

リムド鋼の熱間ねじり変形能におよぼす

非金属介在物の影響*

美馬源次郎**・猪子富久治***・石川 克己****

Effects of Nonmetallic Inclusions on the Hot Torsional Deformability of Rimmed Steels

Genjiro MIMA, Fukuji INOKO, and Katsumi ISHIKAWA

Synopsis:

The effects of nonmetallic inclusions on the hot torsional deformability were investigated on the specimens cut from the slabs of rimmed steels (12 t). The kinds and cleanliness of nonmetallic inclusions were examined in the test part of each test piece. The hot torsional tests were carried out at 1000 and 1200°C at the strain rates of 15.2, 1.67×10^{-2} and $5.81 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$.

The results obtained were as follows:

(1) The effect of MnS on the hot torsional deformability was most remarkable. The relation between the cleanliness of MnS and the number of twist to failure was changed in the form of hyperbola. When the cleanliness was more than about 0.075%, the number of twist to failure was small, and it decreased slowly with increasing cleanliness. When the cleanliness was less than 0.075%, the number of twist to failure remarkably increased by decreasing the cleanliness. The number of twist to failure did not depend on the strain rate, but on the strain. The cleanliness is so defined as to increase when the density of inclusions increases.

(2) In case of the oxide-type inclusions which were hardly deformed during the hot torsional deformation, the initiation of the cracks from them depended on their shapes and sizes, the deformability of matrix, and the strain rate.

(Received June 11, 1969)

1. 緒 言

本研究は、鉄鋼基礎共同研究会非金属介在物部会における研究の関連研究として行なつたもので、リムド鋼の熱間被圧延性に関係すると考えられる熱間ねじり変形能におよぼす非金属介在物の影響を調べることを目的とした。

鋼の熱間加工性に対する非金属介在物の影響は、赤熱脆性の問題として、熱間加工性に対する硫黄および酸素などの影響、また、それに対するマンガンの効果などについて多くの研究^{2)~9)}がなされてきた。それによつて、現在、市販のリムド鋼では、硫黄の含有量を低くし、マンガンを添加することによつて、Mn/Sの比を高め、赤熱脆性の主因であるFeSを、MnSに置換させ鋼の熱間加工性をよくしている。しかしながら、MnSの量が熱間加工性に及ぼす影響についての研究は非常に少なく森島⁹⁾が、50 kg 鋼塊で普通鋼の化学成分をもつ試料と硫黄の含有量の多い試料について、衝撃ねじり試験などを行ない、MnSの量が多くなると変形能が劣化することを報告している程度である。また、従来、この種の研究で

は、チャージの異なる鋼塊または鋼片における非金属介在物の清浄度、硫黄の含有量または、Mn/S比などによつて加工性との相関が多く論じられてきたが、実際、リムド鋼では同一鋼塊または鋼片内の偏析が顕著であつて、そのための測定値のバラツキや、諸性質の変化が問題¹⁰⁾となる。

そこで、本研究は、製鋼履歴のよく知られたリ、Al添加量のみ異なる2個の鋼片より採取した各試験片の試験部における非金属介在物の清浄度および種類などを調べ、それらと熱間加工性との関係を調べた。特にMnSの量が、熱間ねじり変形に及ぼす影響を求めるとともに、熱間ねじり変形において、ひずみ速度を変化させて、ねじり変形能および変形抵抗と、非金属介在物の種類または量との関係に対するひずみ速度の影響を調べ、さらに、変形後の非金属介在物の状態を観察することによつて、熱間ねじり変形における破断の機構に対して非金属介在物の与える影響を検討した。

* 昭和44年6月11日 受付

** 大阪大学工学部 工博

*** 大阪大学工学部

**** 大阪大学工学部大学院

2. 実験方法

供試材は、鉄鋼基礎共同研究会非金属介在物部会委員で計画、溶製されたものの中から支給された鋼片* S1' および S3' で、それらの鍋下における化学成分を Table 1 に示す。

次に、試験片の採取方法を Fig. 1 に示す。図に示すよう

Table 1. Chemical composition of steels.

Steel No	In ladle (wt%)						Al added in ladle
	C	Si	Mn	P	S	O	
S1	0.08	0.01	0.32	0.014	0.018	0.044	200g/t
S3	0.07	0.01	0.30	0.014	0.017	0.035	400g/t

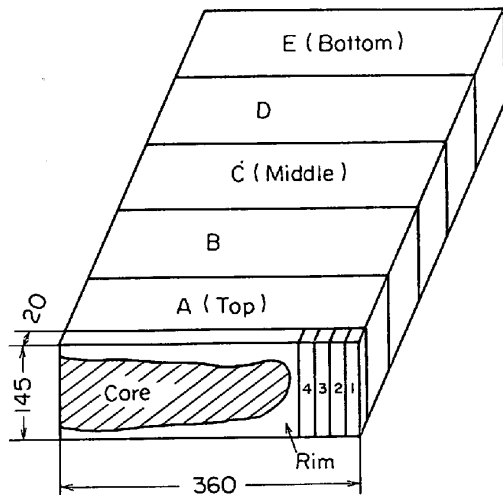


Fig. 1. Sampling of test pieces.

