539.431.013.3 : 669.295

浅い切欠きをつけた工業用 純チタニウムの疲れ強さについて*

竹 内 勝 治**

On the Fatigue Strength of Shallow-Notched Specimens of Commercially Pure Titanium

by KATSUZI TAKEUCHI

The rotating-beam fatigue tests with comparatively shallow notches are conducted on two grades of commercially pure titanium and the fatigue strengths are measured at 10^7 cycles. The notched fatigue strength increases beyond that of unnotched specimen as it increases remarkably in sharpness of the notch until the theoretical stress concentration for the notch reaches 1.2 and decreases gradually with further notching. The notched fatigue strength for theoretical stress concentration of about 2.0 or less is higher than that of the unnotched specimen. In the case of shallow-notched specimens with theoretical stress concentration less than 1.2, an internal heating phenomenon same as in the case of unnotched specimens is observed. When those specimens are tested in water, the increase in fatigue strength is not exhibited on account of the cooling effect. It is considered that the increase in fatigue strength of shallow-notched specimens is related to the internal heating phenomenon.

1. 緒 言

工業用純チタニウムおよびその合金の切欠き疲れ強さについては二、三の実験^{(1)~(3)}があり、疲れ強さは形状係数 α_k が 1.8 以上になると α_k につれて低くなることが知られている。しかし、工業用純チタニウムについて切欠きが比較的浅い場合における疲れ強さを測定すると、疲れ強さは平滑試験片の値より高くなることがある。きわめて興味ある現象であり、また、鉄

鋼に浅い切欠きをつけた場合⁽⁴⁾と異なっている。本報は工業用純チタニウム 2 材質 (ST-40 ならびに ST-60) について α_k が 1.07 ないし 3.1 の範囲における切欠き疲れ強さを検討し、その原因を探究した。

2. 供試材ならびに実験方法

供試材は 18 または 20 mm ϕ 鍛造棒であり、700°C で焼なまし後試験に供した。各供試材の化学成分と機械的性質はそれぞれ第 1 表と第 2 表に示す。

第 1 表 供試材の化学成分

マ ー ク	材 質	化 学 成 分 %							
		N	O	C	H	Fe	Si	Mn	Ti
A	ST - 40	0.006	0.098	0.011	0.004	0.06	0.02	—	99.801
B	ST - 60	0.006	0.100	0.017	0.005	0.13	0.01	0.02	99.712
C	ST - 40	0.007	0.090	0.010	0.004	0.05	0.01	—	99.829
D	ST - 40	0.005	0.100	0.012	0.004	0.09	0.01	—	99.779

第 2 表 熱処理および機械的性質

マ ー ク	索 材 寸 法 mm	熱 処 理 °C×0.5h	機 械 的 性 質					
			耐 力 $\sigma_{0.2}$ kg/mm ²	引張強さ σ_B kg/mm ²	真破断力 σ_T kg/mm ²	伸 び ϕ %	絞 り ψ %	ブリネル かたさ H_B 10/3000/30
A	20	700	18.9	33.9	—	45	—	109
B	18	700	35.4	49.8	77.6	23	49	(H_V 167)
C	18	700	26.6	38.9	75.3	34	64	120
D	18	700	25.0	38.1	—	33	—	120

* 昭和 36 年 11 月 12 日 第 39 期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和 37 年 11 月 14 日。

** 正員、住友軽金属工業会社 (名古屋市港区千原口の割 500)。

疲れ試験は小野式回転曲げ疲れ試験機 (1700 rpm) を用いて行ない、実験は大気中ならびに水中の 2 条件下で繰返し数 10^3 ないし 2×10^7 の範囲にわたって疲れ強さを測定した。水中における疲れ試験方法は流下式であり⁽⁶⁾、流量は主として 200~400 cc/min とした。

