczeliny zmęczeniowej» (*delayed retardation of fatigue crack growth*) i zależy od rodzaju materiału, współczynnika przeciążenia, wielkości strefy uplastycznionej przed wierzchołkiem szczeliny spowodowanej przeciążeniem oraz grubości materiału. ELBER tłumaczy to zjawisko w oparciu o tzw. model zamykania się szczeliny. Przyrost długości szczeliny odpowiadający wspomnianemu okresowi, obserwowany w dziewięciu różnych materiałach, wahał się w granicach  $0 \div 5$  mm.

**2.1. Przeciążenia rozciągające,  $R = 0$ .** Typowe krzywe wzrostu szczeliny zmęczeniowej po przyłożeniu pojedynczego przeciążenia rozciągającego otrzymane przy  $R = 0$ , z badania stali A440 [9] przedstawiono na rys. 3. Każda krzywa reprezentuje inną próbkę badaną przy innym współczynniku przeciążenia ( $OLR$ ), który zmieniano w granicach  $1,6 \div 2,2$ .



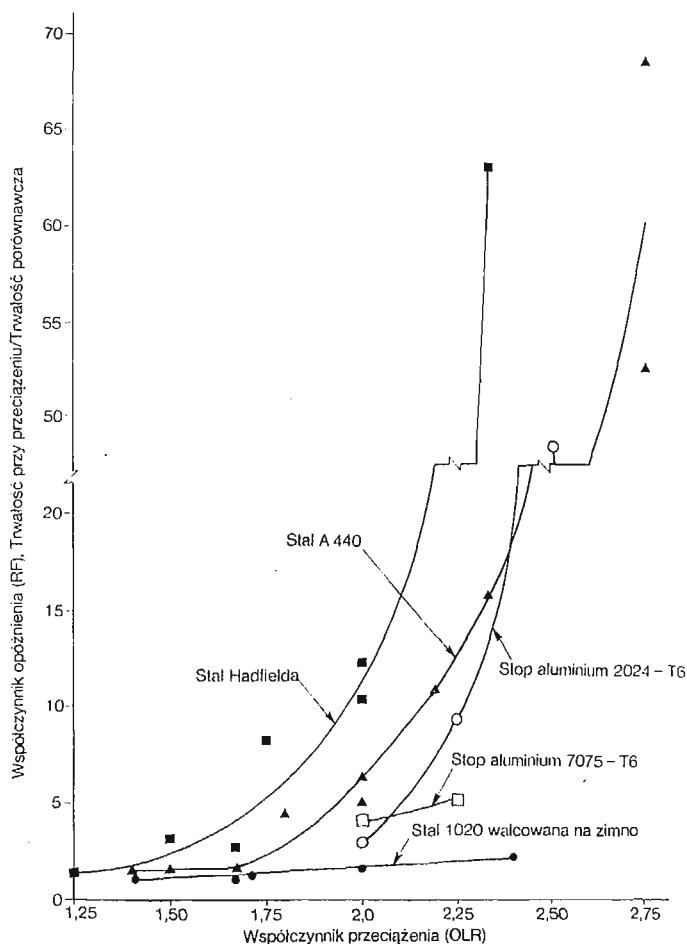
Rys. 3. Wzrost szczeliny zmęczeniowej po przyłożeniu pojedynczego przeciążenia rozciągającego, stal A440,  $R = 0$  [9]

Przeciążenia przykładano dopiero wtedy, gdy szczelina osiągnęła długość początkową równą 25,4 mm. Widać wyraźnie, że przy określonej wartości maksymalnej  $P_{max}$  obciążenia o stałej amplitudzie, najdłuższa trwałość i największe opóźnienia występowały przy największych przeciążeniach. Symbol  $K_{max}$  oznacza wartość współczynnika intensywności naprężeń zaraz po przyłożeniu przeciążenia przyjmując, że nie nastąpił w tym czasie przyrost długości szczeliny. Natomiast symbole  $a^*$  i  $r^*$  zaznaczone na krzywej otrzymanej

przy  $OLR = 2,2$  oznaczają odpowiednio przyrost długości w okresie opóźnionego wzrostu szczeliny i wymiar cyklicznej strefy uplastycznionej w płaskim stanie naprężenia, obliczany według RICE'A [16]

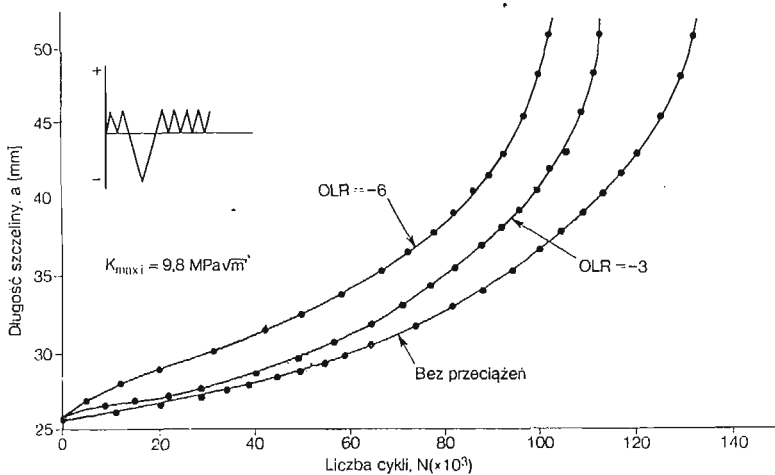
$$(1) \quad r^* = \frac{1}{4}(2r_y) = \frac{1}{4} \left[ \frac{2}{2\pi} \left( \frac{K_0}{S_y} \right)^2 \right] = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{K_0}{S_y} \right)^2.$$

W przypadku stopów aluminium i stali wartość  $a^*$  zmieniała się znacząco w przedziale  $0 \div 11$  mm, a wartość  $r^*$  — w granicach  $1 \div 15$  mm, natomiast wartości stosunku  $a^*/r^*$  leżały w przedziale  $0 \div 1$ . We wszystkich przypadkach opóźnienie wzrostu szczelin zmęczeniowych miało miejsce na odcinku odpowiadającym wymiarowi cyklicznej strefy uplastycznionej w płaskim stanie naprężenia, wywołanej przeciążeniem. Długość okresu wzrostu szczeliny zmęczeniowej na odcinku od  $a^*$  do  $r^*$  jest stosunkowo mała i dlatego przy opracowywaniu modeli dla określenia trwałości na etapie wzrostu szczelin zmęczeniowych założenie, że  $a^* \approx r^*$  jest uzasadnionym przybliżeniem inżynierskim.



Rys. 4. Wpływ współczynnika przeciążenia ( $OLR$ ) na opóźnienie wzrostu szczeliny zmęczeniowej [4, 5, 7, 9, 10]

Na rys. 4 przedstawiono ostateczne wyniki dotyczące trwałości przy opóźnionym wzroście szczelin zmęczeniowych w funkcji współczynnika przeciążenia [4, 5, 7, 9, 10], uzyskane z badań pięciu różnych materiałów. Widoczne jest, że trwałość nie ulega istotnemu wydłużeniu wskutek przyłożenia przeciążenia, jeśli  $OLR \leq 1,4$ . Przy większych przeciążeniach uzyskano natomiast nawet 68-krotne wydłużenie trwałości. W stopach aluminium przy  $OLR \geq 2,5$  i  $R = 0$  występowało nawet całkowite zatrzymanie szczelin zmęczeniowych. Zgodnie z wynikami przedstawionymi na rys. 4 oczywiste jest także, że opóźnienie przy określonym współczynniku przeciążenia silnie zależy od rodzaju materiału. W przypadku stali 1020 walcowanej na zimno przyrost trwałości przy współczynniku przeciążenia  $OLR = 2,0$  był na przykład 1,5-krotny, natomiast dla stali Hadfielda około 11-krotny. Wymiar cyklicznej strefy uplastycznionej  $r^*$  był przy tym w przypadku stali 1020 bardzo mały, natomiast duży dla stali A440 i stali Hadfielda. Większym opóźnieniem przy  $R \geq 0$  charakteryzowały się materiały o niższej granicy plastyczności i wysokiej odporności na pękanie. Podobną tendencję wykazywały także, posiadające różne granice plastyczności, trzy odmiany stali 4140 [13], podczas gdy opóźnienie w żeliwie sferoidalnym było podobne jak w stali walcowanej na zimno.



Rys. 5. Wzrost szczeliny zmęczeniowej po przyłożeniu pojedynczego przeciążenia ściskającego, stop aluminium 2024-T3,  $R = 0$  [11]

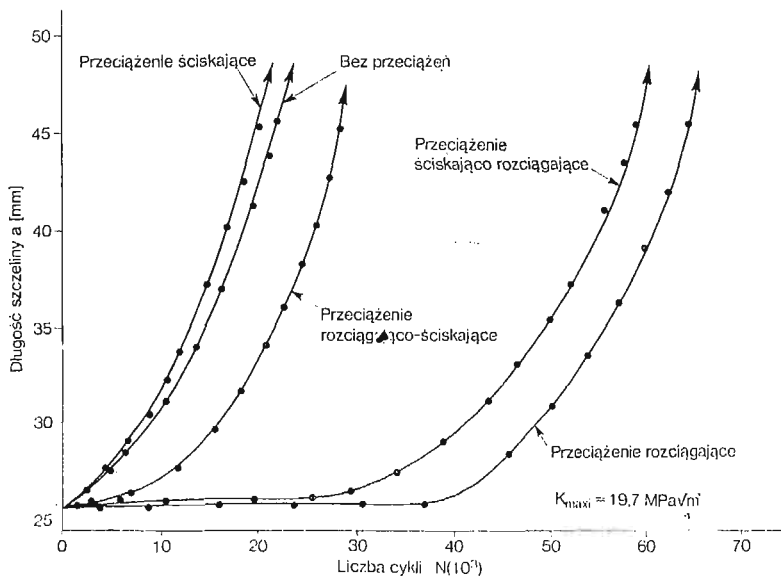
Stwierdzono, że opóźnienie przy danym obciążeniu i materiale zależy od jego grubości  $B$  [12]. Zwiększenie grubości próbek ze stopu aluminium 7075-T6 z 3,2 mm do 6,3 mm spowodowało na przykład około 2,5-krotne zmniejszenie opóźnienia, natomiast w przypadku stopu aluminium 2024-T3 taka sama zmiana grubości spowodowała większe aniżeli 3-krotne zmniejszenie opóźnienia. W obydwóch przytoczonych przykładach badania prowadzono na próbkach z pojedynczym karbem krawędziowym przy współczynniku przeciążenia  $OLR = 2,25$ .

