

超音波ピーニング法による 溶接構造物の延命策と補修 —— UPシステム ——

大規模な補強工事回避により費用激減

本資料は“溶接技術”2009年1月号に紹介したものです。2005年の国際溶接学会（IIW）で発表された論文（IIW Doc.XIII-2076-05）の抄訳です。

1995年1月の阪神大震災時の高速道路崩壊以降、専門家による点検・補修工事・設計見直しが行われています。2007年8月には米国の橋梁が突然崩壊し大事故になりました。

部分破損や疲労亀裂発生後の補修は大規模になり、膨大な費用が必要になります。本論文では疲労亀裂発生前に構造部の応力集中部のみに超音波ピーニングを施工（UP処理）すれば疲労寿命が2倍以上伸び、クレーン上の作業で済むので費用が大幅に削減できかつ短期間の工事ですむことを提案しています。

さらに、発生した疲労亀裂の補修溶接部に **UP処理** を施すと同じ箇所からの疲労亀裂再発がほとんどなくなります。本技術の検証と実用化を図られることが望まれます。

—— 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 (株) 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

超音波ピーニング法による 溶接構造物の延命策と補修

岩村 吉就

(株)Beよんど Phase Tech

1 はじめに

本稿は2005年の国際溶接学会 (IIW) にて発表された IIW XIII-2076-05で、カナダのITL社Kudryavtsev, Kleiman, ウクライナのパトン溶接研究所Lobanov, Knysh, Voitenkoおよびウクライナの金属物理研究所 ProkopenkoとLugovskoy等の共同研究によるものである。以下にその内容を抄訳の形で紹介させて頂く。

超音波ピーニング (UP) 法は、ティグドレッシング、ショットピーニング、ハンマーピーニング等よりももっとも効果的に溶接継手の疲労寿命を向上させる技術であるとされている。

この論文では、疲労き裂発生防止並びにき裂伝播防止を目的に、溶接構造物の延命と補修に関する超音波ピーニング (UP) の効果について実験的検証を行った。As weldの大型試験片を用いて、推定疲労寿命の50%まで繰り返し荷重を負荷した後にUP処理を施した。また、疲労き裂の補修溶接後にもUP処理を実施した。そして疲労き裂への種々の拘束法や補修法についても比較試験を行った。過負荷加重、き裂先端部の穿孔加工、穿孔部へ高張力鋼ボルト挿入、局部爆発処理、局部加熱処理、補修溶接や補修溶接止端部へのUP処理等。さらに、高速道路や鉄道橋の延命策としてのUP実施例並びに補修溶接後のUP施工例についても紹介している。

2 緒言

超音波ピーニング (UP) 法は溶接構造物の疲労寿命向上を図る上でもっとも効果的な方法の一つとされている^{1),2)}。技術開発のそれぞれの場所や段階でUP法は超音波処理 (UT)^{3)~5)} 法、超音波衝撃技術 (UIT)^{6)~8)} 法あるいは超音波衝撃ピーニング (UIP)^{9),10)} 法などとして知られている。

このUP技術は溶接構造物の疲労寿命向上に対する高

出力超音波の代表的な応用技術とされている。それは次のことによる。

- 1) UP技術は、高出力超音波の適用技術として、溶接継手の品質向上と長寿命化への応用について30年以上の実験的研究に基づいてる。この技術に関する最初の論文は、グループリーダーのプロコフェンコ教授によって1974年³⁾ に発表されている。
- 2) UP装置の設計は「要求出力」の考えに基づいている。UP装置の出力と他のパラメーターは、溶接継手の疲労寿命を最も向上させるために、残留応力、応力集中係数および材料表面の機械的特性等の改善の必要性に応じて決定される。基本的なUPシステムでの消費電力は300~500Wである。さらに高出力な装置については要求に応じて製作できる。手動とロボット搭載用の基本的装置を写真1に示す。
- 3) 疲労寿命向上の諸処理法の効果は、特にUP処理では、使用されている材料特性、溶接継手形状、繰り返し荷重や他の因子等によって影響を受ける。UP処理を効果的に行うためにこれらの因子を考慮した最適UP処理法のソフトも開発された。開発に当たり独自の