つぎに、平滑試験片は疲れ試験を大気中に行なうと応力が高い場合に発熱する⁽¹⁾⁽⁶⁾ことが知られているが、切欠きが浅い場合も後述するように切欠き底に同様な現象が見受けられるのでその発熱温度を測定した。測定は温度鉛筆 (A. W. Faber 社製 Thermchrom) を用いて行なった。温度鉛筆による測定値はかなりあいまいものであるが、各温度の鉛筆を使いわけることによっておおよそその温度は測定できる。予備実験として長さ 70×幅 45×厚さ 10 mm の鉄板の表面の中心部に熱電対を埋込んでそれを溶接し、その表面に厚さ 1 mm の工業用純チタニウム板を被覆したサンプルを用い、工業用純チタニウム板の表面に各温度で使用する温度鉛筆を塗布した後、鉄板の裏面をガスで加熱し、加熱温度と温度鉛筆の変色の関係を測定した。その結果によると、500°C 以下では温度鉛筆の指定温度より 10 ないし 20 % 低い加熱温度から変色が

始まり、加熱温度が指定温度前後になると変色が終了し、指定温度と加熱温度の差はおおよそ 4 % 以下であった。指定温度 600°C の温度鉛筆の場合は加熱温度 520° ないし 530°C、670°C の温度鉛筆は 580° ないし 590°C で変色がそれぞれ終了し、温度鉛筆の変色した温度は指定温度より低い。500°C 以上の実験は温度を上昇させるためにガスの火力をかなり強くしたので熱電対の位置と工業用純チタニウム板の表面との間に温度差がかなり生じたのかも知れない。本実験では温度鉛筆の指定温度を発熱温度とみなすこととした。つぎに、サンプルの加熱温度が温度鉛筆の指定温度に到達した後、温度鉛筆を塗布してから変色が終了するまでの時間を測定した。所要時間は 300°C 以下の場合が 2 ないし 8 s、400°C 以上では 25 s 程度もかかる場合があった。本実験では疲れ試験前に温度鉛筆を試験片に塗布した。

平滑試験片は平行部の直径 10 mmφ の標準寸法のものであり、平行部の仕上は紙やすり 4/0 仕上とした。切欠き試験片は半円形または 60°-V 形環状切欠き ($D=12$ mmφ, $d=10$ mmφ, $t=1$ mm) であり、切欠き底の丸み ρ はそれぞれ 20, 10, 7.5, 5, 3, 2, 1 (以上半円形), 0.5 および 0.25 mm (以上 60°-V 形) とした。Neuber の計算式⁽⁷⁾によると、 α_k がそれぞれ 1.07, 1.15, 1.18, 1.25, 1.39, 1.54, 1.89, 2.4 および 3.1 に相当する切欠きである切欠き部は旋削のままとしてその形状を投影器で 50 倍または 20 倍に拡大して検査し、標準寸法と比較して ± 0.03 mm の範囲にあるもののみを試験に供した。

3. 実験結果ならびに考察

3-1 試材 A と B の大気中における切欠き疲れ強さ

S-N 曲線は第 1 図と第 2 図に示し、それより疲れ強さならびに β_k を求めると第 3 表のようになる。第 3 図は縦軸に繰返し数 10^7 回の疲れ強さ $\sigma_w'(10^7)$ をとり、横軸に α_k をとって両者間の関係を示す。また、第 4 図は縦軸に繰返し数 10^7 回の β_k の逆数をとって切欠き感度を示したものである。得られた結果について検討するとつぎのようである。

(1) 切欠き試験片の $\sigma_w'(10^7)$ は第 3 図に見られるように切欠きが浅いと平滑試験片の値より高くなる。すなわち、 α_k が 1 より大きくなると $\sigma_w'(10^7)$ はかなり急激に高くなり、 α_k が 1.1 ないし 1.2 付近で最高値に達した後しだいに低くなり、 $\alpha_k=2.0$ 付近を越えると平滑試験片の値よ

第 1 図 試材 A の S-N 曲線

第 2 図 試材 B の S-N 曲線

り低くなる。したがって、 α_k が 2 程度以下の場合、 $\beta_k(10^7)$ は 1 より小さい。以上の結果は試材 A と B、すなわち、純度の異なるものでも全く類似であった。

