論文

超微細粒鋼のせん断加工面の特徴

鳥塚 史郎* 村松 榮次郎*

小松 隆史** 永山 真一***

Characterization of Sheared Edge of Ultrafine-Grained Steel

Shiro TORIZUKA*, Eijiro MURAMATSU*,

Takafumi KOMATSU** and Shinichi NAGAYAMA***

(Received on June 5, 2013)

The effect of microstructural parameters, particularly, ferrite grain size, on the quality of a sheared edge in piercing was examined in 0.02C ferrite steel with grain sizes of 13 μ m and 0.7 μ m, 0.002C ferrite steel with a grain size of 0.7 μ m, and 0.3C ferrite+pearlite steel. The quality, component ratio of rollover, burnished surface and fracture surface was influenced by both clearance during piercing and microstructure. The ratio of rollover decreased with a decrease in clearance, on the other hand, the ratio of the burnished surface increased with a decrease in clearance, irrespective of microstructure and grain size. The ratio of rollover was markedly influenced by grain size. The ratios of rollover in ultrafine-grained ferrite steels were very small compared with those in large-grained and ferrite+pearlite steels. This is because ultrafine-grained steels have a small work hardening ability. The ratio of the burnished surface decreased with grain refinement, owing to smaller elongation. However, the ratio of the burnished surface of 0.02C ultrafine-grained steel was as high as 40%, although the elongation was as small as 5%. The ultrafine-grained ferrite steel has a large reduction in area in spite of its small elongation. This indicates that the ratio of the burnished surface is influenced by reduction in area rather than elongation.

Key words: shearing, ultrafine grain, steel, rollover, burnished, fracture, work hardening, ferrite, pearlite, piercing, punching.

1. 緒言

超微細粒鋼は、Fig.1 に示すように、フェライト+パーライト鋼、マルテンサイト鋼やベイナイト鋼に比較して、強度一絞りバランスに優れている。そのため、超微細粒鋼の線材は、高強度の非調質冷間圧造用鋼として、高い可能性を持つことを報告してきた^{1)~4)}。

一方、超微細粒鋼が、成形性の優れた高強度薄鋼板として提供できれば、プレス加工で製造する精密部品への適用

が可能となる。しかし、プレス加工特性に関しては、サブミクロン組織をもった薄板の製造が困難なことから、報告例は少ない^{5)~15)}。精密部品のプレス加工には、素材の切断や穴抜きなどせん断加工による成形が欠かせない。せん断加工面はだれ、せん断面、破断面、かえりからなるが、結晶粒径の影響は明らかではない¹⁶⁾。

Fig. 1 Tensile strength-reduction in area balance in various microstructure steels

* 物質・材料研究機構

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1
National Institute for Materials Science
1-2-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-0047, Japan.
(鳥塚 史郎: 現 兵庫県立大学大学院
〒671-2280 兵庫県姫路市書写 2167)

** 株式会社小松精機工作所

〒392-0012 長野県諏訪市大字四賀桑原 942-2
Komatsu Seiki Kosakusho Co., Ltd.
942-2 Shiga, Suwa-City, Nagano 392-0012, Japan.

*** 株式会社特殊金属エクセル

〒355-0342 埼玉県比企郡ときがわ町大字玉川 56
Tokushu Kinzoku Excel Co., Ltd.
56 Tamagawa, Tokigawa, Hiki-gun, Saitama 355-0342, Japan.

