高速フレイム溶射により補修された SUS304 鋼の引張・疲労強度特性

荒井 正行^{*1}, 水津 竜夫^{*2}

Tensile and fatigue strength of SUS304 stainless steel repaired by a high velocity oxy-fuel thermal spraying

Masayuki ARAI^{*1} and Tatsuo SUIDZU^{*2}^{*1} Department of Mechanical Engineering, Tokyo University of Science
6-3-1 Nijiyuku, Katsushika-ku, Tokyo 125-8585, Japan^{*2} R&D Center, TOCALO Co. Ltd.
14-3 Minamifutami, Futami-machi, Akashi-shi, Hyogo 674-0093, Japan

Received: 10 January 2018; Revised: 20 March 2018; Accepted: 13 June 2018

Abstract

Tensile and fatigue tests were conducted on type 304 stainless steel plate-shaped specimens repaired by High Velocity Oxy Fuel (HVOF) spraying. Specimen surfaces were machined for repair into trapezoid with the same depth, the same length, and various slope angles (called here cutting angles). During tensile tests, damage evolution in the repaired part was continuously monitored under increasing load. Quantitative evaluation of the relationship between the strain gauge attached to the repaired part surface and the cross-head displacement was performed. In fatigue tests, influence of the repaired shape on damage evolution was studied, and obtained fatigue lives were compared between the cutting angles. According to tensile testing results, crack initiation strain values increase with cutting angles. At the same time, residual stresses were mostly compressive and almost independent from cutting angles, thus positively affecting the magnitude of fatigue strength. Fatigue test results indicated that specimens repaired with a cutting angle of 50° possess a superior fatigue life. The results showed that the HVOF spraying can potentially replace welding repair.

Keywords : Thermal spraying, HVOF, Repairing, CoNiCrAlY, Tensile strength, Crack initiation, Fatigue life

1. 緒 言

我が国においては、多くの橋梁、道路、建築物、構造物が高度成長期に建設、製造された。現在、これらのインフラ設備は 60 年を経過しようとしており、今後も安全に使用し続けるために継続的に検査と補修を実施していかなければならない。一般的に設備の健全性を保証するために非破壊検査が定期的に行われる。非破壊検査の実施項目には、目視検査、打診検査、超音波検査などがある。これらの検査の結果、き裂が検出された場合にはその形状とサイズに応じて現場で新しい部品に取り換えられるか、あるいは部分的に補修がなされる。近年のセンシング技術の進歩に伴って微細なき裂を検出できるようになっているものの、補修技術については以下に挙げる方法に留まっているのが現状である。

腐食による減肉に対しては補強板が溶接される。これは“パッチ当て”と呼ばれている (Breitzma et al., 2009)。疲労により生じたき裂に対してはドリルによりき裂先端に円孔を加工し、き裂先端での応力集中を緩和させる。これは“ストップホール法”と呼ばれている (Wu et al., 2010)。さらにき裂が発生した箇所は“肉盛溶接”により補修がなされる (Chowdhury et al., 1998)。これらの中からき裂のサイズや減肉した形状に応じて適切な補修方法

が選択される。ただし、これらの補修方法にも次のような問題がある。パッチ当てならびにストップホールによる補修方法は、補修後に形状不連続部あるいは円孔を留置することになる。これにより新たな応力集中源が生じることになる。肉盛溶接による補修方法は、き裂部を除去した後に溶接金属を溶かし込むことから、補修後も元の形状に回復できる。ただし、溶接施工により補修部に高い残留応力が発生すること (Dong et al., 2005)、構造物全体をゆがませることが問題となる (Aloraier et al., 2010)。原子力発電設備においては、このような問題を回避するために後熱処理が施される。ただし、火力発電設備をはじめとするインフラ設備においては、施工コストの増加につながるような後熱処理は敬遠されるのが一般的である。

以上のことから、補修施工に伴って生じる様々な問題を克服するとともに、現場で補修を容易に行うための施工技術が確立されれば、定期検査中に検出された損傷（減肉、き裂）を短期間で補修することが可能になるものと期待される。