(2) つぎに、第 1 図をみると切欠き試験片の $S-N$ 曲線は α_k が大きくなるにつれて平滑試験片のそれよりしだいに上方に位置し、 α_k が 1.18 を越えると逆に低下し始めるが、 $\alpha_k=1.89$ では平滑試験片のそれよりまた上方に位置している。第 2 図の試材 B の場合もほぼ同様な傾向をもつが、 $\alpha_k=1.89$ 以上の試片の $S-N$ 曲線は平滑試験片のそれより下方に位置する。したがって、繰返し数 10^4 、 10^5 および 10^6 回の疲れ強さと切欠き係数も前項と同様な傾向をもつ。

(3) 平滑試験片の平行部ならびに破面を調べると発熱したことが見受けられ、また、切欠きがある場合も α_k が小さいと高応力で試験したものは切欠き底に発熱していた。発熱の程度は破面近傍における変色の

状況によって判定できるが、 250°C 以下の発熱温度では変色しない⁽⁸⁾ のでわからない。本実験では α_k が 1.39 (試材 A) または 1.25 (試材 B) 以上の各試験片の変色はなかった。以上のように試験片の破面の状況から検討すると、浅い切欠きがある場合の疲れ強さの上昇は発熱現象と関係があるらしいから、切欠き底における発熱温度を測定した結果をつぎに示す。

3.2 切欠き底の発熱温度 試材 B および C の疲れ試験結果と発熱温度はそれぞれ第 4 ないし 5 表に示し、後者の $S-N$ 曲線は第 5 図に示す。得られた結果について検討するとつぎのようである。

(1) 平滑試験片の場合、試材 B、C とも $\sigma_w'(10^7)$ よりわずかに 1 kg/mm^2 上の応力まで 670°C 以上の発熱をした。切欠き試験片の場合、 α_k が大きくなるにつれて発熱温度が低くなり、 α_k が 1.25 以上になると 65°C 以下になる。たとえば、試材 B の応力 40 kg/mm

第 3 表 疲れ強さおよび切欠き係数

マ ー ク	材 質	切欠き底の丸み ρ mm	形状係数 α_k	疲れ強さ σ_w' kg/mm ²				切 欠 き 係 数 β_k			
				10 ⁴ 回	10 ⁵ 回	10 ⁶ 回	10 ⁷ 回	10 ⁴ 回	10 ⁵ 回	10 ⁶ 回	10 ⁷ 回
A	ST-40	∞	1	21.1	20.0	20.0	20.0	1	1	1	1
		20	1.07	24.2	22.5	22.5	22.5	0.87	0.89	0.89	0.89
		10	1.15	26.0	24.0	23.0	23.0	0.81	0.83	0.87	0.87
		7.5	1.18	29.7	26.5	24.5	23.7	0.71	0.76	0.82	0.84
		5	1.25	28.3	24.8	23.6	23.5	0.75	0.81	0.85	0.85
		3	1.39	—	24.5	22.6	22.5	—	0.82	0.89	0.89
		2	1.54	—	25.1	23.4	22.6	—	0.80	0.86	0.89
		1	1.89	—	23.1	21.7	21.2	—	0.87	0.92	0.94
B	ST-60	∞	1	34.1	30.1	27.4	27.0	1	1	1	1
		20	1.07	42.3	36.8	36.0	36.0	0.81	0.82	0.76	0.75
		10	1.15	45.7	39.3	35.9	34.2	0.75	0.77	0.76	0.79
		5	1.25	45.2	35.8	33.2	32.3	0.75	0.84	0.83	0.84
		2	1.54	41.8	34.7	32.4	31.3	0.82	0.87	0.85	0.86
		1	1.89	35.9	27.8	26.3	26.0	0.95	1.08	1.04	1.04
		0.5	2.4	31.3	25.1	22.9	21.9	1.09	1.20	1.20	1.23
		0.25	3.1	29.2	21.5	18.2	16.3	1.17	1.40	1.51	1.66

第 3 図 形状係数と疲れ強さの関係

第 4 図 切欠き感度 (10⁷ 回)