微細粒鋼の特徴である加工硬化が小さい、絞りが大きいという特性は、せん断加工の切り口面に大きな影響を与えると考えられる。本研究では、超微細粒鋼のせん断加工特性に注目し、せん断加工面の特徴を解析した。

2. 実験方法

2.1 超微細粒材の作製

Table 1 に示す組成の 0.002C 極低炭素鋼, 0.02C 低炭素鋼および 0.3C 中炭素鋼を真空溶解により作製し、熱間鍛造によって 80×80mm の角棒とした。この角棒のうち、極低炭素鋼, 低炭素鋼に対し、温間温度域で溝ロール圧延を施した。圧延条件を Fig.2 に示すが、823K に加熱し、773K で 21 パスの圧延を行い、18×18mm まで圧延した¹⁷⁾。総減面率は 95%(真ひずみ 3)であり、組織の微細化を行った。この中で、0.02C 鋼に対し、さらに、923K で熱処理を行い、組織の粗大化を行った。なお、超微細粒材の成分を低炭素組成としたのは、セメンタイトを含まない、フェライト単相組織とするためである。また、0.3C 中炭素鋼に関しては、80×80mm 角の素材を 18×18mm 角まで熱間圧延を行い、仕上げ温度 1173K とし、フェライト+パーライト組織鋼を得られるようにした。

Table 1 Chemical composition of used steels (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	N
1	0.002	0.3	0.20	0.01	0.001	0.002
2	0.022	0.30	0.20	0.01	0.001	0.002
3	0.30	0.30	1.50	0.01	0.001	0.002

Fig. 2 Warm multi-pass caliber rolling condition to fabricate ultrafine grained steel bars and annealing condition to obtain large grain one

Fig. 3 (a)Sheet for hole piercing test, (b) schematic illustration of punch and die and (c) appearance of the hole piercing test device

2.2 せん断加工

次に、18mm 角の棒材から、放電加工および表面研削によって、幅 14mm×厚さ 1mm の薄板形状のサンプルを作製し、せん断加工用のサンプルとした(Fig.3(a)). せん断加工として、Fig.3(b)および(c)に示す金型を用いて、穴抜き加工を行った。パンチの直径は 3.00mm、ダイスの内径は 3.04, 3.12, 3.20mm で、クリアランスはそれぞれ 2.0, 6.0, 10.0%となる。これらの金型セットを引張試験機に取り付けて、穴抜き加工を行った(Fig.3(c)). クロスヘッド速度は、0.5mm/min とした。試験後のせん断加工切り口面の評価には、光学顕微鏡および SEM(キーエンス 3D-SEM VE9800)を用いた。

3. 結果および考察

3.1 素材の組織と力学的性質

Fig.4(a), (b)に 0.02C 超微細粒材(0.02C UFG-F)と粗粒材(0.02C Large-F)の組織写真を示すが、結晶粒径はそれぞれ、0.7μm, 13μm であった。セメンタイトは見いだされなかった。Fig.4(c)は、0.002C 微細粒材(0.002C UFG-F)であるが、0.02C 超微細粒材と同等な微細フェライト粒組織であった。Fig.4(d)は、0.3C 材(0.3C F+P)の組織はフェライト粒径約

Fig. 4 Microstructure of the steels for the hole piercing test, (a)ultrafine grained ferrite with 0.02C, (b)large grained ferrite with 0.02C, (c) ultrafine grained ferrite with 0.002C and (d) ferrite+pearlite with 0.3C

Fig. 5 Stress-strain curves of ultrafine grained ferrite with 0.02 and 0.002C, large grained ferrite with 0.02C and ferrite+pearlite with 0.3C

10 μ m で、第 2 相はパーライトであった。

Fig.5 にサンプルの引張試験結果を示す。0.02C 粗粒材は全伸びが 50%と大きく、引張強さは 330MPa であった。0.3C フェライト+パーライト材は、降伏応力 400MPa、引張強さ 630MPa で、大きな加工硬化をもつ。一方、0.02C 超微細粒材は下降伏応力 700MPa と粗粒材の 3 倍になったが、降伏後、一樣伸びを持たずにくびれが発生し、全伸び 5%で破断した。一方、0.002C 超微細粒材は、630MPa の引張強さと全伸びが 20%程度あった。また、それぞれの絞り(引張試験前後の断面変化)は、90%(0.02C Large-F)、80%(0.02C UFG-F)、88%(0.002C UFG-F)、71%(0.3C F+P)であった。

