ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLASKIEJ

Nr 41

MECHANIKA z.9

1961

TADEUSZ ŚWIERZ, JAN ADAMCZYK

ZMIANY W STRUKTURZE STALI POD WPŁYWEM ZMĘCZENIA

<u>Streszczenie</u>: Przeprowadzono próby zmęczenia stali konstrukcyjnej 35 przy naprężeniach obustronnie zmiennych skręcająco - zginających. Przedstawiono zmiany strukturalne w staliw zeleżności od ilości cykli i wielkości naprężenia zmiennego.

1. Cel i zakres badań

Badanie niniejsze jest częścią pracy badawczo-naukowej, mającej na celu określenie stadium zmęczenia elementu maszynowego, pracującego pod zmiennym obciążeniem skręcająco - zginającym. Praca obejmuje badania metalograficzne i rentgenograficzne stali zmęczonej oraz próbę ilościowego określenia tych zmian w zależności od ilości cykli i wielkości naprężenia.

W artykule przedstawiono metodę badań zmęczeniowych oraz jakościowe zmiany struktury pod wpływem naprężeń zmiennych przy różnej ilości zmian obciążenia (cykli).

2. Przegląd piśmiennictwa

Na wykresie rozciągania próbki w zakresie odkształceń sprężystych, linia obciążenia nie pokrywa się z linią odciążenia -rys.1., a więc praca zużyta na odkształsenie próbki przy obciążeniu nie jest oddawana w całości przy odciążeniu. Zjawisko to nosi nazwę histerezy sprężystej (2). Oprócz występowania zjawiska histerezy sprężystej szczególnie przy naprężeniach wahadło zmiennych wystąpić może również histereza plastyczna - odkształceniowa (1,4,5), której towarzyszy w każdym cyklu obciążenia nieprzerwany wzrost odkształcenia trwałego -rys.2.



Rys.1. Pętla histerezy sprężystej przy rozciaganiu (5)



Rys.2. Pętla histerezy plastycznej przy naprężeniach wahadłowych (5) Pochłanianie energii przy histerezie plastycznej ma wyraźnie charakter nieodwracalny, towarzyszy mu nieprzerwane wydzielanie się ciepła i znaczne nagrzewanie się próbki.

W wyniku energii straconej wskutek histerezy odkształceniowej następuje powolne naruszenie spójności w metalu, które może doprowadzić do powstania pęknięcia zmęczeniowego w miejscu najbardziej osłabionym.

Zjawisko zmęczenia metalu do chwili obecnej nie jest jeszcze dokładne wyjaśnione. Wydaje się mało prawdopodobnym, aby zjawisko zmęczenia można wyjaśnić jednoznacznie na podstawie uproszczonego modelu struktury metalu, dla którego podobnie jak w teorii sprężystości przyjmuje się, że posiada on budowę izotropową. W rzeczywistości metale są ciałami quasiizotropowymi, złożonymi z drobnych zorientowanych ziarn, których własności mechaniczne wykazują cechy kierunkowości. Poza tym poszczególne ziarna oddzielone są od siebie granicami. na których występują często wtrącenia niemetaliczne, mikroskopijne pory wynikłe z zakłóceń uporządkowania atomów i inne. Przy krystalizacji metalu zaistnieć może stan zakłócenia porządku atomowego nawet w poszczególnym ziarnie, wobec czego należy się liczyć z tym. że tylko niewielkie części ziarna "bloki" wykazywać będą własności izotropowe.

Na skutek różnych własności mechanicznych, jakie wykazują poszczególne ziarna i bloki, po przełożeniu obciążenia powstaną w nich różne naprężenia. Mimo że naprężenia średnie (nominalne) na przekroju materiału są jeszcze znacznie niższe od granicy sprężystości, to w niektórych blokach czy ziarnach granica ta może zostać przekroczona, na skutek czego doznają one pewnych odkształceń plastycznych.

