ニッケル合金薄肉パイプにおける溶接部のショットピーニング
および熱時効による残留応力変化熊谷 正芳^{*1}, 石渡 正人^{*2}, 大谷 眞一^{*1}

Residual stress variation due to shot peening and thermal ageing on welded Ni-alloy pipe

Masayoshi KUMAGAI ^{*1}, Masato ISHIWATA ^{*2} and Shin-ichi OHYA ^{*1}^{*1} Department of Mechanical Systems Engineering, Tokyo City University
1-28-1 Tamazutsumi, Setagaya-ku, Tokyo 158-8557, Japan^{*2} Fuji Manufacturing Co., Ltd.
5-2-24 Matsue, Edogawa-ku, Tokyo 132-0025, Japan

Received: 16 March 2018; Revised: 29 April 2018; Accepted: 21 June 2018

Abstract

Residual stress measurements on pipe-shaped Ni-alloy, Inconel 625, were conducted. The pipes were made from a thin plate by roll-bend and weld along longitudinal direction of the pipe. Shot peening processes were performed to the outside surface of the pipes. The stresses were measured using X-ray stress measurement method. The residual stresses on the specimen before shot peening process were around 100 MPa toward longitudinal direction and around 250 MPa toward transvers direction to the welding direction. The residual stresses changed to 800 MPa in compressive by shot peening process. After thermal aging at 1173 K for 1 and 10 hour, the residual stresses changed to -100 MPa on the specimens with and without shot peening in both longitudinal and transvers directions. In addition, optical microscopic observation and the analyses of X-ray diffraction peaks were performed to reveal microstructural features due to welding, shot peening, and thermal aging. Equiaxed and columnar dendrites were generated in the center and the outer of fusion zone, respectively. The grains in the heat affected zone, between the fusion zone and base metal became larger. The grains near the surface even in welds became small by shot peening processes according to analyses of X-ray diffraction peaks. Even though induced compressive residual stresses were released during thermal ageing, refined grains had been smaller than before shot peening process.

Keywords : Ni-alloy, Welding, Shot peening, Residual stress, X-ray, Microstructure

1. 緒 言

ニッケル合金は高い耐腐食性や高温での高い機械的特性などから、原子力プラントやガスタービンなど環境負荷の高い場面で使用されている。中でも Inconel 625 と呼ばれる Ni-Cr-Mo-Nb 合金 (Special Metals Corporation, 2018) は高い耐腐食性を有し、代表的なニッケル合金の一つとして広く用いられている。その用途として原子力プラントや化学プラント、モータースポーツで利用されるエキゾーストパイプなどがある。例えば、エキゾーストパイプには走行時に振動などによる繰返し荷重が加わる他、パイプ内側は 900 °C を超える排気ガスによって高温にさらされる (井上, 菊池, 2003) (山下, 2007)。また、使用時と停止時では高い温度差が生じるため熱応力による繰返し荷重が生じると考えられる。この様に同材料は機械的また熱的に過酷な条件下で使用されることが多く、様々な状況を想定した機械的強さや破壊を把握することは予期せぬ破壊の防止や製品の性能向上に欠かすことができない。

一般にエキゾーストパイプは薄板を円筒状に曲げ、接合部を溶接することで製造される。同材は優れた機械的性質を有しているが、一般的な金属材料と同様に機械的な繰返し荷重や熱サイクルによる負荷などによりき裂の

No.18-00139 [DOI: 10.1299/transjsme.18-00139], J-STAGE Advance Publication date : 3 July, 2018

^{*1} 正員, 東京都立大学 工学部 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)^{*2} 正員, (株) 不二製作所 (〒132-0025 東京都江戸川区松江 5-2-24)