に、鋼片 S1' の縦割り半分の top より 10% (top) 50% (middle) および 90% (bottom) の部分から切り出した、 $20 \times 145 \times 360$ mm の 3 枚の鋼板を、それぞれ、1A, 1C および 1E とし、鋼片 S3' も同様にして、3A, 3C および 3E とすると、それらの計 6 枚の鋼板より、それぞれ、16 本の 20 mm 角の棒を採取し、1~16 の試験片 No を付した。それらの図に示した面について、サルファプリントをとるとともに試験部における非金属介在物の清浄度を学振第 3 法によって測定した。その後、Fig. 2 に示す形状寸法のねじり試験片を製

* 住友金属工業株式会社で溶製された 12 t 鋼塊およびより得た。

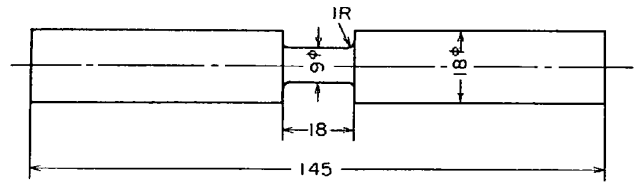


Fig. 2. Dimension of test piece.

作した。

ねじり試験は、試験温度 1000°C および 1200°C で、ひずみ速度、 15.2 sec^{-1} 、 $1.67 \times 10^{-2} \text{ sec}^{-1}$ および $5.81 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ の 3 段階について、清浄度の異なつた試験片に対して行なつた。ひずみ速度 15.2 sec^{-1} の場合は、既報¹⁾の衝撃ねじり試験機で、ひずみ速度 $1.67 \times 10^{-2} \text{ sec}^{-1}$ および $5.81 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ の場合は、市販の静ねじり試験機で行なつた。試験片の支持は、両端固定方式を用いた。試験片の加熱はカンタル炉で行ない、試験片をセットした後、約 30 min で昇温し 15 min 保持した後、アルゴン気流中で試験を行なつた。

ねじり試験前後における非金属介在物の観察および判定は、光学顕微鏡および X 線マイクロアナライザーによって行なつた。

3. 実験結果および考察

3.1 サルファプリントおよび清浄度

試料 1A, 1C, 1E, 3A, 3C および 3E において、Fig. 1 に示した面に対するサルファプリントの結果を Photo. 1 に示す。これより、試料 1A および 3A の top 部のリムとコアにおける、硫黄の偏析の差は非常に顕著

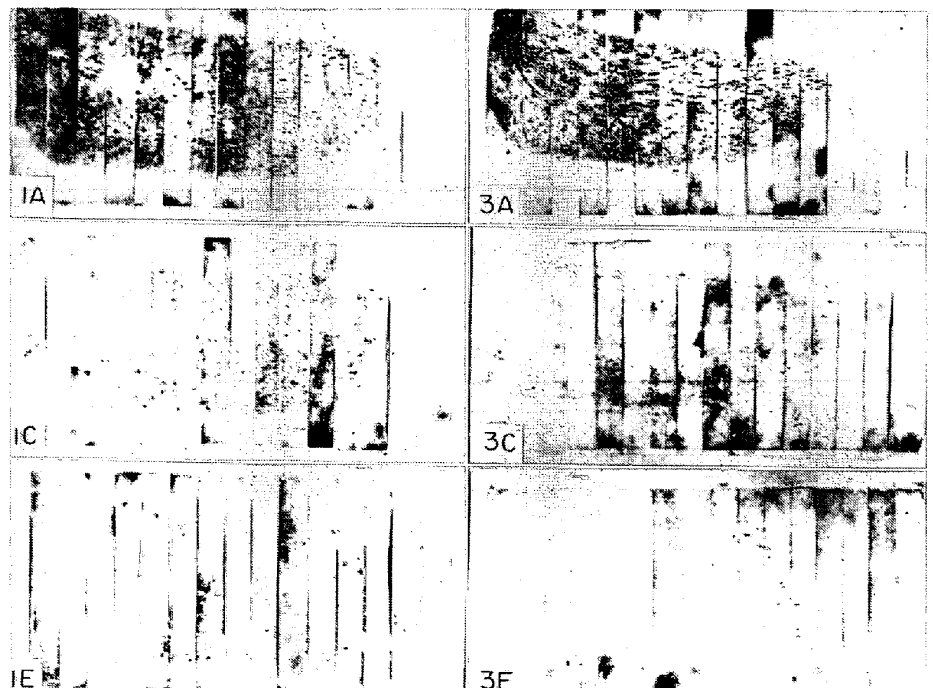


Photo. 1. Sulphur prints of specimens.