W ziarnach tych otoczonych ośrodkiem odkształconym sprężyście już po kilku zmianach obciążenia - cyklach zachodzi umocnienie materiału w wyniku zmiennych odkształceń plastycznych i obniżenie granicy sprężystości wskutek efektu Bauschingera (4,6).

W konsekwencji tego przy dostatecznej ilości zmian obciążenia w blokach i ziarnach "słabych" nastąpić może przekroczenie granicy plastyczności, a dalej wytrzymałości – co z kolei prowadzi do powstania mikropęknięć wywołujących zaburzenie stanu naprężeń podobnie jak przez wtrącenia niemetaliczne i pory.

Dalszy rozwój, czy przerwanie rozrostu mikropęknięć zależy od sprężystego otoczenia odkształconych bloków czy ziarn oraz od rozkładu naprężeń. Tego rodzaju odkształcenia spowodowane są wyłącznie działaniem naprężeń stycznych.

Stopniowy rozwój mikropęknięć, łączenie się ich w większe, przebiegające przez szereg bloków, a dalej przez ziarno i jego granice, powoduje powstanie makropęknięcia - bezpośredniej przyczyny złomu zmęczeniowego.

Zjawisko zmęczenia usiłuje wyjaśnić wielu autorów. Jedną z najbardziej rozpowszechnionych i ogólnie przyjętych jesttecznia opracowana przez Orowana (7). Do badania zjawisk zmęczenia posłużył się specjalnym układem kinematycznym, składającym się ze sprężyn i ciała odkształcalnego plastycznie. Teoria podana przez Orowana jest na ogół zgodna z wywodami Gough a i Wood a (8), i w większości pokrywa się z teorią Afanasjewa (9) i innych autorów, lecz nie wyjaśnia całkowicie zjawiska zmęczenia co wypływa z założeń upraszczających.

Badanie metalograficzne zjawisk zmęczeniowych i zmian zachodzących w strukturze metalu pod działaniem obciążeń okrsowo zmiennych prowadziło wielu badaczy, jak Ewing i Humfrey (10) Afanasjew (9), Gough (8), Moore (11) Forsyth (12, 13) oraz Wever, Hempel, Schrader (14) i inni.

3. Badania własne

3.1. Materiał do badań

Próby zmęczeniowe przeprowadzono na próbkach ze stali konstrukcyjnej 35. Skład chemiczny i własności mechaniczne stali zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1

Skład chemiczny i własności mechaniczne stali poddanej zmęczeniu

Gatunek		4	Sk	tad che	emiczny	1 W %			Rp	Qn	a5	С	U
stall	C	Mn	Si	Р	S	Cr	Ni	Cu	kG/mm ²	kG/mm ²	90	%	kGm/cm
35	0,36	0,58	0,32	0,035	0,035	0,20	0,22	0,2	56	32	27,5	48	4,80

3.2. Maszyna do prób na zmęczenie

Próby zmęczenia przeprowadzono na maszynie do prób na zmęczenie firmy Amsler, przy naprężeniach złożonych zginająco-skręcających, typ NPL434 -rys.3.



Rys.3. Schemat maszyny zmęczeniowej firmy Amsler do prób przy naprężeniach złożonych zginająco skręcających

Próbkę S mocuje się jednym końcem w uchwycie głowicy K, która przymocowana jest do korpusu G za pomocą śrub i może być obracana wraz z próbką. Drugi koniec mocuje się w ruchomej głowicy C z którą łączy się dźwignia A w ten sposób, że możliwy jest obrót głowicy wokół prostopadłej osi przechodzącej przez środek próbki. Dźwignia A za pośrednictwem prętów L poddana jest drganiom pochodzącym od obracającej się niezrównoważonej tarczy D, które powstają w wyniku przymocowania do niej ciężarków W. Tarcza D obraca się w łożysku zamocowanym na jednym końcu dwóch sprężyn płaskich U, podczas gdy drugi koniec sprężyn umocowany jest stale w korpusie maszyny. Do napędu tarczy D służy silnik elektryczny o n = 1500 obr/min.