E-mail of corresponding author: mkumagai@tcu.ac.jp

発生・進展などの損傷が生じることが想定される。特に、他の材料と同様に溶接部は結晶粒の粗大化 (Bayraktar et al., 2007) や引張の残留応力 (秋田他, 2005) の発生などによって母材部と比べ損傷の可能性が高くなることが予測される。溶接による脆化や引張残留応力の対策として、ショットピーニングに代表されるピーニング処理による圧縮残留応力の導入 (Kobayashi et al., 1998) や結晶粒微細化 (戸高他, 2003) (間野他, 2006) といった改善が挙げられる。金属材料に対するピーニング処理の研究は広く行われており、ピーニング処理が疲労強度に及ぼす影響 (平野他, 1996) (森山他, 1999) (竹内他, 2005) やピーニング方法の違いによる応力導入の違い (Kumagai et al., 2013, 2014) など研究が進んでいる。しかし、これら従来研究は数 mm 以上の厚みのある板材などに対してピーニング処理を施した際の研究であるなど、薄板を円筒状に加工した形状での研究は少ない。そこで、本研究では薄板を円筒状に加工した際の溶接部および母材部に生じる残留応力やピーニング処理による残留応力の改善、さらにはその熱時効による影響について実験的研究によって明らかとし、溶接部に対するピーニング処理の有効性について検討した。

2. 実験方法

2・1 供試材および組織観察

供試材には市販の Ni-Cr-Mo-Nb 合金 (Inconel 625) を用いた。受け入れ材のミルシートに基づいた化学組成を表 1 に示す。また、室温での 0.2%耐力は 567 MPa, 引張強さは 999 MPa, 伸びは 49.0%であった。この供試材をロールベンダーを用いて円筒状に加工した後、開先は I 形とし、溶加材は用いず TIG 溶接によって完全溶込み状態の突合せ継手とした。図 1 に作製した試験片形状を示す。また、ピーニング処理として円筒の外表面の全体にショットピーニング処理を施した。ショット材は粒径が 0.1 - 0.2 mm の SKH57 材であり、0.4 MPa の圧力で試験片全体を 150 s 間投射した。作製したショットピーニング施行した試験片およびショットピーニングを施していない試験片を、真空電気炉を用いて 1173 K で 1 および 10 時間の焼きなまし処理を行い、熱時効による残留応力変化を評価した。なお、昇温速度は 0.1 K/s, 降温速度は ≤ 0.1 K/s とした。

また、試験片長手方向の中心付近を輪切りに切断した後、溶接部付近を切り出し、切断面の研磨、エッチングを行い光学顕微鏡による観察を行った。切断には回転砥石を用いた精密切断機を用いた。研磨は #2000 までの耐水研磨紙による研磨を行った後、コロイダルシリカによる研磨を行った。なお、組織観察は試験片を切断して行ったことから、熱処理時間ごとに異なる試験片を用い、残留応力測定に用いた試験片とは異なる試験片である。

Table 1 Chemical composition of as received plate [mass%].

C	Mn	Fe
0.02	0.10	2.81
S	Si	Ni
0.001	0.2	61.3
Cr	Al	Ti
22.84	0.14	0.26
Co	Mo	Nb
0.10	8.69	3.31
P	Nb+Ta	
<0.00001	3.31

Fig. 1 Shape and dimensions of the rolled and welded specimen with/without shot peening and their picture.

2・2 X線応力測定

残留応力測定は研究室自作の垂直ゴニオ型のX線応力測定装置を用い、 $\sin^2\psi$ 法（日本材料学会，2002）により行った．詳細な測定条件は表2に示す． $\sin^2\psi$ 法では

$$\sigma = M \cdot K \quad (1)$$

$$M = \frac{\partial(2\theta)}{\partial(\sin^2\psi)} \quad (2)$$

により応力を算出する．ここで、 K は応力定数、 2θ は回折角であり、 ψ は試料面法線に対する回折面法線の角度である． $\sin^2\psi$ は0から0.6の範囲で7点以上測定した．X線応力定数 K はX線の弾性定数と回折角の関係によって決定される．ここでは単結晶の弾性スティフネス $c_{11}=243.3$ ， $c_{12}=156.7$ ， $c_{44}=117.8$ GPa（Wang et al., 2016）よりKrönerモデル（田中他，2006）により求めたX線の弾性定数 $E_x=198$ GPaおよび $\nu_x=0.322$ を用いて、Mn-K α 線による311回折の測定における回折角値 150.29° より、 $K=-347.1$ MPa/degと求めて用いた．なお、回折角算出のための格子定数は文献値 0.36089 nm（Rai et al., 2004）を用いた．

