X線による疲労の研究 その2*

(半価幅による疲労損傷の検出)

X線材料強度部門委員会第2分科会**

An X-Ray Study on Fatigue of Metals—Report 2
(On Detection of Fatigue Damage by the Breadth of Diffraction Line)

by

The 2nd Division of the Committee for X-Ray Study on
Deformation and Fracture of Solid Material

A lot of studies on fatigue by using X-ray diffraction methods have been conducted during these ten years. The X-ray diffraction makes it possible to measure not only macro-stress but also various parameters on microstructure such as micro-stress in materials. Therefore the use of X-rays is promising as source for creation of new and significant fields in the fatigue study, and its application by the persons concerned about this kind of problems is foreseen. The 2nd Division of the Committee for the X-ray Study on Deformation and Fracture of Solid Material in the Society of Material Science, Japan, have conducted a series of studies by collaboration of scientists with a view to achieving further development in this field of studies.

The first report of the Division was presented in the Journal of Material Science, Japan, vol. 18, p. 679 and 685 (1969), as a survey of the investigation conducted. One of the suggestions given in the report was that the broadening of X-ray diffraction line would represent the state of fatigued metals well and possibly indicate the extent of fatigue damage. This suggestion has stimulated engineering interest. Therefore as many experimental results on the change in broadening of the diffraction line during fatigue have been gathered as possible, and examination has been made of its application to the nondestructive method indicating fatigue damage, for the second report of the Division.

(Received Jan. 28, 1970)

1 ま え が き

金属材料の疲労は、機械構造物の破壊の主原因であって、機械設計上不可欠な研究題目として長年月に渡り取り上げられ研究されてきた。それら研究は、設計基準を定めるための機械工学的研究あるいは疲労現象理解のための物理学的研究といった幅の広いものであって、疲労に関する研究報告は莫大の量となっている。

ここ10年来、非破壊的にかつ定量的に金属組織変化を観察しうるX線回折の利点が認識されるにつれ、疲労問題にX線を採用した研究が盛んに行なわれるようになってきた。すなわち、X線回折技術を用いれば、巨視的応力の測定および微視的ひずみと言った微視的組織に関する諸量の測定が非破壊的に可能であって、

疲労現象の機構的深求のみならず工学的にも有意義な新しい研究分野が開発されつつある。

これら情勢にかんがみて、日本材料学会X線材料強度部門委員会においてはこの方面における研究の一層の発展を期して第2分科会を設置し、共同研究を実施している。共同研究の目的は、すなわち、疲労に関するX線の研究を広範囲に行なって、現実の種々疲労問題の解決にX線回折技術を応用しうる方法を確立せんとすることにある。第2分科会はその活動として、まず、この分野の研究をとりまとめ総括を行なった。(共同研究報告そのI)。それによれば、測定の比較的容易な線回折線半価幅は格子乱れ程度を表わすよいパラメータであって、それを用いて機械構造物の疲労損傷と余寿命の非破壊的測定を行なうことがある程度まで可能である。そこで、報告そのIを発表した時点よ

* 原稿受理 昭和45年1月28日

** X線材料強度部門委員会第2分科会

Table I. Test information on X-ray observation of fatigue.