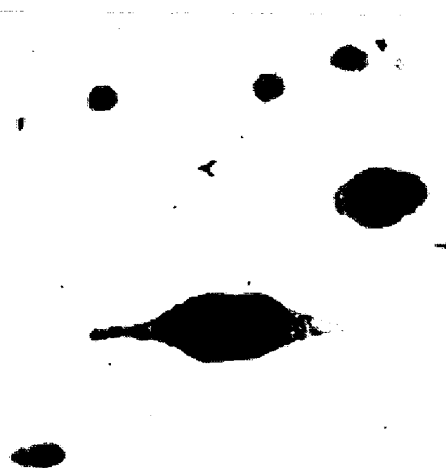


Photo. 2. Closely segregated inclusions in the core of slab 3A. $\times 400$

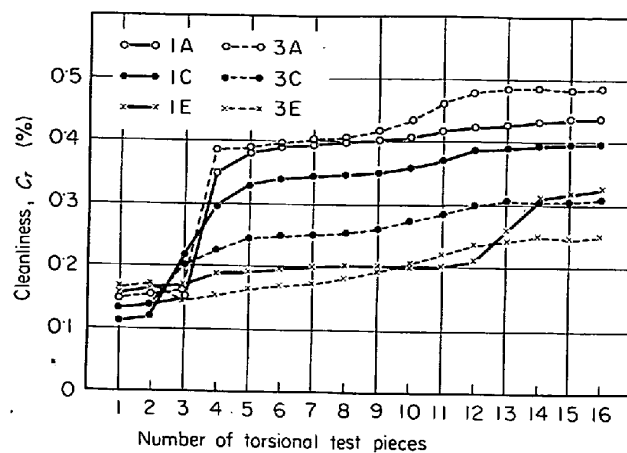


Fig. 3. Cleanliness of test pieces.

の偏析では、長いものは約 15 mm にもわたり、より濃度

の濃い硫黄の偏析部が多く分布しているのが認められ、その部分を光学顕微鏡で拡大すると、Photo.

2 に示すような種類の非金属介在物が密に分布しているのが観察された。これらを、X線マイクロアナライザーで分析した結果の一例をPhoto. 3 に示した。Photo. 3(a)

はその光学顕微鏡写真で、Photo. 3(b) は同じ場所の Fe の特性X線 (K_{α}) 像で、非金属介在物にも全体にわたって、かなりの Fe が分布していることが認められる。

Photo. 3(c) は、同様に、Mn の特性X線 (K_{α}) 像で、非金属介在物全体にわたって、Mn が密に分布しているのがわかる。Photo. 3(d) は、同じく、S の特性X線 (K_{α}) 像で、これより、この非金属介在物において中心の濃度の濃い楕円状の部分には、硫黄が認められず、その両端に伸びた濃度の淡い部分に分布していることが認められる。さらに写真法¹²⁾およびOについての特性X線像を検討した結果、非金属介在物は、濃度の濃い部分がFeを固溶したMnOで、濃度の淡い部分はFeを固溶したMnSであるとみなされる。

次に、試料 1A, 1C, 1E, 3A, 3C および 3E におけるねじり試験片の試験部に相当する部分、約 20×20 mm について清浄度を測定した結果を Fig. 3 に示す。