応力測定は溶接線を中心に試験片外周に沿って溶接線直交方向に左右30 mmの範囲を5 mm間隔、溶接線方向の試験片中心部40 mmの範囲を10 mm間隔で最大65点測定した．なお、図1に示す通り、溶接線方向の位置は変数 x で表し、円筒の端面を0とし、溶接線直交方向の位置は変数 y で表し溶接線中心を0とした．つまり測定領域は $x=30\sim60$ mmかつ $y=\pm 30$ mmの範囲である．なお、 y 位置は円周上での距離である．

Table 2 X-ray stress measurement conditions.

Characteristic X-ray	Mn-K α
Incident X-ray collimator	ϕ 3, mm
Diffraction plane	Ni 311
Detector	PSPC
Range of $\sin^2\psi$	0 – 0.6

3. 結 果

3・1 組織観察

光学顕微鏡による組織観察ではショットピーニング処理の有無や熱処理の有無による明確な組織の変化は確認できなかった．そのため、代表例としてショットピーニング未処理材の1時間熱処理後の溶接金属部から母材部にかけての組織を図2示す．溶接部中心から0.3 mm付近までは一様な組織となっており、溶接時に母材が溶融し、その後凝固した等軸デンドライトの様相を呈している．溶接部中心から0.3～1 mmの辺りでは溶接部中心から母材部に向かっての柱状デンドライト組織となっており、溶融後の再凝固により形成された組織であると考えられる．溶接部中心から1.2～1.5 mmの辺りでは明確な結晶粒界が確認でき、結晶粒径は20 μm 以上であり、溶接時の熱影響により結晶が粗大化した熱影響部であることがわかる．溶接部中心部から3 mm以上離れた母材部の結晶粒径は熱影響部など比べ小さいことがわかる．

ショットピーニング処理を施すことで一般に試料表面近傍ではショット材の衝突による塑性変形によって結晶粒が微細化するが（戸高他，2003）（間野他，2006），本研究での光学顕微鏡による観察では明確な組織変化を確認することはできなかった．これは加工層が十数～数十 μm とわずかであること、研磨時の端部の垂れなどによって加工層を観察できなかったことなどによると考えられる．

Fig. 2 Pictures of optical microscopic observation in the cross-section welds.

3・2 残留応力

ショットピーニング未施工材の試験片長手方向つまり溶接線方向 (LD) 成分, および試験片周方向つまり溶接線直交方向 (TD) の残留応力を図 3 に示す. なお, 応力分布は市販のグラフソフト Origin Pro2018 を用いて, 測定点間の値を内挿し表示した. また, ショットピーニング未施工材の溶接金属部 ($y=0$) については光学顕微鏡による組織写真からも推測されるように集合組織の発達が著しく, $\sin^2\psi$ 法による応力測定が困難であったため測定結果からは除外した. 図 3 より熱処理前ではショットピーニング未処理材の溶接線方向にはいずれの場所においても 100 MPa 程度の引張残留応力が存在していることが分かる. また, 溶接線直交方向には 250 MPa 程度の引張残留応力が生じている. 試験片は板材を円筒状に曲げ, 溶接しているため, 試験片作製時に円筒の周方向である溶接線直交方向へは曲げ応力が生じ, 接合後に引張残留応力となると考えられる. 一方, 溶接線方向には変形は加えていないため, 溶接線方向に生じている 100 MPa 程度が板材製造段階での冷間圧延などにより導入された残留応力であり, 差分の 150 MPa 程度が試験片作製時の曲げおよび接合によって生じた残留応力であると考えられる. つまり, 今回の製造方法ではパイプ外周に溶接線直交方向の引張残留応力が生じるため注意が必要であることがわかる.

