# 超音波ピーニング法による高張力鋼の疲労強度の改善

## - UPシステム ----

### パワーアップされたUPシステム(UP-600)

本資料は"溶接技術"2010年2月号に紹介したものです。2009年に高崎市で開催された「水力発電プラント用高張力鋼に関する国際会議」で発表された論文の抄訳です。

超音波ピーニング法(UPシステム)や超音波衝撃処理法(UIT処理法)の有効性等が認知され始め、種々の工業界で本格的な適用への動きが活発になって来ています。溶接構造物の延命策として、さらに補修溶接後の疲労強度の向上策並びに新造時における疲労強度の向上策として最も有効な技術として認められて来ています。特に高張力鋼に対して著しい疲労強度の向上が見られます。

本論文ではUP-500が使用されましたが、その後より強固なUP-600が開発され、これが標準品とされています。

#### —— SINTEC 社 ——

カナダ ITL 社から分離独立し、超音波ピーニング装置等の製造・販売と実用化への研究開発を行っている Structural Integrity Technologies Inc.です。

CEO: Jacob Kleiman, Ph.D.
President: Yuri Kudryavtsev, Ph.D.

—— (株) Be よんど —— 岩村 吉就:元 溶接技術者

製造元: Structural Integrity Technologies (SINTEC) Inc. Canada 日本総代理店 ㈱ Beよんど SINTEC Japan 部

〒658-0072 神戸市東灘区岡本5丁目2-6 Tel: 078-413-8303、Fax: 078-452-5330

URL:http://go-beyond,jp E-mail:office@go-beyond,jp

## 特別寄稿

## 超音波ピーニングによる 高張力鋼溶接継手の疲労強度の改善

ユーリ・クデュラフチェフ、ヤコブ・クレイマン 岩村 吉就
Integrity Testing Laboratory社 株Beよんど

#### 1 はじめに

高張力鋼の溶接継手の疲労強度は、溶接のままでは軟鋼の疲労強度と同一であり、高張力鋼の特性を生かし切れない点があった。さらに溶接構造物の疲労き裂はほとんど繰り返し荷重を受ける溶接継手に発生し、補修溶接後も疲労寿命は伸びなかった。

これらの問題を解決するために、溶接後の種々の処理 法により、高張力鋼溶接継手の疲労強度の向上が図れら ている。超音波ピーニング(UP)は、このような溶接継 手の疲労寿命を改善できる新しくて有望な手法の一つで ある。

UP法は1960年代にウクライナのパトン溶接研究所で基礎技術が開発され、2000年の国際溶接学会(IIW)でその効果が確認された。開発のそれぞれの段階で、UP法は超音波処理(UT)、超音波衝撃処理(UIT)、超音波衝撃ピーニング(UIP)として知られている。UP処理のもっとも大きな効果は、材料表面の有害な引張残留応力を圧縮残留応力に変えることによって得られる。さらに溶接止端部の応力集中の減少並びに材料表面層の改質にもよって効果が発揮される。

溶接継手の疲労試験では、従来からあるグラインダー処理、TIGドレシング法や、加熱処理法、ハンマーピーニング法、ショットピーニング法や新しい低温変態溶接材等に比べて、UP処理法がもっとも効果が高い改善法であることを示している。

# 2 超音波ピーニング(UP)システムの概要

超音波衝撃処理法(UIT)は溶接構造物の疲労寿命を向上させる新しく確実な手法の一つである<sup>1)~5)</sup>。ほとんどの工業的応用において、この手法は超音波ピーニング(UP)として知られている<sup>6),10)</sup>。UP処理のもっとも大きな効果は、材料表面の有害な引張残留応力を圧縮残留応

力に変えることによって得られる。さらに溶接止端部の 応力集中の減少並びに材料表面層の改質にもよって効果 が発揮される。

溶接継手の疲労試験では、従来からあるグラインダー処理、TIGドレシング法や、加熱処理法、ハンマーピーニング法や新しい低温変態溶接材等に比べて、UP処理法がもっとも効果が高い改善法であることを示唆している<sup>1),11),12)</sup>。