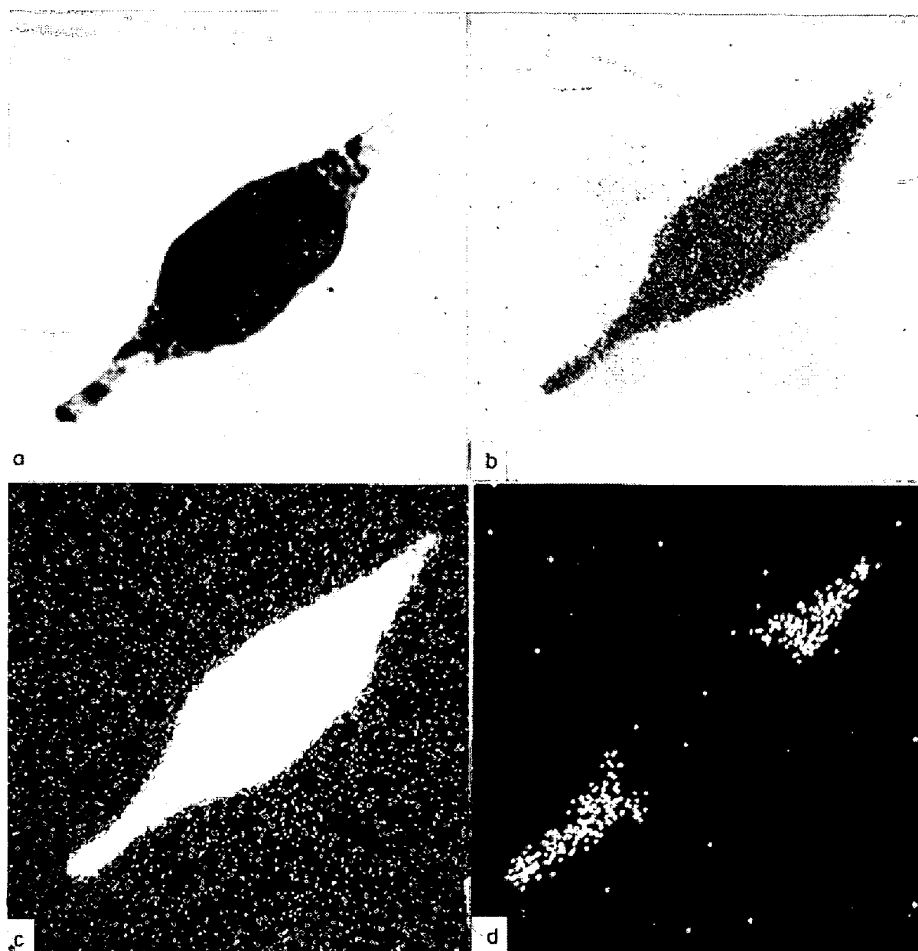


Photo. 3. Characteristic X-ray images of typical inclusion in the core. (a) optical, (b) Fe K_{α} , (c) Mn K_{α} , (d) S K_{α} . $\times 1000$ ($5/\gamma$)

であり、middle 部においても、その差は明りょうにみとめられるが、bottom 部においては、ほとんど差は認められなくなる。コア部の硫黄の偏析の多いほうから並べると、3A, 1A, 1C, 3C, 1E, 3E の順になる。特に、試料 1A および 3A の top のコア部における硫黄

横軸は Fig. 1 で示したねじり試験片 No である。リム部に相当する試験片 No 1 および No 2 においては、清浄度の値は、 $3E > 1E > 3A > 1A > 3C > 1C$ の順で小さくなっている。すなわち、bottom > top > middle の順で小さくなった。コア部における試験片 No 4~No 11 の範囲では、清浄度の値は、ほぼ、 $3A > 1A > 1C > 3C > 1E > 3E$ の順で小さくなり、top および middle の清浄度の値の増加は、Photos. 1~3 で示したように、Fe を固溶した MnO および MnS の増加によつていいる。3A のコア部における試験片 No 11 以上で清浄度が増加しているのも、同様である。1E のコア部の試験片 No 13 以上で清浄度の値が急激に増加しているのは、大型酸化物が多くなつたためである。

3.2 清浄度とねじり変形能との関係

ねじり変形能を破断までのねじり回数、 N 、で表示し、ひずみ速度、 15.2 sec^{-1} 、試験温度、 1000°C 、における清浄度、 C_T 、と N との関係を Fig. 4(a) に、また、同

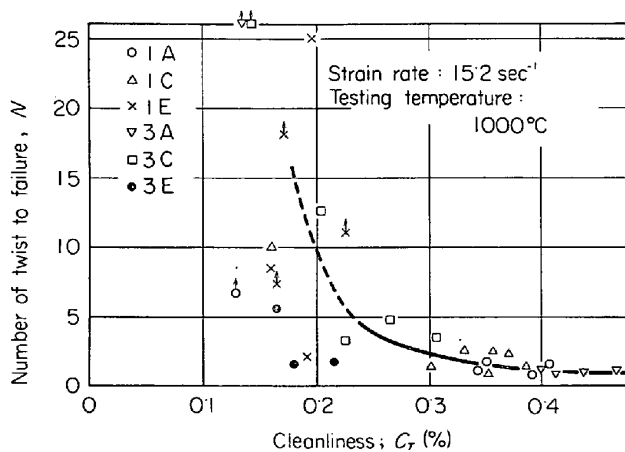


Fig. 4(a). Relation between cleanliness and the number of twist to failure.

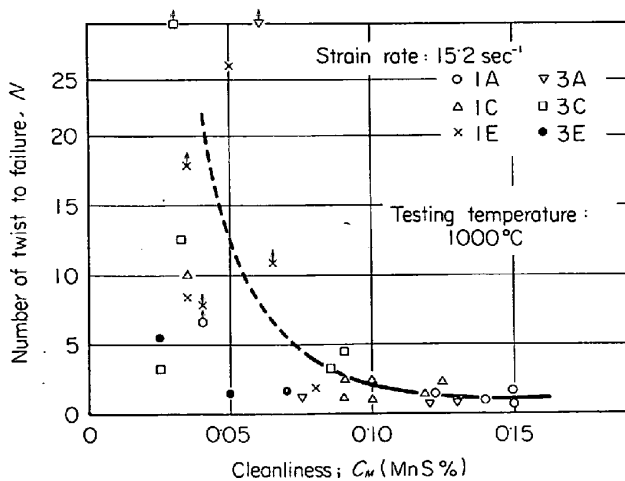


Fig. 4(b). Relation between cleanliness (MnS) and the number of twist to failure.