の場合、 $\alpha_k=1.07$ では 300°C 以上 (500°C 以下)、 1.15 ではおよそ 65°C 、 1.25 では 65°C 以下であった。また、同じ α_k では応力が大きいほど発熱温度が高い。

(2) 以上のようなことから、疲れ強さが $\alpha_k=1.2$ 付近まで平滑試験片の値より高くなるのは発熱温度と関係があることがわかる。換言すると、 $\alpha_k=1.2$ 以上では発熱が少なくなるから疲れ強さは α_k につれて低下するが、 α_k がそれより小さい場合は試験片が発熱によって損傷を受け、その割合は α_k が小さいほど著しいのであろう。比較のために、試材Cの平滑試験片の水中における疲れ試験結果を第5図に示したが、その $\sigma_w'(10^7)$ は 27.0 kg/mm^2 であって $\alpha_k=1.18$ の大気中における値と同程度であった。すなわち、平滑試験片は発熱によって 5 kg/mm^2 ほど損傷を受けたわけである。

(3) 深い切欠きの場合に発熱しないのは応力が局部化して切欠き底に集中するので、切欠き底に発熱してもその周囲は応力が低いため熱の発生量が少ないはずであるから、発生した熱が逃げやすいのであろう⁽⁶⁾。しかし、平滑試験片の場合は熱の発生する表面積と熱が蓄積される体積が大きく疲れ強さに影響する

ことがわかっている⁽⁸⁾⁽⁹⁾から、浅い切欠きの場合はこれに近い考え方で上述の結果を説明できよう。

3.3 水中における疲れ試験結果 つぎに、大気中で発熱現象によって損傷されるものならば、水中で疲れ試験すると防ぎ得るはずである。水中においては腐食の影響が現われるのが通常であるが、工業用純チタニウムはそのような影響が現われない⁽⁶⁾。試材Dについて大気中ならびに水中における疲れ試験結果は第6表に示し、S-N 曲線は第6ないし7図に示す。第8図と第9図は α_k と $\sigma_w'(10^7)$ または $1/\beta_k(10^7)$ の関

第5図 試材CのS-N曲線

第4表 試材Bの疲れ試験結果

切欠き底の丸み ρ mm	形状係数 α_k	かたさ HRA	応力 σ kg/mm ²	破断までの繰返し数 N	発熱温度 °C
∞	1	50.6	40.0	0.12×10^4	> 670
		50.5	36.0	0.26	> 670
		51.5	32.0	3.2	> 670
		50.6	30.0	21.4	> 670
		50.7	30.0	12.6	> 670
		50.5	28.0	60.9	(測定せず)
		50.4	28.0	43.7	> 670
		49.0	27.0	> 1300.0	< 65
		52.0	26.0	> 1510.0	(測定せず)
20	1.07	50.5	42.0	1.1×10^4	≈ 500
		51.8	40.0	2.3	(測定せず)
		51.2	38.0	4.4	≈ 300
		52.7	36.0	> 1025.0	< 65
10	1.15	50.2	48.0	0.46×10^4	≈ 200
		51.4	48.0	0.50	≈ 200
		50.2	44.0	1.9	≈ 120
		50.0	40.0	5.3	≈ 65
		50.2	36.0	188.8	< 65
		50.8	34.0	907.5	< 65
5	1.25	49.9	48.0	0.65×10^4	≈ 65
		50.2	44.0	1.3	< 65
		49.9	40.0	2.0	< 65
		50.6	36.0	14.9	< 65
		50.7	34.0	125.9	< 65
		50.9	33.0	54.7	< 65
		50.0	32.0	> 1250.0	< 65