UP技術は特別な打撃子によるハイサイクルな衝撃と被処理材での超音波振動との相乗効果を基本としている。開発されたUP処理システムは全重量の9kgで、超音波駆動体と発振器並びに疲労寿命改善に最小の作業時間と消費電力でもって、もっとも大きな効果を出すUP最適条件を算定するソフトウエアを搭載した卓上パソコンからなる<sup>6),10),13)</sup>。図1に示す基本的なUPシステムは溶接止端部あるいは溶接金属や母材の広い面積(必要に応じて)の処理に使用される。

最近開発したUP装置は「需要に応じたパワー」の概念に基づいている。この概念に応じてUP装置の出力と他の操作上のパラメータは、残留応力の変換、応力集中の緩和や表面層の改質等により、溶接構造物の寿命がもっとも改善できるように調整されている。



図1 溶接構造物の疲労寿命改善のための基本的な超音波ピーニング (UP) システム

104

UP処理法を含む種々の溶接継手の疲労寿命改善処理法の効果は、使用される材料特性、溶接継手の種類や繰り返し荷重や他の因子などに左右される。このような要素を考慮しUP処理法を効果的に適用するために、独自の予想モデルを使用し、UP最適応用のソフトウエアが開発された。この最適応用では、最小の作業時間・最小労働・最小コストで溶接継手の疲労寿命を最大に延ばすことができる。

UPシステムへの開発技術とコンピューター化により、溶接継手の疲労寿命の延命が図られ、同時に溶接歪みの除去並びに残留応力の除去・材料表面の硬化・結晶の微細化が図られてきた。UP処理法が貢献している産業界としては、鉄道、高速道路の高架橋、建築物、造船、鉱業、自動車や航空機等がある。

#### 3 超音波ピーニング(UP)の原理, 技術と装置

#### 3.1 自由稼働な打撃子

超音波ピーニング(UP)の装置は、1940年代にハンマーピーニングの作動頭部に用いられた技術に基づいてる。当時、種々の複数の打撃子を装着した作動頭部が開発され、部品や溶接継手の衝撃処理に用いられた。ただし駆動源はほとんど圧搾空気であった。打撃子を駆動部先端と結合せず、非処理材と駆動部との中間で自由に動かさせると、衝撃処理の効果が発揮される<sup>14),15)</sup>。図2に、UPにおける一連の作動頭部を示す。作動頭部の取替えは容易である。

#### 3.2 超音波衝撃と超音波の効果

UP技術は特別な打撃子によるハイサイクルな衝撃と被処理材での超音波振動との相乗効果に基づいている。金属への超音波衝撃処理に関する特徴は文献<sup>16)</sup> に記述されている。駆動源の操作周波数と打撃子の周波数は同じではない。



図2 交換可能な一連の作動頭部

超音波処理中、打撃子は超音波駆動源の端部と非処理 材の小さな間隙を振動し、処理部に衝撃を加える。この 種のハイサイクルな動きと非処理材に誘因されるハイサ イクルな振動衝撃の速度が典型的な超音波衝撃といわれ ている。

金属に関する超音波の代表的活用としては,音響軟化,音響硬化や音響加熱等がある<sup>17)</sup>。音響塑性として知られる音響軟化の最初のものとして,音響照射により降伏応力が低下し塑性変形が生じやすくなる。一般に,機械的特性への超音波の影響は,材料の加熱効果と対比される。金属は超音波照射を受けるとすぐに音響軟化を生じる。また,比較的低い振幅の超音波は,音響照射が止まると金属の物理的特性への後遺的影響は何も残らない<sup>17)</sup>。

#### 3.3 超音波ピーニングの技術と装置

超音波駆動体は20~30kHzの高周波で振動する。そして駆動体は圧電式か磁歪式を用いている。どちらの技術を用いても、駆動体端部の振動は20~40μmである。駆動体が振動している間、駆動体先端部は打撃子と異なる振動サイクルで衝撃を与える。打撃子は非処理材の表面に衝撃を加える。この衝撃によって、材料の表面層に塑性変形が生じる。1秒間に何百回から何千回と繰り返されるこれらの衝撃は、材料内に誘因される高周波の振動と連動して、UPの種々の有益な効果を発揮する。