写真1 手動用（左側）とロボット用（右側）の基本UPシステム

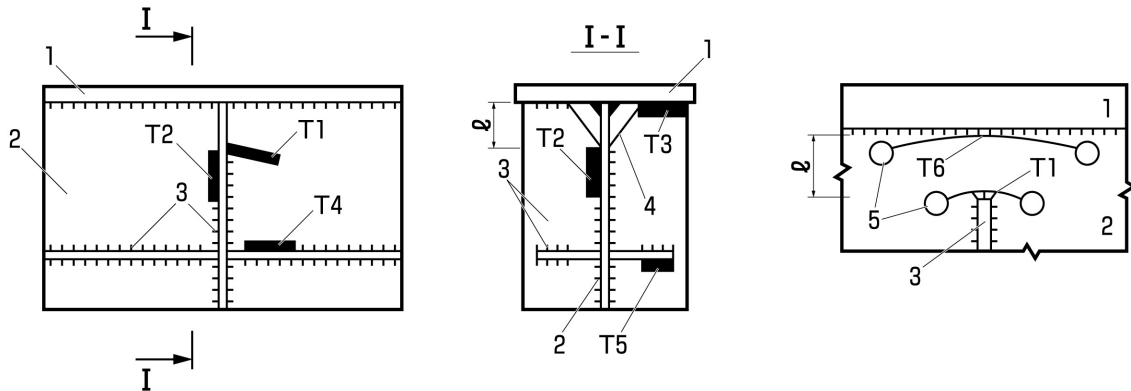


図1 鉄道橋 (a, b) と高速道路橋 (c) の溶接構造に発生する疲労き裂の代表的な位置

T1-T6: 疲労亀裂発生箇所, 1, 2: 橋梁スパンでの上部フランジ, ウェブとスティフナ, 4: スティフナ開口部 (スカラップ), 5: 疲労き裂伝播防止用孔, I: 曲げ加重を受けるウェブ領域

予測モデルを用いた。最適な施工条件では、最小の施工時間労力と消費電力で溶接継手の疲労寿命をもっとも向上できると考えられる¹⁾。

UP技術は、いろいろな産業界、鉄道、高速道路、橋梁、造船、建設機械、製鉄、自動車、航空機などの分野で、種々の部品や溶接継手の疲労寿命の向上に役立っている。

この論文では、疲労き裂の発生防止並びにき裂伝播の防止を目的に、溶接構造物の延命と補修に対する超音波ピーニング (UP) の効果について実験的検証を行った。As weldの大型試験片を用いて、推定疲労寿命の50%まで繰り返し荷重を負荷した後UP処理を施した。また、疲労き裂の補修後にもUP処理を実施した。そして疲労き裂への種々の拘束法や補修法についても比較試験を行った。過負荷加重、き裂先端部の穿孔加工、穿孔部への高張力鋼ボルト挿入、局部爆発処理、局部加熱処理、補修溶接や補修溶接止端部へのUP処理等。さらに、高速道路や鉄道橋の延命策としてのUP実施例並びに補修溶接後のUP施工例についても紹介している。

3 溶接継構造物の延命策としてのUP処理について

UPの効果的適用例の一つとして、高速道路橋や鉄道橋の溶接継手の疲労寿命改善がある。溶接構造の橋梁における疲労き裂は、縦スティフナの継手端部にほとんど集中している (き裂のタイプは図1におけるT1とT2)⁶⁾。

このような部位での疲労き裂の発生と伝播を防止する上で、UP適用の有効性について調査するために、図2に示す大型溶接試験体を用いて疲労試験を実施した。その結果、UP処理を施すと、実際の溶接構造に近いモデルでの繰り返し加重下では疲労き裂の発生は見られな