ところで表面改質技術としてプラズマ溶射技術（APS 法）が知られている (Kumar et al., 2005)。この成膜技術は、高温プラズマ流中に表面改質材となる粉末を供給し、これを対象部品表面に高速衝突させて皮膜を成膜する方法である。この技術の特徴として、(1)成膜中、部品温度をコントロールできる、(2)溶接に見られるような熱影響部を形成しない、(3)様々な種類の材料を成膜できる、(4)現場で成膜することが可能である、ことが挙げられる (境, 納富, 1985)。そこで、著者らは表面改質技術としての APS 法に注目し、同手法の補修施工への適用可能性とその信頼性について検討してきた (坂本ほか, 2015)。そこでは、損傷部を削除する際の適切な削除形状を検討するとともに、削除部を APS 法により補修した補修材の引張強度特性を調べた。この結果、き裂面に対して垂直方向になるべく細長い形状で部材表面を削除し、この削除部を APS 法により補修すればよいことを明らかにした。ただし、さらなる信頼性向上のために APS 法による補修部の密着強度の改善も求められた。

本研究では、APS 法に比べて密着強度のさらなる改善が期待できる高速フレーム溶射(HVOF)法に注目し、HVOF 法による補修施工の適用可能性とその信頼性について検討する。HVOF 法は、溶射ガンの燃焼圧力を高めることにより、爆発燃焼炎に匹敵する高速火炎を発生させる。そして、この燃焼炎ジェット流中に原料粉末を供給し、粉末を熔融または半熔融状態にして、高速で連続的に衝突、堆積する方法である (和田, 2008)。このため、原料粉末の衝突速度が超音速に近いことから、APS 法に比べて極めて緻密で高密着強度な皮膜を形成できる点に特徴がある。本研究では、前報 (坂本ほか, 2015) と同様に SUS304 鋼製平板試験片を HVOF 法により補修し、同試験片の引張強度特性、疲労寿命特性について調べる。

2. 試験方法

2・1 供試材および試験片形状

本試験に供した材料はオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 である。供試材の化学成分を表 1 に示す。厚板素材から図 1 に示す形状（平行部長さ 40mm、幅 10mm、厚さ 5mm）に試験片を機械加工した。なお、試験片の平行部に対して、図中の灰色の領域を図 1 に示されるように切欠き加工した。切欠き形状は、長さ $L=12\text{mm}$ 、深さ $h=1\text{mm}$ とした。なお、切欠きの切込み角度は、引張試験片に対しては $\theta=20, 30, 40, 50^\circ$ の 4 種類、疲労試験片に対しては $\theta=30, 50, 80^\circ$ の 3 種類とし、切込み角度が引張強度や疲労寿命に及ぼす影響について検討することとした。

図 1 に示すように切欠き加工した後、切欠き底面をブラスト処理 (WA#60, 0.3MPa) し、HVOF (UniCoat-LF/JP-5000 gun, Oerlikon Metco 社製) により CoNiCrAlY 合金粉末 (CO-210-1, Praxair Surface Technologies 社製) にて補修した。なお、本研究で補修材として CoNiCrAlY 合金粉末を選定したのは前報 (坂本ほか, 2015) と同様の理由である。HVOF による 1 パス当たりの成膜量は $20\sim 30\mu\text{m}$ であり、数パス毎に皮膜厚さをマイクロメータで測定するとともに、溶射直後の基材温度を接触式温度計により管理した。なお、溶射中、溶射面の反対側に冷却用空気を吹き付けることで基材温度をコントロールした。

Table 1 Chemical composition of SUS304 stainless steel.

Composition [wt.%]	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS304	0.06	0.70	1.72	0.031	0.003	8.90	18.21

Fig. 1 Geometry of plate-shaped specimen, and gray area indicates part repaired by HVOF.