Material	Condition	Specimen and fatigue test	X-ray measurement	Reference
Iron and carbon steel 0.01% C 0.06% C 0.07% C S10C S15C S35C S40C S43C S45C	Annealed	Plane-bending	H-V breadth, microbeam pattern	36)
	Annealed, cold-worked	Plane-bending, notched	Micro beam pattern	19)24)~39)
	Quenched and aging	Plane-bending, notched	Micro beam pattern	48)
	Annealed	Plane-bending, notched	Micro beam pattern	29)
	Annealed	Plane-bending	H-V breadth, R-stress	20)~22)
	Quenched and tempered	Rotating-bending, steps stress-cycling	H-V breadth, R-stress	4) 8)
		Plane-bending, notched	H-V breadth, R-stress	3) 6)
			H-V breadth, R-stress	5)
	Annealed, cold-pulled and shot-peened	Plane-bending	H-V breadth, R-stress	10)
	Annealed	Rotating-bending, varying stress	H-V breadth	26)
	Push pull mean stress, notched	Plane bending, mean stress	Micro beam pattern	41)52)
		Plane-bending, notched	H-V breadth, R-stress	15)
		Twisting, mean stress	H-V breadth, R-stress	9)13)
		Push-pull, low-cycle fatigue	H-V breadth, R-stress	12)16)
		constant and two steps strain cycling	H-V breadth, micro beam pattern	46)47)51)
	Tufftrided	Rotating-bending	H-V breadth, R-stress	25)42)50)
	Annealed, machined	Rotating-bending	R-stress	45)
	Induction-hardened	Rotating-bending	R-stress	18)
	Annealed, cold-drawn	Rotating-bending, steps stress-cycling	H-V breadth	2)
	Quenched and tempered			
	Quenched	Rotating-bending	H-V breadth, R-stress	33)
		Plane-bending	H-V breadth, R-stress	54)
Rolled steel SS 41	Annealed, shot-peened	Plane-bending	R-stress	43)
Carbon steel forging SF 55	Annealed	Rotating- and plane-bending Plane and notched Rotating-bending	H-V breadth, R-stress H-V breadth, R-stress	38) 55)
Spring steel SUP 6	Quenched and tempered	Plane-bending, mean stress	H-V breadth, R-stress	23)
Carbon tool steel SK 6	Annealed, cold-drawn	Rotating-bending	H-V breadth	1)
High carbon chromium bearing steel SUJ-2	Annealed quenched and tempered	Twisting and plane-bending	H-V breadth, R-stress	53)
Chromium molybdenum steel SCM 21, 22	Carburized	Rotating bending	R-stress	44)
Stainless steel SUS 27,39	Solution treated, Cold-drawn	Plane-bending	H-V breadth	34)
High-tensile steel HT 50	Cold-drawn	Push-pull Rotating-bending	R-stress H-V breadth, R-stress	17) 31)
HT 60, 80	As machined	Plane and notched Rotating-bending	R-stress H-V breadth, R-stress	1)37)
Cast iron	Annealed, cold-drawn	Rotating-bending	H-V breadth	1)
Cast steel	Annealed, cold-drawn	Push-pull, low-cycle fatigue	H-V breadth, R-stress	32)
Aluminum	As machined	Push-pull, plane and notched	Micro beam pattern	35)
	Annealed	Cantilever-bending	Pseud kossel pattern	40)
	Annealed single crystal	Rotating-bending, steps stress cycling	H-V breadth	7)
24S aluminum alloy	Quenched and aging	Plane-bending, Plane and notched	H-V breadth, micro beam pattern	14)30)49)
Copper	Annealed	Plane-bending	H-V breadth, R-stress	11)
6-4, 7-3 brass	Annealed		Micro beam pattern	27)

り1年を経た現在においてさらに共同研究成果も積み重ねられたので、X線回折線半価幅の上記問題への適用について検討し、今後の共同研究成果の整理法を示し、それをもって当分科会共同研究報告そのⅡとして、ここに報告する。

なお、現時点(昭和44年9月)までにX線回折技術を

用いて行なわれた疲労に関する研究報告を Table I に材料別に表示しておく。これら研究は、各実施者がそれぞれ興味のもとに行なったものであって、その研究目的に応じた実験手段を選んでいるため、疲労現象の多岐にわたる研究報告の一覧であることはいうまでもない。なお、同表は、材料、機械学会論文集, Procee-

ding of the Japan Congress on Material Research, X線材料強度に関するシンポジウム前刷等の雑誌および第2分科会共同研究報告書(当分科会にて保管)により作成してある。

2 疲労過程におけるX線回折線半価幅の変化様相

今まで報告のあった種々金属において、焼なまし材の場合に、X線回折線半価幅は疲労過程中3段階増加変化を示すことが認められている。すなわち、疲労初期(第1期)においてX線回折環は拡散を続け「半価幅対繰返し数」曲線は増加するが、やがてその増加はゆるやかとなり第2期にはいる傾向を示す。半価幅対繰返し数曲線は、これよりその増加割合の小さいゆるやかな傾斜となって、繰返し数とともに漸増する。第3期において半価幅は再度急増して破壊に至る。疲労の進行とともに発生するすべり帯、およびすべり帯に発生する微視的き裂・巨視的き裂の発生状況を観察することによって格子みだれ程度(半価幅)の変化を説明せんとする試みは、半価幅でもって疲労損傷を示さんとする上で、非常に意義深い。数多くの観察によれば、半価幅の第1期の増加過程において特定の結晶粒内に特定の方向に走るすべり帯が現われ、第2期に入るとそれらすべり帯の数が増加するとともにすべり帯の広さが著しく拡散する。またこの時期において微視的き裂がそれらすべり帯中に発生・成長するようである。巨視的き裂は第3期において認められるようになる。