3.2 切り口面および抜きカスの特徴

Fig.6 は穴を切断し、切り口を SEM で観察した結果である。0.02C 粗粒材と 0.02C 超微細粒材を代表として示す。上からだれ、なめらかな表面を持つせん断面、凹凸を持つ破断面が観察される。クリアランスの減少にともない、だれが減少し、せん断面が増加、同時に破断面が減少することが観察される¹⁶⁾。Fig.7 は抜きカスの外観のデジタルマイクロスコープ像である。上から、だれ、せん断面、破断面が観察される。こちらもクリアランスの減少にともない、だれが減少し、せん断面が増加、同時に破断面が減少することが観察される。これらのことは、引張強さ 980MPa 級の高張力鋼においても同様な報告がされている¹⁸⁾⁻²⁰⁾。

Fig. 6 Cross-sections of sheared edges of the holes punched in various clearances

Fig. 7 Surfaces of the bulks punched in various clearances

3.3 結晶粒微細化とせん断面、破断面比率の関係

Fig.8 に切り口面の形状の模式図を示すが、穴のだれ、せん断面、破断面の長さの割合を評価するために、各比率を式(1)~(3)のように定義して、a, b, c の各長さを写真から計測して、各比率を求めた。

その結果を Fig.9 に示す。0.02C 粗粒材の場合、クリアランスが、10%, 6%, 2%と減少してゆくにしたがって、せん断面比率は 64%, 68%, 75%と増加し、逆に、破断面比率は、31%, 30%, 21%と減少する。一方、0.02C 微細粒材の場合、

傾向は同様であるが、せん断面比率はクリアランス 10%, 6%では、41%以下であり、粗粒材に比べて小さい。しかし、クリアランスが 2%になると、せん断面比率は 72%と同等となる。0.002C 微細粒材でも、傾向は同じである。しかし、クリアランス 10%, 6%の場合、せん断面比率は 53%程度あり、0.02C 微細粒材よりも大きい。一方、0.3C フェライト+パーライト材の場合も、同様な傾向であるが、せん断面比率は、42%, 49%, 71%と 0.02C 微細粒材に近い。

$$\text{Rollover ratio} = \frac{a}{a+b+c} \quad (1)$$

$$\text{Burnished ratio} = \frac{b}{a+b+c} \quad (2)$$

$$\text{Fracture ratio} = \frac{c}{a+b+c} \quad (3)$$

Fig. 8 Schematic drawing of a sheared edge¹⁶⁾

せん断面から破断面への変化は、塑性変形から破壊への遷移であり、破断亀裂の発生が原因である。クリアランスの減少によるせん断面比率の増加は、材料に与えられる曲げモーメントによる引張応力が小さくなり、亀裂発生の時期が遅れるためであることが知られている¹⁶⁾。クリアランスの減少に伴ってせん断面比率が増加するという現象は、結晶粒径がサブミクロンとなっても変わらなかった。

一方、クリアランスが 10%, 6%の場合、結晶粒微細化によって、せん断面比率が低下し、破断面比率が増加する。伸び、絞りの観点からこの機構を考察する。Fig.10 に材料の全伸びとせん断面比率の関係を示す。クリアランスが 10%, 6%の場合、全伸びと良い相関がある。このことは、延性の大きな材料ほど延性亀裂が発生しづらく、せん断面比率が大きくなることを意味すると思われる。

しかし、30%も全伸びがある 0.3C フェライト+パーライト材のせん断面比率が全伸び 18%の 0.002C 微細粒材よりも小さいこと、さらに、全伸びがわずか 5%の 0.02C 微細粒材でもせん断面比率が 40%程度あり、0.3C フェライト+パーライト材を少し下回る程度であることを考えると、全伸びだけでは説明できないと思われる。