第5表 試材Cの疲れ試験結果

切欠き底の丸み ρ mm	形状係数 α_k	かたさ HRA	応力 σ kg/mm ²	破断までの繰返し数 N	発熱温度 °C
∞	1	41.7	26.0	0.40×10^4	> 670
		41.6	26.0	0.60	> 670
		43.3	24.0	0.87	> 670
		43.1	24.0	1.4	≈ 670
		41.7	23.0	4.3	> 670
		42.2	22.0	> 1136.0	< 65
7.5	1.18	41.2	34.0	0.92×10^4	> 100
		41.5	34.0	0.52	> 150
		42.0	34.0	0.96	≈ 200
		42.2	32.0	2.8	≈ 90
		41.7	32.0	4.5	< 150
		41.2	30.0	4.3	< 100
		40.6	30.0	5.3	> 75
		41.3	28.0	14.7	≈ 65
		42.6	27.0	1969.4	< 65
		41.0	26.0	> 1822.0	< 65
1.0	1.89	43.1	34.0	0.6×10^4	< 65
		44.7	34.0	0.5	< 65
		44.4	30.0	0.7	< 65
		45.7	30.0	1.2	< 65
		43.5	26.0	4.1	< 65
		44.5	26.0	3.6	< 65
		44.9	24.0	8.0	< 65
		43.7	23.0	14.4	< 65
		41.9	22.0	428.7	< 65
		42.2	21.5	32.5	< 65

第6表 疲れ強さおよび切欠き係数

試 験 条 件	切 欠 き 底 の 丸 ρ mm	形 状 係 数 α_k	疲 れ 強 さ σ_w' kg/mm ²				切 欠 き 係 数 β_k			
			10 ⁴ 回	10 ⁵ 回	10 ⁶ 回	10 ⁷ 回	10 ⁴ 回	10 ⁵ 回	10 ⁶ 回	10 ⁷ 回
大 気 中	∞	1	24.2	21.1	21.0	21.0	1	1	1	1
	10	1.15	32.5	28.2	28.0	28.0	0.75	0.75	0.75	0.75
	5	1.25	33.8	29.4	28.0	27.4	0.72	0.72	0.75	0.77
	1	1.89	31.5	24.7	22.6	21.8	0.77	0.85	0.93	0.96
	0.5	2.4	26.7	19.9	17.7	16.8	0.91	1.06	1.19	1.25
水 中	∞	1	37.7	28.4	26.1	26.0	1	1	1	1
	10	1.15	37.8	30.1	29.0	29.0	1.00	0.94	0.90	0.90
	5	1.25	37.7	29.7	28.0	27.6	1.00	0.96	0.93	0.94
	1	1.89	32.7	25.4	23.4	22.9	1.15	1.12	1.12	1.14
	0.5	2.4	25.1	20.0	18.5	18.0	1.50	1.42	1.41	1.44

係をそれぞれ示す。得られた結果について検討するとつぎのようである。

(1) α_k と大気中における $\sigma_w'(10^7)$ または $\beta_k(10^7)$ の関係は 3・1 節と全く類似であった。

(2) 水中における $\sigma_w'(10^7)$ は $\alpha_k=1.15$ 付近まで平滑試験片の値より若干高くなり、さらに α_k が大きくなると第8図に見られるようにしだいに低下するが、大気中の値よりおよそ 1 kg/mm² ほど高い。

(3) 3・1 節の実験結果では省略したが、試材AおよびBの各平滑試験片の水中における $\sigma_w'(10^7)$ はそれぞれ

第6図 試材Dの S-N 曲線 (大気中)

第7図 試材Dの S-N 曲線 (水中)

第8図 大気中と水中における
疲れ強さの比較 第9図 大気中と水中における
切欠き感度の比較 (10⁷ 回)

23.5 および 34.8 kg/mm² であった。これらの試材の大気中における $\alpha_k=1.15$ の $\sigma_w'(10^7)$ は 23.0 または 34.2 kg/mm² であるから、平滑試験片の水中における $\sigma_w'(10^7)$ より低い。(2) 項で述べたように切欠き試験片の水中における $\sigma_w'(10^7)$ は大気中より 1 kg/mm² 程度高くなるとすれば、 $\alpha_k=1.15$ の水中における $\sigma_w'(10^7)$ は平滑試験片の水中における値とほぼ同程度になろう。