これら観察を突き合わせてみると、第1期においては、応力繰返しにより塑性変形が生じて加工硬化が現われるが、これが第1期の格子乱れの急増の原因となる。繰返し数とともに加工硬化は飽和するので半価幅の増加割合も小さくなり第2期に入るが、この期間における半価幅の定常的漸増現象は微視的き裂の成長あるいは増殖に伴う微視的ひずみの増加におうとされている。第3期の半価幅急増はき裂の切欠き集中による著しい塑性変形に帰因するのであろう。

一方、予ひずみを受けたため、回折環が拡散している材料については、半価幅対繰返し数曲線は焼なまし材の場合に比較すると、対称的に、逆の傾向を示すようになる。すなわち、初期において拡散している半価幅は急激な減少を示し、第2期においてさらに漸減し、そしてき裂発生とともにふたたび急減過程を経て破断に至る。予加工材においては、すでに存在するすべり帯が応力繰返しとともに強化されるようであるが、予加工によって生じた高い内部エネルギーが繰返しに伴う塑性変形によって低められようとし、すなわち加工軟化によって、半価幅の減少がもたらされるようである。

種々熱処理等を行なって、回折環が拡散している場合にも、予加工材の場合と大略類似の半価幅変化を示すようであるが、例外の認められる事が多い。

このように、疲労過程におけるX線回折線半価幅の変化様相は、材料等あるいは試験条件によって異なるものであるが、その変化様相を次のごとく分類してみる。

- A 3段階増加
- B 3段階減少
- C 変化が認められない
- D その他

この分類記号を付して、今までに観察し報告された疲労過程の半価幅変化を Table II にまとめてみる。同表で、疲労過程における半価幅の変化様相の材料別にまとめて示す判定は、大部分実験者が行なったものであるが、厳密を期すために筆者が他の範中に入れたものもある。なお、一般に疲労限以下の応力振幅で行なった場合には第3期の半価幅変化の現象が生じないが、この場合の変化はAあるいはBの中に入れておく。応力振幅の違い等によって変化様相が異なるような場合は2つの変化を記入してある。

この表を見てみると、半価幅対繰返し数曲線は上述の焼なましおよび予加工材の変化様相に大半は分類されてしまうわけであるが、疲労損傷と余寿命の測定を行なう場合に種々の問題がある事も同表は示摘している。

3 問題点の指摘

X線回折線半価幅を用いて疲労損傷と余寿命の測定を可能にするためには、半価幅による損傷量の一義的表示を求める事、すなわち、損傷量 α があらゆる条件下においても半価幅 h の一価函数

$$\alpha = g(h) \quad (1)$$

で表示できる事が必要となる。しかしながら、疲労過程における半価幅の変化様相が焼なまし材と予加工材においてまったく逆のような変化を示す事からみてもわかるように、(1)式的表示が常に可能であるとはいいがたく、むしろ以下述べるごとく、その成立はかなり限られた条件範囲内に限られる。それゆえ、現実の機械構造物の疲労損傷と余寿命の測定を行なうためには、まず予備の実験により(1)式成立のための条件範囲を知る事が不可欠である。当分科会共同研究の意図すべきところは、半価幅のこの方面の工学的応用の可能な条件範囲を探る事にあり、さらには、条件範囲をひろげても(1)式的表示の可能なパラメータを見いだしていく事にあるといえよう。そこで、(1)式的表示を求めるに際して考慮すべき因子を取り上げてみる。なお、試験温度、ふん囲気等に関しては報告もなく、現時点で述べる事は省略し、今後の問題点として残しておく。

3・1 応力振幅依存性

前章にても述べたごとく、疲労初期における半価幅の変化様相よりみて、格子ひずみはき裂の分布といっ

Table II. Mode of change in half-value breadth of X-ray diffraction peak during fatigue.