Masy drgające i sprężyny podtrzymujące tarczę drgającą są tak dobrane pod względem dynamicznym, że próbka poddana jest jedynie obciążeniom spowodowanym przez siłę odśrodkową niezrównoważonych mas wirujących. Przez zmianę wielkości niezrównoważenia tarczy wywołuje się zmianę naprężeń w próbce. Przy ustawieniu głowicy K jak na rys.3 - kąt $\vartheta = 0$ - na próbkę działa tylko moment zginający, zaś przy kącie $\vartheta = 90^\circ$, próbka poddana jest tylko działaniu momentu skręcającego. Przez ustawienie głowicy pod określonym kątem ϑ wywołuje się w próbce wymagane naprężenie złożone zginająco-skręcające.

3.3. Dobór kształtu i obliczenie wytrzymałościowe próbek

Charakterystyka maszyny do prób na zmęczenie przewiduje stosowanie próbek o przekroju kołowym -rys.4. Ten



Rys. 4. Próbka do prób zmęczeniowych przy naprężeniach złożonych wg f-my Amsler

kształt próbki nie nadaje się do prowadzenia badań metalograficznych, w związku z czym do prób na zmęczenie zastosowano próbki o przekroju kwadratowym -rys.5..



Rys. 5. Próbka zastosowana do prób zmęczeniowych

stosując odpowiednie przeliczenie wytrzymałościowe.

a) Naprężenia styczne i odkształcenia zachodzące przy skręcaniu.

Próbka o przekroju kwadratowyme

$$\tau'_{\max} = \pm \frac{M'_s}{V} = \pm \frac{M'_s}{\alpha_s a^3} = \pm 4,807 \frac{M'_s}{a^3}$$
 (1)

$$\vartheta' = \frac{M_{s} \cdot 1}{G \cdot J} = \frac{M_{s} \cdot 1}{\beta G \cdot a^{4}} = 7,14 \frac{M_{s} \cdot 1}{G \cdot a^{4}}$$
(2)

Próbka o przekroju kożowym:

$$\tau''_{\text{max}} = \pm \frac{M''_{\text{s}}}{W_{\text{o}}} = \pm \frac{16 M''_{\text{s}}}{\Re d^3} = \pm 5,09 \frac{M''_{\text{s}}}{d^3}$$
(3)

$$\vartheta'' = \frac{M'' \cdot 1''}{G \cdot J_0} = \frac{32 M'' \cdot 1''}{\pi d^4 \cdot G} = 10,18 \frac{M'' \cdot 1''}{G \cdot d^4}$$
(4)

przy czym:

$\tau'_{\max}; \tau''_{\max}$	4469	maksymalne naprężenie styczne w próbce kwadratowej i okrągłej;
M'; M''s	-	momenty skręcające;
V	-	zastępczy wskaźnik wytrzymałości na skręcanie: dla kwadratu $V = \alpha \cdot a^3 \cdot \alpha =$ = 0,208;
W _o	60	wskaźnik wytrzymałości na skręcanie; dla przekroju kołowego $W_o = \frac{\pi d^2}{16}$;
v'; v"	\$	kąt skręcenia w próbce kwadratowej i okrągłej:

T.Swierz, J.Adamczyk

1'; 1"	- długość próbki kwadratowej i okrągłej;
G	- moduł sprężystości postaciowej;
J	- dla kwadratu J = βa^4 ; $\beta = 0,140$;
Jo	 moment bezwładności; dla przekroju kołowego π d⁴

$$J_{o} = \frac{3La}{32};$$

a - bok kwadratu
d - średnica próbki

Z założenia M = M" wynikają wzory, do przeliczenia naprężeń stycznych i odkształceń przy skręcaniu:

$$\tau''_{\max} = 1,057\tau'_{\max}(\frac{a}{d})^3$$
 (5)

$$v''=1,395v'\frac{1''}{1}(\frac{a}{d})^4$$
 (6)

 b) Naprężenia i odkształcenia występujące przy zginaniu.