じ結果について、Fe を固溶した MnS の清浄度、 C_M と N を Fig. 4(b) に示した。これらより、清浄度の値が C_T で約 0.25%， C_M で約 0.075% 前後で、 N が顕著に変化することが認められる。 C_M の値がそれらの値より大きい場合は、 N の値は、小さく、 C_M の値の増加に対して漸減する傾向にあり、バラツキが小さい。この場合に、相当する試験片の採取位置は、1A、1C、3A および 3C で、すなわち、S1' および S3' 鋼片のそれぞれ top および middle のコア部であることがわかる。次に、清浄度の値が、先に示した値より小さい場合は、 N は非常に増加するものと、増加しないものに別れ、バラツキが非常に大きくなっている。この場合に相当する試験片の採取位置は、 N の値が大きい場合は、1A、3A、1C、3C のリム部であつた。 N の値が小さい場合は、1E および 3E ならびに 1C および 3C のリム部であつた。ここで、1E および 3E より採取した試験片では、大型のアルミナ系酸化物が、1C および 3C のリム部の試験片では、長く伸びた珪酸塩が観察されたことから、その他より採取した試験片の場合と破断機構が異なることは容易に推測される。したがつて、それらの場合を除いた、おもに、MnS の量(常温で)が破断機構の主因をなすとみなされる場合は、MnS の清浄度と N との関係は双曲線状に変化し、先に示した $C_M = 0.075\%$ 前後で、顕著なねじり変形能の差異がみられ、 C_M がその値より大きい場合は、 N の値が小さく、 C_M の値の増加に対して漸減し、一方 C_M がその値より小さくなると N の値は急激に増加した。 $C_M = 0.075\%$ は、先の Photo. 1 から、このサルファプリントで、硫黄の偏析が明らかに認められる下限の値を示すことがわかる。

次に、同じひずみ速度、 15.2 sec^{-1} で、試験温度を 1200°C にした場合、清浄度、 C_T 、と破断までのねじり

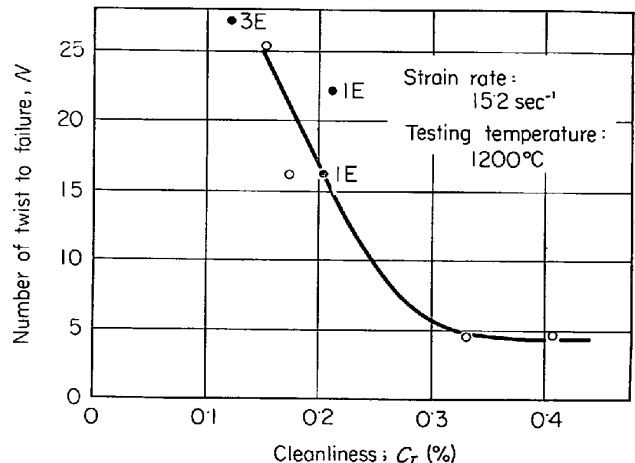


Fig. 5. Relation between cleanliness and the number of twist to failure.

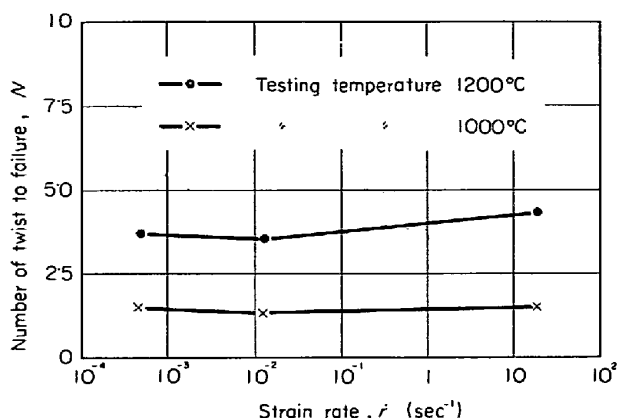


Fig. 6. Relation between strain rate and the number of twist to failure ($C_M=0.15\%$).

回数, N , との関係がどのように変化するかをみてみると, Fig. 5 に示したように 1000°C の場合と比較して, 各 C_T の値に対して, 全般に N の値が大きくなっているが, その傾向は類似していることがわかる. ただし, C_T の値が小さい場合 N の値は, 大型酸化物が存在する 1E および 3E より採取した試験片においても, 大きい値をとった. このことは, 試験温度が 1200°C になるとマトリックスの変形能が, よくなり大型酸化物の影響が少なくなつたものとみなされる.