試験片作製ままの状態では引張の残留応力が生じていたが, これを 1 時間熱処理すると LD, TD 共に引張応力が減少し, 全体的に 100 MPa 程度の圧縮応力となっていることがわかる. これは熱処理による回復または再結晶などによって引張応力が解放したためであると考えられる. また, 10 時間後の応力状態は 1 時間後とほとんど変わらず, 全体的に 100 MPa 程度の圧縮残留応力であったことから, 1 時間程度の熱時効で引張残留応力は解放しており, その後は変化しないことが分かる.

Fig. 3 Residual stress distribution map on un-shot peened specimens. LD and TD denote stress directions toward longitudinal and hoop directions in the specimen, respectively.

Fig. 4 Residual stress distribution map on shot peened specimens. LD and TD denote stress directions toward longitudinal and hoop directions in the specimen, respectively.

図4にショットピーニング処理材のLD成分およびTD成分の残留応力を示す。なお、ショットピーニング処理材では溶接金属部の応力測定が可能であったことから、測定結果を図中に示した。ショットピーニング処理材の熱処理前についてみるとLD, TDによらず800 MPa程度の圧縮残留応力が導入されていることがわかる。これは十分な加工条件によってショットピーニングを施工したことにより均一に残留応力が導入され、ショットピーニング処理前では応力状態の異なるLD成分およびTD成分いずれにおいても同程度の残留応力値となったと理解できる。また、ショットピーニング処理材では溶接金属部においても測定結果を示したが、母材部と比べほぼ同じ応力値であり、初期残留応力や加工前の組織などによらず同程度の残留応力が導入されたことが分かる。ショットピーニング処理材の初期状態では圧縮残留応力が生じていたが、これを1時間熱処理するとLD成分およびTD成分いずれも100 MPa程度まで圧縮応力が減少した。これはショットピーニング未処理材料と同様に、熱処理による回復または再結晶などによって圧縮応力が解放したためであると考えられる。また、ショットピーニング未処理材と同様に10時間後の応力分布は1時間後の応力状態とほとんど変化がなかった。

図3および図4では測定位置ごとの残留応力がショットピーニング処理の有無によらずほぼ一定であり、熱処理によっても全体的に同様の変化をしている様に見える。そこで、各y位置における残留応力を熱処理前および1時間処理後について図5にまとめた。なお、各値はy位置ごとのx位置における残留応力の平均値である。熱処理前においてはショットピーニング処理の有無によらず、y位置によって残留応力にばらつきがあることがわ

Fig. 5 Effect of annealing on mean residual stresses at y-positions of shot peened and un-peened specimens. The 0 h and 1 h indicate before and after annealing, respectively. The left side figure demonstrates the residual stress in the longitudinal direction, and the right side figure demonstrates the residual stress in the transverse direction.

Fig. 6 Residual stress variations against thermal ageing duration.

かる．また、各値のエラーバーが大きく、 x 位置によっても残留応力のばらつきがあることがわかる．ショットピーニング未処理材においては板状の受入材に既に残留応力分布が生じていたこと、また円筒試験片への加工時の変形が不均一であったことなどが原因で生じたばらつきであると考えられる．一方、ショットピーニング処理材においてはピーニング処理によって、800 MPa 程度の圧縮残留応力が導入されたが、詳細に見ると均一ではなく、小さな残留応力分布が存在することがわかる．次に、これら初期材に対して熱処理を施すと、ショットピーニング処理の有無、応力方向によらず 100 MPa 程度の圧縮残留応力へ変化し、そのとき x 位置、 y 位置における応力分布は初期材と比べ小さいことがわかる．