このUPは、部品や溶接継手表面層から有害な引張残留応力を除去し有益な圧縮残留応力をもたらす有効な方法である。残留応力の再分布は次の二つの因子による。ハイサイクルな衝撃荷重と複雑なスペクトラムを有する振動が非処理材に伝播される。このスペクトラムは、超音波駆動体の周波数、質量並びに打撃子の数量や形状と非処理材の形状に関係する。これらの振動は溶接による残留応力を軽減する。第二のもっとも重要な因子は、少

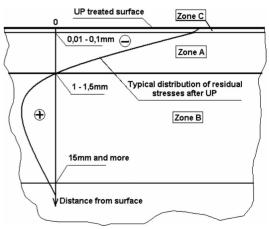


図3 超音波ピーニングによって改善された材料の横断面

2010年2月号 105

<b>±</b> 1	超音波ピー	<b>-</b> ` .	ガルト	・アンか羊+	<b>か + ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ☆</b>	51-1:
ᅏ			·/ h	つ ( EV 華 み	/ L. / / / / / / / / / / / / / / / / / /	a rev

Zone	Description of zone	Distance from surface, mm	Improved characteristics	
A	Zone of plastic deformation and compressive residual stresses	1-1,5 mm	Fatigue, corrosion, wear, distortion	
В	Zone of relaxation of welding residual stresses	15 mm and more	Distortion, crack propagation	
С	Zone of nanocrystallization (produced at certain conditions)	0,01-0,1 mm	Corrosion, wear, fatigue at elevated temperature	

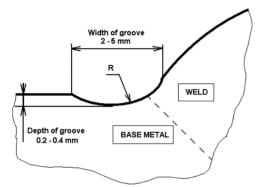


図4 超音波ピーニングによって改善された溶接止端部の形状

なくても疲労改善に対して、最も有効な圧縮残留応力を 生じさせる表面層の塑性変形である。

疲労改善において、もっとも有効なのは金属や合金の表面層に圧縮残留応力を導入し、溶接止端部の応力集中を緩和すると同時に材料表面の機械的特性を強化することである。UP処理後の材料横断面における残留応力状態を図3に模式的に示す。UPの利点を表1に示す。

UPによる溶接継手の疲労寿命改善の概念を図4に示す。溶接継手の疲労寿命を十分に延ばすには、溶接止端部(母材と溶接金属の境界領域)のみ処理すれば十分である。図5に示すいわゆる溝はUPによって生じるものであり、その幾何学的因子によって特徴付けられる<sup>2),3),6),7)</sup>。

超音波ピーニングに使用される超音波駆動体には2種類ある。一つは圧縮方式、他は磁歪方式である。電気的エネルギーを振動する機械的エネルギーに変換することは同じであるが、それぞれ違った方法を取っている(図6)。磁歪式では、超音波発信器からの電気的エネルギーを変換するのに先ずコイルを使用して磁場変換を行う。そして磁歪材料の振動子に機械的振動を発生させる。

一般に、磁歪式駆動体の効率は圧電式より劣る。磁歪



図5 突合せ継手形状; As Weld, UP処理後(右側)

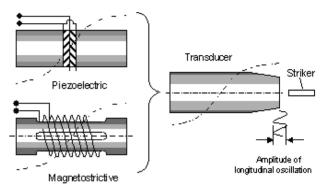


図6 超音波ピーニングの駆動体の模式図

式では、電気的エネルギーを磁力に変換しさらに機械的 エネルギーに変換する二度のエネルギー変換が必要なた めに効率が低くなる。さらに、磁場のヒステリシス効果 がさらに磁歪式駆動体の効率を下げる。また、磁歪式駆 動体では強制水冷が必要になる。