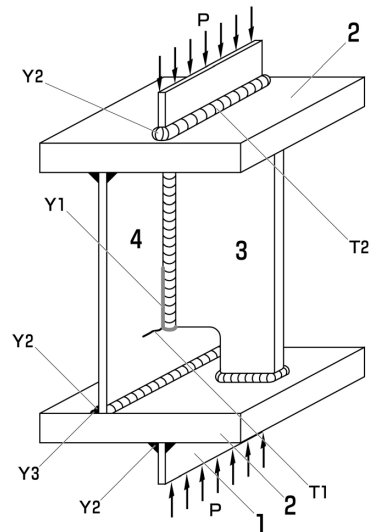


図2 ウェブに縦スティフナをつけた疲労試験用溶接構造図

T1: 疲労き裂発生領域, Y1: UP施工領域, 3: スティフナ, 4: ウェブ

った。さらに溶接スティフナ継手の終端部100mmについてUP処理を行うだけで疲労寿命が著しく伸び、疲労き裂の発生も防止できることが実証された。このUP処理は溶接止端部のみに施され、いわゆる溝が形成される (図2)^{6),7)}。

溶接橋梁等における疲労亀発生防止にUPは有効であることが溶接構造物の疲労試験で実証された。しかし、何年も使用され繰り返し加重を受けている既存橋梁へのUPの効果については未知であった。とくに今までの疲労試験結果は、繰り返し加重を受ける前にUP処理を行なったものに関するものばかりであった。次章では、As weld状態で予測疲労寿命の50%まで繰り返し加重を受けた後でUP処理を施した場合の効果を評価するための疲労試験結果について記述する。

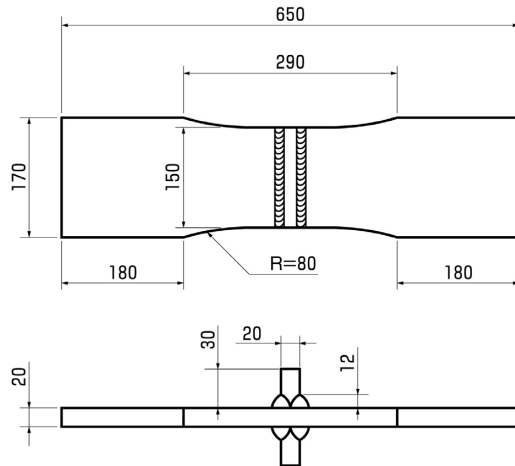


図3 溶接継手の疲労試験片形状

表1 母材の機械的特性

σ_y , Mpa	σ_u , Mpa	δ , %	ψ , %
260	465	37.6	63

表2 母材の化学成分

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
0.210	0.205	0.52	0.019	0.007	0.04	0.04	<0.01

4 溶接継手の予測疲労寿命50%時にUP処理した場合の効果

溶接構造物へのUP適用の有効性を評価するために、次の3種類の溶接継手試験片を用いて疲労試験を実施した。

- ①As weld
- ②疲労試験前にUP処理
- ③As weld状態での予測疲労寿命50%の繰返し加重を受けた後のUP処理

疲労試験用溶接継手の外観を図3に示す。

母材の機械特性と化学成分を表1および表2に示す。

すべての試験片は応力比 $R=0$ で試験された。疲労試験結果を図4に示す。図4に示すように、UP処理を施すと溶接継手の疲労強度が著しく向上する。疲労試験前にUP処理をした場合、疲労限($N=2 \times 10^6$)での応力は53% (118Mpaから180Mpa) 向上した。As weld状態での予測疲労寿命50%の繰返し加重後にUP処理をした場合には67% (118Mpaから197Mpa) 向上した。また、すべての応力レベルにおいて疲労寿命は4～6倍伸びた。#3のS-N曲線が#2のS-N曲線に比べてより向上していることから、UP処理によるより効果的な残留応力の再分布と、あるいは疲労損傷の回復が図られたことを示していると言える。このことを解明しかつ同じような結果