引張試験において、延性亀裂が発生するのはボイドが発生するような破断直前であり、全伸びよりも絞りに関係が深いとも考えられる。絞りは引張試験片の断面変化であるから、破断真ひずみを引張試験結果から求めることができる。この破断真ひずみとせん断面比率の関係を表した図が Fig.11 である。

0.3C フェライト+パーライト材がはずれているため、絞りのみから説明できるわけではないが、超微細粒鋼のように、伸びが小さいが、絞りが大きい材料のせん断特性は、絞りが大きく影響するといえる。

Fig. 9 Effect of clearance on the ratio of rollover, burnished surface and fracture surface on sheared edges in ultrafine grained ferrite steels with 0.02C (0.02C UFG-F) and 0.002C (0.002C UFG-F), large grained ferrite steel with 0.02C (0.02C Large-F) and ferrite+pearlite steel with 0.3C (0.3C F+P)

Fig. 10 Relationship between total elongation and depth percentage of burnished surface in punched holes

Fig. 11 Relationship between true fracture strain and depth percentage of burnished surface in punched holes

クリアランスが 2%になるとせん断面比率は、組織や力学的特性によらなくなる。これは圧縮応力が亀裂の発生を抑制するファインブランキングの効果と考えられる²¹⁾。

3.4 結晶粒微細化とだれの関係

Fig.9 に示すように、だれもクリアランスの減少とともに低下してゆく。これも、従来知見と一致する点である²²⁾。

一方、結晶粒径の影響は顕著である。Fig.12 は、せん断

加工切り口面の変形、特にだれの様子を詳細に観察するために、穴抜き加工の途中止めを行い、断面を観察した結果である。クリアランス 6%であるが、結晶粒微細材のだれはわずかであることが明らかである。

クリアランスとだれの変化を詳細に解析した結果が Fig.13 である。0.02C 粗粒材のだれ比率は、クリアランス 10%~2%の低下によって、6.1%, 4.2%, 3.7%となるのに対し、

0.02C 微細粒材および 0.002C 微細粒材では、だれ比率は 1/3 程度の 1.6%, 0.93%, 0.37% および 1.6%, 0.83%, 0.59% となり、クリアランス 10% の場合でも、だれ比率は 2% 以下である。クリアランス 6%, 2% の場合、だれ比率は 1% 以下となる。したがって、穴側のだれは実質的ないといっている。

0.3C フェライト+パーライト組織の場合のだれ比率は、4.8%, 3.0%, 3.0% と 0.02C 粗粒材のだれ比率に近い。したがって、結晶粒の大きさがだれ比率に大きな影響を与えているといえる。

Fig. 12 Cut surface of punched holes which was interrupted during piercing

Fig. 13 Relationship between clearance and depth percentage of rollover in punched holes

ここで、注目している点は、加工硬化(指数)である。0.02C 粗粒材および 0.3C フェライト+パーライト材は、加工硬化の大きな材料である。Fig.5 の公称応力-公称ひずみ曲線から真応力-真ひずみ曲線を求め、加工硬化指数 n 値を決定したところ、0.26 と 0.14 であった。

一方、0.02C 微細粒材は降伏直後にネッキングがはじまる加工硬化のない材料である。また、0.002C 微細粒材も、局部伸びは大きいものの、加工硬化は少ない材料である。これらの n 値は 0.0023 および 0.033 であった。

Fig. 14 Relationship between work hardening exponent, n and depth percentage of rollover in punched holes