圧電式駆動体では、電気的エネルギーを圧電効果により直接機械的エネルギーに変換する。最近の圧電式駆動体では、より強力で、高効率で安定性の高いセラミック圧電素子が使用され、高温や高応力下でも使用されており、消費電力も60%近く削減されている。エネルギーの高効率により、消費電力300~500Wの圧電式駆動体による疲労寿命改善の効果は、消費電力1,000Wの磁歪式駆動体での効果と同じである<sup>6),11),12)</sup>。セラミック圧電素子を用いたUPシステムを図1に示す。

#### 4 疲労改善へのUPの適用

溶接継手や溶接構造物の疲労寿命改善に,UPは製造時,共用時の疲労回復並びに補修時に有効に適用される 6)~10).18)

#### 4.1 疲労寿命改善と疲労回復による延 命策

実際の溶接構造物へのUP適用の効果を評価するために、3種類の大型溶接試験片について疲労試験を行った。 1番目は溶接のまま(As weld)のもの、2番目は疲労

106 溶 接 技 術

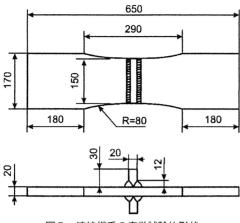


図7 溶接継手の疲労試験片形状

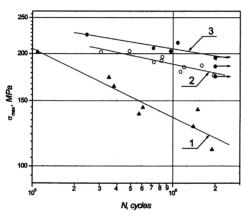


図8 加重非伝達型十字すみ肉溶接継手のS-N曲線(1:As Weld, 2:疲労試験前にUP処理,3:As Weld状態で予測疲労寿命 の50%まで繰り返し荷重を与えた後にUP処理)

試験前にUP処理を施した物,3番目はAs weldの状態で 予測疲労寿命の50%迄繰り返し荷重を与えた後UP処理 を施したもの<sup>7)</sup>。疲労試験用溶接継手形状を**図7**に示す。

荷重非伝達型十字スミ肉継ぎ手の疲労試験結果を図8に示す。UP処理を施した2,3ともに疲労強度は大幅に向上した。疲労試験前にUP処理を施した場合,疲労限(N=2\*10<sup>6</sup>)での限界応力は49%(119MPaから177MPa)向上した。As weld状線で予測疲労寿命の50%まで繰り返し荷重を与えた後でUP処理をした場合には66%(119MPaから197MPa)向上した。#2のS-N曲線に比べて,#3のS-N曲線の方がより疲労強度が向上していることから,繰り返し荷重を与えた後でのUP処理では,より効果的な残留応力の再分布が起こりかつ疲労損傷の回復が生じていることを示している。

#### 4.2 補修溶接

本稿では、実際に共用されている溶接構造部の疲労き 裂発生防止を疲労回復としている。さらにUPは疲労亀 裂の補修溶接時にも有効に使用される<sup>17),18)</sup>。

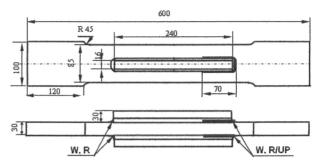


図9 種々の状態で疲労試験を行った溶接継手試験片形状(W-As Weld, R-ガウジング後の補修溶接, R/UP-ガウジングと 補修溶接のUP処理)

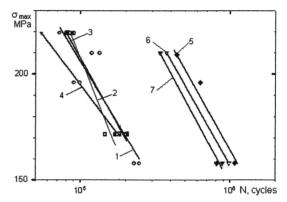


図10 溶接継手の疲労試験結果(1-As Weld 状態, 2, 3, 4-1回, 2回, 3回の補修溶接後それぞれUP処理)

荷重非伝達型で長さ方向の板がすみ肉溶接された大型 疲労試験片の形状を図9に示す<sup>18)</sup>。これらの試験片を用 いて、As weld状態、補修溶接状態並びに補修溶接後に UP処理を施した状態でそれぞれ疲労試験を行った。

