

# 低炭素鋼の冷間圧延・回復過程における硬度と磁気特性変化

伊藤 史也, 武川 幸平, 村上 武, 菊池 弘昭  
(岩手大学)

Magnetic properties and hardness changes on cold rolled low carbon steel under recovery process  
Fumiya Ito, Kohei Takekawa, Takeshi Murakami and Hiroaki Kikuchi  
(Iwate University)

## 1. 緒言

橋梁・高速道路などの社会基盤構造物の経年劣化が問題となっている。構造物の安全性・信頼性の確保のために、高精度、信頼性の高い非破壊検査技術の確立が求められている。構造物の多くには強磁性材料である鋼が使用されており、材料の内部組織変化が磁気特性や硬度などの機械特性に影響を与えることから、磁気的非破壊評価が有効であると考えられる<sup>1)</sup>。磁気特性と機械特性の相関については多くの検討がなされているが<sup>2), 3)</sup>、その定量的な対応関係については不明な点もある。そこで本研究では、磁気的非破壊評価を実用化する上で重要な磁気特性と硬度との定量的関係について明らかにするため、低炭素鋼(S15C)を試料として用い、それらを冷間圧延および熱処理することで内部組織を変化させ、磁気特性と硬度を評価した。

## 2. 実験方法

試料には低炭素鋼 S15C を用いた。はじめ試料に圧延率 0, 5, 10, 40% で冷間圧延を施し、それぞれの試料に対し熱処理前後で試料の組織の分析と磁気特性の評価、及び硬度測定を行った。試料の内部組織観察には EBSD を用いた。磁気特性の評価は磁気ヒステリシスループの計測から保磁力を求め、測定時には励磁方向を変化させた。圧延方向を 0° とし 0~180° の範囲で変化させた。熱処理温度は 600°C、熱処理時間は 1, 3, 5, 10, 15, 25, 40 分とした。硬度測定はビッカース硬さ試験を用いた。

## 3. 実験結果

Fig. 1 は熱処理前の試料について保磁力とビッカース硬度を圧延率に対してプロットしたグラフである。圧延率の増加に伴って保磁力と硬度は増加する。一般に冷間圧延により格子欠陥である転位が増加する。この転位が磁壁のピンニングサイトとして働くので保磁力は増加する。また、増加した転位は互いに相互作用し合い、転位同士の移動を妨げるので、硬度は増加する。このことから保磁力と硬度は良い相関を示す。Fig. 2 は圧延率 40% の試料において、真空中 600°C で熱処理を施した時の各熱処理時間における保磁力とビッカース硬度の変化を示した図である。保磁力は熱処理時間初期に大幅に低下している。一方、硬度は 20 分程度までの変化は小さく、保磁力と硬度の挙動は異なっていることが確認される。圧延した試料は冷間圧延後、格子欠陥の蓄積により自由エネルギーの高い状態にある。これを原子の拡散が十分に起こる高温で熱処理をすると、自由エネルギーを減少させるように転位の消滅や再配列、すなわち、回復が起こる。回復過程における転位の消滅や再配列は保磁力の低下に寄与するが、硬度に対しては影響を及ぼさず、ここでは、保磁力と硬度とは相関を持たない。

### 参考文献

- 1) H. Krommüller, *Int. J. Nondestruct. Testing*, Vol. 3, p. 315, 1972.
- 2) D. C. Jiles, *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, Chapman & Hail, London UK, 1991.
- 3) S. Takahashi, J. Echigoya, and Z. Motoki, *J. Appl. Phys.*, Vol. 87, p. 805, 2000.

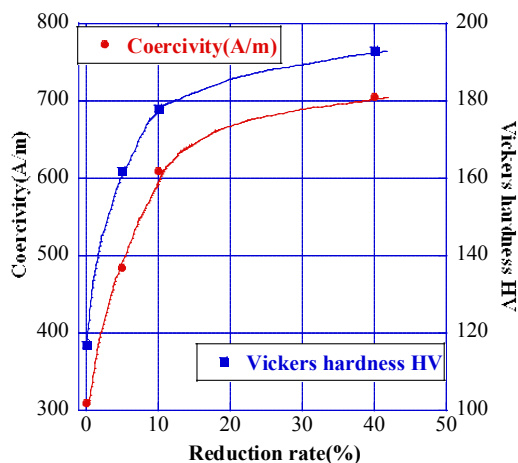


Fig.1 Coercivity and Vickers hardness of each reduction rate on as-rolled specimen.