**2.2. Przeciążenia ściskające,  $R = 0$ .** Typowe krzywe wzrostu szczeliny zmęczeniowej w funkcji liczby cykli obciążenia po przyłożeniu pojedynczego przeciążenia ściskającego [11] przedstawiono na rys. 5. Każda krzywa reprezentuje jedną próbkę, przy czym pokazano



także krzywą porównawczą otrzymaną z próby bez przeciążeń. Uogólniając można stwierdzić, że przeciążenia ściskające zmniejszają lub nie wpływają na trwałość na etapie wzrostu szczelin zmęczeniowych. Większy wpływ, jak pokazano na rys. 5, mają wyższe przeciążenia ściskające. Oddziaływanie takich przeciążeń na prędkość wzrostu szczelin zmęczeniowych badano na stopach aluminium [8, 11], stali Hadfielda [4] i walcowanej na zimno stali 1020 [5]. Współczynnik przeciążenia zmieniano w granicach  $OLR = -1 \div -6$ , otrzymując skrócenie trwałości od  $0 \div 45\%$ . W przypadku walcowanej na zimno stali 1020, badanej przy współczynnikach  $OLR \leq -5$ , w większości prób ubytek trwałości nie przekraczał  $15\%$ . Największe skrócenie trwałości na etapie wzrostu szczelin zmęczeniowych otrzymano w stopach aluminium. Stwierdzono jednak, że pojedyncze przeciążenia ściskające mają na ogół mniejszy wpływ na wzrost szczelin zmęczeniowych, aniżeli analogiczne przeciążenia rozciągające.

**2.3. Kombinowane przeciążenia rozciągająco-ściskające,  $R = 0$ .** Rys. 6 przedstawia całokształt badań i wyników dotyczących wpływu pojedynczych przeciążeń, pokazanych na rys. 1d ÷ 1g, na wzrost szczelin zmęczeniowych. Jak widać istnieje zasadnicza różnica w efektach, zależnie od tego, czy przeciążenie ściskające występuje przed czy po przeciążeniu

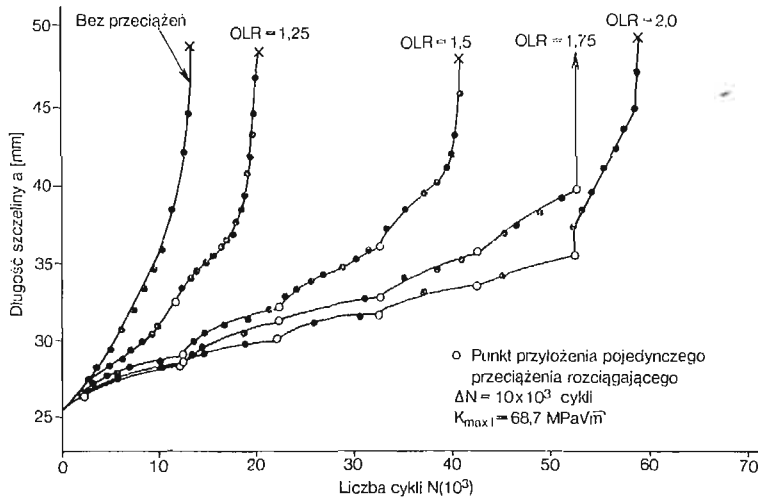


Rys. 6. Wzrost pęknięć zmęczeniowych dla obciążeń z różnymi przeciążeniami pojedynczymi, stop aluminium 7075-T6 [8]

rozciągającym. Przyłożenie przeciążenia ściskającego zaraz po przeciążeniu rozciągającym powoduje całkowite lub częściowe wyeliminowanie wpływów przeciążenia rozciągającego. Natomiast przyłożenie przeciążenia ściskającego przed przeciążeniem rozciągającym ma niewielki wpływ na trwałość na etapie wzrostu szczelin zmęczeniowych. Z tych powodów przy przewidywaniu trwałości zmęczeniowej należy dokładnie uwzględnić kolejność występowania wysokich obciążeń.

### 3. Periodyczne i nieregularne pojedyncze przeciążenia rozciągające, $R = 0$

Do badania wpływu periodycznych i nieregularnych pojedynczych przeciążeń rozciągających, pokazanych na rys. 1h ÷ 1i, użyto stali Hadfielda [4], stali 1020 walcowanej na zimno [5] oraz stali A440 [9]. Wpływ współczynnika przeciążenia na wzrost szczelin zmęczeniowych w stali Hadfielda w przypadku pojedynczych przeciążeń periodycznych, przykładowych w odstępach  $\Delta N = 10 \cdot 10^3$  cykli, przedstawiono na rys. 7. Współczynnik przeciążenia zmieniano w granicach  $1,25 \div 2,0$ . Podobnie jak w poprzednich próbach,

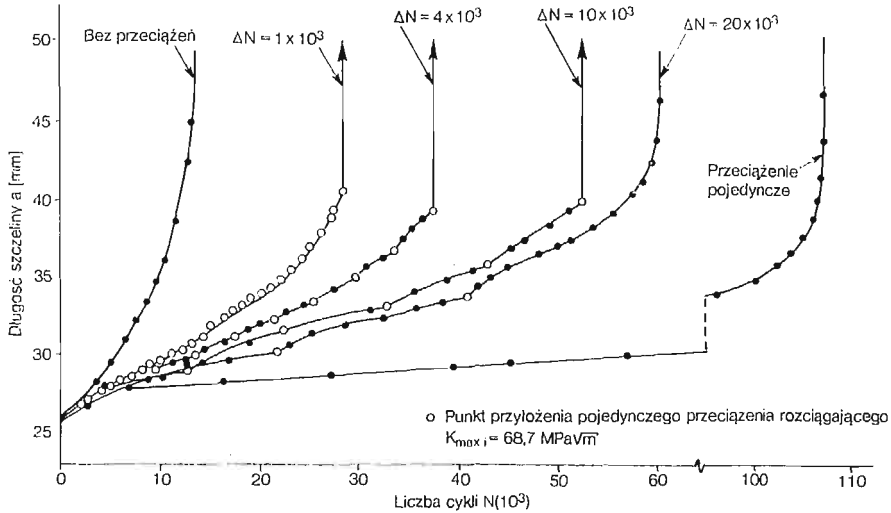


Rys. 7. Wpływ współczynnika przeciążenia ( $OLR$ ) w przypadku periodycznych pojedynczych przeciążeń rozciągających, stal Hadfielda [4]

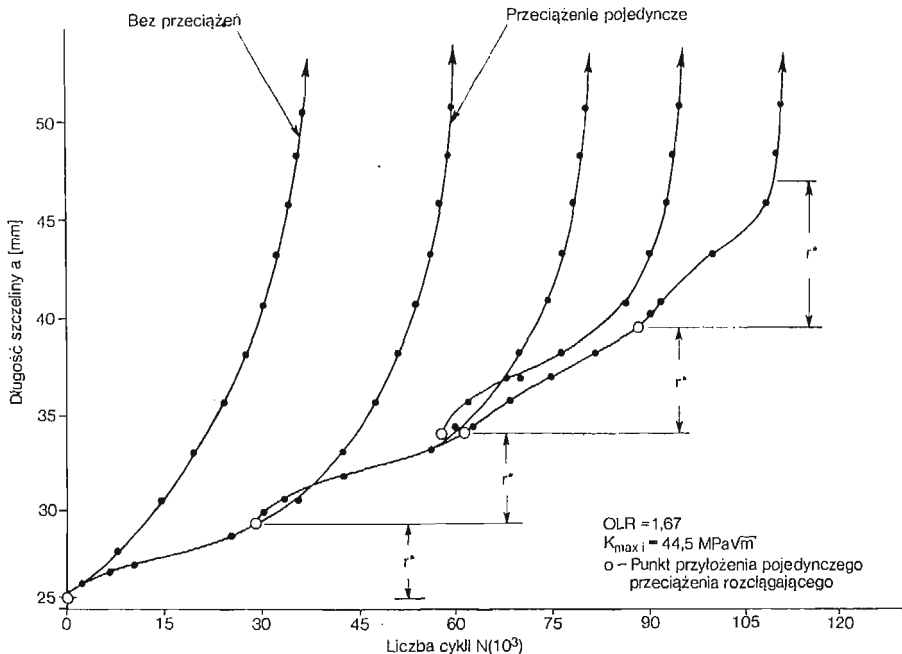
również i w tym przypadku, im wyższe było przeciążenie, tym dłuższa była trwałość na etapie wzrostu szczelin zmęczeniowych. Podobne rezultaty dla stali Hadfielda otrzymano również w przypadku pojedynczych przeciążeń periodycznych przykładowych w odstępach  $\Delta N = 2 \cdot 10^3$ ,  $4 \cdot 10^3$  i  $20 \cdot 10^3$  cykli. Takie same rezultaty otrzymano także w przypadku stali 1020 walcowanej na zimno przy przeciążeniach przykładowych w odstępach  $\Delta N = 2 \cdot 10^3$ ,  $5 \cdot 10^3$ ,  $10 \cdot 10^3$  i  $20 \cdot 10^3$  oraz współczynnika przeciążenia zmienianym w przedziale  $1,43 \div 2,40$  [5].