ここで, ひずみ速度を $1.67 \times 10^{-2} \text{sec}^{-1}$ および $5.81 \times 10^{-4} \text{sec}^{-1}$ とおそくした場合, 変形中に回復および再結晶が起こったり, 非金属介在物の性状変化, また, 変形しない大型酸化物とマトリックスの界面でのハクリの減少などにより, 清浄度と破断までのねじり回数との関係がどのように変化するかを試験温度 1000°C および 1200°C について調べた結果, 大型酸化物を含む試験片の破断までのねじり回数は増加したが, その関係は, それぞれひずみ速度 15.2sec^{-1} の場合の試験温度 1000°C および 1200°C のそれとほぼ一致した. これを清浄度 $C_M=0.15\%$ の場合におけるひずみ速度と N との関係について試験温度 1000°C および 1200°C において求めた結果をみてみると, Fig. 6 に示したように, その関係は試験温度 1000°C および 1200°C とともに, ひずみ速度によつて N は, ほとんど変化しなかつた.

このことは, 非金属介在物がおもに Fe を固溶した MnS である場合のねじり破断は, ひずみ速度に依存せず, ひずみ量によつて決まるとみなされる.

3.3 清浄度と変形抵抗との関係

ねじり試験の変形抵抗を, 最大トルクで表示し, ひずみ速度が 15.2sec^{-1} で, 試験温度が 1000°C および 1200°C の場合における, 清浄度と最大トルクとの関係を Fig. 7 に示す. これより, 1000°C の場合において,

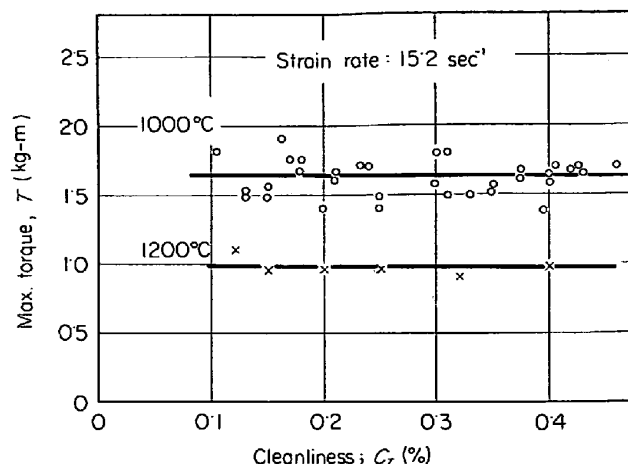


Fig. 7. Relation between cleanliness (C_T) and max. torque.

最大トルクの値にバラツキがあるが, 1000°C および 1200°C とともに, 清浄度の値の変化に対して, 最大トルクの値に変化があるとは認められない.

ここで, 試験温度が 1000°C および 1200°C において, リム部とコア部より採取した試験片の最大トルクの平均値とひずみ速度との関係を Fig. 8 に示した. コア部の最大トルクの平均値がリム部のそれより, 大きい傾向にあるが, 顕著な差は認められない. この関係を $T=A(\dot{\epsilon})^m$ で表わすと, 試験温度 1000°C および 1200°C とともに $m=0.12$ であつた. ここで, T は最大トルク, A は定数, $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度である.

3.4 ねじり変形後の非金属介在物の観察

ねじり変形後の非金属介在物の観察は, 試験がすでに熱間圧延された鋼片であるために, 受入れ状態で Fe を固溶した MnS などは変形し伸ばされていることから, ねじり変形後観察されたそれらの非金属介在物は, ねじ

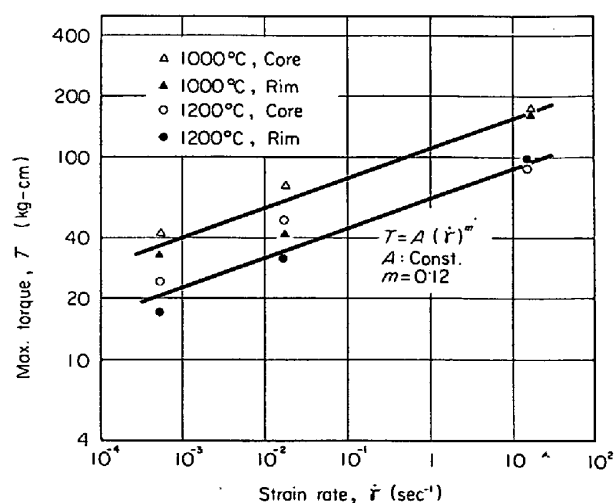


Fig. 8. Relation between strain rate and max. torque.