ところで、ショットピーニングの有無によらず熱処理後には初期の引張および圧縮の残留応力が変化し、100 MPa 程度の圧縮残留応力となった．熱処理時間による残留応力変化を確認するため、図 6 に各試験片の熱処理時間と残留応力の平均値の関係を示す．残留応力の平均値とは試験片内の全ての x および y 位置における測定値を平均した値である．なお、各測定値のばらつきは図 4 で示した程度のばらつきであり、視認性を優先して同図ではばらつきは省略した．図 3～5 において確認した通り、ショットピーニング未処理材において LD 成分では 100 MPa 程度、TD 成分では 200 MPa 程度の引張残留応力が生じており、1 時間の熱処理によって 100 MPa 程度の圧縮応力へと変化している．10 時間後においても残留応力はほとんど変化していないことがわかる．一方、ショットピーニング処理材においては初期状態において LD および TD いずれの成分も 800 MPa 程度の圧縮残留応力状態であり、1 時間の熱処理によって -100 MPa 程度まで残留応力が減少し、10 時間経過後も大きな変化は無く、100 MPa 程度の圧縮残留応力になっていることがわかる．これらのことから、ショットピーニング処理の有無によらず初期残留力は 1 時間の熱処理によって十分解放されており、ほぼ無応力状態となったと考えられる．-100 MPa の残留応力は測定装置の初期アライメントなどによって生じた可能性がある．ただし、測定に際しては無応力状態の粉末試料を用いて $\pm$ 数十 MPa 以内でアライメントができていることを確認した後に測定を行ったことから、試験片形状などに起因した応力が新たに生じている可能性も排除できない．

4. 考 察

光学顕微鏡による観察ではショットピーニングや熱処理による組織変化を確認することができなかったが、X 線回折強度曲線は結晶子サイズの微細化や転位密度の増加など塑性変形量の増加に応じて大きくなる傾向があることから (Warren, 1990)、応力測定に用いた X 線回折強度曲線を用いて組織変化について検討を行った．ここでは試料面法線方向を向いた結晶からの回折である $\sin^2\psi=0$ における回折強度曲線の半値全幅 (以下、半価幅) の y 位置に対する分布を図 7 に示す．なお、図中では半価幅を FWHM と表す．残留応力の y 位置における分布と同

Fig. 7 FWHM distributions at $\sin^2\psi = 0$ on each y position of shot peened un-peened specimens with or without 1h thermal treatment.

Fig. 8 FWHM variations at $\sin^2\psi = 0$ against thermal ageing duration.

様に各値は各 y 位置ごとの x 位置の値の平均である。また、 $\sin^2\psi=0$ は試料面法線方向の測定結果であり、LD や TD の応力測定方向によらず同一方向の測定であることからここでは LD の結果のみを示す。ショットピーニング処理の有無や熱処理の有無などいずれの場合においても、 y 方向の位置によらず半価幅はほぼ一定の値となっていることがわかる。つまり、X 線回折強度曲線の幅広がりから、 y 方向位置によらず塑性変形量はほぼ一定であると推測される。ショットピーニング未処理材において、溶接による材料組織への影響は図 2 の光学顕微鏡写真の結晶粒サイズから判断して溶接部中心から $\pm 1.5\text{ mm}$ 程度であり、X 線応力測定において溶接線直上の測定位置以外は溶接による結晶粒粗大化などの影響を受けていない。一方、ショットピーニング処理材においては溶接線上の結果もそれ以外の場所と比べてもほとんど変化がないことがわかる。図 2 において溶接部ではデンドライト組織の形成や結晶粒の粗大化が見られたが、X 線の有効侵入深さは十数 μm であることから、ショットピーニング処理により X 線侵入深さである表面から十数 μm の領域では溶接による材料組織の違いによらずほぼ均一に塑性変形が生じていると考えられる。