引張試験、疲労試験のために“溶射まま材”と“後熱処理材”を準備した。溶射まま材とは、HVOF 溶射した後にそのまま試験に供したものである。後熱処理材とは、つぎのような手順に従って溶射まま材に対して熱処理を施したものである。熱処理により試験片が酸化することを防止するために、試験片表面に SiO_2 ガラス系酸化防止剤を塗布した。その後、電気炉にて熱処理（大気中 873K, 48 時間）を施した。なお、熱処理温度は、補修部と母材の密着強度の改善と補修部の機械的特性の改善を狙い、CoNiCrAlY 合金の延性—脆性遷移温度（673K）を上回るよう設定した。

2・2 試験方法

本研究で使用した試験機はサーボパルサー（EHF-EB50kN-20L, 島津製作所製）である。引張試験には、図 2(a)に示すようにピンで試験片を試験部に固定し、引張負荷を試験片に作用させるよう治具を準備した。試験片に生じているひずみを計測するために、ひずみゲージ（KFG-2-120-C1-11L1M2R, 共和電業製）を平板試験片の母材部中央、両補修部の 3 か所に接着した。試験機コントローラからのロードセル荷重、クロスヘッド変位、ひずみゲージをアンプで増幅したそれぞれの電気信号をデータロガー（NR-1000, キーエンス社製）にてサンプリング時間 0.1s のもとで記録した。あわせて、引張負荷中での試験片の損傷進展を把握するために、CCD カメラ（BW-500X, アズワン社製）にて引張負荷中、試験片表面を観察、撮影した。

Fig. 2 Testing arrangements for tensile and fatigue tests.

疲労試験には、4 点曲げ荷重を試験片に作用させるよう図 2(b)に示すような治具を準備し、引張試験に用いた試験機と同一のものを用いて行った。なお、補修部に一樣な引張応力を作用させるとともに、実機においては表面から内部に向けて応力が分布する。このため、このような応力分布を模擬するために 4 点曲げ荷重により疲労

試験を行った。周波数 1Hz にて荷重制御正弦波の片振り繰返し負荷（最小荷重 $P_{\min}=0$ ，最大荷重 $P_{\max}=577$ N）を作用させた。なお、本試験で設定した最大荷重は、補修部での曲げ応力が降伏応力に近い値となるよう決定した。繰返し負荷中に試験片に生じているひずみを計測するために、図 2(b)に示すようにひずみゲージ (KFG-2-120-C1-11L1M2R, 共和電業製) を平板試験片の両補修部の 2 か所に接着した。ロードセル荷重, クロスヘッド変位, ひずみゲージをアンプで増幅したそれぞれの電気信号をデータロガー (NR-1000, キーエンス社製) にてサンプリング時間 0.1s のもとで記録した。これに加えて, CCD カメラ (BW-500X (解像度 4608×3288), アズワン社製) にて, 疲労試験を途中止めしながら補修部を観察, 撮影した。さらに疲労試験を終了した後, 走査型電子顕微鏡 (SEM, JCM-6000, JEOL 社製) にて破面を観察し, 破壊の起点, 疲労き裂の進展形態について調べた。

3. 試験結果および考察

3・1 硬さ分布

溶射まま材ならびに後熱処理材の硬さ分布を調べた。硬さ測定を行う前に試験片表面を研磨し, マイクロビッカース硬度計 (MICRO-SA, 松坂精機製) により硬さを測定した。

一例として切込み角度 $\theta=30^\circ$ の試験片に対する硬さ分布を図 3 に示す。中抜き印は溶射まま材, 黒塗り印は後熱処理材の測定結果をそれぞれ示す。また, グレーで示される領域は補修部に相当する。図より, 溶射まま材, 後熱処理材ともに母材部に比べて補修部の硬さが高い。さらに補修部と母材部の界面近傍で硬さが急激に変化していることも特徴的である。界面近傍の組織状態を調べた結果, 補修部と母材部の界面では熱影響部のような熔融痕は認められなかった。このため, 補修部材である CoNiCrAlY 合金と母材である SUS304 鋼の硬さがそのまま本結果に現れたものと考えられる。つぎに溶射まま材と後熱処理材の硬さ分布を比較すると, 母材部では変化が認められないものの, 補修部で硬さが増加している。これは, CoNiCrAlY 合金の延性-脆性遷移温度を超えた温度で後熱処理した影響によるものと考えられる。すなわち, 後熱処理により CoNiCrAlY 合金内部に含まれていた小さな開気孔, スプラットバウンダリーが高温焼結により消失し, 硬さが高くなった。なお, 他の切込み角度においても硬さ分布は図 3 とほぼ同様の傾向を呈していた。

図 4 に補修部での平均硬さと切込み角度 θ の関係を示す。なお, 図中の中抜き印は溶射まま材, 黒塗り印は後熱処理材の結果を示す。図より, 溶射まま材, 後熱処理材ともに切込み角度に対して補修部での平均硬さはほぼ一定である。

Fig. 3 Vickers hardness distribution for the specimen with the cutting angle $\theta=30^\circ$. Vickers hardness of heat-treated specimen is higher than one of non-heated specimen.