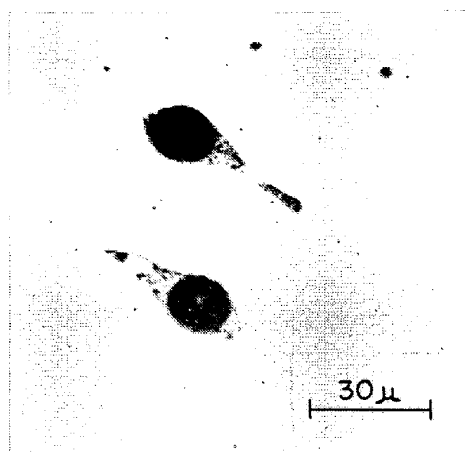


Photo. 4. Inclusions after testing. MnS and MnO in which Fe solved. $\times 400$

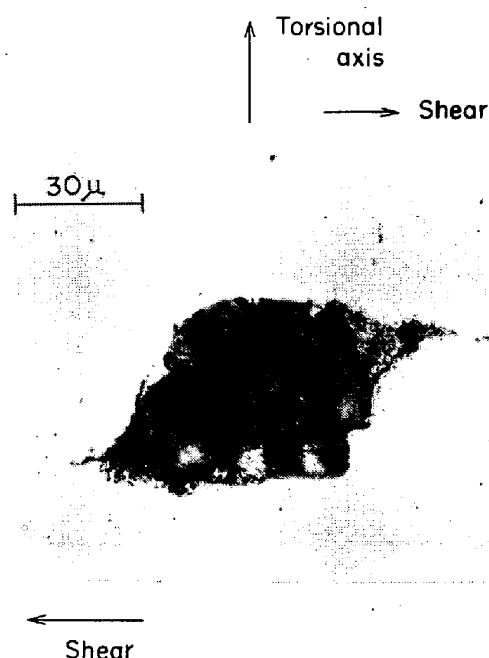


Photo. 5. Cracks observed in oxide inclusion after torsion testing. $\times 400$

り変形によつてどの程度引伸ばされたものかは判定がむずかしい。しかしながら、ねじり試験片の軸に垂直な断面で、低ひずみの中心部と高ひずみの周辺部を比較すると MnS などの変形は、明らかに周辺でより引伸ばされたものが多いことは、容易に観察される。ここで、ねじり変形後の非金属介在物の状態の例を Photo. 4 および Photo. 5 に示した。Photo. 4 に示すように、Fe を固溶した MnO は、球状でしかも MnS によつて周囲を包まれている場合が多く変形せずしかもマトリックスとの間に亀裂は観察されなかつた。Fe を固溶した MnS は引伸ばされ、ちぎれたあとが観察される。Photo. 5 は、 30μ 以上の大型酸化物でそれ自身は変形せず、マトリックスとの界面でせん断方向に亀裂が、発生しているのが

認められる。

3.5 非金属介在物による破断の機構

Fe を固溶した MnS の熱間ねじり変形に対する影響は、最も顕著で特に MnS の清浄度が 0.075% (サルファプリントで硫黄の偏析が顕著に認められる下限) 以上では、破断までのねじり回数は少ない。常温で Fe を固溶した MnS は、試験温度 1000°C および 1200°C に上げることによつて、より多く Mn に Fe が固溶するようになり、よりその溶融点を下げ、より変形しやすくなるとみなされ⁸⁾、それらが、Photo. 6 に示すように特に多く集まつた試験部の断面層では、変形の進行とともに、MnS が引伸ばされ、その断面で MnS の占める割合が多くなるとその断面の強度が低下し、その部分でより変形が進み破断に至るものとみなされる。したがつて、破断までのねじり回数はひずみ速度によらず、ひずみ量によつて決まる。

熱間ねじり変形において変形しない酸化物の影響は、その自身変形しないために、それが 30μ を越える大型で形状が複雑であり、比較的低温 (この場合 1000°C) でしかも、ひずみ速度が高い場合に、マトリックスの変形に不連続が生じ早期破断へと進みその影響が観察された。

ここで、ねじり破断に影響するものとして非金属介在物以外に、炭素、窒素および燐の偏析が問題になるが、そのうち、燐は、試験片の採取位置による含有量は約 $0.025\sim 0.01\text{wt}\%$ の間に入り、その偏析は少ない。窒素は、3A のコア部より採取した試験片で最大含有量を示すが、その値は $0.004\text{wt}\%$ より小さく、炭素含有量に

