

ビード成形した オーステナイト系ステンレス鋼薄板の疲労破壊

桂井 隆*・杜澤 達美*²・加藤 一*²・高山 善匡*²

Fatigue Fracture for Bead-formed Sheet of Austenitic Stainless Steel

Takashi KATSURAI, Tatsumi TOZAWA, Hajime KATO and Yoshimasa TAKAYAMA

Synopsis : A metallic gasket for the cylinder head of the automobile engine is made of an austenitic stainless steel sheet. It commonly has a press-formed bead which seals the high pressure gas in the combustion chamber. Because the fatigue characteristics of the sheet with the bead do not correspond to those of the plain sheet without bead, it is not easy to judge the suitability of the materials for the metallic gasket. We investigated the fatigue behavior for the sheet with the bead, especially the number of crack origins and the fatigue crack propagation rate. As a result, the fatigue strength at the number of 10^6 cycles was not dependent on the mean stress but the stress amplitude. In addition, the discrepancy between the fatigue characteristics of the sheets with and without the bead resulted from fine wrinkle-like bands of plastic deformation which occurred at a part of bead profile foot during the bead-forming.

Key words : stainless steel ; fatigue ; cold rolled sheet ; plastic deformation ; gasket ; austenitic stainless steel ; bead-forming.

1. 緒言

比較的小型な線ばねや板ばねは通常、ばね用鋼を熱間あるいは冷間成形によって製品形状に成形した後に所定の熱処理が施されている。さらにばねの耐疲労性を向上させることを目的とし、ショットピーニングが施される場合もある。しかし、ステンレスばね用鋼のうち最も一般的であるオーステナイト系ステンレス鋼の場合は、冷間圧延時の加工硬化と加工誘起マルテンサイト組織の生成によってばねとしての必要な特性を与えることができるために、そのままばね材として使用することができる¹⁾。従ってばね形状が簡単なものであれば、焼入れ焼戻しなどの熱処理も不要であることから様々なばね部品材料として用いられるようになってきている。

自動車部品においても様々な薄板ばねが用いられている。特にシリンダーヘッドガスケットには、従来アスベストやグラファイトといった軟質の材料が用いられていたが近年、(1)環境対策としてのノンアスベスト化、(2)エンジン性能の向上に伴う燃焼ガス圧力の増加、(3)エンジンの軽量化に起因するエンジン剛性の低下という三つの大きな要因から、機能性、耐久性に優れた金属タイプのガスケットの使用が拡大傾向にある²⁾。

金属ガスケットはFig. 1に示すように自動車のエンジンのシリンダーヘッドとシリンダーブロックの間にあり、両者

の隙間から燃焼ガス、冷却水、潤滑油といったエンジン内を環流する流体が洩れないようにシールする部品である。この金属ガスケットは通常板厚0.2mm程度の薄いステンレス鋼板製で、プレス加工によって燃焼室の周りに円環状のビードを成形し、このビードのばねとしての反発力によって高温高圧の燃焼ガスをシールする構造である。また燃焼室内の燃焼ガス温度は1300Kを越える高温であるが、ガスケット自身は冷却水に直接触れる構造のために実際の温度は473K以下である。しかし腐食性の燃焼ガスや水に接触することから、一般に耐食性に加えて耐熱性をも兼ね備えているオーステナイト系ステンレスばね鋼が使用されている。

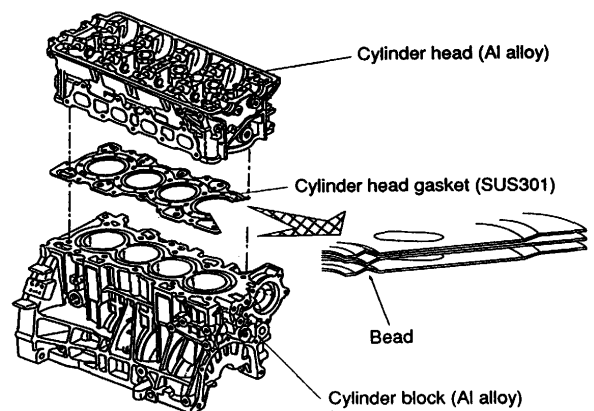


Fig. 1. Illustration of automobile engine.