Wpływ liczby cykli  $\Delta N$  pomiędzy kolejnymi przeciążeniami periodycznymi przy stałym współczynniku przeciążenia  $P_0/P_{max}$  przedstawiono na przykładzie stali Hadfielda na rys. 8 [4]. Wszystkie krzywe otrzymano przy tym samym współczynniku przeciążenia  $OLR = 1,75$ , podczas gdy  $\Delta N$  zmieniano w granicach  $1 \cdot 10^3 \div 20 \cdot 10^3$  cykli. Najdłuższe trwałości na etapie wzrostu szczelin zmęczeniowych we wszystkich przypadkach otrzymano dla obciążeń z pojedynczymi przeciążeniami rozciągającymi. Z powyższego wynika więc, że wszystkie dalsze przeciążenia występujące po pierwszym przeciążeniu miały w tym przypadku niekorzystny wpływ na trwałość. Wyjaśnieniem tego zjawiska może być fakt, że następne przeciążenia przykładowo zanim szczelina wyszła poza strefę  $a^*$  lub  $r^*$  utworzoną przez pierwsze przeciążenie rozciągające, i że opóźniony wzrost szczeliny, odpowiadający każdemu przeciążeniu, pojawiał się ze znacznym spóźnieniem w stosunku do

momentu przyłożenia tego przeciążenia. Jednak wyniki wszystkich prób z przeciążeniami periodycznymi, pokazane na rys. 8 wykazują dłuższą trwałość na etapie wzrostu szczelin zmęczeniowych aniżeli trwałość uzyskana w próbie bez przeciążeń. Natomiast w przypadku



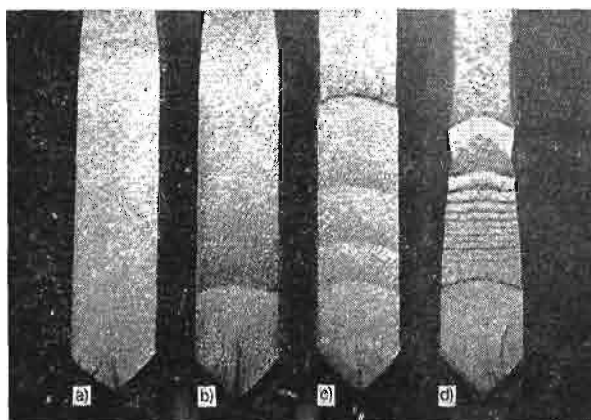
Rys. 8. Wpływ odległości pomiędzy periodycznymi pojedynczymi przeciążeniami rozciągającymi  $\Delta N$ , stal Hadfielda [4]



Rys. 9. Wzrost szczeliny zmęczeniowej przy nieregularnych pojedynczych przeciążeniach rozciągających, przykładanych w odstępach równych cyklicznym strefom uplastycznionym  $r^*$ , stal A440 [9]

stali 1020 walcowanej na zimno przeciążenia periodyczne przykładane w odstępach  $\Delta N = 2 \cdot 10^3 \div 20 \cdot 10^3$  dawały dłuższe trwałości na etapie wzrostu szczelin zmęczeniowych aniżeli trwałości uzyskane w próbach z pojedynczymi przeciążeniami rozciągającymi [5]. Jest to wynikiem mniejszych stref  $a^*$  i  $r^*$  wywołanych przeciążeniami oraz małym spóźnieniem z jakim pojawiał się w tej stali, w stosunku do przyłożonego przeciążenia, opóźniony wzrost szczelin zmęczeniowych.

W celu oszacowania optymalnych z punktu widzenia trwałości odstępów pomiędzy przeciążeniami rozciągającymi, wykonano badania na stali A440 z obciążeniami o różnie rozmieszczonych rozciągających przeciążeniach nieregularnych [9]. Wyniki przedstawione na rys. 9 wykazały, że najdłuższą trwałość na etapie wzrostu szczelin zmęczeniowych otrzymuje się dla określonego współczynnika przeciążenia wtedy, gdy pojedyncze przeciążenia rozciągające przykładane są po osiągnięciu przez szczelinę granicy cyklicznej strefy uplastycznionej w płaskim stanie naprężenia  $r^*$ , utworzonej przez przeciążenie poprzednie [9]. Każda krzywa widoczna na rys. 9 reprezentuje jedną próbkę. Ponieważ wraz z długością szczeliny rósł również współczynnik intensywności naprężeń  $K_0$ , odpowiadającej kolejnym przeciążeniom, zwiększał się także za każdym razem wymiar strefy  $r^*$ .

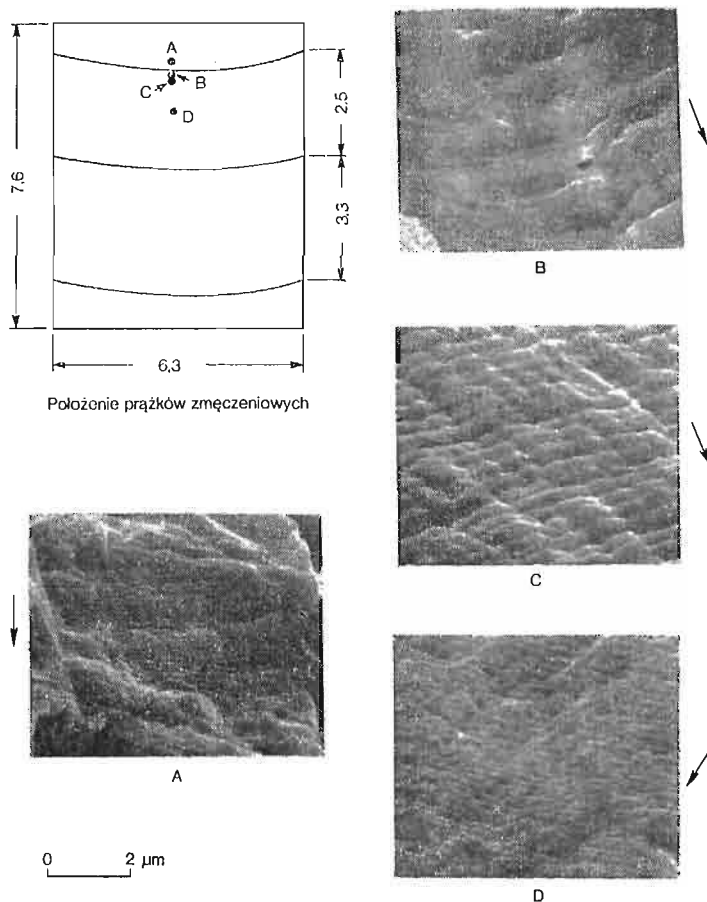


a)  $K_{\max i} = 68,7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ; Bez przeciążeń  
 b) OLR = 1,75; Przeciążenie pojedyncze  
 c) OLR = 1,67;  $\Delta N = 40 \times 10^3$  cykli  
 d) OLR = 2,0;  $\Delta N = 2 \times 10^3$  cykli

Rys. 10. Wpływ przeciążeń na makroskopowy obraz przełomów zmęczeniowych, stal Hadfielda [4]

Z przedstawionych na rys. 7 ÷ 8 rezultatów badań wynika, że przeciążenie rozciągające występujące w widmie obciążeń może mieć wpływ korzystny, niekorzystny lub nie oddziaływać przy danym widmie obciążeń na trwałość na etapie wzrostu szczelin zmęczeniowych. Przyrost długości szczeliny w okresie oddziaływania przeciążenia rozciągającego zależy od materiału i intensywności naprężeń odpowiadającej temu przeciążeniu. Na rys. 10 przedstawiono typowe makroskopowe obrazy urzeźbienia przełomów zmęczeniowych otrzymanych przy obciążeniach: a) bez przeciążeń, b) z przeciążeniem pojedynczym, c) z czterema przeciążeniami periodycznymi, d) z wieloma przeciążeniami periodycznymi, które spowodowały nawet widoczny przyrost długości szczeliny [4]. Należy także zauwa-

żyć, że przy dłuższych szczelinach występuje dostrzegalny tzw. tunelowy ich wzrost. We wszystkich przypadkach szczeliny propagowały się według tzw. modelu rozrywania, dając przełom o płaskiej powierzchni (*flat mode*) prostopadłej do powierzchni bocznych próbki z wyraźnie makroskopowo widocznymi miejscami przyłożenia przeciążeń. Tzw. powierzchnie ścięcia (*shear lips*) powstawały zwykle w obszarach końcowego, szybkiego

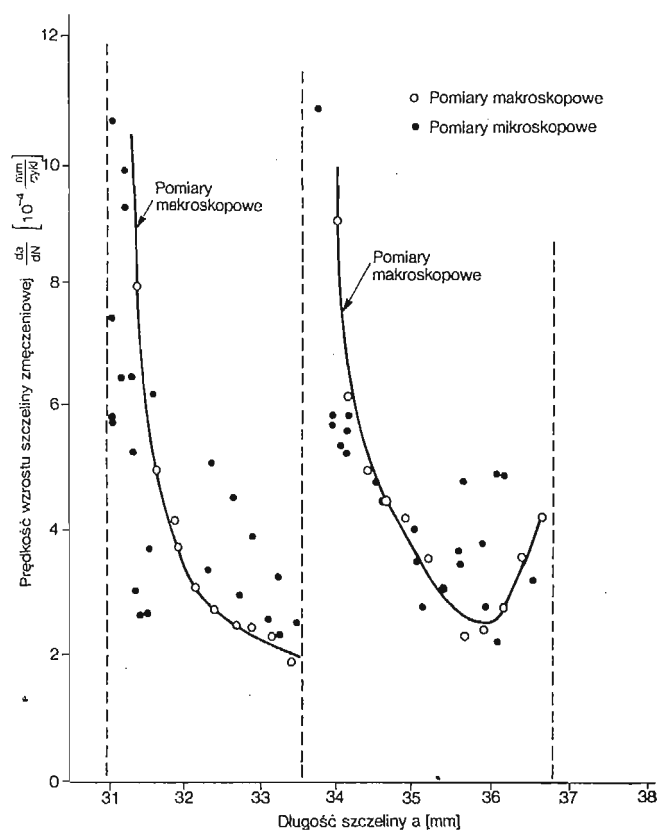


Rys. 11. Prążki zmęczeniowe przed i po przyłożeniu pojedynczego przeciążenia rozciągającego, stal Hadfielda [4]

wzrostu szczelin. W obszarach oddziaływania przeciążeń wykryto wyraźnie widoczne także na powierzchniach przełomów, produkty korozji ciernej w postaci tlenków żelaza lub tlenków aluminium. Wskazuje to, że istnieje tzw. zamykanie się szczelin w obszarze oddziaływania przeciążenia rozciągającego, którą to hipotezę postawił wcześniej ELBER [15].

Spóźnianie się, w stosunku do momentu przyłożenia przeciążenia rozciągającego, występowania opóźnionego wzrostu szczelin zmęczeniowych pokazano na rys. 3, 7, 8 i 9. Nie jest ono jednak widoczne na rys. 6, gdzie przedstawiono wyniki otrzymane z badania stopu aluminium 7076-T6. Spóźnienie to było największe w materiałach o niskich granicach plastyczności, charakteryzujących się dużymi strefami  $r^*$ . Ponieważ makroskopowe pomiary długości szczelin dokonywane były na powierzchniach próbek, powstaje pytanie,

czy spóźnienie z jakim występuje opóźniony wzrost szczelin zmęczeniowych nie jest tylko zjawiskiem powierzchniowym. W tym celu zbadano za pomocą mikroskopu skanninowego (powiększenie  $\times 15000$ ) szereg przełomów w środku grubości kilku materiałów. Tylko niewielki procent przełomów posiadał prążki zmęczeniowe. Jednak na zdjęciach mikrofraktograficznych A, B, C i D (rys. 11) widoczne są prążki zmęczeniowe zarówno przed, jak i po przyłożeniu przeciążenia. Położenie każdego zdjęcia na przełomie pokazano na schemacie, leżącym w lewym górnym rogu rys. 11. Strzałki wskazują kierunek wzrostu szczeliny zmęczeniowej. Zdjęcie A wykonano tuż przed przyłożeniem przeciążenia, natomiast zdjęcia B, C i D po przyłożeniu przeciążenia, w różnych rosnących w stosunku do punktu przyłożenia tego przeciążenia odległościach. Widoczne jest, że prążki zmęczeniowe w chwilę przed przyłożeniem przeciążenia leżą bardzo blisko siebie, co wskazuje na małą prędkość wzrostu szczeliny zmęczeniowej. Natomiast w chwilę po przyłożeniu przeciążenia odległości pomiędzy prążkami widocznymi na zdjęciu B są bardzo duże, świadcząc o dużej prędkości wzrostu szczeliny. W miarę jej wzrostu, czyli oddalania się od punktu przyłożenia przeciążenia, odległości między prążkami zmęczeniowymi zmniejszają się (patrz zdjęcie C i D).