Fig.14 に n 値とだれ比率の関係を表わす。 n 値が大きくなるほどだれ比率が大きくなる²²⁾。加工硬化能が大きいと言うことは、パンチを押し込むときに、パンチに接する材料側の組織が加工硬化するため、変形をより進めるためには、硬化した組織の周囲の柔らかい組織が変形してしまう。微細粒材でだれが極めて少なかったのは、結晶粒の微細化によって、加工硬化能を失ったためと考えられる。パンチに接する材料側の組織は変形しても硬化しないため、その外側の組織との強度差はない。したがって、パンチ周囲の組織が集中的に変形してゆくことになる。そのため、だれが小さくなったと考えられる。微細粒材を用いれば、クリアランスが大きくても、だれの少なさが得られる可能性を示している。超微細粒材は、その加工硬化能や伸びの小ささが欠点と言われてきたが、穴抜き加工では、だれが極めて小さいという大きなメリットを与える。

3.5 結晶粒微細化と破断面の粗さの関係

破断面の粗さ、すなわちその凹凸は、その組織によって大きな影響を受ける。粗さを定量化するために、SEM の 3D 観察機能を用いて、抜きカスの破断面における $100 \times 75 \mu\text{m}$ の領域で縦横 3 カ所の高低差を測定した。Fig.15 に破断面の組織写真を示すが、0.02C 粗粒材では、破断面に大きなディンプルが観察されたが、微細粒材ではそれがなく、そのため、破断面でありながら平滑な印象を受ける。破断面の面粗さ(最大高さ R_y)の測定結果を Table 2 に示す。0.3C

フェライト+パーライト材および0.02C粗粒材の場合、 R_y は10.4 μm 、14.3 μm であったのに対し、0.02C微細粒材の場合、6.0 μm であり、面粗さは1/2程度となっていた。

破断面のディンプルが小さいのは、微細粒鋼のシャルピー試験片の延性破面でも見られることであり、これも加工硬化能が小さいことと関連した現象と思われる。

Fig. 15 Effect of grain size on roughness of fractured surfaces in punched holes observed by 3D-SEM

Table 2 Roughness, maximum height R_y of fractured surfaces in punched holes measured by 3D-SEM

Microstructure	Roughness Maximum height R_y / μm
0.3C F+P	10.4
0.02C Large-F	14.3
0.02C UFG-F	6.0

3.6 結晶粒微細化とせん断荷重

Fig.16 に穴抜き試験における荷重-変位曲線を示す。最大荷重は、引張試験における引張強さとおおよそ関係しているが、0.3C フェライト+パーライト材が最も最大荷重が大きく、最も引張強さの大きかった0.02C微細粒材および、0.3C フェライト+パーライト材と同等の引張強さの0.002C微細粒材は、穴抜き荷重がより低いことは大変興味深い。

Fig. 16 Load-displacement curves of various microstructure steels

穴抜き加工時のせん断抵抗 k は、最大荷重 P 、板厚 t 、せん断輪郭長さ l より、

$$k = \frac{P}{tl} \quad (4)$$

と表すことができる。各材料のせん断抵抗と引張強さの関係を表した結果が Fig.17 である。超微細粒材のせん断抵抗が0.3C フェライト+パーライト材に比べ、小さいことが明らかである。このことも、微細粒材は加工硬化能が小さいために、変形領域が狭く、結果的に低荷重になったことと関連すると考えられる。

Fig. 17 Relationship between tensile strength and shear resistance

4. 結 言

超微細粒鋼のせん断加工面の特徴を、穴抜き試験によって調査し、以下の結果を得た。

- 1) 超微細粒材のせん断加工面は、粗粒材やフェライト+パーライト材に比べ、だれが極めて小さい。これは超微細粒材の加工硬化能が小さいためである。超微細粒材の大きなメリットといえる。
- 2) クリアランスが小さくなるにつれて、せん断面：破断面比率において、せん断面比率が大きくなってゆく。これは組織、粒径によらず、共通の現象であった。
- 3) 超微細粒材は、粗粒材に比べせん断面比率が小さい。しかし、ほとんど伸びのない0.02C微細粒材でも、40%程度あり、さらに、18%の全伸びを持つ0.002C微細粒材は、同等な強度のフェライト+パーライト材と比べると、せん断面比率が大きかった。
- 4) せん断面比率は、伸びと絞り両方に影響を受けると考えられるが、超微細粒材のように、伸びが小さいが、絞りが大きい材料のせん断特性は、絞りが大きく影響する。
- 5) 超微細粒材は、破断面の粗さが粗粒材に比べ小さい。また、せん断抵抗も同等な引張強さのフェライト+パーライト材に比べ小さい。これらも超微細粒の加工硬化能が小さいことに起因すると考えられる。