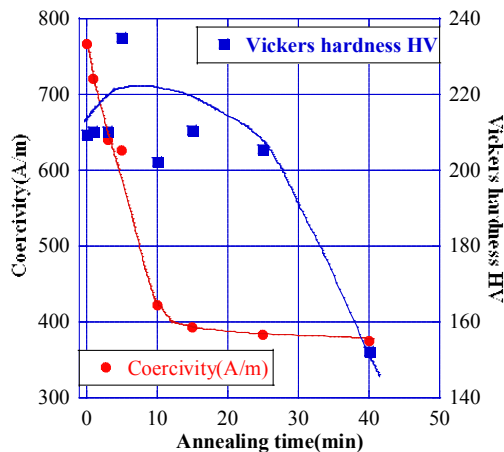


Fig.2 Coercivity and Vickers hardness of each annealing time on 40% rolled specimen.

## Nano-Granular In Gap Magnetic Sensor を使用した厚さ測定

小澤哲也、増子英明、渥美紘一、薮上信、戸塚巡\*、小山恵史\*、早坂淳一\*\*、若生直樹\*\*、荒井賢一\*\*  
(東北学院大学、\*大同特殊鋼、\*\*電磁材料研究所)

### Measurement of Thickness Using Nano-Granular In Gap Magnetic Sensor

T. Ozawa, H. Mashiko, K. Atsumi, S. Yabukami, J. Totsuka\*, S. Koyama\*, J. Hayasaka\*\*, N. Wako\*\*, K.I. Arai\*\*  
(Tohoku Gakuin University, \*Daido Steel Co., Ltd, \*\*Research Institute for Electromagnetic Materials)

#### はじめに

渦電流探傷は渦電流によって生じる磁束を計測する方法を原理としているため、探傷する表面の電気伝導率の影響を受ける。アルミニウムの表面にきれいな塗装膜を形成する方法としてアルマイト処理がある。アルマイト自体は酸化物であり渦電流が流れないため、深部にある電気伝導性がよい部分にて渦電流が生じることになる。そこで渦電流探傷を利用することで、アルマイトの膜厚測定に成功したことを報告する。

#### 実験方法

磁気センサとしては Nano-Granular In Gap Magnetic Sensor (以後、略して GIGS<sup>1)</sup>)を使用した。GIGS はナノグラニューラー TMR フィルムをヨーク対で挟み込んだ構造の磁界センサであり、センサ幅が数十  $\mu\text{m}$  程度で高い空間分解能が得られるものである。GIGS は、磁界を加えると抵抗が減少する特性であり、15 Oe を加えたときの変化率は  $70 \Omega/\text{Oe}$  である。装置の構成を Fig. 1 に示す。バイアスコイルは GIGS 磁界センサに 15 Oe の直流バイアス磁界を加えるために使用する。渦電流探傷面に交流磁界を加えるために使用する励磁コイルは直径 2 mm のパーマロイに 30 ターンのコイルを巻きつけたものである。励磁コイルは、アルマイト表面に対して垂直に励磁する。GIGS で検出された磁界強度は、ロックインアンプを用いて直列接続された抵抗における電圧降下の値の変化として計測する。

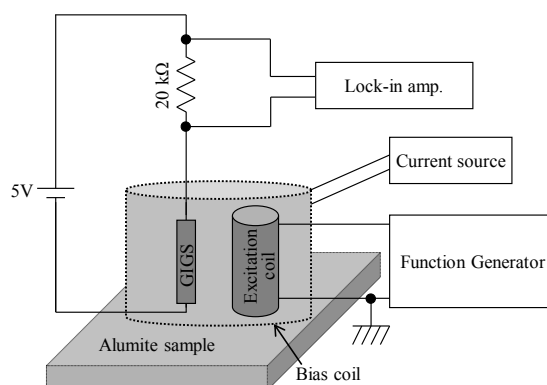


Fig. 1 Measurement configuration

#### 実験結果

Fig. 2 は、サンプルとして用いたアルマイト処理済みのアルミニウム板である。電界処理時間によって塗装の濃度が変わることがわかる。Fig. 3 は、周波数 1 kHz の励磁磁界をアルマイト処理済みのアルミニウム板に加えたとき、GIGS に直列接続されている抵抗で生じる電圧降下の交流成分の実効値である。膜厚の変化に対して電圧降下が変わっていることがわかり、アルマイトの膜厚測定方法として利用できることがわかる。