Próbka o przekroju kwadratowym:

$$G'_{\text{max}} = \pm \frac{M'_{\text{g}}}{W_{\text{x}}} = \pm \frac{12 \text{ M'}}{\sqrt{2} \cdot a^3} = \pm 8,48 \frac{M'_{\text{g}}}{a^3} (7)$$

$$\delta' = \frac{M'_{g} \cdot l'}{EJ} = \frac{12 M'_{g} \cdot l'}{a^{4} \cdot E} = 12,17 \frac{M'_{g} \cdot l'}{E \cdot a^{4}}$$
(8)

Próbka o przekroju kołowym:

$$G''_{max} \pm \frac{M''_{g}}{W_{x}} = \pm \frac{32 M''_{g}}{\pi \cdot d^{3}} \pm 10,18 \frac{M''_{g}}{d^{3}}$$
 (9)

$$\delta'' = \frac{M_{g}'' \cdot 1''}{E \cdot J} = \frac{64 M_{g}'' \cdot 1''}{E \cdot \pi d^{4}} = 20,38 \frac{M_{g}'' \cdot 1''}{E \cdot d^{4}}$$
(10)

przy czym:

6' 6" max	 maksymalno naprężenie zginające w próbce kwadratowej i kołowej;
M' i N'' g g	- momenty zginaj ące ;
W	- wskaźnik wytrzymałości na zginanie;
Е	- moduł sprężystości podłużnej;
J	- biegunowy moment bezwładności.

Z założenia M = M" wynikają wzory do obliczenia naprężeń zginających i odkształceń przy zginaniu:

$$\sigma''_{\max} = 1, 2 \sigma'_{\max} \left(\frac{a}{d}\right)^4$$
 (11)

$$\delta''=1,675 \,\delta' \frac{1'}{1''} \left(\frac{a}{a}\right)^4$$
 (12)

3.4. Próby zmęczeniowe

Celem umożliwienia obserwacji zjawisk zachodzących w strukturze stali pod wpływem naprężeń zmiennych na próbkach przed zmęczeniem wykonywano zgład przez polerowanie elektrolityczne i trawienie.

Na okres zmęczenia zgład zabezpieczono przed korozją i zanieczyszczeń przez nałożenie błonki z 10% roztworu nitrocelulozy w octanie amylowym.

Próbki poddano naprężeniom zmiennym złożonym przy zachowaniu stosunku G/T = 1, wyższym od wyznaczonej wytrzymałości zmęczeniowej R = \pm 22,5 kG/mm² Stosowano naprężenia od 22,5 kG/mm², podwyższając je dla każdej następnej serii próbek c 2,5 kG/mm² aż do 32,5 kG/mm² oraz zmiennej ilości zmian obciążenia 0,5; 1,0; 2,5; 5,0; 7.5; oraz 10 milionów cykli.

4. Wyniki badań

Próbki po zmęczeniu poddano obserwacji na mikroskopie metalograficznym MeF firmy "Reichert" przy powiększeniu 500 i 1000-krotnym. Wyniki obserwacji zmian struktury

stali przy różnych naprężeniach złożonych i różnej ilości zmian obciążenia zestawiono w tablicy 2.

Prace zilustrowano rysunkami Nr.6 do 21. Opis rysunków zawiera tablica 3.

5. Analiza wyników

Badania zmęczeniowe i metalograficzne normalizowanej stali 35 poddanej zmiennym naprężeniom złożonym zginająco-skręcającym, wykazały charakterystyczne zmiany w jej strukturze. Zachodzą one w cienkiej powierzchniowej warstwie metalu, przede wszystkim w ziarnach ferrytu, w wyniku odkształceń plastycznych wywołanych zmęczeniem.

Na zgładach próbek zmęczonych pojawiają się linie poślizgu, których ilość i stopień zagęszczenia zależą głównie od wielkości naprężeń zmiennych i ilości zmian obciążenia. W pierwszym okresie w niektórych ziarnach ferrytu pojawiają się pojedyncze linie poślizgu. Ze wzrostem ilości zmian obciążenia linie te poszerzają się i wydłużają oraz pojawiają się nowe także w innych ziarnach. Wzrost szerokości linii poślizgu prowadzi do powstania pasm, a te z kolei łącząc się pod dalszymi cyklami obciążenia tworzą jakby obszary poślizgu, zajmujące część, a niekiedy całe ziarna ferrytu.