平成6年4月5日受付 平成6年9月2日受理 (Received on Apr. 5, 1994; Accepted on Sep. 2, 1994)

* 宇都宮大学工学部大学院生(現:(株)本田技術研究所) (Graduate Student, Faculty of Engineering, now Honda R&D Co., Ltd., 4630 Oaza-Shimotakanezawa Hagamachi Haga-gun Tochigi-ken 321-33)

* 2 宇都宮大学工学部 (Faculty of Engineering, Utsunomiya University)

上述のようにこの金属ガスケットは、使用時に燃焼室内での爆発による繰り返し荷重を受けるためビード部の疲労強度が問題になる。

しかしながらビード成形前の圧延板材（素材）の状態での疲労試験結果とビード成形された板材（ビード材）での結果とが必ずしも同一傾向を示さず、素材となる薄板の疲労強度によってガスケット材としての適否を判断することができないのが現状である。

よって本研究ではガスケット材料として最も一般的であるオーステナイト系ステンレスばね鋼薄板を用い、ビード材の疲労破壊挙動を比較検討した。

2. 実験方法

2.1 試料

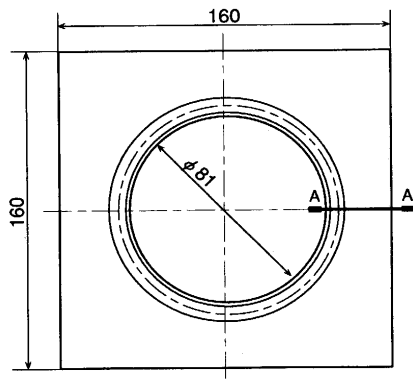
試料にはTable 1に示すオーステナイト系ステンレス鋼 SUS301冷延鋼板を用いた。また硬さの影響を調べるためTable 2に示すように調質圧延時の圧下率を20~75%まで変えることによって平均硬さ309, 403, 448, 495, 599HVの5種類の素材を作製したが、ここではJISに定められるEHをSHとEHに分けて用いている。最終板厚はいずれも0.2mmである。なお硬さはマイクロビッカース硬さ試験機で板の断面について20点の測定を行ったときの平均値を表わしている。

Table 1. Chemical composition. (mass %)

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | Cu | N |
|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|
| 0.09 | 0.60 | 0.77 | 0.037 | 0.002 | 17.15 | 6.92 | 0.18 | 0.34 | 0.026 |

Table 2. Hardness of sample.

| Designation of grade | Temper-rolling reduction (%) | Symbol of temper | Average of hardness (HV) |
|----------------------|------------------------------|------------------|--------------------------|
| SUS301-CSP | 20 | 1/2H | 309 |
| | 32 | 3/4H | 403 |
| | 46 | H | 448 |
| | 60 | SH | 495 |
| | 75 | EH | 599 |



2.2 素材の強度試験

素材は冷間圧延率が高いので、機械的性質に大きな圧延方向の異方性を示すことが考えられる³⁾。そこで圧延方向RDと垂直方向TDについて引張試験用JIS13B号試験片を切り出して引張試験を行い、ヤング率、引張強さ、0.2%耐力、破断伸びの各値を求めた。また素材の疲労強度を測定するために、垂直方向TDについて片持ち式平面曲げ疲労試験を繰返し速度30Hz一定で行った⁴⁾。