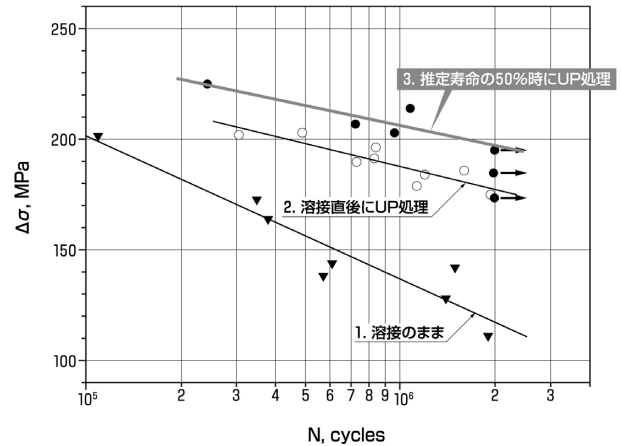


図4 非加重十字すみ肉溶接継手のS-N曲線

1: As Weld, 2: 疲労試験以前のUP処理, 3: As Weld状態での予測疲労寿命50%, 繰返し加重を受けた後のUP処理

を再確認するためにさらなる研究が現在進められている。

ある特定の材料、継手形状および繰返し加重条件下でのUP処理による疲労寿命のデータがない場合には、国際溶接学会 (IIW) で他のピーニング処理法^{(11),(12)}に採用されている有効係数の概念をUP処理に対しても用いることができる。UP処理の場合、疲労限 ($N=2 \times 10^6$) での応力レベルでは、降伏応力355Mpa以下の材料に対する有効係数は1.3となり、それ以上の材料については1.6となる。またアルミニウム合金については1.6となる。たとえば、有効係数1.3は溶接継手の疲労寿命を2.2倍にすることに相当している^{(11),(12)}。

5 溶接構造物における疲労き裂の補修へのUPの適応について

前章では、溶接構造物の延命にUP処理が効果的方法であること述べた。この延命策は、既存の溶接構造物での疲労き裂発生防止の観点から論じられている。さらにUPは疲労き裂の補修時にも使用される。

この章では、疲労き裂を有する溶接構造物の疲労寿命改善の従来からの技術と新しい技術の有効性について述べる。疲労き裂を有する大型試験片で疲労試験を実施した。疲労き裂の拘束や補修に関する数多くの技術について解析され比較された。過負荷加重、き裂先端部穿孔、穿孔部への高張力鋼ボルト挿入、局部爆発処理、局部加熱処理、補修溶接や補修溶接止端部へのUP処理などについて。

図5に示す疲労き裂を有する数多くの疲労試験について、下記の条件下での疲労挙動を調べるために試験を実施した。

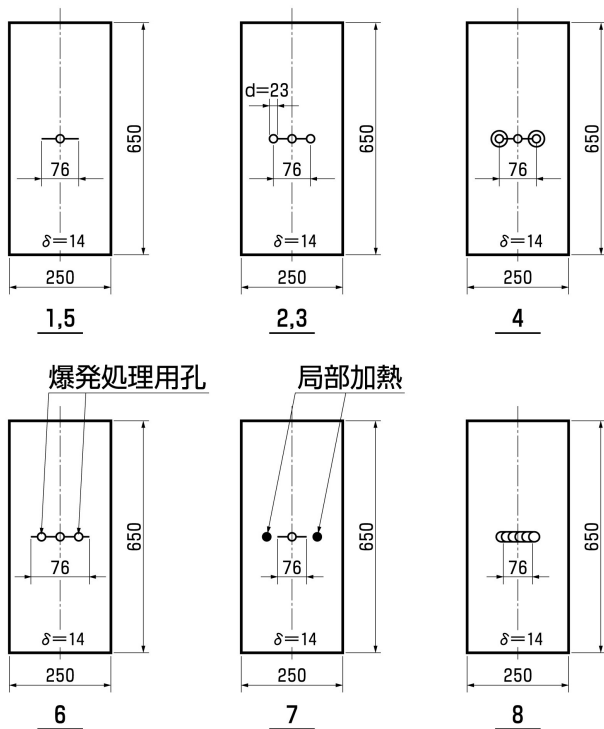


図5 疲労き裂に下記の各種処理を施した試験片形状
 1：き裂発生状態のまま，2と3：き裂先端部穿孔加工（冷間加工の有無），4：き裂先端穿孔部への高張力銅ボルト挿入，
 5：過負荷加重，6：局部爆発処理，7：局部加熱処理，
 8：補修溶接（溶接止端部へのUP処理の有無）