(4) 前項の実験結果からみると水中における場合、 $\alpha_k=1$ ないし 1.15 の範囲では $\sigma_w'(10^7)$ がほとんど変わらないことになるが、(2) 項の場合は $\alpha_k=1.15$ のほうが平滑試験片より $\sigma_w'(10^7)$ が若干高い。平滑試験片と $\alpha_k=1.15$ とでは発熱量が異なるから、前者のほうが後者より冷却しづらいことも考えられよう。冷却効果のみが $\sigma_w'(10^7)$ に影響を及ぼす主因子でないかも知れないが、現段階においては平滑試験片の水による冷却が不十分であったとみなすのが妥当であろう。

なお、鉄鋼においては Neuber の計算式⁽⁷⁾ による α_k が 1.1 程度以下の場合、 β_k が α_k より大きくなるという実験結果⁽⁴⁾ がある。しかし、工業用純チタニウムは水中においても大気中と同様に $\beta_k(10^7)$ は α_k より小さい。

4. 結 語

工業用純チタニウム 2 材質について浅い切欠きをつけた場合における疲れ強さを検討し、つぎの結果を得た。

(1) 疲れ強さは α_k が 1 より 1.2 程度までは平滑試験片の値よりしだいに高くなるが、 α_k がそれ以上になると低下し始める。

(2) 切欠きが浅い場合は平滑試験片における時と同様に発熱現象を示した。

(3) 水中で試験すると $\alpha_k=1$ の場合の疲れ強さの低下が少ない。

(4) したがって、(1) 項の結果は発熱現象と関係がある。

文 献

- (1) J.G. Kaufman & others, WAL Rep. No.40/68-47, Contract No. DA-36-061-ORD-362, (1954).
- (2) 竹内・軽金属, No. 24 (昭 32-5), 82.
- (3) S. Hukai & K. Takeuchi, Proc. 2nd Japan Congr. Test. Mater., (1959), 22.
- (4) 河本・ほか 2 名, 材料試験, 2-3 (昭 28-1), 25.
- (5) 竹内, 軽金属, No. 16 (昭 30-8), 110.
- (6) 竹内, 軽金属, No. 19 (昭 31-5), 90.
- (7) H. Neuber, Kerbspannungslehre, (1937).
- (8) 深井・竹内, 材料試験, 9-77 (昭 35-2), 147.
- (9) 中村, 鉄道業務研究資料, 13-1 (昭 31-1), 2.

激 増 す る 材 料 と 技 術

技術は絶えず進歩し変化している。同時に新しい材料も増加を続けている。メタルの場合を例にとれば、エンジニア・アロイ誌の最新版に示されているメタルの種類は約 3 万 5 千である。9 年前の同誌には 1 万 9 千種類しか載っていない。

プラスチックの場合をみれば、1962 年における種類は前年から 17% 増加している。フェノール樹脂およびセルロース質プラスチックはプラスチック界の花形であったが、ポリ塩化ビニル、ポリエチレン、ポリスチレンに王座を奪われた。それも最近ではアセタール樹脂およびポリプロピレンに王座を譲ろうとしている。

材料は金属と非金属とに分かれているが、最近では両者を合わせた材料が増加している。たとえばジュポン社の TD ニッケルは酸化トリウムを 2% を含んでいるため非常に高い耐熱性を持っている。これに似た例は少なくない。異なった材料を含ませたり、合金としな

いで層として重ね合わせたり、膜としてかぶせたりしたものも増加している。最近ではアルミニウムにスチールを重ねた材料が特に増加している。アルコア社の Duranel はアルミニウムの片がわにステンレス鋼を接合したものであるが、超音速飛行機の部品から家具類に至るまで広い範囲の用途を持っている。

近年メタルファイバがメタル業界の注目を浴びている。これは他のファイバと同様に取扱って、フェルトや紙やきれに似たものを造ることができる。Huyck 社の製品「フェルトメタル」は鋼、銅、ニッケル、銀、高温合金、耐火性メタルから造られたメタルファイバである。

技術の種類も 10 年ないし 15 年ごとに倍加している。これは過去 300 年にわたってみられた傾向である。

[Steel, 152-19 (1963), 63]

(日本科学技術情報センター提供)