Rys. 12. Porównanie prędkości wzrostu szczeliny zmęczeniowej określonych metodami mikro- i makroskopowymi przy obciążeniach z nieregularnymi pojedynczymi przeciążeniami rozciągającymi, stal Hadfielda [4]

Rys. 12 stanowi porównanie prędkości wzrostu szczeliny zmęczeniowej w stali Hadfielda zmierzonej metodą makroskopową podczas badań i prędkości określonej na podstawie średnich odległości pomiędzy prążkami zmęczeniowymi, zmierzonych w różnych punktach przełomu za pomocą mikroskopu skaningowego. Pionowe linie kreskowe widoczne na rys. 12 oznaczają punkt przyłożenia przeciążenia. Pomimo znacznego rozrzutu jakim charakteryzują się uzyskane rezultaty badań mikroskopowych, potwierdzają się jednak wnioski dotyczące spóźnienia z jakim pojawia się opóźniony wzrost szczelin zmęczeniowych, otrzymane z badań makroskopowych.

**3.1. Model matematyczny.** Przewidywanie wzrostu szczeliny zmęczeniowej pod widmem obciążeń wymaga uwzględnienia wszystkich zjawisk opisanych wyżej. Najwięcej modeli teoretycznych dotyczących tego zagadnienia zbudowano w oparciu o efekty oddziaływania stref uplastycznionych powstających przed wierzchołkiem szczeliny lub w oparciu o hipotezę o zamykaniu się szczeliny [17], wprowadzając do obliczeń nowy parametr tzw. efektywny współczynnik intensywności naprężeń [15, 18]. Jednak bez względu na stosowany model zawsze muszą być znane pewne wielkości dotyczące opóźnień, wzrostu szczelin przy stałej amplitudzie obciążenia oraz odporność na pękanie materiału. Wykorzystując dane dotyczące wzrostu szczelin zmęczeniowych przy obciążeniu o stałej amplitudzie bez przeciążeń i z pojedynczymi przeciążeniami rozciągającymi oraz dane dotyczące granicy plastyczności i odporności na pękanie, przeanalizowano, za pomocą uproszczonego modelu przedstawionego niżej, rezultaty 26 prób z obciążeniami o nieregularnych przeciążeniach rozciągających przeprowadzonych na stali A440 [9]. Różnice pomiędzy trwałościami rzeczywistymi i teoretycznymi, obliczonymi na podstawie tego modelu, wahały się w granicach  $57 \div 112\%$ . Średnia trwałość teoretyczna stanowiła około  $77\%$  trwałości rzeczywistej, przy czym większość wyników leżała po tzw. bezpiecznej stronie, tzn. trwałość teoretyczna była krótsza od rzeczywistej. Trwałości teoretyczne leżące po niebezpiecznej stronie nie wykraczały natomiast nawet poza pasmo rozrzutu uzyskane z prób powtarzanych (dublowanych).

U podstaw wspomnianego wyżej uproszczonego modelu leżą cztery założenia [9]:

1. Opóźnienie wzrostu szczeliny zmęczeniowej w okresie jej przechodzenia przez cykliczną strefę uplastycznioną  $r^*$ , utworzoną przez przeciążenie, zmienia się liniowo [por. (1)].

2. Opóźnienie w określonym środowisku jest funkcją współczynnika przeciążenia  $OLR$  i współczynnika asymetrii cyklu  $R$ .

3. Jeśli wierzchołek szczeliny znajduje się poza strefą  $r^*$ , utworzoną przez przeciążenie, jej wzrost dobrze opisuje wzór

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^n.$$

4. Współczynnik intensywności naprężeń odpowiadający każdemu przeciążeniu może być parametrem charakteryzującym warunki, lecz zależnym od wielkości strefy  $r^*$  powstałej przy tym współczynniku.

Jeśli wierzchołek szczeliny znajduje się poza strefą  $r^*$ , trwałość można obliczać poprzez całkowanie wzoru

$$(2) \quad \frac{da}{dN} = A(\Delta K)^n, \quad \text{gdzie} \quad \Delta K = \Delta \sigma f(a).$$

W wyniku tego całkowania otrzymuje się zależność

$$(3) \quad \Delta N_i = \frac{1}{A(\Delta\sigma)^n} \int_{a_i}^{a_{i+1}} \frac{da}{[f(a)]^n}.$$

Wyrażenie pod całką jest zwykle bardzo złożone i wymaga stosowania maszyn matematycznych. Natomiast jeśli wierzchołek szczeliny znajduje się wewnątrz strefy  $r^*$ , do obliczania trwałości w tym obszarze stosuje się wzór (3), którego lewa strona pomnożona jest przez współczynnik opóźnienia  $RF$  (patrz rys. 4), a górna granica całkowania  $a_{i+1}$  zastąpiona przez sumę  $a_i + r_i^*$ . A zatem

$$(4) \quad \Delta N_i = (RF) \frac{1}{A(\Delta\sigma)^n} \int_{a_i}^{a_i + r_i^*} \frac{da}{[f(a)]^n}.$$

Wyrażenie (4) dotyczy ilości cykli obciążenia, jaka potrzebna jest do wydłużenia szczeliny o odcinek równy  $r_i^*$ . Jeśli zmiana amplitudy obciążenia nastąpi przed wyjściem szczeliny ze strefy  $r_i^*$ , wtedy należy użyć przybliżonego wzoru, otrzymanego z pomnożenia wyrażenia (4) przez iloraz  $\Delta a_i / r_i^*$ , gdzie  $\Delta a_i$  jest przyrostem długości szczeliny, dla którego przeprowadza się obliczenia. Wówczas

$$(5) \quad \Delta N_i = \frac{\Delta a_i}{r_i^*} (RF) \frac{1}{A(\Delta\sigma)^n} \int_{a_i}^{a_i + r_i^*} \frac{da}{[f(a)]^n}.$$

Całkowite zniszczenie nastąpi wtedy, gdy  $K_{\max}$  lub  $K_0$  osiągnie wartość równą odporności na pękanie.

Zastosowanie przedstawionego modelu wymaga jednak dokładnego postępowania krok po kroku za zmianami, jakie od początku do końca zachodzą w widmie obciążeń. Może on być wykorzystywany zarówno do obliczania liczby cykli obciążenia dla danego przyrostu długości szczeliny jak i przyrostu przy danej liczbie cykli i historii obciążenia. Model ten najbardziej użyteczny jest wtedy, gdy skomplikowane widma obciążeń mogą być rozłożone na szereg prostszych bloków obciążeń z przeciążeniami nieregularnymi. Całkowita trwałość na etapie wzrostu szczeliny zmęczeniowej może więc być określona poprzez odpowiednie wykorzystanie wzorów (3), (4) i (5). Wyboru właściwego w danej chwili wzoru dokonuje się na podstawie porównania odpowiednich wartości  $r^*$ . Największa wartość  $r^*$  jest właśnie parametrem charakterystycznym.

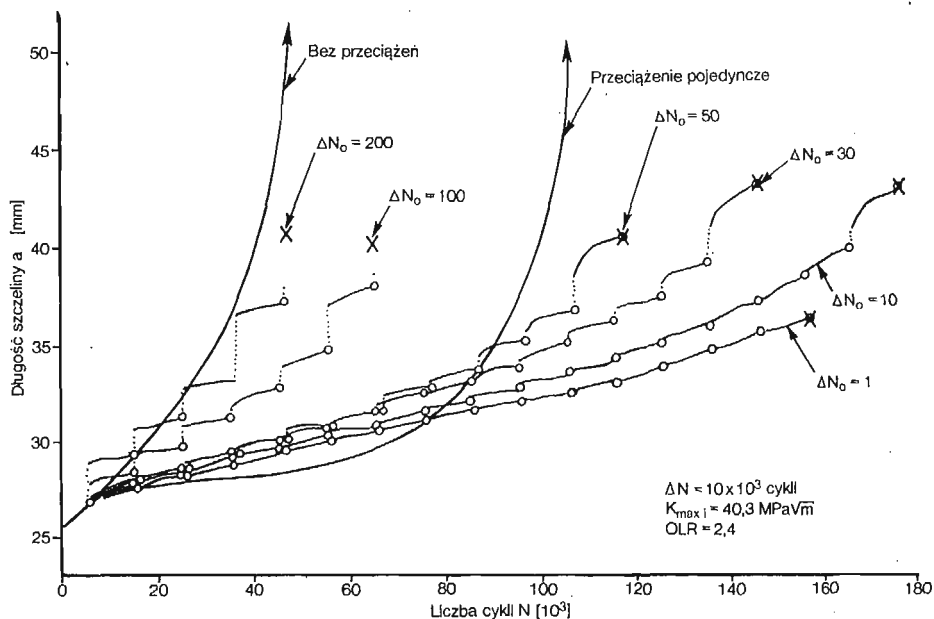
Największą prawdopodobnie wadą przedstawionego modelu uproszczonego jest pominięcie zjawiska spóźnienia z jakim występuje opóźnienie wzrostu szczeliny zmęczeniowej. Przyjęto bowiem, że prędkość wzrostu szczeliny wewnątrz strefy  $r^*$  zmienia się liniowo. Zbieżność wyników teoretycznych i eksperymentalnych jest jednak dość dobra. Wyjątek stanowi tylko stal A440, w której opóźniony wzrost szczelin zmęczeniowych pojawił się z dużym spóźnieniem.