疲労試験は完全片振(R=0)の引張り条件で行った。 疲労試験では、材料表面の疲労き裂長さが20mmに達し た時点で一端中断して繰り返し回数を記録し、ガウジン グでき裂を除去後補修溶接を施し疲労試験を続行した。 あるものは補修溶接後新しい溶接止端部にUP処理を施 した。As weld状態、疲労き裂補修溶接状態などの疲労 試験結果を図10に示す。

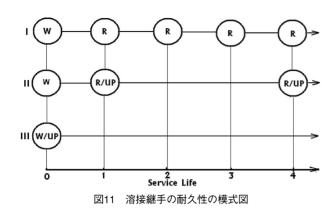
疲労亀裂の補修溶接により疲労強度は初期As weld状態の強度まで回復している。さらに、二度あるいは三度 疲労亀裂を補修してもほぼ初期As weld状態の強度まで 回復している。

疲労き裂の補修溶接後にUP処理を施すと、疲労強度は3~4倍延びている。同様の効果が、2回3回の疲労き裂補修溶接後にUP処理を施すことに依っても得られている。

UP処理を行った場合とそうでない場合について, 疲労き裂補修溶接の効果の比較を**図11**に示す。

この図表では、(I) はUP処理をしない場合、(I)

2010年2月号 107



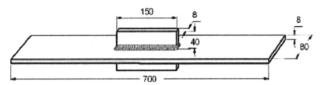


図12 降伏応力700MPa鋼の溶接継手疲労試験片形状

は補修溶接後にUP処理を行った場合、(Ⅲ) は疲労回復開始前あるいは途中でUP処理を行った場合に区分している。耐用年数1とは応力レベル158MPaでの繰り返し数240,000、応力レベル220MPaでの繰り返し数75,000に相当している。図11中のすべての○にRあるいはR/UPとあるのは耐用年数1からスタートし、疲労き裂が生じ補修溶接を繰り返したことを示してる。補修溶接や溶接継ぎ手の疲労回復のためのUP処理の効果は、図11に示すように、明らかである。

# 5 高張力鋼の溶接継手への超音波 ピーニング

#### 5.1 降伏応力700MPa鋼

降伏応力350MPa鋼と700MPa鋼の溶接継手の疲労寿 命改善に対してUP処理がいかに有効であるかを評価する ために4種類の大型溶接継手について疲労試験を行った <sup>11)</sup>。疲労試験片は板厚8mm,幅80mmで長さ方向に荷 重非伝達型の板をすみ肉溶接したものであり、その形状 を**図12**に示す。

すべての試験は応力比R=0.1の引張り荷重で行われた。

試験時の繰り返し数は2.6Hzであった。破損の定義は、 試験片が完全に分離した時点とした。疲労試験結果を**図** 13に示す。

図13から明らかなように、700MPa鋼溶接継手の疲労 強度改善にUP/UIT処理とも著しい効果を発揮している。 繰り返し数2百万回での限界応力はAs weldのそれに比

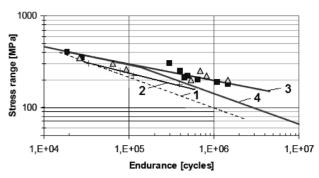


図13 700MPa鋼溶接継手の疲労試験結果<sup>11)</sup>

表 2 繰り返し数二百万回での限界応力の向上11)

S-N curve	Slope m	FAT value [MPa]	Improvement at FAT value [%]
As-welded S355 and S700	-3 (fixed)	71.3	_
UIT/UP S700	-5 (fixed)	129.4	81
Robotized TIG-dressing S700	-3 (fixed)	97.0	36.0

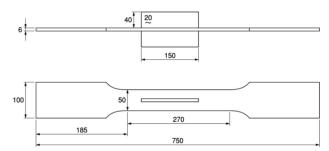


図14 960MPa鋼の溶接継手疲労試験片形状<sup>12)</sup>

較して81%増加している。同時に、TIGドレッシングの場合は、36%増加した(表2を参照)。

#### 5.2 降伏応力960MPa鋼

さらに、降伏応力960MPa鋼溶接継手の疲労寿命改善に対してUP処理がいかに有効であるかを評価するために4種類の大型溶接継手について疲労試験を行った<sup>12)</sup>。