Badania przeprowadzone na mikroskopie metalograficznym elektronowym i emisyjnym (14) wykazały, że w zaciemnionych ziarnach ferrytu powstać mogą szczeliny o wymiarach submikroskopowych, będące zaczątkiem złomu zmęczeniowego.

Opisany przebieg zmian strukturalnych przy naprężeniu złożonym obustronnie zmiennym symetrycznym + 32,5 kG/mm²przedstawiono na rys. 6 do 13. Pierwsze linie poślizgu pojawiają się ok. 10.000 cykli -rys. 6 poszerzając się i wydłużając ze wzrostem ilości zmian obciążenia. Przy 50.000 cykli -rys.8 widoczne są już pasma poślizgu, które stopniowo łączą się w większe skupiska -rys.9 i 10.

Po 100.000 zmianach obciążenia - rys.9, w nielicznych ziarnach ferrytu zaobserwowano powstawanie linii poślizgu przecinających się prawie pod kątem prostym, co tłumaczy się szczególnym układem krystalograficznym tych ziarn. Dalszy wzrost ilości cykli powoduje zaciemnienie części ziarn ferrytu rys.11, przy czym przy zmianach strukturalnych widocznych na rys. 11 próbka uległa zniszczeniu. Tablica

N

Uwagi 6 rysun-NY 15g S 8 6 ω 0-3 Struktura pod mikroskopem metalogra-Struktura jw. - następuje wzrost dłupojawienie się ich w nowych ziarnach gości i grubości linii poślizgu oraz Struktura jw. - pojawiają się linie Struktura jw. - w nielicznych ziar-Zmiany w strukturze stali 35 pod wpływem zmęczenia nach ferrytu pojawiają się pierwsze natomiast już istniejące poszerzają poślizgu w nowych ziarnach ferrytu, się tworząc jakby "pasma poślizgu" Struktura stali znormalizowanej; 4 ficznym ferryt i perlit. linie poślizgu ferrytu żenia (cykli) Napręże- zmian obciąilosó × 10⁶ 3 0,015 0,025 8 0,05 hie ± 6 red kg/mm² 32.5 N . = = prób--IN K1

Zmiany w strukturze stali

~					1		14	
l.c. tabl.	9						próbka	uległa zniszcze- niu
°.	5	σ		10	•	1		11.
	4	Struktura jw 110ść pasm poślizgu wzrasta przy czym zaobserwowano skion- ność do łączenia się ich w większe skupiska "obszary poślizgu"	Struktura jw coraz większa ilość pasm poślizgu Łączy się w obszary poślizgu, zaś w niektórych ziar- nach ferrytu powstają linie pośli- zgu prostopadłe do siebie	Struktura jw wzrost obszarów pośli- zgu, zaś linie poślizgu do siebie pro- stopadłe poszerzają się tworząc pasma poślizgu	Struktura jw dalszy wzrost obsza- rów i pasm poślizgu	Struktura jw powiększenie się obsza- rów poślizgu powoduje zaciemnienie ca- łych lub części ziarn ferrytu	Struktura jw dalsze zaciemnienie	części i całych ziarn ferrytu oraz sil- na deformacja (pofałdowanie) powierz- chni zgładu (utrudniająca wykonanie ostrego zdjęcia)
	3	0,1	0,15	0,20	0,30	0,40		0,575
	2	32,5		E	=	, E		=
	1							