Material	Condition	Fatigue test	X-ray measurement	Mode of change	Reference	
Iron and carbon steel	0.01% C	Annealed	Plane-bending, $\sigma_a=11-25$ kg/mm ² $N_f=7 \times 10^4 \sim$ ($\sigma_w=14$ kg/mm ²)	Diffractionmeter Co (220)	A	36)
	0.07% C	Annealed	Plane-bending, $\sigma_a=15-22$ kg/mm ² $N_f=5 \times 10^5 \sim 10^6$ Two steps stress cycling $\sigma_a=22$ and 23 kg/mm ² $N_f=10^6 \sim$ ($\sigma_w=17.5$ kg/mm ²)	Parallel beam Co (310)	A	3)
					D, A	
		Annealed	Plane-bending, $\sigma_a=20$ and 22 kg/mm ² $N_f=2.5 \times 10^5$ ($\sigma_w=18.5$ kg/mm ²)	Parallel beam Cr (211) Co (310)(220)(200) Diffractionmeter Cr (110)	A	4)8)
		Annealed	Rotating-bending, $\sigma_a=22$ kg/mm ² Two steps stress cycling $\sigma_a=22$ and 23 kg/mm ² $N_f>10^6$	Parallel beam Co (310)	A	6)
		Cold-worked	Rotating-bending, $\sigma_a=23.5$ kg/mm ² $N_f>10^6$	Parallel beam Co (310)	D	
		Quenched and tempered	Plane-bending, notched $\alpha=2.0, \sigma_n=6-12$ kg/mm ² $N_f=4 \times 10^4 \sim 4 \times 10^5$ ($\sigma_w=16.5$ kg/mm ²)	Film Co (310)	B	5)
	S 10 C	Annealed	Plane-bending, $\sigma_a=22.8-67$ kg/mm ² $N_f=100 \sim 10^6$ $\sigma_a=25.1-77.2$ kg/mm ² $N_f=50 \sim 10^6$	Film Co (310)	A, D	10)
		Pre-pulled ($0.9 \sigma_B$)	$\sigma_a=32.3-73.5$ kg/mm ² $N_f=20 \sim 5 \times 10^4$		B, D	
		Shot-peened			B	
Annealed		Rotating-bending, $\sigma_a=22.5-28$ kg/mm ² $N_f=5 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5$ Varying stress $\sigma_a=20-24.3$ kg/mm ² $=24.4-29.6$ kg/mm ² $=28.7-20.1$ kg/mm ² $N_f=3.5 \times 10^5 \sim 10^6$ ($\sigma_w=17.5$ kg/mm ²)	Film Co (310)	A	26)	
S 15 C	Annealed	Plane-bending, $\sigma_a=14$ and 16 kg/mm ² $\sigma_m=0$ and ± 4.1 kg/mm ² $N_f=6 \times 10^5 \sim 10^6$	Film Co (310)	A	15)	
		Twisting, $\tau_a=15$ kg/mm ² $\tau_m=0$ and $+4.2$ kg/mm ² $N_f=2 \times 10^5 \sim$ $\tau_a=12.1-16.9$ kg/mm ² $\tau_a=15.1$ kg/mm ² $\tau_m=0-4.7$ kg/mm ² $\tau_a=13.2-17.8$ kg/mm ² $\tau_m=4.7$ kg/mm ² $N_f=2 \times 10^5 \sim$ ($\tau_w=13$ kg/mm ²)	Film Co (310)	A	16)	
			Film Co (310)	A	12)	
		Plane-bending, Notched, $\alpha=2.0$ $\sigma_n=11-14$ kg/mm ² $\alpha=1.0-3.02$ $\sigma_{max}=26$ kg/mm ² $N_f=4 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6$	Film Co (310)	A	13)	
		Push-pull $\epsilon_a=0.5-1.25\%$ $N_f=600 \sim 6 \times 10^3$	Diffractionmeter Co (220) Cr (110)	A	46)	
		Two steps strain cycling $\epsilon_a=0.75$ and 1.25% $N_f=500 \sim 1300$		D	47)	
		Tufftrided	Rotating-bending, $\sigma_a=36-42$ kg/mm ² $N_f=2 \times 10^6 \sim$ ($\sigma_w=40$ kg/mm ²)	Film Cr (211)	D	50)
	S 43 C	Annealed	Rotating bending, $\sigma_a=19.8-20.3$ kg/mm ² $N_f=4 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5$ Two steps stress cycling $\sigma_a=19.8$ and $20.3-22.6$ kg/mm ² $\sigma_a=22.6$ and $20.3-21.7$ kg/mm ² $N_f=1.5 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5$	Film Co (310)	A	2)
					D	