疲労試験片は板厚 6 mm,幅50mmで長さ方向に荷重非伝達型の板をすみ肉溶接したものであり、その形状を図14に示す。これらの試験片は、完全両振りR=1で行われた。As weldでは、全ての試験片は、長手方向のスチフナ端部の溶接止端部で破損した。しかし、改善処理をした試験片では、他のいろいろな破損形態であった。疲労試験結果を図15に示す。

図15に示すように、降伏応力960MPa鋼溶接継手の疲労改善に対して、UP処理がもっとも効果が高く、次いでUIT、低温変態溶接材の順であった。

108 溶 接 技 術

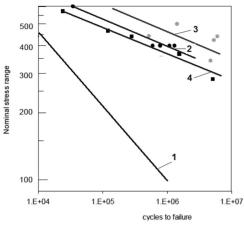


図15 960MPa鋼溶接継手の疲労試験結果<sup>11)</sup> (1 — As Weld, 2 — UT処理, 3 — UP処理, 4 — 低温変態溶接材の使用)



図16 破砕機の溶接継手の疲労回復と補修溶接部へのUP適用状況

## 6 超音波ピーニング(UP)の工業界への応用

溶接構造物の製造時の疲労強度向上や供用時の疲労回復による延命や補修時の疲労強度向上に、超音波ピーニング(UP)処理法は有効に使用される。UP技術と装置は、部品や溶接継手の疲労回復や補修溶接部の疲労強度向上に対して、いろいろな工業分野で成果を上げている。主な分野は、鉄道橋、高速道路橋、構造的装置、造船、鉱業、自動車や航空機などがある。

鉱業界で繰り返し荷重を受ける溶接継手の補修と疲労回復のために、UPを適用している実例を図16に示す。大型粉砕機の疲労強度の向上を図るために、疲労の観点から懸念される溶接長300mに渡ってUP処理が施された。疲労データと文献7)の解決策に基づいて、アメリカのオハヨー河に架かっている橋梁の溶接部の延命策としてUP処理を施した。この橋は約30年前に造られた。溶接部には目視できる疲労亀裂は発生していなかった。この橋の疲労寿命改善のためにUP処理を施す契機になったのは、ほぼ同じ時期に同じ設計で建造されたもう一つの



図17 UP処理準備状況(2つのUPシステムとリフト)

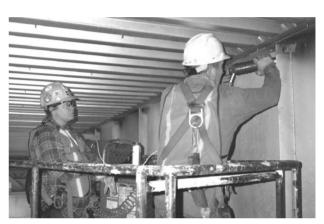


図18 溶接橋の縦スティフナ溶接端部のUP処理状況

橋で一カ所のスパンに疲労き裂が発生し破損したことであった。この橋へのUP準備状況と縦スティフナ溶接部へのUP処理状況を図17と18に示す。疲労き裂の発生の危険性があると考えられた2500箇所の溶接部にUP処理が施された。

#### 7 結論

- (1) 降伏条件700~1,000MPaの高張力鋼(HSS)による 溶接構造物の疲労寿命を改善するのには、超音波ピー ニング(UP)は比較的新しくかつ堅実な技術である。 疲労試験の結果、溶接継手へのUP処理は、使用材料 の機械的特性の向上に従って、疲労強度も著しい向上 を示している。疲労荷重を受けるHSS材へのUP 適用 は非常に大きな効果をもたらす。
- (2) さらに、溶接継手の疲労試験では、UT処理法は、 従来からの疲労強度改善技術であるグラインダ、TIG ドレッシング、加熱処理法、ハンマーピーニング、ショットピーニングや低温変態溶接材料の適用などに比 べより効果的である。
- (3) UPシステムへの開発技術とコンピュータ化により溶接継手の疲労寿命の延命が図られ、同時に溶接歪の除

2010年2月号 109

去並びに残留応力の除去・材料表面の硬化・結晶の微細化が図られてきた。UP処理法が貢献している工業界としては、鉄道、高速道路の高架橋、建築物、造船、鉱業、自動車や航空機等がある。