Fig. 4 Relationship between average Vickers hardness over the repaired part and the cutting angle θ . Average hardness in repaired part takes almost constant value over all range of cutting angle.

3・2 引張試験結果

図5に溶射まま材の応力-ひずみ曲線を示す。ここで、応力は補修部を含む試験片平行部での断面積によりロードセル荷重を除した値とした。また、横軸のひずみは図2(b)の試験片中央部に接着したひずみゲージによる計測値を示す。図より、すべての切込み角度に対して応力はほぼ線形にひずみとともに増加している。その後、降伏応力に達した後に塑性変形する典型的な応力-ひずみ曲線を呈している。ただし、溶射まま材の降伏応力は、切込み角度によらず母材（図中の切込み角度 $\theta=0$ ）のそれに比べて低い。CCDカメラによる観察結果から、溶射まま材において降伏応力を超えると母材と補修部の界面でき裂が発生していた。その後、き裂先端を起点としてすべり帯が発生した。このことから、母材の降伏応力に比べて溶射まま材のそれが低かった理由として、補修部と母材部界面で早期に発生したき裂が見かけ上降伏応力を低下させたものと考えられた。

図6に切込み角度 $\theta=40^\circ$ の試験片における応力-ひずみ曲線に及ぼす後熱処理の影響を示す。図中の中抜き印は溶射まま材、黒塗り印は後熱処理材の結果をそれぞれ示す。図より、後熱処理により全体的に応力レベルが増加している。これは、後熱処理により補修部の硬さが増加したことと対応している。すなわち補修部は応力の一部を分担しており、補修部の機械的特性が増加したことでロードセルにて計測された荷重値が溶射まま材のそれに比べて増加したと考えられる。

Fig. 5 Stress-strain curve for non-heat treated specimen. Peak stress is reduced by repairing specimen.

Fig. 6 Effect of heat treatment on stress and strain curve for specimen with the cutting angle $\theta=40^\circ$. It is found that peak stress is affected by heat treatment.

図7に縦弾性係数と切込み角度 θ の関係を示す．ここで、縦弾性係数は応力—ひずみ曲線における原点近傍での傾きから評価した．また、図中の中抜き印は溶射まま材、黒塗り印は後熱処理材をそれぞれ示す．図より、溶射まま材、後熱処理材ともに切込み角度 θ が縦弾性係数に及ぼす影響はわずかである．ただし、溶射まま材に対して後熱処理を施すことにより縦弾性係数は増加する．これは先の硬さ分布での説明と同様に後熱処理により小さな開気孔やスプラットバウンダリーが消失し、補修部の組織が緻密となったことによる．

Fig.7 Relationship between apparent Young's modulus and the cutting angle θ . Apparent Young's modulus is increased by performing heat treatment for repaired specimen.

Fig.8 Variation of strain at surface of the repairing part with cross head displacement for the specimen with the cutting angle $\theta=40\text{deg}$.

図8に切込み角度 $\theta=40^\circ$ の溶射まま材に対する補修部でのひずみ(ε_1 , ε_3)とクロスヘッド変位(δ)の関係を示す．なお、その他の切込み角度の結果もここに示した結果にほぼ一致していたため、ここでは結果の掲載を割愛する．はじめに、補修部でのひずみはクロスヘッド変位とともに単調に増加し、0.7mmでひずみ値が最大となる．ひずみ値がピークに達した後、急激に低下し、クロスヘッド変位とともにひずみ値はほぼ一定となる．CCDカメラによる観察結果から、ひずみ値が変化した理由をつぎのように説明できる．クロスヘッド変位の増加に伴って試験片が一様に変形した．その後、母材部と補修部の界面でき裂が発生し、界面に沿って進展した．この時、