Material	Condition	Fatigue test	X-ray measurement	Mode of change	Reference
Carbon steel forging	Cold drawn	Multi steps stress cycling $\sigma_a=18.9$ and $19.8-21.7$ kg/mm ² $N_f=6.5 \times 10^5 \sim$ ($\sigma_w=18$ kg/mm ²)	Film Co (310)	D	
		Rotating-bending, $\sigma_a=42.6-47.1$ kg/mm ² $N_f=10^5 \sim 4 \times 10^5$		B	
		Two steps stress cycling $\{\sigma_a=38.7$ and $39.6-41.5$ kg/mm ² $\sigma_a=47.1$ and 42.6 kg/mm ² $\sigma_a=42.6$ and 41.5 kg/mm ² $N_f=10^5 \sim 4 \times 10^5$		B B B	
		Multi steps stress cycling $\sigma_a=38.8$ and 39.6 kg/mm ² $\sigma_a=38.8$ and 41.5 kg/mm ² $N_f=6 \times 10^5 \sim 8 \times 10^5$ ($\sigma_w=21$ kg/mm ²)		B B	
	Quenched	Rotating-bending, $\sigma_a=32$ and 35 kg/mm ² $N_f=10^5 \sim 2 \times 10^6$	Film Co (310)	D	33)
		Plane-bending, $\sigma_a=38$ kg/mm ² $N_f=4.5 \times 10^5$ ($\sigma_w=31.67$ kg/mm ²)	Parallel beam	C	54)
	Annealed	Rotating-bending, $\sigma_a=25.5$ kg/mm ² $N_f=2 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6$	Film Co (310)	A	38)
		Rotating-bending, $\sigma_a=25-33$ kg/mm ² $N_f=10^5 \sim$		A	55)
	Quenched and tempered	Plane-bending			23)
	Annealed	Rotating-bending, $\sigma_a=18.9-25.5$ kg/mm ² $N_f=1.5 \times 10^5 \sim$ ($\sigma_w=18.0$ kg/mm ²)	Film Co (310)	A	1)
		Cold drawn Rotating-bending, $\sigma_a=35-70$ kg/mm ² $N_f=5 \times 10^4 \sim$ ($\sigma_w=39.5$ kg/mm ²)		B	
High carbon chromium bearing steel	Annealed	Twisting, $\tau_a=16$ and 20 kg/mm ² $N_f=10^5 \sim 10^6$ ($\tau_w=13$ kg/mm ²)	Parallel beam Cr (211)	A	53)
	Quenched and tempered	Plane-bending and twisting $\sigma_a=66$ kg/mm ² $\tau_a=46$ and 56 kg/mm ² ($\tau_w=43$ kg/mm ²) $\sigma_a=78$ kg/mm ² $\tau_a=51$ and 60 kg/mm ² ($\tau_w=49$ kg/mm ²) $\tau_a=51$ kg/mm ² $N_f=5 \times 10^4 \sim 10^6$ ($\tau_w=39$ kg/mm ²)		C C C C C	
Stainless steel	Solution treated	Plane-bending, $\sigma_a=25-40$ kg/mm ² $N_f=10^4 \sim 2 \times 10^5$	Diffractometer Co (310)	A	34)
	Rolled and tempered	Plane-bending, $\sigma_a=25-40$ kg/mm ² $N_f=10^3 \sim 10^5$		D	
Cast iron	Solution treated	Plane-bending, $\sigma_a=20-40$ kg/mm ² $N_f=3 \times 10^3 \sim 5 \times 10^5$		A	
		Plane-bending, $\sigma_a=25-40$ kg/mm ² $N_f=10^3 \sim 10^5$		D	
	Annealed	Rotating-bending, $\sigma_a=8-12$ kg/mm ² $N_f=1.5 \times 10^5 \sim$ ($\sigma_w=8.5$ kg/mm ²)	Film Co (310)	A	1)
		Cold drawn Rotating-bending, $\sigma_a=6-14$ kg/mm ²		B	