ここで、図 8 に熱処理時間による半価幅の変化を示す。各値は残留応力同様に各位置における測定結果の平均値を示しており、ばらつきは小さいため省略した。熱処理前におけるショットピーニング未処理材の半価幅は 2.6° であるが、ショットピーニング処理材では 9.3° と 3.6 倍大きくなった。熱処理によりショットピーニング未処理材では 1 時間後の半価幅は 2.3° 、10 時間後は 2.1° と熱処理前と比べやや減少することがわかる。一方、ショットピーニング処理材では 1 時間後の半価幅は 1.9° と熱処理によって半価幅が約 20% まで大きく減少していることがわかる。また、10 時間後は 1.9° と 1 時間後と比べ変化しなかった。ショットピーニング未処理材において、わずかではあるが熱処理後と比べ半価幅が大きくなったのは、薄板作製時の冷間圧延や円筒形状への曲げ加工時に塑性変形が生じたためと考えられる。一方、ショットピーニング処理材においてはショットピーニング未処理材と比べても十分半価幅が大きいことから、明らかにショットピーニング処理による組織変化の影響であると言える。ところで、熱処理後の試験片においてショットピーニング処理材の方がショットピーニング未処理材よりも 1 割程度半価幅が小さくなった。その差はわずかであるが熱処理による組織変化の違いを表している可能性がある。ショットピーニング処理材の表面は未処理材と比べ残留応力が高く、大きなひずみエネルギーが蓄積されているため、ひずみエネルギーが駆動力となってショットピーニング処理材の方が未処理材と比べ再結晶・回復が進んだ可能性がある。

5. 結 言

本研究ではニッケル合金の薄板をロールベンドによって円筒状に曲げ、溶接によって接合した円筒状試験片を作製し、これにショットピーニング処理を施し、作製時およびショットピーニング処理により導入される残留応力を X 線応力測定法により明らかとした。作製時は板材製造時の初期残留応力と考えられる引張残留応力が溶接線方向に 100 MPa 程度存在し、溶接線直交方向には板材製造時の初期残留応力と曲げ応力の重畳と考えられる引張残留応力が 200 MPa 程度存在し、パイプ製造時では残留応力が危険側に生じていることから、溶接部近傍など相対的に強度の低い箇所より破壊する可能性があることが示唆される。一方、ショットピーニング処理を施した場合は溶接部においても母材と同程度の圧縮の残留応力が 800 MPa 程度付与されており、溶接部に対してもショットピーニング処理の残留応力改善効果が有効であることがわかる。

光学顕微鏡による組織観察から溶接金属部はデンドライト組織が特定の方向に配向した状態であり、熱影響部では結晶粒が粗大化していた。一方、X 線回折強度曲線の半価幅評価からショットピーニング処理材では表面近傍の結晶サイズが処理前と比べ微細化しており、組織の改善という点からもショットピーニング処理が強度向上に寄与してと考えられる。

ショットピーニング処理の有無によらず熱処理を 900°C で 1 時間施すことでいずれもほぼ無応力とみなせる約 -100 MPa へと変化し、熱負荷後の残留応力状態はショットピーニング処理の有無に因らず同程度であることがわかった。つまり、ショットピーニング未処理材においては引張残留応力の除去効果がある一方で、ショットピーニング処理による圧縮残留応力の導入効果は無くなる。ただし、ショットピーニング処理無しの場合は熱影響部の結晶粒は粗大であり、これは熱処理によっても変化しないことから、結晶粒粗大化による強度低下の危険性は減少しない。一方、ショットピーニング処理を施した場合は熱処理によって未処理材の母材部程度までは結晶

粒は大きくなるものの、溶接部近傍においても熱影響部の粗大粒と比べると結晶粒は微細であり、組織の改善効果が維持されていることから高温下で使用する場合であってもある程度ショットピーニングによる組織改善による強度改善効果が期待できる。