#### 参考文献

- 1) M. Naoe et al., J. Magn. Soc. Jpn., 35, 11-16 (2011)

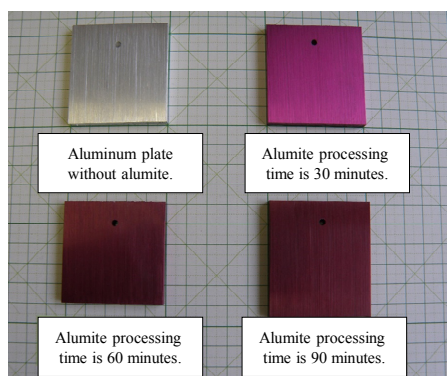


Fig. 2 Photograph of Alumite samples

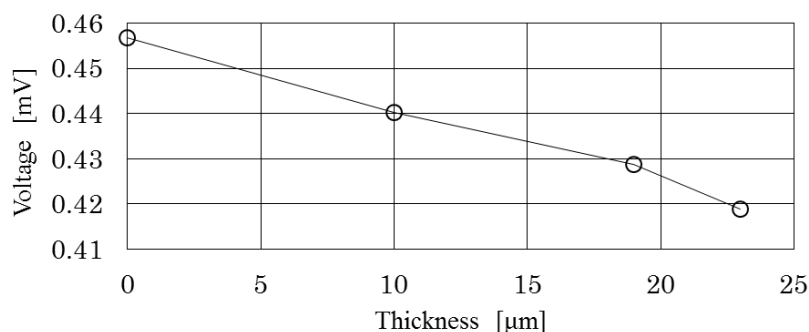


Fig. 3 Relationship between Alumite thickness and detected voltage

## 保温材下配管外面欠陥の磁氣的検査装置の開発

原 拓也, 春日 基志, 堺 健司, 紀和 利彦, 塚田 啓二  
(岡山大学)

Development of a magnetic inspection apparatus for detection of corrosion under insulation.

Takuya Hara, Motoshi Kasuga, Kenji Sakai, Toshihiko Kiwa, and Keiji Tsukada (Okayama University)

### はじめに

現在, 日本の石油コンビナートで用いられている保温材被覆配管は, 50 年以上使用されているものが多く, 老朽から漏洩事故が年々増加している. 配管の漏洩は, 工場の運用に深刻な影響を与えるため定期的な検査を行い, 欠陥の早期発見が必要である. 一般的な配管の非破壊検査は超音波や磁気を用いた方法が確立されているが, リフトオフや磁性体である外装板などの影響から, 保温材下配管に対する非破壊検査法はまだ確立されていない. 破壊検査は, 外装板や保温材を剥ぎ取る必要があり, 多くのコストや時間, また破壊による疲労などが懸念されるため, 定期的な検査には不向きである. そこで, 本研究では保温材下配管を対象とした, パルスリモートフィールド探傷法での非破壊検査装置の開発を行った.

### 実験方法

本研究で設計した実験システムについて説明する. 図 1 はシステムの構成図である. 本システムは, リモートフィールド探傷法とパルス渦電流法を組み合わせたパルスリモートフィールド探傷法を基に設計した. 本システムの構成要素は, MR センサ, 印加コイル, 発振器, データ取得システムである. 本システムは, 非破壊かつ配管使用中の欠陥検出を可能にするため, 印加コイル・検出素子共に配管外部に設置している点が通常のリモートフィールド探傷法とは異なっている. 検出方法は, パルス渦電流法に類似しているが, 印加コイルを用いて試験サンプルに交流磁場を印加し, 伝播して発生する渦電流に伴って変化する磁場の平行成分を計測し欠陥検出を行っている. 試験サンプルは, 欠陥のない正常管, 中心に腐食欠陥を想定した減肉 50%の人工スリット欠陥を有するパイプ A, 減肉 25%を有するパイプ B の三種類である. 今回は, 中央前後 20mm 間隔で 11 点分の測定を行い, 本システムでの欠陥検出が可能であることを検証した.