補修部と母材部の界面にき裂が発生した時点とひずみ値が急激に低下した時点が一致していた。その後、補修部が完全に母材側からはく離した。補修部のはく離後、ひずみ値が一定となったことから、この値にマイナスを掛けた値が HVOF により補修部に形成された残留応力の符号と大きさに対応している。本結果においては、ひずみ値は正、すなわち引張ひずみであったことから、HVOF により補修部には圧縮残留応力が形成されていたと考えられる。

HVOF 補修の引張強度を特徴づけるため、CCD カメラにより母材と補修部の界面でき裂発生が認められた時の母材部でのひずみ値 (ϵ_2) を“き裂発生ひずみ”と定義した。このため、き裂発生ひずみと図 8 のひずみのピーク値とは完全には一致しない。また、ひずみ値—クロスヘッド変位の関係図において、補修部がはく離して一定となったひずみ値の符号を逆転させた値に補修部の縦弾性係数を掛けることで HVOF 補修部での残留応力を求めた。なお、補修部の弾性係数は次のようにして求めた。引張試験後に試験片から脱落した補修部から引張試験片を採取し、室温にて引張試験を実施した。試験片の平行部に接着したひずみゲージによる値とロードセル荷重から応力—ひずみ曲線を求め、この傾きからそれぞれの試験片に対する HVOF 補修部の縦弾性係数を評価した。

Fig.9 Relationship between crack initiation strain and the cutting angle θ . The crack initiation strain is increased with cutting angle, and is affected by heat treatment.

図 9 にき裂発生ひずみと切込み角度 θ の関係を示す。図に用いられている印はこれまでと同様であり、中抜き印は溶射まま材、黒塗り印は後熱処理材をそれぞれ示す。溶射まま材において、き裂発生ひずみは切込み角度 θ に伴って増加していることがわかる。このことから、鋭い切込み角度となるように損傷部を切り出し、補修することで補修部のき裂発生強度が向上することがわかる。さらに後熱処理することでき裂発生ひずみも増加する。なお、APS 補修材に関する前報の結果 (坂本ほか, 2015) において、き裂発生ひずみ値は約 0.0003 mm/mm であった。このことから、APS に対して HVOF により補修することで密着強度が約 10 倍程度改善されたこともわかった。

図 10 に残留応力と切込み角度 θ の関係を示す。補修部での残留応力は圧縮側に数百 MPa である。特に溶射まま材の結果に注目すると、切込み角度によらず -350 MPa であった。これに対して、後熱処理を施すことにより、残留応力の値は全体的に低下、すなわち緩和している。ただし、測定結果に大きなばらつきが認められるが、このようなばらつきが生じた理由については現状不明である。ところで、APS による補修材に関する前報の結果 (坂本ほか, 2015) において、残留応力値は数十 MPa の引張応力であった。このことから、APS に対して HVOF により補修することで高い圧縮残留応力を付与できることもわかった。なお、圧縮残留応力は後述する疲労寿命の改善に寄与することが期待できる。

以上のことから、溶射まま材において、残留応力は -350 MPa と非常に高いこと、部品表面に発生した損傷 (減肉、き裂) を機械加工により削除する際には、切込み角度をなるべく鋭くすることで、その後に行われる補修の密着強度をさらに向上できることがわかった。

Fig.10 Relationship between residual stress and the cutting angle θ . The residual stress in repaired part is in compressive, which leads to improve fatigue life of repaired component.

Table 2 Fatigue test results and damage features.

Cutting angle	30deg			50deg			80deg		
	N [cycles]	D [%]	Observation	N [cycles]	D [%]	Observation	N [cycles]	D [%]	Observation
Spallation of the repairing part at tensile side	652	1.57		—	—		—	—	
Crack initiation at the substrate	34000	82.1		205162	98.0		48000	77.1
Spallation of the repairing part at compressive side	36822	88.9		207800	99.2		60824	97.7
Failure	41435	100		209392	100		62277	100	

3・3 疲労試験結果

疲労試験結果をまとめて表2に示す。この表には、切込み角度 θ が疲労寿命と表面での損傷状態に及ぼす影響が示されている。また、補修部が脱落するまでの繰返し数、き裂が発生するまでの繰返し数、補修材の中立面にき裂が達するまでの繰返し数、疲労寿命 (N_f) もそれぞれ併記されている。ここで、損傷率 D は、

$$D = \frac{N}{N_f}$$

で定義した。ここでの疲労寿命とは試験片が破断するまでの繰返し数を意味する。

表において表面損傷の違いに注目すると、次のようなふたつの違いが認められる。すなわち、(1)補修部が脱落するケース、(2)補修部と母材の界面からき裂が発生し、母材部を進展するケース、である。