T.Świerz, J.Adamczyk

1°Ce Table			próbka ule- gła zni- szczeniu			próbka ule- gła zni- szcz eni u		
5	15		14.44	14	I	19	13	10
4	Struktura jw pasma oraz obszary po- ślizgu w ziarnach ferrytu	Struktura jw powiększenie się ob- szarów poślizgu aż do zaciemnienia ca-	Łych i części ziarn ferrytu Struktura jw zaciemnienie części oraz całych ziarn ferrytu	Struktura jw pasma poślizgu prze- chodzące z jednego złarna ferrytu na drugie oraz tworzenie się obszarów poślizgu	Struktura jw łączenie się pasm w obszary poślizgu oraz częściowe za- ciemnienie ziarn ferrytu	Struktura jw zaciemnienie części oraz całych ziarn ferrytu; w ziarnach perlitu widoczna pojedyncza mikro- szczelina	Struktura jw. – pasma i linie po- ślizgu w ziarnach ferrytu	Struktura jw poszerzenie się oraz łączenie pasm poślizgu w sąsiadujących ziarnach ferrytu
9	0,5	1,0	1,196	0,5	1,0	1,416	0,5	1,0
2	30,0	=	E	27,5	F	E	25,0	F
1	S	2.1.	2.2	a.	3.1.	3.2	4.	4.10

Zmiany w strukturze stali

	-					- 25-			
letabl.2	9		Próbka tilegta zniszcze-						
d.o	5	I	21	4	ł	8	1	I	8
	4	Struktura jw łączenie się pasm po- ślizgu w obszary oraz zaciemnienie czę- ści ziarn ferrytu	Struktura jw zaciemnienie części oraz całych ziarn ferrytu	Struktura jw. – linie poślizgu w niektórych ziarnach ferrytu	Struktura jw wzrost długości i szerokości linii poślizgu oraz poja- wienie się ich w nowych ziarnach fer- rytu	Struktura jw pasma oraz linie po- ślizgu w ziarnach ferrytu	Struktura jw pasma oraz nieliczne obszary poślizgu w ziarnach ferrytu	Struktura jw – obszary poślizgu oraz częściowe zaciemnienie niektorych ziarn ferrytu	r E
	3	2,5	3,08	0,5	1.0	2,5	5,0	7.05	10.0
•	2	25,0		22,5		H	B	6	Ŧ
	1	4.2.	4,3°	5.	5.1.	5.2.	5.3°	5.4.	5.5.

T.Świerz, J.Adamczyk





13

12

Opis rysunków

Nr	Napręże-	Ilość zmian		Powię-
rys.	nie ^G red	obciążenia	Struktura	kszenie
	kG/mm^2	x10 ⁶		x
6	32,5	0,015	Struktura stali znorma- lizowanej: ferryt i per- lit - w ziarnach ferrytu widoczne pojedyncze li- nie poślizgu	1000
7	¥¥ -	0,025	Struktura jw. – wzrost grubości i szerokości linii poślizgu oraz po- jawienie się ich w no- wych ziarnach ferrytu	1000
8	97	0,05	Struktura jw poja- wienie się linii pośliz- gu w nowych ziarnach ferrytu oraz występowa- nie pasm poślizgu	1000
9	77	0,1	Struktura jw. – wzrost ilości pasm poślizgu oraz kączenie się ich w większe skupiska – obsze ry poślizgu	1000
10	43	0,20	Struktura jw dalszy wzrost obszarów pośliz- gu, pojawienie się li- nii poślizgu prostopa- dłych do siebie	1000
11	29	0,575 [±]	Struktura jw – powię- kszenie się obszarów po- ślizgu powoduje zaciemnie nie części ziarn ferrytu	1000
12	22,5	0,5	Struktura jw. – linie poślizgu w niektórych ziarnach ferrytu	500
13	25,0	C, 5	Struktura jw. – pasma poślizgu oraz częścio– we zaciemnienie ziarn ferrytu	500

x) Próbka uległa zniszczeniu.