#### 4. Periodyczne obciążenia wielokrotne, $R = 0$

Wpływ wielokrotnych periodycznych przeciążeń rozciągających na wzrost szczelin zmęczeniowych badano dla stali 1020 walcowanej na zimno [6]. Badania prowadzono pod obciążeniami przedstawionymi schematycznie na rys. 1j. Stosowano różne ilości przecią-



żeń wielokrotnych  $\Delta N_0 = 1, 20, 30, 50, 100$  i  $200$  cykli oraz różne odstępy pomiędzy tymi przeciążeniami  $\Delta N = 5000, 10\ 000$  i  $20\ 000$  cykli. Przykłady wzrostu szczelin zmęczeniowych pod takimi obciążeniami pokazano na rys. 13, gdzie każda krzywa reprezentuje jedną próbkę [13]. Pionowe linie punktowe odpowiadają wzrostowi szczeliny zmęczenio-



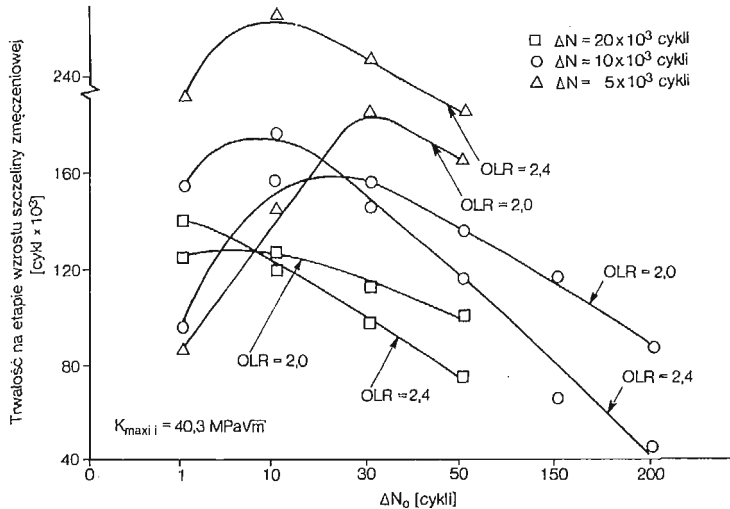
Rys. 13. Wzrost szczelin zmęczeniowych przy wielokrotnych periodycznych przeciążeniach rozciągających, stal 1020 walcowana na zimno [6]

wej spowodowanemu działaniem wielokrotnych przeciążeń rozciągających, natomiast linie ciągłe reprezentują wzrost szczeliny przy obciążeniach niższych. Nie zaznaczonymi kółkami zaznaczono punkty przyłożenia przeciążeń. Dla porównania narysowano także krzywą otrzymaną z próby bez przeciążeń i pojedynczym przeciążeniem rozciągającym. Wyniki badań widoczne na rys. 13 otrzymano przy współczynniku przeciążenia  $OLR = P_0/P_{max} = 2,4$  i odstępem  $\Delta N = 10\ 000$  cykli.

Widoczne jest, że najdłuższą trwałość otrzymano w niniejszym przypadku dla  $\Delta N_0 = 10$  cykli. Trwałość natomiast malała wraz ze wzrostem liczby przeciążeń  $\Delta N_0$ . Spowodowane to było zwiększającym się przyrostem szczeliny na skutek przeciążeń. Pojedyncze przeciążenie rozciągające było mniej korzystne od przeciążeń wielokrotnych przykładowych w liczbie  $\Delta N_0 = 1 \div 50$  cykli, natomiast bardziej korzystne w stosunku do przeciążeń wielokrotnych przykładowych w liczbach  $\Delta N_0 = 100 \div 200$  cykli.

W celu określenia optymalnej liczby przeciążeń [6] wielokrotnych, wyniki badań przedstawiono w postaci wykresu «trwałość — liczba przeciążeń  $\Delta N_0$ » (patrz rys. 14). Każda krzywa dotyczy innego współczynnika przeciążenia i innego odstępu pomiędzy tymi przeciążeniami. W większości przypadków najdłuższą trwałość przy współczynnikach przeciążenia większych od 1,7 otrzymano dla  $\Delta N_0 = 10$  cykli. Z powyższego wynika,

że kilka wielokrotnych przeciążeń nieregularnych może wydłużyć trwałość bardziej aniżeli pojedyncze przeciążenia nieregularne. Dzieje się to skutkiem większej intensywności ściskających naprężeń pozostających w otoczeniu wierzchołka szczeliny i większym jej zamknięciem. Zmiany liczby przeciążeń  $\Delta N_0$  nie miały natomiast większego wpływu na trwałość przy współczynnikach przeciążenia mniejszych od 1,7.



Rys. 14. Wpływ odległości ( $\Delta N$ ) pomiędzy wielokrotnymi periodycznymi przeciążeniami rozciągającymi na trwałość na etapie wzrostu szczeliny zmęczeniowych, stal I020 walcowana na zimno [6]

## 5. Wpływ małych przeciążeń ściskających, $R < 0$

**5.1. Obciążenie o stałej amplitudzie.** Większość danych na temat wzrostu szczelin zmęczeniowych przy stałej amplitudzie obciążenia dotyczy zwykle obciążeń rozciągających tzn.  $R \geq 0$ . Istnieją cztery główne przyczyny, dla których w badaniach wzrostu szczelin zmęczeniowych przy stałej amplitudzie obciążenia pomija się naprężenia ściskające:

1. Nieliczne dotychczasowe badania wykazały, że naprężenia ściskające mają tylko niewielki wpływ na prędkość wzrostu szczelin zmęczeniowych. Wniosek ten wypływa z faktu, że w czasie realizacji części dla cyklu obciążeń ściskających następuje zanikający przyrost długości szczeliny, gdyż w tym okresie jest ona wtedy zamknięta.

2. Hipoteza o zamykaniu się szczeliny wydaje się potwierdzać wniosek o nieszkodliwości naprężeń ściskających.

3. Niejasna jest definicja zakresu współczynnika intensywności naprężeń  $\Delta K$  i minimalnego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{min}$ , w części cyklu obciążenia ściskającego.

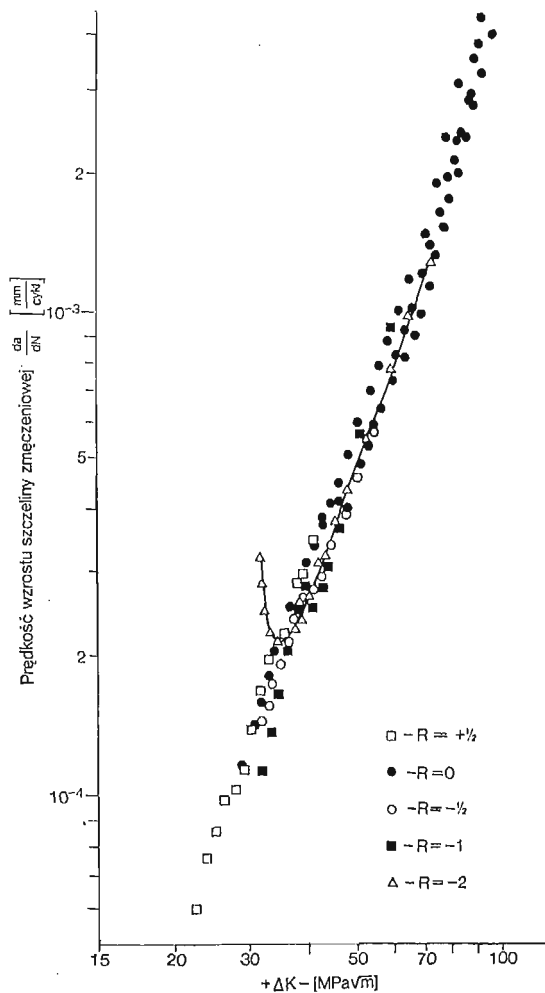
4. W badaniach z obciążeniami ściskającymi wymagane jest bardziej skomplikowane stanowisko do zamocowywania próbek.

W celu głębszego zrozumienia wpływu naprężeń ściskających na wzrost szczelin zmęczeniowych przy stałej amplitudzie obciążenia przeprowadzono badania siedmiu spośród dziewięciu materiałów opisanych w tabl. 1. Badania wykonywano na próbkach rozcią-

ganych zwartych, przy współczynnikach asymetrii cyklu  $R = +0,5 \div -3$ . Typowy przykład wyników otrzymanych z badań stali A440 [9] przedstawia rys. 15. Rezultaty badań pokazano w postaci wykresów przedstawiających prędkość wzrostu szczelin zmęczeniowych  $da/dN$  w funkcji dodatniej (rozciągającej) części zakresu współczynnika intensywności naprężeń  $+\Delta K$ . Dodatnią część zakresu współczynnika intensywności naprężeń  $\Delta K$  zdefiniowano jako

$$+\Delta K = K_{\max} - K_{\min}, \quad \text{gdzie} \quad K_{\min} = \begin{cases} 0 & \text{dla } R \leq 0, \\ K_{\min} & \text{dla } R > 0. \end{cases}$$

Unika się w ten sposób niepoprawnej interpretacji ujemnej intensywności naprężeń. Prędkości wzrostu szczelin zmęczeniowych wyznaczono za pomocą maszyny matematycznej, aproksymując zależność pomiędzy długością szczeliny i liczbą cykli obciążenia za pomocą wielomianu, wyznaczanego metodą najmniejszych kwadratów drugiego rzędu, zalecaną przez ASTM Committee E-24 [19].

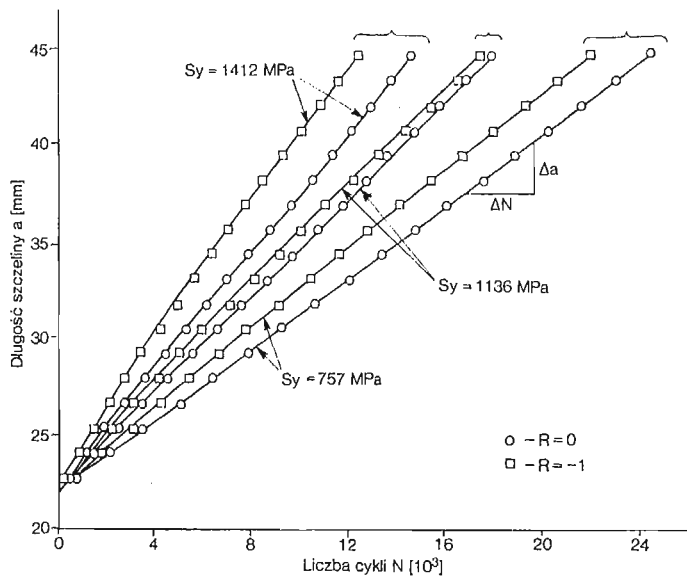


Rys. 15. Wzrost szczelin zmęczeniowych pod obciążeniami o stałych amplitudach z ujemnymi i dodatnimi wartościami współczynnika asymetrii cyklu  $R$ , stal A440 [9]

Pomimo różnych współczynników asymetrii cyklu  $R = +1/2, 0, -1/2, -1$  wyniki badań charakteryzują się małym rozrzutem. Jest to zgodne z poprzednimi sugestiami o nieszkodliwości naprężeń ściskających. Należy jednak zaznaczyć, że w niniejszych badaniach zauważono około 25% skrócenie trwałości przy zmianie współczynnika asymetrii cyklu od 0 do  $-1$ . Natomiast zupełnie inny był charakter wzrostu szczeliny zmęczeniowej przy współczynniku  $R = -2$ , jako że początkowo prędkość  $da/dN$  malała, a potem rosła.