切込み角度 $\theta = 30^\circ$ の補修材における疲労損傷状態はケース(1)に相当する。 $N=652$ サイクルにて補修部が完全に脱落した。その後、 $N=34000$ サイクルにて切込み部での応力集中部からき裂が発生した。最終的には、 $N=41435$ サイクルにて疲労寿命に達した。

切込み角度 $\theta = 50^\circ$ の補修材における疲労損傷状態はケース(2)に相当する。損傷率 $D=98\%$ に達するまでなら損傷発生が認められず、補修部が脱落することなく補修部と母材部界面でき裂が発生した。このき裂は繰返し数の増加とともに母材中を伝ばし、疲労寿命に達した。この時の疲労寿命は 209392 サイクルであった。なお、切込み角度 $\theta = 80^\circ$ においても同様の損傷進行状態が認められる。ただし、き裂が発生するまでの損傷率は $N=77\%$ 、疲労寿命は 62277 サイクルと短くなった。以上のことから、補修部がはく離せず、疲労き裂も疲労寿命に達する直前まで発生しにくい適切な切込み角度 θ が存在することがわかった。

Fig.11 SEM observation of fatigue fractured surface.

Fig.12 SEM observation of A part in the fatigue fractured surface.

図 11 に疲労試験後の破面を電子顕微鏡 (SEM) にて観察した結果を示す。図 11(a)は切込み角度 $\theta = 30^\circ$, 図 12(b)は $\theta = 50^\circ$ の破面を示しており、曲げ負荷における引張側にある補修部を観察したものである。図 11(a)では

補修部が脱落しているため、SEM 写真には補修部は含まれていない。図 11(a)の SEM 観察結果より、図中の破線で示されるエッジ領域からそれぞれき裂が発生していることが確認できる。これらのき裂は放射状に伝ばし、試験片厚み方向中央部で相互に合体したと考えられる。一方、図 11(b)においては補修部が脱落していなかったため、SEM 写真には補修部が認められる。観察結果から、補修部は平坦であり、母材側には明瞭なストライエーションが認められた。このため、き裂が補修部と母材部界面で発生し、これが母材部を伝ばしたと考えられる。

図 12 に図 11(b)の切込み角度 $\theta = 50^\circ$ の補修材の破面における A 部を拡大した観察結果を示す。図より補修部側のエッジ部において滑り合うような痕跡が認められる。このような滑り合う痕跡は、補修部と母材部の界面でき裂が発生した後に、繰返し負荷中、圧縮残留応力により相互に滑り合ったことで生じたものと考えられる。

以上により、切込み角度 θ により疲労寿命が強く影響を受けていること、特に切込み角度 $\theta = 50^\circ$ において最も疲労強度が高くなることがわかった。

4. 結 言

本研究では、HVOF により補修された SUS304 鋼製の平板試験片を対象に引張試験、疲労試験を実施した。得られた結果をまとめるとつぎのようになる。

- (1) 様々な切込み角度を有する試験片を準備し、同試験片を室温下で引張試験した。CCD カメラによる連続観察の結果、すべての切込み角の条件においてき裂が補修部と母材部の界面で発生し、これが界面に沿って進展し、補修部がはく離することがわかった。また、切込み角度が鋭くなるにつれて補修部界面でのき裂発生強度が増加した。これらの結果は、APS による補修材のそれに比べて 10 倍程度改善していた。
- (2) 同平板試験片に対して繰返し曲げ荷重を作用させる疲労試験を行った。この結果、切込み角度 $\theta = 50^\circ$ において最も疲労強度が高くなることがわかった。また、切込み角の増加により補修部がはく離しないこともわかった。

以上のことから、これまで検討してきた APS 法に比べて HVOF 法は補修技術として高い可能性を有していることが明らかとなった。今後、同法による高温機器の補修可能性とその信頼性について検討を進めていく。