2.3 ビード材の疲労試験

ビード材の疲労強度の測定には上述の硬さの異なる5種類の素材からFig. 2に示すような160×160×0.2mm³の寸法に切り出したものに、シリンダー内径相当のφ81mmの円孔を開け、その周りに幅3.4mm、高さ0.25mmのビードをプレス成形したものを試験片として用いた。また調質記号H(448HV)の試料についてはビード成形時の残留応力による疲労強度への影響を調べるために、473K, 673K, 873Kの各温度で2hのひずみ取り焼鈍を行い試験に供した。これら硬さの異なる5種類の試験片に加えて焼鈍3条件の計8種類の試験片をそれぞれダミーヘッドとダミーブロックの間に挟み、島津製作所製サーボパルサー(EHF-ED5-40L)により50Hzで繰り返し圧縮し疲労試験を行った。なお試験片はダミーブロックにノックピンで位置決めされており周辺部は特に固定されていない。破壊の定義としては10°回の繰り返し数を基準に、それ以前に板を貫通した亀裂が発生すれば破壊、そうでなければ非破壊とした。試験中のビード高さ変化量(ギャップ変化量)は渦電流式の微小変位計で測定した。

また一部試験片についてはFig. 2に示すように、測定の場合上外側のビードとその部分にゲージ長さ0.2mmのひずみゲージを貼り、疲労試験中における半径方向の発生応力の変化を測定した。このときへたりによる塑性変形の影響を除くためにビードを39.2kNで10回繰り返し圧縮し、へたりを除去した試験片を用いた。へたりの後のビード形状をTable 3に示す。またこのときダミーヘッドと接触することによってひずみゲージが破壊されないように、ゲージの部分にスリットを入れた平板を試験片とダミーヘッドの間に挟ん

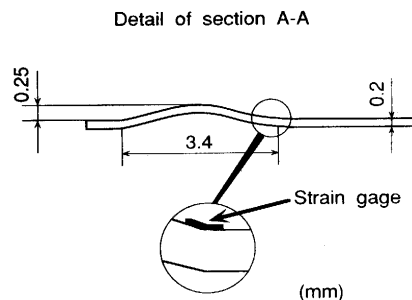


Fig. 2. Illustration of bead test piece.

Table 3. Height of bead.

| Average of hardness(HV) | Height of bead(mm) | |
|-------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| | Initial | After compression (39.2kN×10cycles) |
| 309 | 0.25 | 0.08 |
| 403 | 0.25 | 0.10 |
| 448 | 0.25 | 0.11 |
| 495 | 0.25 | 0.12 |
| 599 | 0.25 | 0.13 |

で測定を行った。ここで発生応力はビード内側と外側で同等であると見なした。さらに試験を所定のサイクルで中断し光学顕微鏡によって亀裂発生の起点の数と、各亀裂の長さを測定した。