Material	Condition	Fatigue test	X-ray measurement	Mode of change	Reference
Cast steel	Annealed	$N_f=5 \times 10^4 \sim$ ($\sigma_w=9.5 \text{ kg/mm}^2$) Rotating-bending, $\sigma_a=10-30 \text{ kg/mm}^2$ $N_f=1.5 \times 10^5 \sim$ ($\sigma_w=17 \text{ kg/mm}^2$)	Film Co (310)	A	1)
	Cold drawn	Rotating-bending, $\sigma_a=15-35 \text{ kg/mm}^2$ $N_f=5 \times 10^4 \sim$ ($\sigma_w=21 \text{ kg/mm}^2$)	Film Co (310)	D	
Copper	Machined and tempered	Push pull, $\epsilon_a=0.5\%$ $N_f=170$	Film Co (310)	D	32)
	Annealed	Rotating-bending, $\sigma_a=5-3 \text{ kg/mm}^2$ $N_f > 10^7$	Film Cu (420) (331) Co (400)	A	14)
24S aluminum alloy	Quenched and aged	Rotating-bending, $\sigma_a=8.0-12.0 \text{ kg/mm}^2$ $N_f=3 \times 10^5 \sim 1.5 \times 10^6$	Parallel beam Co (420)	A	7)
		Two steps stress cycling $\sigma_a=12 \text{ and } 10 \text{ kg/mm}^2$ $N_f=5 \times 10^5 \sim 10^6$		D	
		Multi steps stress cycling $\sigma_a=10 \text{ and } 12 \text{ kg/mm}^2$ $N_f=9 \times 10^5 \sim 1.4 \times 10^6$ ($\sigma_w=9.0 \text{ kg/mm}^2$)		D	
		Rotating-bending, $\sigma_a=14.0-18.6 \text{ kg/mm}^2$ $N_f=8 \times 10^5 \sim 8 \times 10^6$ ($\sigma_w=12.7 \text{ kg/mm}^2$)	Film Co (400) (310) Cu (420) (331) (321)	A	11)14)
6-4 brass	Annealed	Rotating-bending, $\sigma_a=16.8$ $N_f=8 \times 10^5 \sim 8 \times 10^6$ ($\sigma_w=11.8 \text{ kg/mm}^2$)	Film Cu (420) (331)	A	11)14)

た損傷程度のみではなく加工硬化あるいは軟化された状態に大きく左右される。それゆえ、応力振幅に依存する加工硬化現象の半価幅への寄与は大きい問題となり、次のような各項に留意する必要がある。

3・1・1 まず、(1)式的表示に成功した例を Fig. 1_Dに示す。用いられた材料は SK6 焼なまし材であって、応力振幅 $\sigma=18.9 \sim 25.5 \text{ kg/mm}^2$ ($\sigma_w=18.0 \text{ kg/mm}^2$) の範囲で半価幅比 b/B は繰返し数比 (損傷量) n/N との間に応力振幅に依存しない1つの関係の存在する事が同図より認められる。このような関係の成立する事は、大半の材料についていいうるようであるが、た

えば Fig. 1 で $n/N=1$ において求められた半価幅以上の半価幅値を与えるような加工硬化量がある。それゆえ、応力振幅による加工硬化のために生じる半価幅変化に比して、損傷による半価幅変化が顕著であるような場合にのみ(1)式の成立が期待される。すなわち、(1)式の成立はある応力振幅以下に限られる。あるいは、応力振幅の高い場合にも、応力振幅の範囲を規定すれば、その中で(1)式的表示が可能である。

3・1・2 応力振幅が非常に高くなって、塑性疲労の領域になれば、半価幅対繰返し数曲線は必ずしも一方増加あるいは一方減少といった形にはならず、たとえば焼なまし材をひずみ範囲2%近傍で疲労させた場合、半価幅は繰返し数とともに増加するが、後半過程で減少する傾向を示すことが報告されている。Table II での、S15C 焼なまし材塑性疲労における半価幅変化様相Dはこれである。

3・1・3 応力繰返しにともなう加工硬化および軟化の現象は、予加工量あるいは熱処理による初期格子ひずみの程度と負荷される応力振幅の組み合わせに左右される。それゆえ、半価幅のこれら現象への追従性を知る必要がある。

応力振幅が変化する場合においては、応力振幅変化とともに加工硬化あるいは軟化の現象が繰返されると考えてよく、これらの現象による半価幅の変化程度が損傷量の増加に伴う半価幅変化よりも顕著な場合も考えられる。Fig. 2 に、二段二重応力繰返しの場合

Fig. 1. The b/B - $\log n/N$ relation of an annealed SK 6.

Fig. 2. b/B - n curve in a case of two-steps stress cycling for an annealed S43C steel.