Ten początkowy stosunkowo szybki wzrost szczeliny był prawdopodobnie przyczyną znacznego skrócenia trwałości dając w efekcie 40÷80% trwałości uzyskanej przy  $R = 0$ . Mógł on być także wynikiem wcześniejszego inicjowania szczeliny przy  $R = 0$ , które spowodowało większe jej zaostrenie i powstanie niskich naprężeń pozostających w otoczeniu wierzchołka.

Wąskie pasmo rozrzutu dla podobnie przedstawionych wyników  $da/dN = f(+\Delta K)$  otrzymano także w przypadku obydwóch stopów aluminium. Zmniejszenie trwałości o około 10÷30% otrzymano tylko przy  $R = -2$ ÷ $-3$ . Natomiast w przypadku żeliwa sferoidalnego różnice pomiędzy wytopami były większe od różnic wynikających ze zmiany współczynnika asymetrii cyklu od  $R = 0$  do  $R = -1$ .



Rys. 16. Wzrost szczelin zmęczeniowych pod obciążeniami o stałych amplitudach z zerowymi lub ujemnymi współczynnikami asymetrii cyklu,  $K_{\max} = 33 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ , Stal AISI 4140 [13]

W przypadku trzech odmian ulepszonej cieplnie stali 4140 o granicach plastyczności 757 MPa, 1136 MPa i 1412 MPa prędkość wzrostu pęknięć zmęczeniowych badano przy stałym zakresie intensywności naprężeń, stosując tzw. technikę stopniowego zmniejszania obciążenia [13]. Badania wykonano na próbkach rozciąganych zwartych (CT) przy współczynnikach  $R = 0, -1/2, -1$  i  $K_{\max} = 33 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ . Krzywe wzrostu szczeliny zmęczeniowej w funkcji liczby cykli obciążenia przedstawiono na rys. 16. W celu większej przej-

rzystości pokazano tylko jedną piątą wyników. Przy określonym współczynniku asymetrii cyklu  $R$  i materiale prędkość wzrostu szczeliny zmęczeniowej była stała na całej jej długości. Dla ułatwienia analizy porównawczej wyeliminowano z rysunku także krzywe uzyskane dla  $R = -1/2$ , ponieważ we wszystkich próbach leżały pomiędzy krzywymi otrzymanymi dla  $R = 0$  i  $R = -1$ .

Wartości prędkości wzrostu szczelin zmęczeniowych podano w tabl. 3. Widoczne jest, że prędkość wzrostu szczelin  $da/dN$  w określonym materiale rośnie, jeśli współczynnik  $R$  maleje od 0 do  $-1$ . Największa różnica w prędkościach spowodowana zmianą  $R$ , jaką zanotowano we wspomnianych trzech odmianach stali 4140, wynosiła 18%, a najmniejsza 2%. Największa różnica była jednakże mniejsza, aniżeli różnice jakie otrzymano przy sta-

Tablica 3. Prędkości wzrostu szczelin zmęczeniowych w stali 4140 przy stałej amplitudzie współczynnika intensywności naprężeń  $\Delta a/\Delta N$  [ $\mu\text{mm}/\text{cykl}$ ]  $K_{\text{max}} = 33 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$

Sy [MPa]	$R = 0$	$R = -1/2$	$R = -1$
1412	153	161	181
1136	122	126	125
757	91	98	101

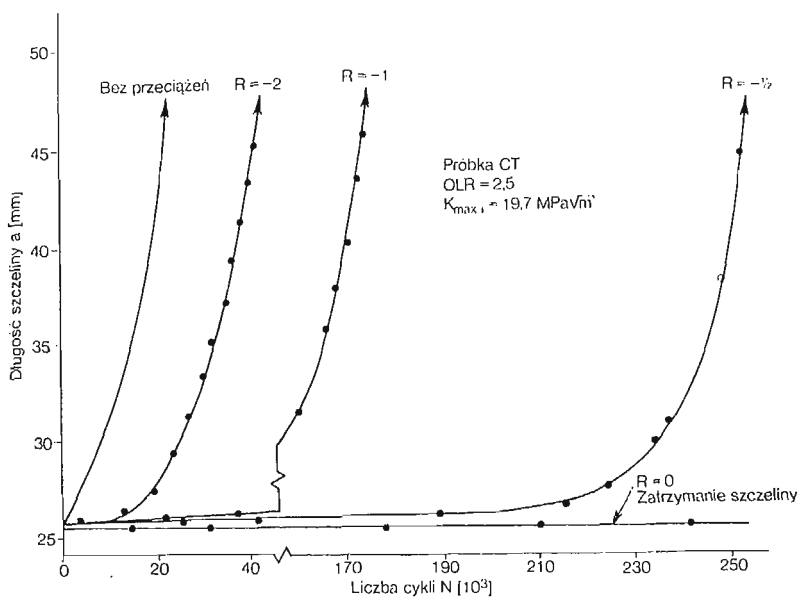
łym współczynniku  $R$  pomiędzy tymi odmianami. Różnice pomiędzy rezultatami otrzymanymi dla stali o najwyższej i najniższej granicy plastyczności wahały się bowiem w granicach  $68 \div 80\%$ . Naprężenia ściskające powodują więc podwyższenie prędkości wzrostu szczelin zmęczeniowych w stali 4140, lecz zmiany te są mniejsze od zmian spowodowanych np. prawie dwukrotnym podwyższeniem granicy plastyczności.

Można więc stwierdzić, że w przypadku siedmiu badanych materiałów naprężenia ściskające powodują przy stałej amplitudzie obciążenia podwyższenie prędkości wzrostu szczelin zmęczeniowych. Jest ono jednak stosunkowo małe i w żadnej z przeprowadzonych prób różnice spowodowane naprężeniami ściskającymi nie były nawet 2-krotne. W przypadku siedmiu badanych materiałów uzasadnione wydaje się więc pomijanie naprężeń ściskających przy określaniu trwałości na etapie wzrostu szczelin zmęczeniowych dla obciążeń o stałych amplitudach. Tego stwierdzenia nie można jednak rozszerzyć, co zostanie wyjaśnione niżej, na wzrost szczelin zmęczeniowych przy obciążeniach o zmiennych amplitudach.

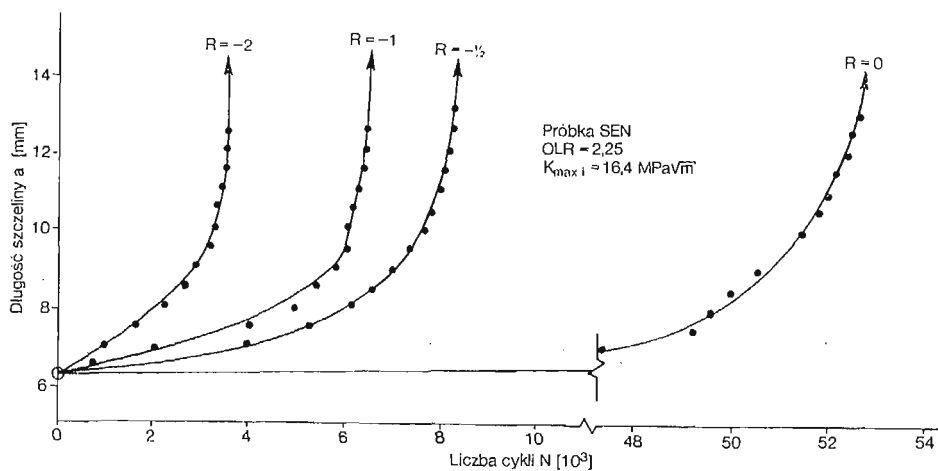
**5.2. Pojedyncze przeciążenia rozciągające.** Wpływ pojedynczych przeciążeń rozciągających na wzrost szczelin zmęczeniowych badano na próbkach rozciąganych zwartych, wykonanych z tych samych siedmiu materiałów opisanych wyżej. W przypadku stopów aluminium 2024-T3 i 7075-T6 dla celów porównawczych oraz pomiaru współczynnika intensywności naprężeń przy otwieraniu i zamykaniu się szczeliny [12] użyto także próbek z pojedynczym karbem krawędziowym [10]. Wartości współczynników asymetrii cyklu obciążenia realizowanego po przyłożeniu przeciążenia były  $R = 0$ ,  $-1/2$ ,  $-1$  i  $-2$ . Wartości współczynnika przeciążenia zmieniano w granicach  $1,67 \div 3,0$ . Ażeby w próbach zachowane były

jednakowe warunki w otoczeniu wierzchołka szczeliny, wszystkie szczeliny zmęczeniowe przed przyłożeniem przeciążenia inicjowane były pod obciążeniem o współczynniku  $R = 0$ .