3. 実験結果

3.1 素材の強度試験結果

素材板の引張試験結果をFig. 3に示す。図の横軸はいずれ

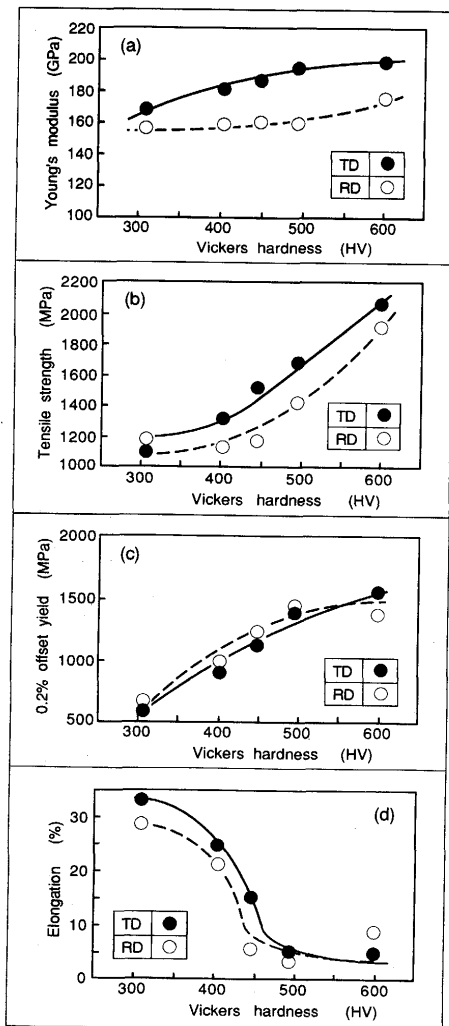


Fig. 3. Relationships between mechanical properties and hardness.
: (a) Young's modulus
(b) Tensile strength
(c) 0.2% offset yield
(d) Elongation

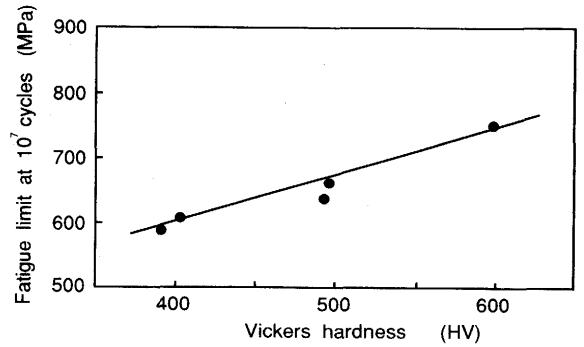


Fig. 4. Relationship between fatigue limit stress and hardness for as-rolled sheet.

Table 4. Surface roughness of SUS301 sheet.

| Surface roughness | Hardness(HV) | | |
|-------------------|--------------|------|------|
| | 448 | 495 | 599 |
| Rmax (μm) | 0.71 | 0.66 | 0.57 |
| Ra (μm) | 0.09 | 0.08 | 0.07 |

も硬さで示してある。圧延方向の異方性は大きく、0.2%耐力以外の機械的特性はすべて垂直方向TDの方が圧延方向RDより高い値を示している。特にヤング率に関してはTDとRDの差が大きく、硬さが増加するに従ってこの傾向は顕著になっている。これは圧延率が高いほど異方性をもつ加工誘起マルテンサイト量が増えることと、加工による残留応力に異方性が生じることなどが原因として考えられる³⁾。

次に垂直方向TDの平面曲げ疲労試験結果をFig. 4に示す。硬さが増加するほど10⁷回における疲労限は直線的に高くなっている。一般的に鋼の疲労強度はビッカース硬さが400HV以下では硬さに対応して増加するが、それ以上では表面、内部の微小欠陥あるいは非金属介在物の影響によってばらつきが大きくなり、明瞭な対応関係が現われなくなるとされている^{5)~8)}。今回の試験結果では600HVまで明瞭な対応関係が見られたが、これは冷間圧延率が高いためTable 4に示すように板の表面が鏡面状態に近く、疲労強度に影響を及ぼすマイクロクラックのような表面の微小欠陥⁹⁾がほとんど無いと推測される。また亀裂の発生部を観察した結果、亀裂はいずれも表面から発生しており、介在物による影響は特に見られなかった。

3.2 ビード材の疲労試験結果

ビード材の疲労試験結果をFig. 5に示す。ビード材の疲労特性はビードに発生する応力ではなくビードに与えられる変位量によって評価するのが通例である。それは実際の使用環境を考えた場合ビードにかかる負荷は、燃焼室内での爆発によって発生するシリンダーヘッドとシリンダーブロック間の口開き変位量によって一義的に決定するためである。より高出力かつ軽量薄肉のエンジンへの使用に対応するためには大きな変位量が生じてビードが追随し、耐疲労性に優れたガスケットが要求される。