組織観察のための試験片切断は平和テクニカ株式会社の渋谷吉彦氏の協力を得た。また、X線応力測定および組織観察は東京都市大学・工学部の鷹見知明君、伊藤隆宏君、古屋孝晟君らの協力を得た。記して謝意を表す。

文 献

- 秋田貢一, 吉岡靖夫, 佐野雄二, 小川和夫, 久保達也, 小畑稔, 田中寛大, Ni基合金溶接金属のX線残留応力測定, 材料, Vol. 54, No. 7 (2005), pp. 710–716.
- Bayraktar, E., Kaplan, D., Devillers, L. and Chevalier, J. P., Grain growth mechanism during the welding of interstitial free (IF) steels, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 189, No. 1-3 (2007), pp. 114–125.
- 平野克彦, 榎本邦夫, 林英策, 黒沢孝一, SUS 304鋼の耐食性および疲労強度に及ぼすウォータージェットピーニングの影響, 材料, Vol. 45, No. 7 (1996), pp. 740–745.
- 井上宜治, 菊池正夫, 自動車排気系用ステンレス鋼の現状と今後の展望, 新日鐵技報, Vol. 378 (2003), pp. 55–61.
- 日本材料学会X線材料強度部門委員会, X線応力測定標準 (2002).
- Kobayashi, M., Matsui, T. and Murakami, Y., Mechanism of creation of compressive residual stress by shot peening, International Journal of Fatigue, Vol. 20, No. 5 (1998), pp. 351–357.
- Kumagai, M., Akita, K., Itano, Y., Imafuku, M. and Ohya, S., X-ray diffraction study on microstructures of shot/laser-peened AISI316 stainless steel, Journal of Nuclear Materials, Vol. 443, No. 1-3 (2013), pp. 107–111.
- Kumagai, M., Akita, K., Imafuku, M. and Ohya, S., X-Ray line profile study on shot/laser-peened stainless steel, Advanced Materials Research, Vol. 996 (2014), pp. 39–44.
- 間野日出夫, 近藤寛, 松室昭仁, ショットピーニングによる表層組織の変化と疲労強度の関係, 日本金属学会誌, Vol. 70, No. 5 (2006), pp. 415–419.
- 森山三千彦, 永野茂憲, 皮籠石紀雄, 高木節雄, 長島悦一, 18%Niマルエージング鋼の疲労強度に及ぼすショットピーニングの影響, 日本機械学会論文集 A編, Vol. 65, No. 639 (1999), pp. 2267–2273.
- Rai, S. K., Kumar, A., Shankar, V., Jayakumar, T., Rao, S. K. B. and Raj, B., Characterization of microstructures in Inconel 625 using X-ray diffraction peak broadening and lattice parameter measurements, Scripta Materialia, Vol. 51, No. 1 (2004), pp. 59–63.
- Special Metals Corporation, available from <<http://www.specialmetals.com/products>> (参照日 2018年2月27日) .
- 竹内悦男, 松岡三郎, 沖田耕一, 堀秀輔, Alloy 718 Ni 基超合金の疲労特性におけるショットピーニング効果, 日本機械学会論文集 A編, Vol. 71, No. 707 (2005), pp. 1051–1057.
- 田中啓介, 鈴木賢治, 秋庭義明, 残留応力のX線評価 (2006).
- 戸高義一, 梅本実, 渡辺幸則, 土屋浩一, ショットピーニングによる鉄鋼材料表面のナノ結晶化, 日本金属学会誌, Vol. 67, No. 12 (2003), pp. 690–696.
- Wang, Z., Stoica, A.D., Ma, D. and Beese, A.M., Diffraction and single-crystal elastic constants of Inconel 625 at room and elevated temperatures determined by neutron diffraction, Materials Science and Engineering: A, Vol. 674 (2016), pp. 406–412.
- Warren, B.E., X-ray diffraction (1990), pp. 251–314.
- 山下賢, 自動車排気系部品の溶接材料, 神戸製鋼技報, Vol. 47 (2007), pp. 307–312.