+----2



21

			CoCo Ca	biley j
Nr	Napręże-	Ilość zmian		Powię∞
rys。	nie ⁶ red	obciążenia	Struktura	kszenie
	kG/mm ²	×10°		X
14	27,5	0,5	Struktura stali znor- malizowanej: ferryt i perlit - pasma oraz obszary poślizgu w ziarnach ferrytu	500
15	30,0	0,5	Struktura jw.	500
16	30,0	1,196≭	Struktura jw. – za- ciemnienie części oraz całych ziarn ferrytu	500
17	30,0	1,196	Szczegół rys.18	1000
18	25,0	1,0	Struktura jw łą- czenie się pasm po- ślizgu w sąsiedują- cych ziarnach fer- rytu	1000
19 20	27,5	1,416 [±]	Struktura jw pa- sma poślizgu oraz częściowe zaciemnie- nie ziarn ferrytu; w ziarnach perlitu po- jedyncze mikroszcze- liny przechodzące przez część lub całe ziarno	1000
21	25,0	3,08 ^ૠ	Struktura jw pa- sma poślizgu oraz częściowe zaciemnie- nie ziarn ferrytu; linie poślizgu prze- chodzą przez wtrą- cenie niemetaliczne	500

x) Próbka uległa zniszczeniu.

Podobny obraz struktury otrzymano po zniszczeniu próbek poddanych naprężeniom + 30 kG/mm²- rys.18 i 19; + 27,5 kG/mm² + 25 kG/mm²oraz naprężeniom + 22,5 kG/mm²po 10.10⁶ zmianach obciążenia, tj. przy wytrzymałości na zmęczenie stali 35. Wynika stąd, że zaciemnienie części oraz całych ziarn ferrytu zachodzi w ostatnim stadium zmęczenia stali przed jej zniszczeniem.

Podobny przebieg zmian strukturalnych zaobserwowano badając zależność między zmianami w strukturze stali 35 a zmianą wielkości naprężeń zmiennych przy stałej ilości zmian obciążenia. Zależność tę zilustrowano na rys. 12 do 15, przymując naprężenia od + 22,5 kG/mm² do + 30 kG/mm²i stałą ilość zmian obciążenia równą 500,000 cykli. Przy naprężeniu równym + 22,5 kG/mm² zaobserwowano tylko pojedyncze linie poślizgu w nielicznych ziarnach ferrytu. -rys.12 . Wzrostowi naprężenia do + 25 kG/mm² towarzyszy wystąpienie pasm poślizgu oraz częściowe zaciemnienie nielicznych ziarn ferrytu, zaś naprężeniu + 27,5 kG/mm² - powstanie obszarów poślizgu zaciemniających cześciowo oraz całkowicie niektóre ziarna ferrytu -rys.14.

Podobny obraz struktury otrzymano wywołując w próbce naprężenia złożone równe <u>+</u> 30 kG/mm² -rys.15.

Zaobserwowano, że nie wszystkie ziarna ferrytu wykazują zmiany strukturalne nawet w momencie zniszczenia próbki, co związane jest prawdopodobnie z różnymi własnościami wytrzymałościowymi poszczególnych ziarn oraz stosunkiem głównych elementów krystalograficznych do kierunku działania naprężenia wywołującego zmęczenie.

W niektórych ziarnach ferrytu sąsiadujących z sobą i posiadających podobny układ krystalograficzny istnieje możliwość łączenia się linii i pasm poślizgu, względnie przerzucanie się ich z jednego ziarna na drugie, co pokazano ma rys. 13 do 15 i 18. Pod wpływem działania naprężeń zmiennych w strukturze stali wystąpić mogą pewne zmiany również w ziarnach perlitu. Na rys. 19 widoczna jest mikroszczelina w części ziarna perlitu, zaś na rys. 20 mikroszczelina przebiega prawie przez całe ziarno perlitu.

W toku pracy obserwowano również zachowanie się wtrąceń niemetalicznych w stali poddanej zmęczeniu. Obserwacje wykazały, że nie są one źródłem zapoczątkowania zmian strukturalnych ani nie stanowią przeszkód przy powstawaniu i rozroście linii i pasm poślizgu -rys.12, 15 i 21.