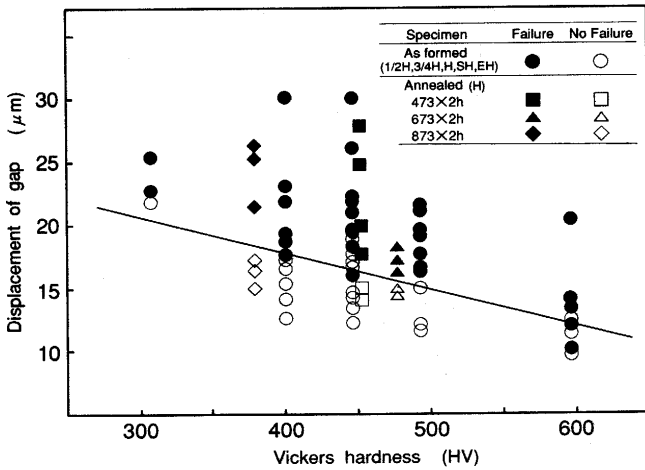


Fig. 5. Relationship between displacement of gap and hardness after annealing. (10⁶cycles)
Solid line shows the displacement of gap against failure.

これらの観点から疲労試験結果を見ると10⁶サイクル時において、ビードに割れの発生しない変位量の限界値（以下限界ギャップ変化量）は硬さと明瞭な直線関係があり、硬さが増加すると限界ギャップ変化量が小さくなっていることがわかる。即ち硬い材料ほど少ない変化量に対しても割れやすくなり、ビードの疲労特性は劣化していることがわかる。またビードすその部分は成形加工時に圧縮残留応力が発生するが、残留応力は疲労亀裂伝播挙動に大きな影響を及ぼすことが報告されて^{10)~13)}いるので調質記号H(448HV)の試料についてはビード成形後にひずみ取り焼鈍を行った。しかしながらFig. 5に示すようにこの試料についても限界ギャップ変化量はほぼ焼鈍後の硬さで整理できることから、残留応力の影響は少ないと言える。以上のことから素材では硬い材料である方が疲労強度が高いが、ビード成形を行うとその傾向が完全に逆転しているようにみえる。即ち素材での疲労強度が高い材料であっても、必ずしもガasketとしての優れた疲労特性を示すとは限らない。

3.3 ビード部分の応力測定結果

ビードすその部分に疲労試験中に発生する応力の測定結果をFig. 6に示す。図には亀裂の発生しやすい垂直方向TDにおける試験開始時の結果が示してある。ビード部の圧縮時の発生応力は常に引張応力であり、硬い材料ほど高いことがわかる。これは硬い材料ほど垂直方向TDのヤング率が高くなっていること及びTable 3に示したへたり後のビード形状の違いに起因している。一方比較的硬さの低い材料ではビードにかかる荷重が増加したときに応力がある一定値に近づく傾向を示しているが、これはビードの強度が低いために完全にへたってしまう潰れきってギャップの変化が生じていないことを意味している。

この応力測定結果を用いて疲労試験時の設定荷重条件を応力値に置き換え、最大応力と最小応力の平均である平均

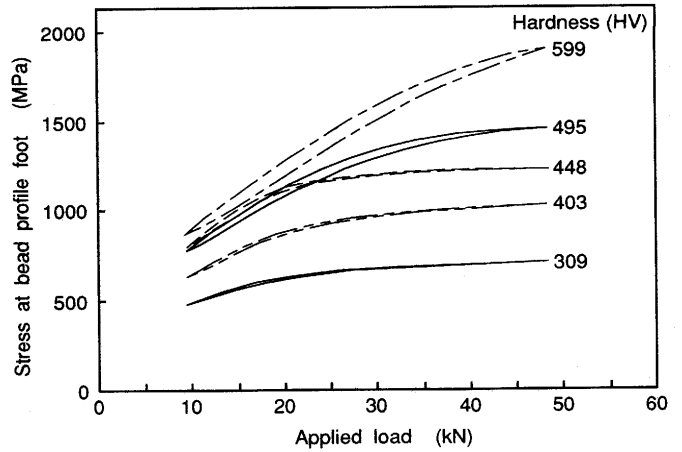


Fig. 6. Relationship between stress at bead profile foot and applied load.