### 実験結果

初めに, 保温材下配管の非破壊検査が困難な原因の 1 つである外装板による影響を調べるために, 外装板を取り外し, 保温材のみの状態および外装板をつけた状態での実験を行った. パルス渦電流法では, 検査対象内部の情報が波形の減衰部分に現れた. 図 2 は, 欠陥上での外装板の影響を比較した結果である. 検出信号は, 減衰率の変化を見やすくするため, ピーク値での規格化を行った. 図 2 の検出信号から, 正常管と欠陥パイプとの間に保温材のみ・外装板込みで減衰率に違いがあることが分かる. 以上から外装板がある場合においても, 欠陥検出が可能であることが分かった. また, 正常管と欠陥パイプの検出信号を 3D 等高線にマッピングしたデータも作成し, 欠陥パイプと正常管において違いが出ていることも確認した. 以上から, 設計した本実験システムは, 保温材下配管における欠陥検出が可能であることが分かった.

### 参考文献

Keiji Tsukada and Toshihiko Kiwa, "Magnetic property mapping system for analyzing three-dimensional magnetic components," Review of Scientific Instrument, vol.77, No.6, pp. 063703-063703-6, Jun 2006

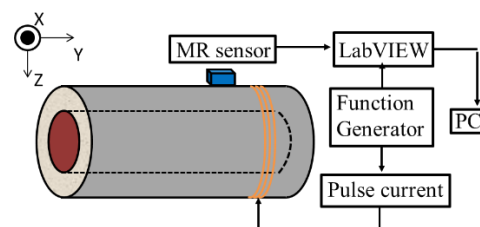
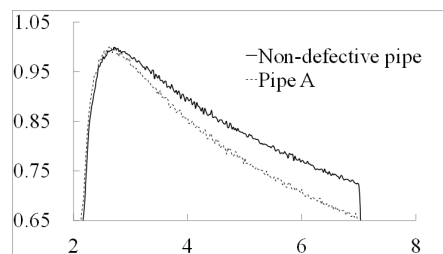
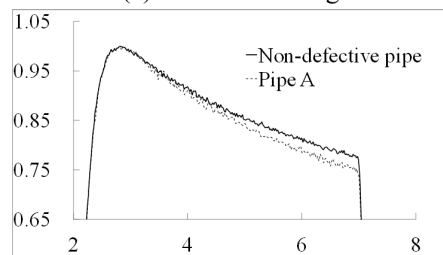


Fig.1 Measuring system



(a) Without cladding



(b) Including cladding

Fig.2 Detection signal at the defective point

## TMR センサを用いた裏面欠陥の漏洩磁束探傷検査

志賀 啓秀、塚本 有哉、堺 健司、紀和 利彦、西川 卓男\*、塚田 啓二  
(岡山大学、\*コニカミノルタ(株))

Detection of back-side defect by magnetic flux leakage method using TMR sensor  
K.Shiga, Y.Tsukamoto, K.Sakai, T.Kiwa, T.Nishikawa\*, K.Tsukada  
(Okayama Univ., \*Konica Minolta, Inc.)

### 研究背景

発電所や各種プラントなどの構造物で使用されている鋼板は内部を液体やガスといった流体が通るため裏面に欠陥が生じやすいため、欠陥を早期に検出する非破壊検査が必要である。放射線透過検査や超音波探傷検査がよく用いられているが、熟練者が必要であったり安全性の確保が難しかったりといった問題がある。そこで本研究では次世代の凡用高感度磁気センサとして期待されているトンネル型磁気抵抗素子<sup>1)</sup>を用いて漏洩磁束探傷検査法により鋼板の裏面欠陥を正確かつ迅速に検出する非破壊検査装置の開発を行った。

### 装置構成

開発した非破壊検査装置は Fig.1 のように構成されており、発振器から発生させた交流信号を交流電流源で増幅させ、励起コイルに流す。コイルに巻かれた鉄心と測定試料である鋼板に磁気回路が形成される。測定試料の内部や裏面に欠陥が存在すると磁束が迂回するため空气中に迂回した磁束を TMR センサで検出し、ロックインアンプで位相検波することで欠陥を検出する。