謝 辞

本研究は、ボイラー・圧力容器等研究助成金を受けて実施したものであり、ここに感謝の意を表する。また、本研究における引張試験、疲労試験の実施ならびにデータ整理の協力を得た、東京理科大学大学院 坂本拳吾氏（現、国土交通省）に感謝する。

文 献

- Aloraier, A., Al-Mazrouee, A., Price, J.W.H. and Shehata, T., Weld repair practices without post heat treatment for ferritic alloys and their consequences on residual stresses: a review, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 87, Issue 4 (2010), pp.1270-1330.
- Breitzman, T. D., Iarve, E.V., Cook, B.M., Schoeppner, G.A. and Lipton, R. P., Optimization of a composite scarf repair patch under tensile loading, *Composites: Part A*, Vol. 40 (2009), pp.1921-1930.
- Chowdhury, S.G., Mukhopadhyay, N.K., Das, G., Das, S.K. and Bhattacharya, D.K., Failure analysis of a weld repair steam turbine casting, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 5, No. 3 (1998), pp.205-218.
- Dong, P., Hong, J.K. and Bouchard, P.J., Analysis of residual stresses at weld repairs, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 82, Issue 4 (2005), pp.258-269.
- Kumar, A., Boy, J., Zatorski, R. and Stephenson, L.D., Thermal spray and weld repair alloys for the repair of cavitation damage in turbines and pumps: a technical note, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 14, No. 2 (2005), pp.177-182.
- 境英輔，納富啓，プラズマ溶射技術の応用，溶接学会誌，Vol.54, No. 8 (1999), pp.164-168.
- 坂本拳吾，荒井正行，水津竜夫，引張負荷を受ける大気圧プラズマ溶射補修材の強度特性，日本機械学会論文集，Vol.81, No.830 (2015), DOI: 10.1299/transjsme.14-00559.
- 和田哲義，高速フレイム(HVOF)溶射の現状と課題，表面技術，Vol. 59, No. 8 (2008), pp. 495-500.

Wu, H., Imad, A., Beseddiq, N., de Castro, J.T.P. and Meggiolaro, M.A., On the prediction of the residual fatigue life of cracked structures repaired by the stop-hole method, *International Journal of Fatigue*, Vol. 32, Issue 4 (2010), pp.670-677.

References

- Aloraier, A., Al-Mazrouee, A., Price, J.W.H. and Shehata, T., Weld repair practices without post heat treatment for ferritic alloys and their consequences on residual stresses: a review, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 87, Issue 4 (2010), pp.1270-1330.
- Breitzman, T. D., Iarve, E.V., Cook, B.M., Schoeppner, G.A. and Lipton, R. P., Optimization of a composite scarf repair patch under tensile loading, *Composites: Part A*, Vol. 40 (2009), pp.1921-1930.
- Chowdhury, S.G., Mukhopadhyay, N.K., Das, G., Das, S.K. and Bhattacharya, D.K., Failure analysis of a weld repair steam turbine casting, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 5, No. 3 (1998), pp.205-218.
- Dong, P., Hong, J.K. and Bouchard, P.J., Analysis of residual stresses at weld repairs, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 82, Issue 4 (2005), pp.258-269.
- Kumar, A., Boy, J., Zatorski, R. and Stephenson, L.D., Thermal spray and weld repair alloys for the repair of cavitation damage in turbines and pumps: a technical note, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 14, No. 2 (2005), pp.177-182.
- Sakai, E. and Notomi, K., Application of plasma spraying, *Journal of the Japan Welding Society*, Vol. 54, No. 3 (1985), pp.164-168.
- Sakamoto, K., Arai, M. and Suidzu, T., Study on strength properties of material repaired by atmospheric plasma spraying under tensile load, *Transaction of the JSME (in Japanese)*, Vol.81, No.830 (2015), DOI: 10.1299/transjsme.14-00559.
- Wada, T., Current status and problems of HVOF thermal spray, *Journal of the Surface Finishing Society of Japan*, Vol. 59, No. 8 (2008), pp. 495-500.
- Wu, H., Imad, A., Beseddiq, N., de Castro, J.T. P. and Meggiolaro, M.A., On the prediction of the residual fatigue life of cracked structures repaired by the stop-hole method, *International Journal of Fatigue*, Vol. 32, Issue 4 (2010), pp.670-677.