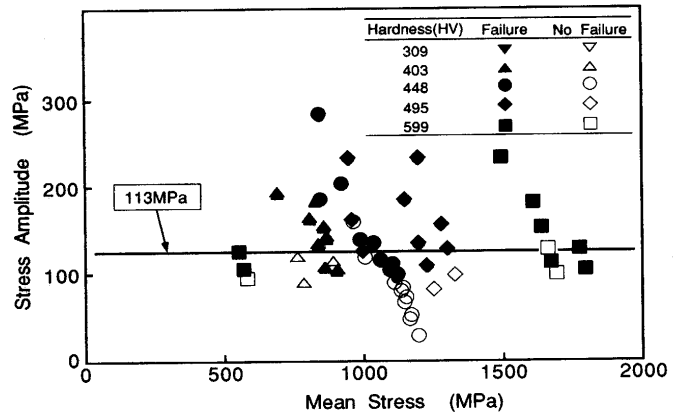


Fig. 7. Effects of stress amplitude and mean stress on fatigue strength after 10⁶cycles.

応力と、また最大応力と最小応力の差の1/2である応力振幅を求めた。Fig. 7は先にFig. 5で示したビードの疲労試験結果を平均応力と応力振幅の関係で表わしたものである。これを見ると亀裂の発生に対して5種類の材料に一貫して右上がり又は右下がりの傾向は無く、平均応力の影響は少ないことがわかる。またそのときの限界応力振幅は材料の硬さによって大きな違いは見られず、本実験の範囲ではほぼ一定の113MPaとなっている。

4. 考察

上述のようにビード材の疲労特性は素材とはかなり異なることが知られた。そこでビード材の疲労特性を亀裂の発生及び伝播の観点より検討する。

Fig. 8に亀裂の発生状態を示す。ビードの亀裂は垂直方向TDにおいて最初に発生しほぼ円周方向に進展している。またこの亀裂は板表面上に複数観察され、独立した各亀裂が合体して一つの大きな亀裂に成長していくことがわかる。発生した亀裂は単純な円周方向ではなく円中心方向に向きを変えながら進展する。それにより合体した複数の亀裂は

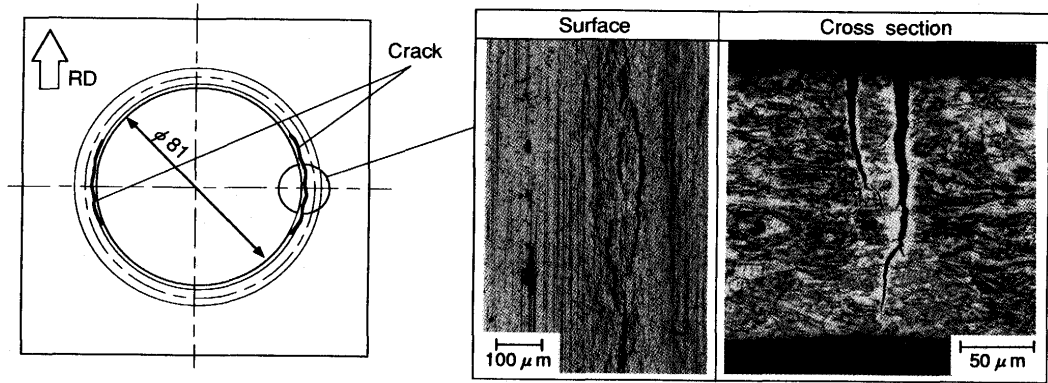


Fig. 8. View of fatigue cracks.