Na rys. 17 pokazano krzywe wzrostu szczelin zmęczeniowych w funkcji liczby cykli po przyłożeniu pojedynczego przeciążenia rozciągającego w stopie aluminium 7075-T6. Badania prowadzono na próbkach rozciąganych zwartych. Widoczne jest, że przy współczynniku  $R = 0$  nastąpiło całkowite zatrzymanie szczeliny, natomiast dalsze zmniejszanie współczynnika asymetrii cyklu od  $R = -1/2$  do  $R = -2$  powodowało ciągle

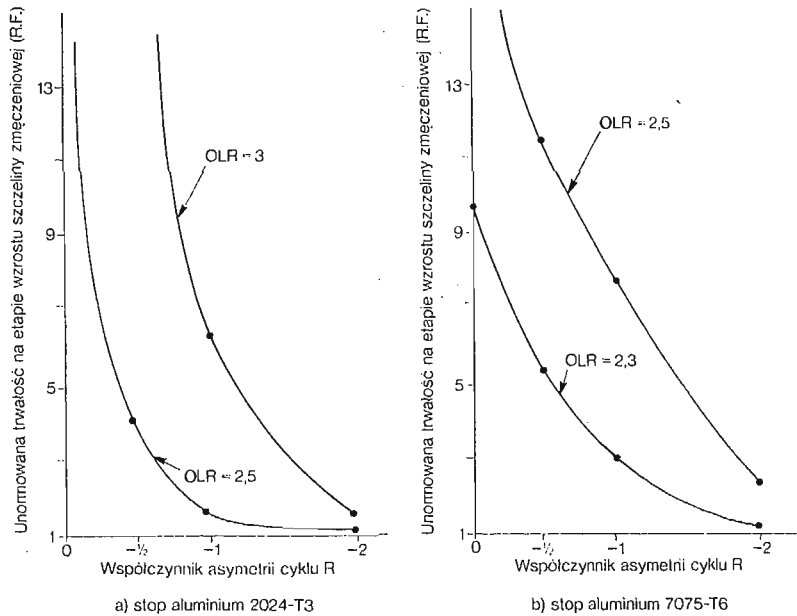


Rys. 17. Wzrost szczelin zmęczeniowych po przyłożeniu pojedynczego przeciążenia rozciągającego, stop aluminium 7075-T6 [8]



Rys. 18. Wzrost szczelin zmęczeniowych po przyłożeniu pojedynczego przeciążenia rozciągającego, stop aluminium 2024-T3 [10]

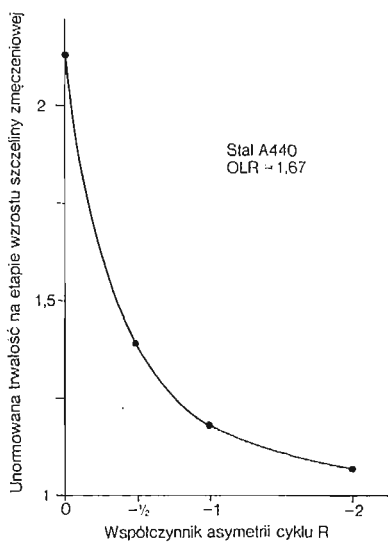
zmniejszanie opóźnienia wzrostu szczelin zmęczeniowych. Podsumowanie wyników badań stopów aluminium 2024–T3 i 7075-T6 przedstawione w postaci wykresów unormowanej trwałości przy przeciążeniach w zależności od współczynnika asymetrii cyklu  $R$  [8] widoczne jest na rys. 19. Z przytoczonych rys. 17, 18 i 19 jasno wynika, że niskie naprężenia ściskające występujące po pojedynczym przeciążeniu rozciągającym znacznie zmniejszają opóźnienie wzrostu szczelin zmęczeniowych, jakie w badanych stopach wywołuje tylko przeciążenie rozciągające.



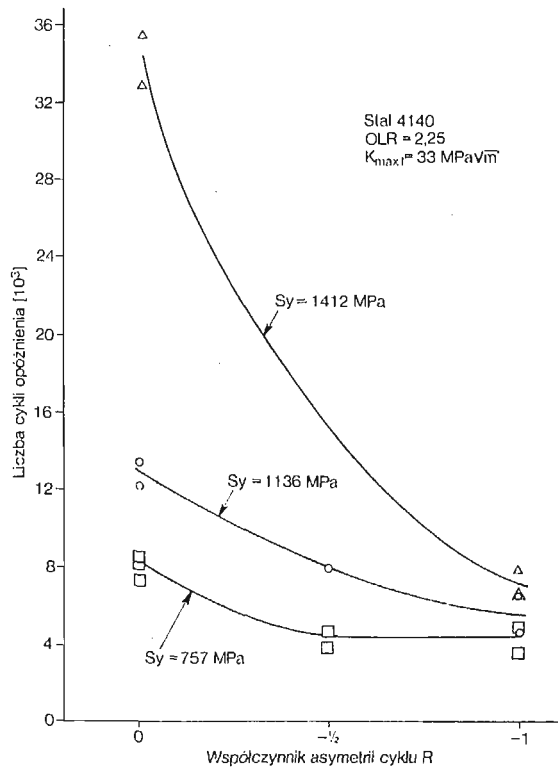
Rys. 19. Wpływ ujemnych współczynników asymetrii cyklu ( $R$ ) na trwałość na etapie wzrostu szczelin zmęczeniowych po przyłożeniu pojedynczego przeciążenia rozciągającego [8]

Podobne skrócenie unormowanej trwałości przy przeciążeniach i zmniejszanie opóźnienia wskutek zmniejszania współczynnika asymetrii cyklu w przedziale  $R = 0 \div -2$  występowało również w stali A440 [9] (patrz rys. 20.) Badania prowadzono na próbkach rozciąganych zwartych przy współczynniku przeciążenia  $OLR = 1,67$ . Także w przypadku żeliwa sferoidalnego dla  $R = -2$  trwałość w obecności przeciążeń była znacznie krótsza aniżeli dla  $R = 0$ . Na rys. 21 przedstawiono natomiast wpływ współczynnika asymetrii cyklu  $R$  na opóźnienie wzrostu szczelin zmęczeniowych, spowodowane pojedynczym przeciążeniem rozciągającym o współczynniku przeciążenia  $OLR = 2,25$ . Badania prowadzono przy stałym współczynniku intensywności naprężeń  $\Delta K$  dla wszystkich trzech odmian stali 4140. W tym przypadku również można zauważyć wyraźne zmniejszenie opóźnienia, od pojedynczego przeciążenia rozciągającego przez naprężenia ściskające.

Wyniki badań przedstawione na rys. 17÷21 wskazują, że nawet w zupełnie różnych materiałach, małe naprężenia ściskające, występujące po przeciążeniu rozciągającym powodują znaczne zmniejszenie opóźnienia wzrostu szczeliny zmęczeniowej, wywołanego tym przeciążeniem. Zmniejszenie opóźnienia jest tym większe im większe są naprężenia



Rys. 20. Wpływ ujemnych współczynników asymetrii cyklu ( $R$ ) na trwałość na etapie wzrostu szczelin zmęczeniowych po przyłożeniu pojedynczego przeciążenia rozciągającego [9, 14]



Rys. 21. Wpływ ujemnych współczynników asymetrii cyklu ( $R$ ) na opóźnienie wzrostu szczelin zmęczeniowych po przyłożeniu pojedynczego przeciążenia rozciągającego [13]



ściskające. Z powyższego wynika więc, że w przypadku widm obciążeń o zmiennych amplitudach, przy których należy spodziewać się opóźnień, wniosek o nieszkodliwości małych naprężeń ściskających jest błędny.

Rezultaty badań przedstawione na rys. 21 dostarczają także ważnych informacji z innego punktu widzenia, a mianowicie danych dla porównywania materiałów pod względem maksymalnej trwałości przy danym widmie obciążeń. PETRAK [20] oraz GALLAGHER i HUGHES [21] wykazali, że największe opóźnienia przy  $R \geq 0$ , spowodowane pojedynczymi przeciążeniami rozciągającymi, występują w stalach o niższych granicach plastyczności np: stali HP-9Ni-4Co-30C lub stali 4340. Sugerowałyoby to, że w przypadku obciążeń o zmiennych amplitudach lepsze są stale o niższych granicach plastyczności. Autorzy przytoczonych wyżej prac wskazują jeszcze na fakt, że otrzymane przez nich wyniki zgodne są z hipotezami o zamykaniu się szczeliny zmęczeniowej. Natomiast rezultaty dla  $R = 0$  przedstawione na rys. 21 są całkowicie niezgodne z powyższymi wywodami, chociaż należy zaznaczyć, że różnice te są znacznie mniejsze w przypadku  $R = -1/2$  lub  $R = -1$ . Bardzo małe różnice w opóźnieniach zanotowano przy  $R = -1$  także w przypadku wspomnianych trzech odmian stali 4140. Z powyższego wynika, że małe naprężenia ściskające powodują większe zmniejszenie opóźnień w stalach o niższych granicach plastyczności. Może to być spowodowane zarówno cykliczną relaksacją ściskających naprężeń pozostających w otoczeniu wierzchołka szczeliny, jak i cyklicznym zmniejszaniem się zamknięcia szczeliny. Wy tłumaczenie tego jest podobne, jak przy śrutowaniu, które ma niewielki wpływ na trwałość w przypadku stali o niskich granicach plastyczności i duży w przypadku stali o średnich i wysokich granicach plastyczności. Porównywanie opóźnień przy  $R \geq 0$  może więc prowadzić do zupełnie błędnych wniosków.

## 6. Zakończenie

Najważniejsze wnioski wypływające z przedstawionych wyżej sześcioletnich badań nad wzrostem szczelin zmęczeniowych w dziewięciu różnych materiałach podano niżej. Wiele z nich może mieć charakter wniosków ogólnych, jednak czytelnik musi pamiętać, że dotyczą tylko warunków w jakich prowadzono badania i nie można ich rozszerzać np. na środowiska korozyjne, czy też warunki, w których panuje inna temperatura.

1. Pojedyncze przeciążenia rozciągające mogą powodować znaczne opóźnienie wzrostu szczelin zmęczeniowych lub nawet całkowite ich zatrzymanie. Opóźnienie jest tym większe, im wyższe jest przeciążenie rozciągające. Stwierdzenie to jest prawdziwe dla przeciążeń o współczynniku intensywności naprężeń  $K_0$  nie przekraczającym 98% odporności na pękanie materiału. Przeciążenia o współczynnikach  $OLR \leq 1,4$  powodowały bardzo małe opóźnienia we wszystkich badanych materiałach. Wspomniane opóźnienia przypisuje się powstawaniu ściskających naprężeń pozostających w otoczeniu wierzchołka szczeliny oraz zamykaniu się szczeliny.

2. Przyrost długości szczeliny  $a^*$  odpowiadający okresowi występowania opóźnienia wahał się, przy  $R \geq 0$  w granicach  $0 \div 11$  mm, podczas gdy wymiar cyklicznej strefy uplastycznionej  $r^*$  zmieniał się w przedziale  $1 \div 15$  mm. Odpowiednie stosunki  $a^*/r^*$  były zawsze mniejsze od jedności. Okres występowania opóźnionego wzrostu szczeliny zmęczeniowej jest więc dość dobrze skorelowany z wymiarem cyklicznej strefy uplastycznionej.

Nie jest to jednak prawdziwe przy współczynnikach asymetrii cyklu  $R < 0$ . Największe opóźnienia przy  $R \geq 0$  występują w materiałach o niższych granicach plastyczności.