の半価幅変化の一例を示す。大応力振幅より小振幅に変えた場合に、一時半価幅の減少するのが認められよう。

3・1・4 損傷量として、 $\Sigma n/N$ の Miner 式を用いて Fig. 1 では表示しているが、損傷式自体がまだ完成したものであるとはいえない。それゆえ、あくまで半価幅を主体にした損傷式を見いだす方が賢明であろう。たとえば、平均応力は、残留応力的働きをして損傷の進行を左右するといわれているし、同時に加工硬化現象に影響すると考えられるので、無平均応力下での半価幅対損傷量曲線をそのまま平均応力のある場合に適用することは危険であろう。

3・2 発生き裂様相

2章にても述べたごとく、第2期以降X線照射域内での微視あるいは巨視き裂が微視的ひずみを左右すると考えられるので、き裂の様相が半価幅と損傷をむすびつける上において重要な因子となる。それゆえ、たとえば切欠き材といったように、損傷が局部に集中する場合には、X線照射域の面積により損傷検出能力が左右されよう。また、この問題では、き裂発生に及ぼす材質自体の効果が大きく影響する。たとえば、高周波焼入れ等で表面硬化を充分した場合には、き裂が内部より発生することが報告されており、表面で測定される半価幅が損傷程度を良く表示しうるか疑がわしい。Table II の C の変化の原因は、おもにこれによると考えられる。

3・3 疲労過程中に相変態の生じるような場合

疲労過程中に相変態の生じるような材料もあり、かような異質の微視構造変化が著な場合には半価幅のみの測定でもって損傷量を決定する事は困難であるかもしれない。S45C quenched and tempered 材で、一部このような相変態による半価幅対繰返し数曲線の乱れが認められた。

3・4 X線測定条件

一般に、疲労に伴う半価幅の変化は、初期のそれに

比して3割未満程度のわずかなものであって、その測定には充分な注意が必要である。特に、繰返し前にかなり半価幅の大きい場合においては測定を正確に行なう事が困難であって損傷量による半価幅の変化が隠されてしまう恐れもある。それゆえ、測定値の安定をはかると同時に感度を上げたX線条件を探すようにくふうしなければならない。

上記のごとく、半価幅の変化観察結果を述べる場合には、材料および処理条件並びに疲労条件そしてX線測定条件を厳密に記述しておく事が望ましい。その意味で Table II には、各測定者の用いた疲労試験の条件およびX線測定法を付記してある。さらに詳細な条件の知りたい場合には各文献を参照されたい。

4 あとがき

3にも述べたごとく、X線回折線半価幅を用いて疲労損傷と余寿命の測定を安心して行なうためには、材料、処理および疲労条件の種々重なる系統的な実験研究が必要であろう。X線材料強度部門委員会第2分科会においては、このとりまとめ以後も報告のある実験結果を Table II に加え充実をはかっていく予定である。(筆責 本田和男、後藤 徹)

参考文献

- 1) Taira, S., and K. Honda, Bulletin of JSME, **4**, 230 (1961).
- 2) 平 修二, 本田和男, 日本機械学会論文集, **28**, 452 (1962).
- 3) 平 修二, 本田和男, 松木健次, 日本機械学会論文集, **28**, 1335 (1962).
- 4) 平 修二, 本田和男, 阿部武治, 材料試験, **11**, 699 (1962).
- 5) 平 修二, 本田和男, 林 建吉, 材料試験, **11**, 707 (1962).
- 6) Taira, S., and K. Honda, Proc. 5th Jap. Cong. Test. Mat., **8** (1962).
- 7) 平 修二, 本田和男, 松木健次, 日本機械学会論文集, **29**, 6 (1963).
- 8) Taira, S., K. Honda, and T. Abe, Proc. 6th Jap. Cong. Test. Mat., **10** (1963).
- 9) 平 修二, 林 建吉, 材料, **12**, 894 (1963).
- 10) 青山威恒, 並川宏彦, 材料, **13**, 999 (1964).
- 11) 本田和男, 有間淳一, 小長哲郎, 材料, **13**, 1006 (1964).
- 12) Taira, S., and K. Honda, and T. Abe, Proc. 7th Jap. Cong. Test. Mat., **26** (1964).
- 13) Taira, S., and K. Hayashi, *ibid.*, **38** (1964).
- 14) 小長哲郎, 本田和男, 材料, **14**, 998 (1965).
- 15) 平 修二, 本田和男, 阿部武治, 日本機械学会論文集, **31**, 39 (1965).
- 16) 平 修二, 本田和男, 阿部武治, 日本機械学会論文集, **31**, 891 (1965).