花びら状の形態を呈する。

板断面を見ると亀裂はすべてビード側の表面から内部に進行し、加工誘起マルテンサイト組織を横切りながら伝播しており、微細組織や内部介在物の影響¹⁴⁾は特に見られなかった。疲労強度の異方性には介在物の形状や方向性、圧延による層状組織が影響を及ぼすことが知られているが¹⁵⁾¹⁶⁾、本実験では亀裂の発生部の異方性には材料の機械的性質よりむしろ板の表面性状異方性の影響が大きいと考えられる。

亀裂はビード円周上に発生し、合体しながら進展し、花びら状の形態を呈することを先に述べたが、この花びらの数が起点の数に対応する。そこでこの起点の数と亀裂の伝播速度を測定し、亀裂の伝播形態を解析した。応力振幅条件を 10^6 サイクル時の限界応力振幅に相当する113MPaとしたときに、硬さが起点の数と亀裂伝播速度に及ぼす影響をFig. 9に示した。これを見ると硬い材料ほど亀裂の起点の数が増加しているが、個々の亀裂伝播速度は遅くなっていることがわかる。これは亀裂の起点の数が増加するに従って亀裂同士が干渉しあい、応力緩和が起きることによって亀裂伝播速度が遅くなっているためと考えられる。

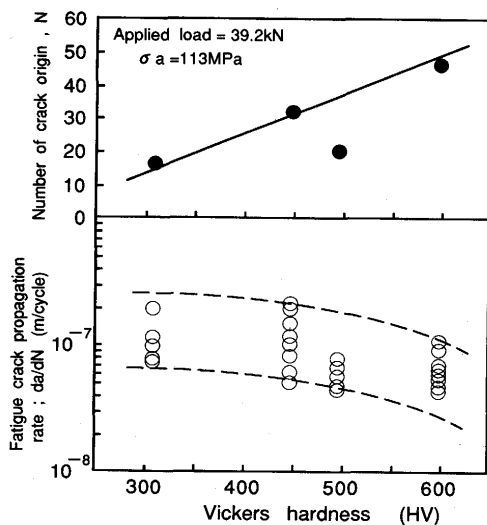


Fig. 9. Effects of fatigue crack propagation rate and number of crack origin on hardness.

このような硬さの異なる試料による亀裂の伝播形態の違いには板の表面性状の違いが大きく影響を及ぼしている。素材の場合、Table 4に示したように表面に微小欠陥は見られず例えば599HVの材料でRmaxは $0.6\mu\text{m}$ 以下であり、先に述べた400HV以上の硬い材料においても素材の疲労強度の増加の割合が低下しない原因の一つと考えられた。これに対してビード成形を行った場合Fig.10に示すようにビード成形時に、既に板表面のビードすその部分に微小なしわ状の塑性変形部が形成されていることがわかる。この部分はビード成形型に接していない自由表面であるために、加工度が増すに従って表面は粗くなる傾向がある¹⁷⁾。よって微小なしわは硬い材料ほど多く発生すると考えられる。このため表面粗さも硬さとともに増加する傾向にあり、599HV

| Illustration of bead | | |
|----------------------|------------------------------|--|
| Hardness (HV) | Surface of bead profile foot | Surface roughness Rmax (μm) |
| 309 | | 0.83 |
| 448 | | 1.11 |
| 599 | | 1.19 |

Fig. 10. Micrograph of surface of bead profile foot.

の材料ではRmaxは約 $1.2\mu\text{m}$ と素材の約2倍になっていることがわかる。亀裂はすべてこの微小なしわ部分から発生しているが、しわ自体は疲労試験中にほとんど変化は認められない。以上のことからビード成形時に発生したしわが多いとそれを起点とした亀裂が発生しやすくなると考えられる。

Fig. 5に示したビード材の疲労試験結果をしわの影響の観点から見ると次のようになる。図では焼鈍材も焼鈍後の硬さで整理できているが、しわの形態は焼鈍前から変化していないので、亀裂の発生には成形時のしわの発生形態と合わせ、材料の硬さによって異なる切り欠きに対する感受性の影響が同時に作用しているものと考えられる。