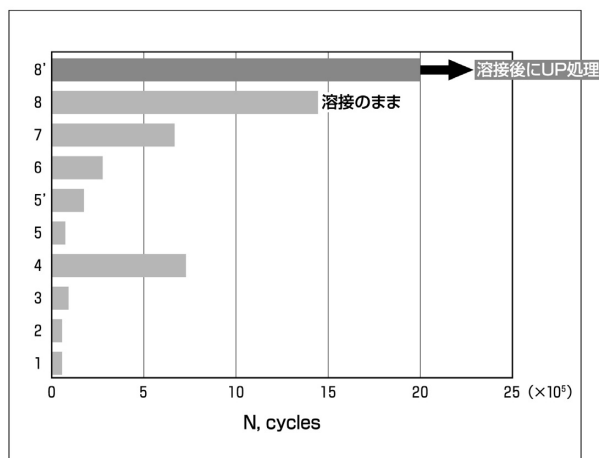


図6 疲労き裂の拘束や補修など種々の技術効果の比較
 1：き裂発生状態のまま，2と3：き裂先端部穿孔加工（冷間加工の有無），4：き裂先端穿孔部への高張力銅ボルト挿入，
 5：過負荷加重（降伏応力），5'：過負荷加重（0.7降伏応力），
 6：局部爆発処理，7：局部加熱処理，8：補修溶接のまま，
 8'：補修溶接止端部をUP処理

- ・ き裂発生状態まま
- ・ き裂先端部穿孔加工（冷間加工の有無）
- ・ き裂先端穿孔部への高張力銅ボルト挿入
- ・ 過負荷加重
- ・ 局部爆発処理



写真2 溶接橋梁への超音波ピーニング：UP処理の準備状況（2台のUPシステムとリフト）

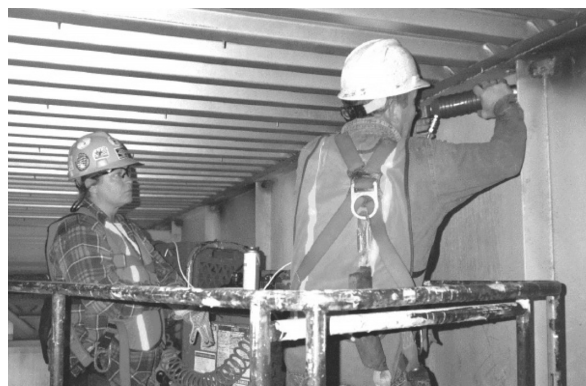


写真3 溶接橋梁への超音波ピーニング：溶接縦スティフナ端部のUP処理状況

- ・ 局部加熱処理
- ・ 補修溶接（溶接止端部へのUP処理の有無）

繰り返し加重は応力比 $R = 0$ の片振りで最大応力は155Mpaとした。大型試験片による疲労試験の結果，補修溶接止端部をUP処理したものが他のものと比較して最も疲労寿命が伸びることが立証された。き裂に上記の種々の改善技術を施した疲労試験の結果を図6に網羅している。

As weld状態でき裂が発生した先端部に圧縮残留応力を導入し疲労強度改善を計った溶接継手の疲労評価を予測できるモデルとソフトも開発され実験的に実証されている¹³⁾。いくつかの試験片については，非破壊超音波法¹⁴⁾、¹⁵⁾により残留応力が測定され，疲労き裂伝播に関する圧縮残留応力の影響への計算にも使用された。