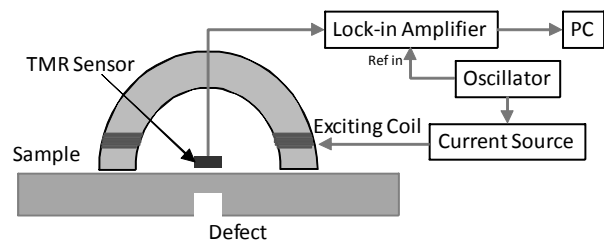


Fig.1 Measurement system of back-side

### 測定結果

試料には厚さ 8.6 mm の鋼板の裏面の中心に円形の欠陥を入れたものを用いており、欠陥径  $\Phi$  と欠陥深さ  $d$  が異なる試料を欠陥周辺  $20 \times 20 \text{ mm}^2$  を走査した。解析方法にはロックインアンプによって取得された磁場強度  $B$  と位相  $\theta$  を式(1)に代入することで位相成分を考慮した磁場強度  $B'$  が得られ  $\lambda=10^\circ, 20^\circ, \dots, 180^\circ$  と変化させることで欠陥検出に最適な画像化を行った<sup>2)</sup>。

$$B' = B \sin(\theta + \lambda) \quad (1)$$

裏面欠陥形状  $\Phi=6 \text{ mm}$ ,  $d=6 \text{ mm}$  印加周波数 10 Hz のときの磁場強度  $B$  のみのマッピング図、位相を考慮した磁場強度  $B'$  ( $\lambda=130^\circ$ ) のマッピング図を Fig.2 に示す。比較すると磁場強度のみのマッピング図より位相を考慮した図の方が欠陥が明瞭になった。次に周波数別による  $\Phi=6 \text{ mm}$ ,  $d=4 \text{ mm}$  のときのマッピング図を Fig.3 に示す。印加周波数 5 Hz の方が 50 Hz より欠陥が明瞭的になっていることがわかる。よって最適な周波数と  $\lambda$  を選ぶことで裏面欠陥を検出することができた。

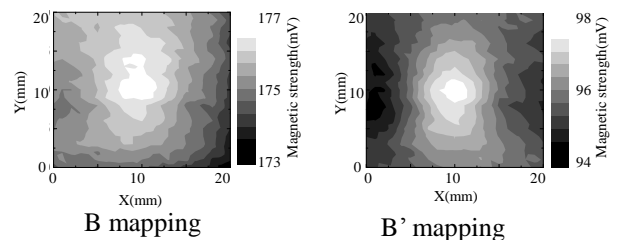


Fig.2 Two dimensional mapping of B and B'

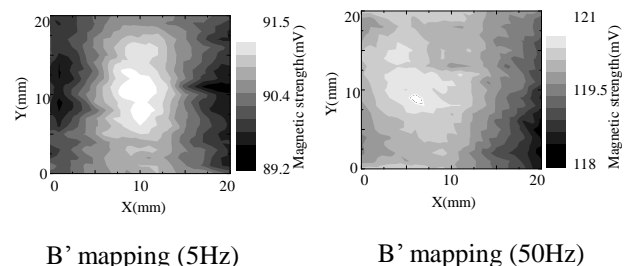


Fig.3 Two dimensional mapping at frequency of 5 Hz and 50 Hz

### 参考文献

- 1) 西川卓男,他,強磁性トンネル接合を用いた高感度生体磁気センサの開発,平成 25 年 9 月 18 日応用物理学会シンポジウム 18p-C15-5
- 2) Keiji Tsukada, et al., NDT & E International, Vol. 43, pp.323-328(2010)

## 渦電流センサによる SUS304 鋼管レーザー溶接継手の内部欠陥検出評価

\*矢崎 耕平<sup>1,2</sup>, 杉村 佳奈子<sup>2</sup>, 曾根原 誠<sup>2</sup>, 佐藤 敏郎<sup>2</sup>, 島津 進<sup>1</sup>( <sup>1</sup>高島産業株式会社, <sup>2</sup>信州大学)

Evaluation on internal defect detection for laser welding joint on SUS304 pipe using by eddy current sensor

K. Yazaki<sup>1,2</sup>, K. Sugimura<sup>2</sup>, M. Sonehara<sup>2</sup>, T. Sato<sup>2</sup>, S. Shimadu<sup>1</sup>( <sup>1</sup>Takashima Sangyo Co., Ltd., <sup>2</sup>Shinshu University)

## はじめに

レーザーの出力不足により生じる溶接継手の内部未溶接欠陥は、破損の原因となり得るため、医療部品では特に非破壊による全数検査が望まれている。筆者らは、Fig. 1 に示す構造の渦電流センサを用いて SUS304 鋼管溶接継手の内部未溶接欠陥の検出を検討している<sup>1)</sup>。SUS304 鋼管は、加工履歴によって磁化特性が変化するため、センサの設計、試作に先立ち、その物性値を明確にしたので報告する。