(この論文は2009年7月に高崎市で開催された「水力発電プラント用高張力に関する国際会議」で発表されたものの抄訳)。

#### 参考文献

- V.Trufyakov, P. Mikheev and Y. Kudryavtsev. Fatigue Strength of Weld Structures. Residual Stress and Improvement Treatmens. Harwood Academic Publishers GmbH. London. 1995. 100 p.
- Y. Kudryavstsev, V. Korshun and A. Kuzmenko. Improvement of Fatigue Life of Welded Joints by Ultrasonic Impact Treatmnet. Paton Welding Journal. 1989. No.7, p.24 - 28.
- Y. Kudryavtsev, P. Mikheev and V. Korshun. Influence of Plastic Deformation and Residual Stress Created by Ultrasonic Impact Treatment on Fatigue Strength of Welded Joints. Paton Welding Journal. 1995. No.12. p.3-7.
- V. Trufinakov, P. Mikheev , Y.Kudryavstev and E. Statnikov. Ultrasonic Impact Treatment of Welded Joints, International Institute of Welding. IIW Document XII 1609-95. 1995
- E. Stanikov, V.Trufinakov, P. Mikeev and Y. Kudryavstev. Specifications for Weld Toe Improvement by Ultrasonic Impact Treatment. International nstitute of Welding. IIE Document XII-1617-96.1996
- Y. Kudryavstev, J. Kleiman, L. Lobanov et al. Fatigue Life Improvement of Welded Elements by Ultrasonic Peening. International Institute of Welding. IIW Document XII-2010-04.2004. 20 p.
- 7) Y. Kudryavstev, J. Kleiman, A. Lugovskoy et al. Rehabilitation

- and Repair of Welded Elements and Structures by Ultrasonic Peening. International Institute of Welding. IIW Document XII-2076-05. 2005. 13p.
- Y.Kudryavstev, J. Kleiman, A, Lugovskoy and G. Prokopenko. Fatigue Life Improvement of Tubular Welded Joints by Ultrasonic Peening. International Istitute of Welding. IIW Document XII-2117-06. 2006. 24 p.
- Y. Kudryavstev and J. Kleiman. Application of Ultrasonic Peening for Fatigue Life Improvement of Automotive Welded Wheels. International Institute of Welding. IIW Document XII-2075-05. 2005. 9p
- 10) Y. Kudryavstev and J. Kleiman. Fatigue of Welded Elements: Residual Stress and Improvement Treatments. Proceedings of the IIW International Conference on Welding & Materials. July 1-8, 2007. Dubrovnik, Croatia, P.255-264
- P. Haagensen, Progress Report on IIW WG2 Round Robin Fatigue Testing Program on 700 MPa and 350 MPa YS Dteels. International Institute of Welding. IIW Document XII-2081-05. 2005.
- 12) G. Marquis and T. Bjork. Variable Amplitude Fatigue Strength of Improved HSS Welds. International Institute of Welding. IIW Document XII-2224-08. 2008.
- Y. Kudryavstev. Residual Stress. Springer Handbook on Experimental Solid Mechanics. Springer SEM. 2008. P.371 387.
- 14) Patent of USA # 2,356,314. 1944. Reo D. Grey and James R. Denison
- 15) Patent of USA # 3,349,461. 1967. Joseph F. Niedzwiecki.
- 16) Patent of USA No. 3,609,851. 1971. Metal Working Apparatus and Process. Robert C. McMaster and Charles C. Libby.
- B. Langenecker. Effects of Ultraasound on Deformation Characteristics of Metals. IEEE Transactions on Sonic and Ultrasonics. Vol. SU -13, No.1, March 1966, pp.1-8.
- 18) Y.kudryavstev, J. Kleiman and V. Knysh. Fatigue Strength of Structural Elements with Cracks Repaired by Welding. International Institute of Welding. Dovument XII-2236 08. 7p.

110 溶 接 技 術