3. Na wielu przełomach zmęczeniowych zauważono makroskopowe obszary, powstałe po przyłożeniu przeciążenia, świadczące o spóźnieniu z jakim pojawił się opóźniony wzrost szczeliny zmęczeniowej. Szczególnie widoczne były one przy dużych strefach uplastycznionych. Przyrost długości szczeliny odpowiadający temu spóźnieniu osiągał nawet 5 mm. Spóźnienie z jakim pojawia się opóźniony (zwolniony) wzrost szczelin zmęczeniowych widoczny jest także na poziomie mikroskopowym. Świadczą o tym pomierzone, przy pomocy mikroskopu skanningowego, odległości pomiędzy prążkami zmęczeniowymi w środku grubości przełomu. Prędkości wzrostu szczelin zmęczeniowych pomierzone metodami mikro- i makroskopowymi również zasadniczo nie różniły się.

5. Pojedyncze przeciążenia ściskające lekko skracają lub nie oddziałują na trwałość na etapie wzrostu szczelin zmęczeniowych przy stałej amplitudzie obciążenia. Większe przeciążenia ściskające powodowały większe skrócenie trwałości. Przeciążenia ściskające o współczynnikach  $OLR = -1 \div -6$  powodowały skrócenie trwałości od  $0 \div 45\%$ . Jednak przeciążenia ściskające mają na ogół znacznie mniejszy wpływ na wzrost szczelin zmęczeniowych aniżeli analogiczne przeciążenia rozciągające.

6. Przeciążenia ściskające występujące tuż przed przeciążeniami rozciągającymi mają niewielki wpływ na opóźnienie wzrostu szczelin zmęczeniowych. Natomiast przeciążenia ściskające występujące zaraz po przyłożeniu przeciążenia rozciągającego mogą częściowo lub całkowicie wyeliminować opóźnienie spowodowane tym przeciążeniem. Przy opracowywaniu modeli dla przewidywania trwałości na etapie wzrostu szczelin zmęczeniowych, bardzo ważnym jest dokładne uwzględnienie kolejności występowania obciążeń.

7. Przy określonym widmie obciążeń pojedyncze przeciążenie rozciągające może więc być korzystne, niekorzystne lub nie mieć żadnego wpływu na wzrost szczelin zmęczeniowych. Zależy to od jego położenia i wielkości w stosunku do innych obciążeń w widmie oraz długości szczeliny, wymiaru strefy uplastycznionej wywołanej tym przeciążeniem i odporności na pękanie. Maksymalną trwałość na etapie wzrostu szczelin zmęczeniowych uzyskano wtedy, gdy nieregularne pojedyncze przeciążenia rozciągające przykładano po osiągnięciu przez szczelinę granicy strefy  $a^*$  lub  $r^*$  wywołanej przeciążeniem poprzednim.

8. Większy wpływ na wzrost szczelin zmęczeniowych mogą mieć, w porównaniu z pojedynczymi przeciążeniami rozciągającymi wielokrotne przeciążenia rozciągające. Jednak przy współczynnikach przeciążenia mniejszych od 1,7 liczba przeciążeń wielokrotnych, w przypadku stali 1020 walcowanej na zimno, nie miała większego wpływu na trwałość całkowitą.

9. Przy stałej amplitudzie obciążenia naprężenia ściskające mają niewielki wpływ na prędkość wzrostu szczelin zmęczeniowych. Zmiany współczynnika symetrii cyklu w zakresie  $R = 0 \div -3$  powodowały, w przypadku wspomnianych wyżej siedmiu zupełnie różnych materiałów, co najwyżej dwukrotną zmianę prędkości  $da/dN$  i trwałości całkowitej. Z tego względu przy stałej amplitudzie obciążenia można założyć, że naprężenia ściskające nie powodują uszkodzeń.

10. Natomiast duże i małe naprężenia ściskające mogą być bardzo niekorzystne w przypadku występowania opóźnień wzrostu szczelin zmęczeniowych, spowodowanych pojedynczymi przeciążeniami rozciągającymi. Im większe w takich przypadkach jest naprę-

żenie ściskające, tym większe powoduje uszkodzenie. W niektórych przypadkach naprężenia ściskające mogą nawet całkowicie wyeliminować wspomniane opóźnienia. Z tego względu w przypadku widm obciążeń o zmiennych amplitudach, przy których mogą powstawać opóźnienia wzrostu szczelin zmęczeniowych, założenie, że naprężenia ściskające nie powodują uszkodzeń, może być całkowicie błędne.

11. Porównywanie materiałów pod względem opóźnień przy  $R \geq 0$  może prowadzić do błędnych wniosków. Zależnie bowiem od rodzaju materiału różny może być wpływ naprężeń ściskających.

#### Literatura cytowana w tekście

1. J. SCHIJVE, *Fatigue crack propagation in light alloy sheet material and structures*, Report MP 195, National Luchtvaartlaboratorium (Amsterdam), Aug. 1960.
2. C. M. HUDSON and H. F. HARDRATH, *Effects of changing stress amplitude on the rate of fatigue-crack propagation in two aluminium alloys*, National Aeronautics and Space Administration, TN D-960, Sept. 1961.
3. R. P. WEI and R. I. STEPHENS, *Fatigue crack growth under spectrum loads*, ASTM STP 595, 1976.
4. R. C. RICE and R. I. STEPHENS, *Overload effects on subcritical crack growth in austenitic manganese steel*, Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing, ASTM STP 536, 1973, pp. 95—114.
5. L. G. VARGAS and R. I. STEPHENS, *Subcritical crack growth under intermittent overloading in cold-rolled steel*, Proceedings, Third International Conference on Fracture, Munich, Germany, Vol. VI, April, 1973, V-325.
6. F. H. GARDNER and R. I. STEPHENS, *Subcritical crack growth under single and multiple periodic overloads in cold-rolled steel*, Fracture Toughness and Slow Stable Cracking, ASTM STP 559, 1974, 225—244.
7. R. I. STEPHENS, G. W. MC BURNEY and L. J. OLIPHANT, *Fatigue crack growth with negative R ratio following tensile overloads*, International Journal of Fracture, **10**, 4 (1974) 587—589.
8. R. I. STEPHENS, D. K. CHEN and B. W. HOM, *Fatigue crack growth with negative stress ratio following single overloads in 2024-T3 and 7075-T6 aluminium alloys*, Fatigue Crack Growth under Spectrum Loads, ASTM STP 595, 1976, 27—40.
9. R. I. STEPHENS, E. C. SHEETS and G. O. NJUS, *Fatigue crack growth and life predictions in man-ten steel subjected to single and intermittent tensile overloads*, Cyclic Stress-Strain and Plastic Deformation Aspects of Fatigue Crack Growth, ASTM STP 637, (w druku).
10. R. I. STEPHENS, *Fatigue crack growth specimen configuration with compressive loads present*, Int. J. Fracture, **12**, (1976) 323—326.
11. D. S. LANGERUD and R. I. STEPHENS, *Compressive overload and mean stress effects on fatigue crack growth in 2024-T3 and 2024-T3 aluminium*, Proceedings, Second International Conference on Mechanical Behavior of Materials, ICM-II, Boston, ISA, August, 1976, pp. 1000—1004.
12. D. P. MUSIL and R. I. STEPHENS, *Fatigue crack closure with negative stress ratio following single tensile overloads in 2024-T3 and 7075-T6 aluminium*, Proceedings, Fourth International Congress on Fracture, ICF-4, Waterloo, Canada, June 1977, Vol. II, pp. 1017—1023.
13. G. O. NJUS and R. I. STEPHENS, *The influence of yield strength and negative stress ratio on fatigue crack growth delay in 3130 steel*, Int. J. Fracture (w druku).
14. R. I. STEPHENS, *Fatigue crack growth retardation: fact and fiction*, Proceedings, Ninth ICAF Symposium, International Committee on Aeronautical Fatigue, Darmstadt, Germany, May, 1977.
15. W. ELBER, *The significance of crack closure*, Damage Tolerance in Aircraft Structures, ASTM, STP 486, 1969, 230—251.
16. J. R. RICE, *Mechanics of crack tip deformation and extension by fatigue*, Fatigue Crack Propagation, ASTM, STP 415, 1967, 247—309.
17. O. E. WHEELER, *Spectrum loading and crack growth*, J. Basic Engng., Trans. of ASME, **94**, D, 1 (1977) 181—186.

18. J. WILLENBORG, R. M. ENGLE and H. A. WOOD, *A crack growth retardation model using an effective stress concept*, Air Force Flight Dynamics Laboratory, Technical Memorandum 71-1-FBR, Jan., 1971.
19. *Tentative method of test for constant-load amplitude fatigue crack growth rates above  $10^{-8}$  m/cycle*, ASTM Committee E-24 Draft, 1977.
20. G. J. PETRAK, *Strength level effects on fatigue crack growth and retardation*, Engng. Fracture Mech., 6(1974) 725—733.
21. J. P. GALLAGHER and T. F. HUGHS, *Influence of yield strength on overload affected fatigue crack growth behavior in 4340 steel*, AFFDL-TR-74-27, 1974.

## Резюме

## ВЛИЯНИЕ ПЕРЕГРУЗКИ НА РАЗВИТИЕ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН

Приведены результаты экспериментального исследования развития усталостных трещин в девяти разных материалах при разных видах перегрузки. Исследовано влияние растягивающих однократных, многократных и нерегулярных а также сжимающих перегрузок. Опыты в основном проводились на растягиваемых сплошных образцах. После перегрузок прилагались нагрузки с постоянной амплитудой, причем асимметрия цикла была в пределах  $R = 0 \div (-2)$ . Для проверки данных, полученных из испытаний на растяжение сплошных образцов и измерений закрывания трещин, которые применялись для анализа влияния сжимающих напряжений, использовались образцы с одиночным надрезом. Предложена упрощенная математическая модель для расчета развития усталостных трещин при нерегулярных перегрузках. Эта модель базируется на данных о размерах циклических пластических зон, трещиностойкости и на развитии усталостных трещин при нагрузке с постоянной амплитудой.

Работа является обзором исследований влияния перегрузок на развитие усталостных трещин, проводимых в течение шести лет в Университете Айова.

## Summary

## THE INFLUENCE OF OVERLOADS ON FATIGUE CRACK GROWTH

Fatigue crack growth behavior was investigated in nine quite different metals under various overload conditions. Single, multiple and intermittent tensile overloads along with single compressive overloads were applied principally to compact tension specimens. Constant amplitude testing following overloads was applied with stress ratios  $R$  ranging from 0 to  $-2$ . Single edge notch specimens were also tested to verify compression influence in the compact tension specimens and to measure crack closure. A simplified model was developed to predict fatigue crack growth under intermittent tensile overloads based upon constant amplitude fatigue crack growth behavior, retardation, reversed plane stress plastic zone sizes and fracture toughness. The paper is a review of six years of research at the University of Iowa concerning fatigue crack growth interaction effects.

THE UNIVERSITY OF IOWA, USA

*Praca została złożona w Redakcji dnia 7 listopada 1977 r.*