References

- Akita, K., Yoshioka, Y., Sano, Y., Ogawa, K., Kubo, T., Obata, M. and Tanaka, H., X-ray residual stress measurement on weld metal of nickel based alloy, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol. 54, No. 7 (2005), pp. 710–716 (in Japanese).
- Bayraktar, E., Kaplan, D., Devillers, L. and Chevalier, J. P., Grain growth mechanism during the welding of interstitial free (IF) steels, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 189, No. 1-3 (2007), pp. 114–125.
- Hirano, K., Enomoto, K., Hayashi, E. and Kurosawa, K., Effects of water jet peening on corrosion resistance and fatigue strength of type 304 stainless steel, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol. 45, No. 7 (1996), pp. 740–745 (in Japanese).
- Inoue, Y. and Kikuchi, M., Present and future trends of stainless steel for automotive exhaust system, Sinnittetsu giho, Vol. 378 (2003), pp. 55–61 (in Japanese).
- JSMS committee on X-ray study on mechanical behavior of materials, Standard for X-ray stress measurement (2002) (in Japanese).

- Kobayashi, M., Matsui, T. and Murakami, Y., Mechanism of creation of compressive residual stress by shot peening, *International Journal of Fatigue*, Vol. 20, No. 5 (1998), pp. 351–357.
- Kumagai, M., Akita, K., Itano, Y., Imafuku, M. and Ohya, S., X-ray diffraction study on microstructures of shot/laser-peened AISI316 stainless steel, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 443, No. 1-3 (2013), pp. 107–111.
- Kumagai, M., Akita, K., Imafuku, M. and Ohya, S., X-ray line profile study on shot/laser-peened stainless steel, *Advanced Materials Research*, Vol. 996 (2014), pp. 39–44.
- Mano, H., Kondo, S. and Matsumuro, A., Microstructured surface layer induced by shot peening and its effect on fatigue strength, *Journal of the Japan Institute of Metals*, Vol. 70, No. 5 (2006), pp. 415–419 (in Japanese).
- Moriyama, M., Nagano, T., Kawagoishi, N., Takaki, S. and Nagashima, E., Effects of shot peening on fatigue strength of 18% Ni maraging steel, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 65, No. 639 (1999), pp. 2267–2273 (in Japanese).
- Rai, S. K., Kumar, A., Shankar, V., Jayakumar, T., Rao, S. K. B. and Raj, B., Characterization of microstructures in Inconel 625 using X-ray diffraction peak broadening and lattice parameter measurements, *Scripta Materialia*, Vol. 51, No. 1 (2004), pp. 59–63.
- Special Metals Corporation, available from <<http://www.specialmetals.com/products>> (accessed on 27 February, 2018).
- Takeuchi, E., Matsuoka, S., Okita, K. and Hori, S., Effect of shot-peening on fatigue properties for alloy 718 nickel-based superalloy, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 71, No. 707 (2005), pp. 1051–1057 (in Japanese).
- Tanaka, K., Suzuki, K. and Akiniwa, Y., Evaluation of residual stresses by X-ray diffraction —fundamentals and applications— (2006) (in Japanese).
- Todaka, Y., Umemoto, M., Watanabe, Y. and Tsuchiya, K., Nanocrystalline surface layer of steels produced by shot peening, *Journal of the Japan Institute of Metals*, Vol. 67, No. 12 (2003), pp. 690–696 (in Japanese).
- Wang, Z., Stoica, A.D., Ma, D. and Beese, A.M., Diffraction and single-crystal elastic constants of Inconel 625 at room and elevated temperatures determined by neutron diffraction, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 674 (2016), pp. 406–412.
- Warren, B.E., *X-ray diffraction* (1990), pp. 251–314.
- Yamashita, K., *Welding materials for exhaust systems*, *Kobe Steel Engineering Reports*, Vol. 47 (2007), pp. 307–312 (in Japanese).