- 17) 神崎文晔, 縄田 望, 北川 孟, 材料, **15**, 871 (1966).
- 18) 本山盛太郎, 榎並豊一郎, 堀沢 寛, 田代達雄, 材料, **15**, 874 (1966).
- 19) 平 修二, 林 建吉, 田中啓介, 材料, **15**, 879 (1966).
- 20) Taira, S., and K. Hayashi, Bulletin of JSME, **9**, 627 (1966).
- 21) 平 修二, 林 建吉, 日本機械学会論文集, **32**, 389 (1966).
- 22) 平 修二, 林 建吉, 日本機械学会論文集, **33**, 1(1967).
- 23) 青山威恒, 並川宏彦, 材料, **16**, 26 (1967).
- 24) 平 修二, 林 建吉, 田中啓介, 材料, **16**, 32 (1967).
- 25) 寺沢正男, 吉岡靖夫, 浅見克敏, 材料, **16**, 991 (1967).
- 26) 山田敏郎, 北川 茂, 材料, **16**, 1 005 (1967).
- 27) 小長哲郎, 本田和男, 材料, **16**, 978 (1967).
- 28) 小長哲郎, 本田和男, 材料, **16**, 985 (1967).
- 29) 平 修二, 林 建吉, 田中啓介, 材料, **16**, 997 (1967).
- 30) Konaga, T., and K. Honda, Proc. 11th, Jap. Cong Mat. Res., **13** (1968).
- 31) 石黒隆義, 関口 進, 関原博道, 第7回X線材料強度に関するシンポジウム前刷, p. 98 (1968).
- 32) 蒲池一義, 中村尚武, 第7回X線材料強度に関するシンポジウム前刷, p. 109 (1968).
- 33) 蒲池一義, 吉武重明, 第7回X線材料強度に関するシンポジウム前刷, p. 113 (1968).
- 34) 蒲池一義, 石井 裕, 平人義人, 前田太郎, 星野和夫, 第7回X線材料強度に関するシンポジウム前刷, p. 116 (1968).
- 35) 辛島誠一, 小倉次夫, 第7回X線材料強度に関するシンポジウム前刷, p. 240, 246 (1968).
- 36) 平 修二, 田中啓介, 河波保雄, 第7回X線材料強度に関するシンポジウム前刷, p. 260 (1968).
- 37) 光永公一, 石橋征実, 材料, **17**, 1 002 (1968).
- 38) 大内田久, 岩崎 功, 長尾真人, 材料, **17**, 1 089(1968).
- 39) 平 修二, 田中啓介, 材料, **17**, 1 098 (1968).
- 40) 磯谷彰男, 中島耕一, 知久健夫, 材料, **17**, 1103(1968).
- 41) 林 建吉, 三枝信義, 材料, **17**, 1 107 (1968).
- 42) 寺沢正男, 吉岡靖夫, 浅見克敏, 材料, **17**, 1114 (1968).
- 43) 川田雄一, 児玉昭太郎, 栗田政則, 材料, **17**, 1 120 (1968).
- 44) 鮎谷清司, 野田文好, 材料, **17**, 1 124 (1968).
- 45) 川田雄一, 栗田政則, 児玉昭太郎, 材料, **17**, 1 129 (1968).
- 46) 平 修二, 後藤 徹, 中野善文, 材料, **17**, 1 135(1968).
- 47) Taira, S., T. Goto, and Y. Nakano, Proc. of 12th Jap. Cong. Mat. Res., **8** (1969).
- 48) Taira, S., and K. Tanaka, *ibid.*, **15** (1969).
- 49) Konaga, T., and K. Honda, *ibid.*, **24** (1969).
- 50) Terasawa, M., Y. Yoshioka, and K. Asami, *ibid.*, **30** (1969).
- 51) 平 修二, 後藤 徹, 三原 豊, 材料, **18**, 385 (1969).
- 52) 林 建吉, 鳥居太始之, 材料, **18**, 391 (1969).
- 53) 西島 敏, 第2分科会共同研究報告書 (1969).
- 54) 吉武博之, 早山 徹, 第2分科会共同研究報告書(1969).
- 55) 田代晃一, 後田順二, 第2分科会共同研究報告書(1969).