6. Wnioski

Przeprowadzone badania wykazały:

- Widoczne zmiany strukturalne stali 35 pod wpływem zmęczenia zachodzą w cienkiej warstwie powierz chniowej, w niektórych ziarnach ferrytu.
- 2. Zależą one od wielkości naprężenia i ilości zmian obciążenia. Ze wzrostem naprężenia i ilości cykli wzrasta ilość linii poślizgu, które następnie skupiają się w pasma a dalej w obszary poślizgu zaciemniające części oraz całe ziarna ferrytu.
- Zaciemnienie części oraz całych ziarn ferrytu zachodzi w ostatnim stadium zmęczenia przed zniszczeniem stali。
- 4. Przy określonej wartości naprężenia znęczeniowego i liczby cykli występują pojedyncze mikroszczeliny również w ziarnach perlitu.
- 5. Wtrącenia niemetaliczne w stali nie są źródłem zapoczątkowania zmian strukturalnych ani nie stanowią przeszkód przy powstawaniu i rozroście linii i pasm poślizgu.

LITERATURA

- (1) W.Moszyński Wytrzymałość zmęczeniowa części maszynowych. PWT - Warszawa 1954.
- (2) J.A.Pope Metal Fatique Champan Hall, London 1959.
- (3) M.Popiel Przegląd Mechaniczny. T. 3 Nr 8, 11, 13, i 14. Warszawa 1937.
- (4) I.D.Oding Dopuskajemyje napriażenija w maszinostrojenii i cykliczeskaja procznost mietałłow, Moskwa 1947.
- (5) G.W. Użik Mietody ispytanij mietałłow i detalej maszin na wynosliwost. I.A.N. Noskwa 1948.
- (6) N.Saposznikow Badanie własności mechanicznych. PWN, Warszawa 1954.

- (7) E. Orowan Proc. Roy. Soc. Vol. 171, str. 79, 1939.
- (8) H.I.Gough, W.A.Wood Proc. I. Mech. E. Vol. 141, str. 175. 1939.
- (9) N.N.Afanasjew-Staticzeskaja teoria ustałostnoj procznosti, Żurnał Techniczeskoj Fiziki, 1940.
- (10) I.A. Ewing Trans. Roy. Soc. 200 A. str. 241. 1903
- (11) H.E.Moore, Bull Illinois. Engng.Exp. Stat. Nr. 208. 1930.
- (12) P.I.Forsyth J.Inst. Metals. 80, str. 181 1951/52.
- (13) P.I.Forsyth J.Inst. Metals. 82, str. 449 1953/54.
- (14) F.Wever, M.Hempel, A Schrader Arch. Eisenhüttenwessen 26, str. 739. 1955.
- (15) S.Katarzyński, S.Kocańda, M.Zakrzewski Badanie własności mechanicznych. PWT Warszawa 1956.

Изменения в структуре углеродистой стали 35 под влиянием знакопеременных напряжении

Исследовано влияние знакопеременных сложных скручивающих и изгибляющих напряжении на структуру нормализованой углеродистой стали 35.

Наблюдения доказалы, что в тонком поверхностном слое металла в некоторых зернах феррита (в зависимости от кристаллографической ориентовки), выступают линий скольжения, которые расшириваются и удлиняются с увеличиванием напряжения и количества цыкли нагрузения творя ряды а дальше пространства скольжения, затемняющие части или целые зерна феррита.

Константировано, что затемнение части или целых зерн феррита наступают в конечной стадии усталости стали.

Die Veränderungen in der Struktur im Stahl mit 0,35 % C bei Dauerbeanspruchungen

Es wurden Untersuchungen von Strukturveränderung im Stahl mit 0,35 % C bei den Biege — und Torsionsbeanspruchungen durchgeführt. In der äusseren dünnem Schicht des Probestabes zeigen sich in man-

In der äusseren dünnem Schicht des Probestabes zeigen sich in manchen Ferritkörnern die Gleitlinien, die sich mit den zunehmenden Dauerbeanspruchungen und mit Zahl der Lastspiele zu Gleitstreifen nachdem zu Gleitflächen verlängern und verbreiten und in letzten Ermüdungsstadium das Verdunkeln der Teile oder der ganzen Ferritkörnern bilden.