## 実験方法

SUS304 鋼管 (手島精管(株)製) をファイバーレーザー (IPG Photonics 製) を用いて Fig. 2 の条件で溶接し、溶接部の磁化特性と組織を評価した。磁化測定用の試料は Fig. 2 のように研削で切り出し、振動試料型磁力計 (VSM, 理研電子(株)製; BHV-55) により静磁化曲線を測定し、そこから最大比磁化率を求めた。切り出す溶接部のサイズは、最も溶接幅が広がるレーザー溶接出力 150 W のサイズに合わせて  $410 \mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$  とし、VSM の印加磁界は Fig. 1 の渦電流センサの励磁方向と同様に SUS304 鋼管の軸方向とした。また、径方向に破断した溶接部をエッチングしてオプトデジタルマイクロスコープ (オリンパス(株)製; DSX500) により組織観察を行った。

## 実験結果

Fig. 3 に各出力で溶接した溶接部の最大比磁化率を、Fig. 4 に組織観察写真を示す。Fig. 3 より、レーザー溶接出力が 120 ~ 150 [W] において最大比磁化率はほぼ一定であるが、レーザー溶接出力が 105 W になると最大比磁化率が 3 倍ほど高くなった。また、Fig. 4 からレーザー溶接出力 135 W までは内部まで十分に溶接されているのに対し、レーザー溶接出力 105 W では内部が十分に溶接されておらず、溶接された部分の組織はオーステナイト相であるのに対し、未溶接部分には加工誘起マルテンサイト相が認められる。このことから、レーザー溶接出力 105 W では磁化測定サンプル内部に未溶接部、マルテンサイト相が多いため磁化が高くなったと考えられる。

以上の結果から、レーザー出力が低下した際に生じる内部未溶接欠陥は、十分に溶接されたものと比較して比磁化率が高くなり、空隙を有するため、渦電流センサによる欠陥検出が可能であると考えられる。当日は、試作した渦電流センサの欠陥検出性について報告する。

## 参考文献

1) K. Sugimura, et al.: 2014 Annual Conf. FMS IEEJ (2014).

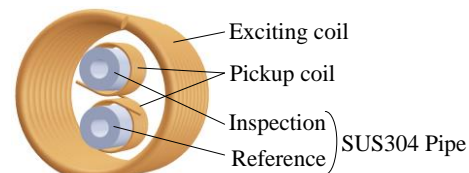


Fig. 1 Eddy current sensor

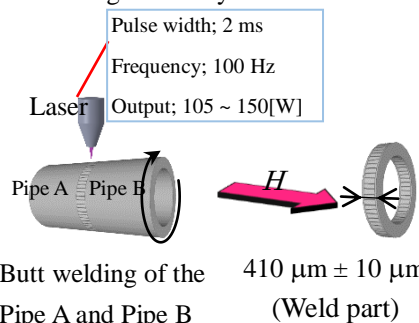


Fig. 2 Manufacture of magnetization measurement sample in laser welding joint of SUS304 pipe

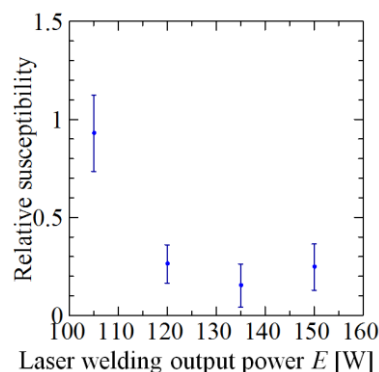


Fig. 3 Relation between laser welding output power and relative susceptibility in laser welding joint of SUS304 pipe

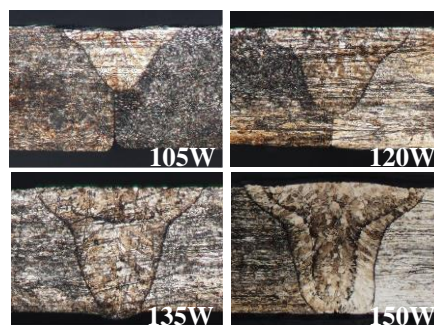


Fig. 4 Micrograph of weld part in laser welding joint of SUS304 pipe