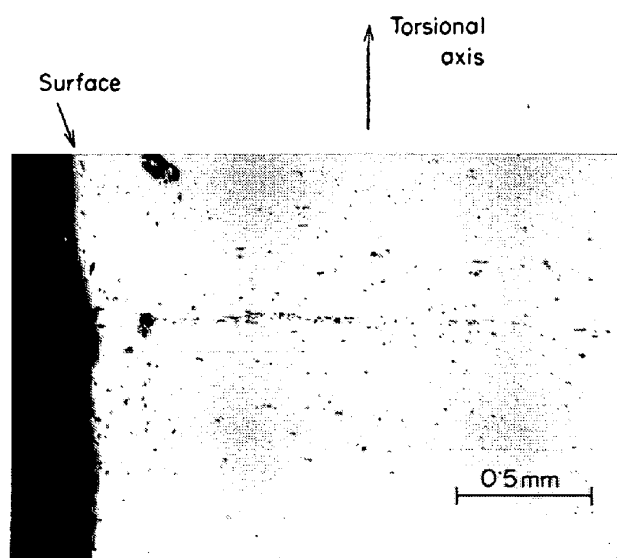


Photo. 6. Closely segregated inclusions in the cross-section. (After testing). $\times 30(^{\circ}/_{10})$

比べると $1/10$ 以下である。一方、炭素の偏析はかなり大きく、最大含有量は、3A のコア部の中心部で約 0.10 wt%，最少は、3A のリムとコアの境界部付近で 0.02 wt% であるが、1A および 3A のコア部の中心（試験片 No. の大きいところ）を除いた大部分が約 0.05~0.02 wt% の間にある。その炭素および燐がねじり破断に与える影響は、それらがマトリックスを強化することによってマトリックスの変形量に対する非金属介在物の変形量の比を高めるとみなされるが、それらの偏析は非金属介在物のそれとよく類似した傾向を示すので、Fig. 7 からわかるように、この程度の偏析では、上記高温範囲でのマトリックスの強度を変えるかどうかは判定できない。したがって、本研究においては炭素、窒素および燐の偏析は、先の清浄度と破断までのねじり回数との関係に、ほとんど影響を与えていないとみなされる。

4. 結 言

以上の結果および考察より、本研究のリムド鋼の熱間ねじり変形におよぼす非金属介在物の影響について、次のことが結論される。

Fe を固溶した MnS の熱間ねじり変形能に対する影響は最も顕著であつた。その清浄度と破断までのねじり回数との関係は、双曲線状に変化した。その清浄度の値が約 0.075% より大きい場合は、破断までのねじり回数は少なく、清浄度の値の増加とともに漸減し、これに対して、0.075% より小さい場合は、急激に増加した。そしてまた破断までのねじり回数は、ひずみ速度に依存せず、ひずみ量に依存した。このように、熱間ねじり変形で変形する非金属介在物の場合において、亀裂を発生するためには、それらがある程度密に分布することが必要である。

一方、熱間ねじり変形で変形しない酸化物系の非金属介在物は、変形中それらとマトリックスとの界面の連続

性が保持されるかどうかが重要である。その場合亀裂の発生は、それらの形状、大きさ、マトリックスの変形能およびひずみ速度に依存する。本実験では、Fe 固溶した MnO は、その形状が球状もしくは、は楕円体のものが多く大きさもほとんど 30μ 以下で、しかも、その囲りを変形しやすい Fe を固溶した MnS が包んでいる場合が多いために、それらの近傍のマトリックスの変形が連続的に進み、変形後、それらの界面で亀裂の発生は認められなかつた。一方、bottom 部より採取した試験片に認められる大型酸化物は、その形状が多角形状で、大きさが 30μ 以上にもなると、ひずみ速度が高く (15.2sec^{-1})、試験温度が低い (1000°C) 場合にのみ亀裂が生じたものが観察された。

最後に、本研究に当たり、試料の提供および加工などのご援助いただいた住友金属工業株式会社に厚く謝意を表します。

文 献

- 1) 鉄鋼基礎共同研究会非金属介在物部会資料，住友中研報告；介-3-1~6 (1966)
- 2) B. M. LARSEN: Metal and Alloys, 1 (1929/1930) p. 763
- 3) E. W. FELL: Arch. Eisenhüttenw., 5 (1931), p. 393
- 4) F. G. NORRIS: J. Iron Steel Inst., 138 (1938), p. 75
- 5) A. JOSEFSSON, T. KOENEMAN, and G. LAGERBERG: J. Iron Steel Inst., 191 (1959), p. 240
- 6) 池島，森嶋：鉄と鋼，41 (1955)，p. 17
- 7) 池島，森嶋：鉄と鋼，41 (1955)，p. 430
- 8) 森嶋：学位論文，(1961)
- 9) S. Y. OGAWA, T. B. KING, and N. J. GRANT: Trans. AIME., 224 (1962), p. 12
- 10) 小野寺：鉄と鋼，52 (1966)，p. 1685
- 11) 美馬，猪子：日本金属学会誌，32 (1968)，p. 453
- 12) 日本学術振興会 製鋼第 19 委員会編：鋼中の非金属介在物写真集