6 溶接構造物の延命策と補修に関するUP実施例

6.1 延命策（疲労き裂発生防止）

疲労データと上記解決策に基づいて，アメリカのオハヨー川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（写真2および写真3）。溶接部には疲労き裂はまだ発生していなかった。この橋梁の延命策としてUP処理を行った理由は、ほとんど同じ時期に同様な設計がされたもう一つの橋梁の溶接部に疲労き裂が発生していたことである。UP処理準備状況と溶接縦スティフナ部のUP処理状況をそれぞれ写真2および写真3に示す。UP処理を施した溶接部の全長は約500mであり、疲労上危険の恐れがあると見なされる2,000箇所以上の溶接部にUP処理を行った。

6.2 疲労き裂の補修

ウクライナのドニエプル川に架かる橋梁の定期検査時に、橋梁スパンの溶接部に一つの疲労き裂が見つかった。疲労き裂は上部フランジとウェブの溶接部に発生しており、その長さは約1mであった。橋梁スパンの溶接継手における疲労き裂の位置を写真4に示す。

疲労き裂は標準的な溶接手法で補修された。補修領域での疲労き裂の再発防止のためにUP処理が施された。補修溶接部のUP処理法を図10および写真5に示す。

7 まとめ

- 1) 超音波ピーニングは疲労寿命の改善に役立つ比較的新しくかつ堅実な技術である。さらに、溶接構造物の延命と補修にも適している。
- 2) 既存溶接構造物の溶接部への超音波ピーニングの適用は、建造中や建造直後におけるUP処理と同じ程度に疲労寿命を延ばし得ることが立証された。
- 3) 大型試験片による疲労試験の結果、疲労き裂の補修溶接止端部にUP処理を施すと、他の方法に比べて疲労寿命がもっとも延びることが立証された。
- 4) 超音波ピーニングの最近の装置は、高速道路橋や鉄道橋の延命や補修に有効に使用できる。



写真4 橋梁スパンの溶接部に発生した疲労き裂の位置とき裂補修時のUP処理状況

8 おわりに

超音波ピーニング（UP）法による「溶接継手の疲労強度の向上」への提言を“溶接技術”2005年3月に紹介して以来、徐々に問い合わせが増え、とくに2008年4月以降、本格的に検討されはじめた。その一つとして、新日鉄による超音波ピーニング（UIT）に関する論文発表が啓蒙のきっかけになっている。ただしこれらは溶接直後に超音波ピーニングを施す「疲労強度の向上」を主目的にしたものであった。

1995年1月の阪神大震災時の高速道路崩壊以降、専門家による点検が実施され補修工事、設計見直しや施工の手直しが行われている。2007年8月には、米国ミネソタ州ミネアポリス市において、ミシシッピー川に架かる高速道路の橋梁が供用中に突然崩壊し大事故が起こった。わが国でも膨大な道路橋をはじめ溶接構造物の高齢化時代を向かえ、適切な維持管理が推奨され、計画的な架け替えや維持補修等が実施されはじめた。これらは大工事となるため膨大な費用が掛かる。経費節減には定期点検間隔の拡大と工事費の抜本的な削減が望まれ、かつ安全上からも障害発生後の事後対策から、あらかじめ実態を把握して行う予防的対策への転換が切望されている。本論文は「超音波ピーニング（UP）法による溶接構造物の延命策と補修」を提案したものであり、非常に貴重なものであろう。2005年の国際溶接学会（IIW）に発表された論文であるが、今のこの時期に紹介するのがもっとも適切と判断し、論文の抄訳の形とした。疲労き裂発生以前に既存溶接構造物の主要溶接部にUP処理を行い疲労寿命の長寿化を可能にする延命策はクレーン上で作業ができるため、作業足場が要らなく、費用も大幅に削減できかつ短期間な工事で済む。一方、発生した疲労き裂の補修溶接後止端部にUP処理を施すと、疲労寿命の長