謝 辞

本研究の一部は、平成 20 年度関東経済産業局戦略基盤技術高度化支援事業および平成 22 年度財団法人天田金属加工機械技術振興財団の支援を頂いたものである。また、研究の遂行に当たり、塚本雅敏博士、櫻井昇氏、野澤智子氏、土谷悦子氏に、多大なご協力を頂いた。

参 考 文 献

- 1) Torizuka, S., Muramatsu, E., Murty, S.V.S.N. & Nagai, K. : Scripta Materialia, **55** (2006), 751-754.
- 2) 鳥塚史郎: まてりあ, **45-6**(2006), 438-443.
- 3) Torizuka, S., Muramatsu, E. & Murty, S.V.S.N. : Materials Science Forum, **710**(2012), 19-26.
- 4) Torizuka, S., Muramatsu, E., Komatsu, T. & Nagayama, S. : Nanostructured Metals and Alloys 1 (2011), 715-746, Woodhead Publishing, Cambridge UK.
- 5) 鳥塚史郎・村松榮次郎: 平成 20 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2008), 43-44.
- 6) 小松隆史・鳥塚史郎・村松榮次郎・永山真一: 平成 20 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2008), 45-46.
- 7) 鳥塚史郎・村松榮次郎・小松隆史・永山真一: 第 59 回塑性加工連合会講演会講演論文集, (2008), 305-306.
- 8) 小松隆史・鳥塚史郎・村松榮次郎・永山真一: 第 59 回塑性加工連合会講演会講演論文集, (2008), 307-308.
- 9) 鳥塚史郎・村松榮次郎・小松隆史・永山真一: 平成 21 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2009), 143-144.
- 10) 小林仁・小松隆史・鳥塚史郎・村松榮次郎・永山真一: 平成 21 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2009), 145-146.
- 11) 小松隆史・鳥塚史郎・村松榮次郎・永山真一・小林仁: 平成 21 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2009), 147-148.
- 12) 鳥塚史郎・村松榮次郎・小松隆史・小林仁・永山真一: 第 60 回塑性加工連合会講演会講演論文集, (2009), 323-324.
- 13) 小林仁・小松隆史・鳥塚史郎・村松榮次郎・永山真一: 第 60 回塑性加工連合会講演会講演論文集, (2009), 325-326.
- 14) 小松隆史・鳥塚史郎・村松榮次郎・永山真一・小林仁: 第 60 回塑性加工連合会講演会講演論文集, (2009), 327-328.
- 15) 鳥塚史郎・村松榮次郎・小松隆史・小林仁・永山真一: 平成 24 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2012), 397-398.
- 16) 日本塑性加工学会編: せん断加工, (1992), 8-39, コロナ社.
- 17) 大森章夫・鳥塚史郎・長井寿: 鉄と鋼, **89-7**(2003), 765-772.
- 18) 村上碩哉・宮武直・笠原延修・金丸尚伸・井村隆昭: 塑性と加工, **51-593**(1990), 577-581.
- 19) 安部洋平・森謙一郎・鈴井啓生: 塑性と加工, **50-580**(2009), 414-418.
- 20) 村川正夫・中村健太・土谷敏郎・松本朗・小関伸裕: 塑性と加工, **54-628**(2013), 431-435.
- 21) 日本塑性加工学会編: せん断加工, (1992), 68-76, コロナ社.
- 22) 村川正夫: 塑性と加工, **38-440**(1997), 794-799.