またFig. 7に示した見かけ上同一の限界応力振幅を示すことを亀裂の発生伝播挙動から考えてみると次のように理解できる。つまりFig. 9のように亀裂の数が多いと亀裂伝播速度が遅く逆に亀裂の数が少ないと亀裂伝播速度が速くなり、結果として亀裂長さの総和がほぼ等しくなるためであると考えられる。

以上のようにビード成形した場合表面のビードすその部に微小なしわ状の塑性変形部が生じ、これが疲労過程において切り欠きとして作用することが、素材とビード材の疲労特性が異なる主原因であると考えられる。

5. 結論

ビード成形したオーステナイト系ステンレス鋼の疲労破壊挙動について、ビード部の局部的発生応力と亀裂の伝播形態について解析した結果、以下のような結論を得た。

(1) 素材の疲労強度は硬さの増加とともに上昇する。

(2) ビード材の 10^6 サイクル時の疲労強度は応力振幅が大きいと減少するが、平均応力の影響は少ない。

(3) 亀裂は、ビード成形時にすその部分に発生する微小

なしわ状の塑性変形部を起点として生じる。

(4) 硬い材料ほど亀裂の起点の数が增加するが、個々の亀裂の伝播速度は遅くなる。その原因は硬い材料ほどビード成形時にしわが多く発生し、このため亀裂の起点の数が増加し、その結果各亀裂が干渉しあい応力緩和が起きることによって亀裂伝播速度が遅くなるためである。

最後に本研究を遂行するにあたり、試料の提供及び加工に御協力を頂いた住友金属工業(株)技術開発本部鉄鋼技術研究所ステンレス研究部と日本リークレス工業(株)浦和研究所技術部に深甚なる謝意を表します。

文 献

- 1) ばね(ばね技術研究会編), (1982), p.66 [丸善]
- 2) 宇田川恒和, 安井 久, 山田好男:自動車技術, 44-9 (1990), p.54
- 3) 金属材料の弾性係数(日本機械学会編), (1970), p.13, p.112 [日本機械学会]
- 4) ばね論文集(薄板ばね強度委員会編), 31 (1986)
- 5) 村上敬宣, 児玉昭太郎, 小沼静代:日本機械学会論文集(A編), 54-500 (1988), p.688
- 6) 江村秀樹, 浅見克敏:日本機械学会論文集(A編), 55-509 (1989), p.45
- 7) 大小森義洋, 北川幾次郎, 篠塚啓吾, 鳥山寿之, 松田健次, 村上敬宣:鉄と鋼, 77 (1991), p.438
- 8) 村上敬宣, 小林幹和, 牧野泰三, 鳥山寿之, 栗原義昭, 高崎惣一, 江原隆一郎:日本機械学会論文集(A編), 57-542 (1991), p.2305
- 9) 山本普康, 中村和男, 白石利幸, 菊間敏夫, 松元俊彦, 高橋勝彦:鉄と鋼, 77 (1991), p.1465
- 10) 渡辺広光, 山本晴生, 川田雄一, 竹淵秀光:日本機械学会論文集(A編), 53-486 (1987), p.206
- 11) 鳥居太始之, 本田和男, 難波浩一:日本機械学会論文集(A編), 53-487 (1987), p.436
- 12) 鳥居太始之, 本田和男, 浜野隆雄:日本機械学会論文集(A編), 54-500 (1988), p.679
- 13) 鳥居太始之, 本田和男:日本機械学会論文集(A編), 52-480 (1986), p.1793
- 14) 皮籠石紀雄, 西谷弘信, 豊広利信:日本機械学会論文集(A編), 57-544 (1991), p.2866
- 15) 鹿毛正治, 西谷弘信:日本機械学会論文集(A編), 49-445 (1983), p.1046
- 16) 西谷弘信, 鹿毛正治:材料, 38-428 (1989), p.501
- 17) 高倉章雄, 山口克彦, 北川雅彦:日本機械学会論文集(C編), 59-561 (1993), p.211