写真5 橋梁スパンの溶接部に発生した疲労き裂補修部の拡大図（溶接とUP処理）

寿命が図れ、ほとんど同じ箇所から疲労き裂が発生することは無くなる。わが国においても、本技術を本格的に検証し、実用化を図られることが望まれる。

株式会社BeよんどPhase Tech.は、超音波ピーニング (UP) システムの製造元であるカナダIntegrity Testing Laboratory 社の輸入販売代理を2004年以来行っている。

参考文献

- 1) Y.Kudryatsev, J.Kleiman, L.Lobanov, V.Knysh and G.Prokopenko. Fatigue Life Improvement of Welded Elements by Ultrasonic Peening, International Institute of Welding. IIW Document XII-2010-04. 2004. 20p.
- 2) Y.Kudryatsev, J.Kleiman, L.Lobanov, V.Knysh, Mechanism and Efficiency of Ultrasonic Peening in Fatigue Improvement. SEM Annual Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics. Milwaukee, Wisconsin, USA, June 10-12, 2002 (On CD)
- 3) I.Polosky, A.Nedoseka, G.Prokopenko et al. Relieving of welding residual stress by ultrasonic treatment. The Paton Welding Journal. 1974. No.5. p. 74-75. (in Russian)
- 4) V.Krivko and G.Prokopenko. Ultrasonic treatment of welded joints. Welding Production. 1979. No.5. p. 32-33. (in Russian)
- 5) P.Mikheev, A.Nedoseka, A.Parkhomenko et al. Efficiency of ultrasonic treatment application for increase of fatigue strength of welded joints. Paton Welding Journal. 1984, No.3 p. 4-7.
- 6) Y.Kudryatsev, V.Korshun and A.Kuzmenko. Improvement of fatigue life of welded joints by the ultrasonic impact treatment. Paton Welding Journal. 1989. No.7 p.24-28.
- 7) Y.Kudryatsev, P.Mikheev and V.Korshun. Influence of plastic deformation and residual stress, created by ultrasonic impact treatment, on the fatigue strength of welded joints. Paton Welding Journal. 1995. No.12. p. 3-7.
- 8) V.Trufiyakov, P.Mikheev, Y.Kudryatsev and E.Statnikov, Ultrasonic Impact Treatment of Welded Joints. International Institute of Welding. IIW Document XIII-1609-95. 1995.
- 9) V.Trufiyakov, P.Mikheev, Y.Kudryatsev and D.Reznik. Ultrasonic Impact Peening Treatment of Welds and Its Effect on Fatigue Resistance in Air and Seawater. Proceedings of the Offshore Technology Conference. OTC 7280. 1993. p. 183-193
- 10) V.Trufiyakov, P.Mikheev, Y.Kudryatsev and D.Reznik. Fatigue Endurance of Welded Joints. residual Stress and Fatigue Improvement Treatments. Ship Structure Symposium '93. Arlington, Virginia, USA. November 16-17, 1993. p.N1-N14.
- 11) P.Haagensen and S.Maddox. IIW Recommendations on Post Weld Improvement of Steel and Aluminum Structures. International Institute of Welding. IIW Doc. XIII-1815-00. 2000.
- 12) A.Hobbacher. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. International Institute of Welding. IIW Doc. XIII-1965-03/XV-1127-03. 2003.
- 13) Y.Kudryatsev, J.Kleiman, V.Knysh and P.Mikheev. Fatigue Life Improvement of Structural Elements with Fatigue Cracks. SEM Annual Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics. Milwaukee, Wisconsin, USA, June 10-12, 2002. (on CD)
- 14) Y.Kudryatsev, J.Kleiman, and O.Gushcha. Ultrasonic Measurement of Residual Stress in Welded Railway Bridge. Structural Materials Technology : An NDT Conference. Atlantic City. NJ. February 28-March 3, 2000. p. 213-218.
- 15) Y.Kudryatsev, J.Kleiman, O.Gushcha et al. Ultrasonic Technique and Device for Residual Stress Measurement. SEM International Congress and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, Costa Mesa, California, USA, June 7-10, 2004 (on CD).