論文

ショットピーニングにおける ピーニング強度分布の計測と関数近似

太田 高裕* 井上 明子**

Measurement and Functional Approximation of Peening Intensity Distributions in Shot Peening

Takahiro OHTA* and Akiko INOUE**

(Received on September 5, 2017)

In the case of large components, shot peening is generally performed by moving peening equipment that follows a trajectory on the component surface using a robot. In this study, we aimed to obtain a functional approximation of the intensity (arc height of the Almen strip) distributions in the shot stream. The intensity distributions using various peening times and standoff distances were measured under two different experimental conditions. The measured intensity distributions were approximated by modified Gaussian distribution functions, which included the saturation curve. Three coefficients in the functions depended on the peening time and the standoff distance. For tilted shot peening, the intensity distributions were more complex because the standoff distance at each Almen strip was different. The intensity distributions of the tilted plates calculated using the modified Gaussian distribution function, which considered the variation in the standoff distance, were in good agreement with the experimental results. The intensity distributions of twice-shot peening differed from those of once-shot peening because the second peening area overlapped the first peening area. The modified Gaussian distribution function and the saturation function were used to determine the intensity distribution of a twice-shot-peened sample. These calculated values were in good agreement with the experimental results.

Key words: shot peening, Almen strip, intensity, standoff distance, Gaussian distribution.

1. 緒 言

ショットピーニングは簡易に金属表面への圧縮残留応力付与や表面硬化が可能であり、疲労強度向上のため、広く産業界で使われている。ショットピーニングでは、ピーニング強度とカバレッジで施工条件の管理を行っている。カバレッジはワーク表面積に対するショットの圧痕面積の比率で定義される。ピーニング強度の計測にはアルメンストリップと呼ばれる薄片を用いる。アルメンストリップのアーカハイトと残留応力分布の関係は密接に関係しており、ピーニング強度はアーカハイトで定義される^{1)~3)}。アルメンストリップの寸法は約19 mm×約79 mmで板厚が異なるN片、A片、C片がある。空気式(圧縮空気でショットをノズルから噴射する方式)のショットピーニングではアルメンストリップの形状がピーニング領域に比べて大きい

ため、実際にはアルメンストリップ内でカバレッジとピーニング強度が分布している可能性があるが、現状ではアルメンストリップ内で均一として取り扱っている研究例が多く、1パス内のピーニング強度分布を考慮した検討はほとんど見られない。

大型部品全面に均一にショットピーニングを行うため、ロボットでノズルを移動して施工する。塗装ロボットでは塗膜厚さ分布を関数近似して、ロボットのオフラインティーチングシステムに組み込む手法が開発されている⁴⁾。Koppらはピーン成形を対象にカバレッジ分布をガウス分布としてノズル軌跡の最適化を行った⁵⁾。Gariépyらもピーン成形を対象にピーニング領域内を3分割してショット速度を定義し、ノズル軌跡の最適化を検討した⁶⁾。しかし、ピーニング強度分布の一般的な関数近似および軌跡を重ね合わせた場合のピーニング強度の計算方法は確立されていない。

本研究では、ショットピーニングのノズル軌跡を制御し、効率よく均一なショットピーニングを行うため、ショットピーニング領域でのピーニング強度分布を詳細に計測した。計測したピーニング強度分布を簡易な関数で近似する方法

*東海大学工学部動力機械工学科 〒259-1292 平塚市北金目 4-1-1
Department of Prime Mover Engineering, School of Engineering, Tokai
university,
4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa 259-1292, Japan.

**三菱重工業(株) 総合研究所 〒455-8515 名古屋市港区大江町 10
Research & Innovation Center, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.
10 Oecho, Minatoku, Nagoya, Aichi, 455-8515, Japan.

を提案した. ピーニング強度分布の近似関数を使用して, 2 回施工で重なった領域でのピーニング強度分布の予測法とノズルと供試体の傾斜角度の影響も検討した.

2. 実験方法

実験装置として, 直圧式ショットブラスト装置ニューマブラスター (株式会社不二製作所製 P-F0-4AICM-501) を用いた. 実験は Table 1 に示す異なる 2 条件 (ピーニング強度の低い条件 A とピーニング強度の高い条件 B) で行った. 用いたショットは硬さが 45~52HRC のマンガンとケイ素を含んだ低合金鋼である (AMS 2431/1D 準拠). 実験設備を Fig. 1 に示す. 実験は穴径 10 mm のノズルを周波数: 1.8 Hz で上下に往復運動させて行った. アルメンストリップ長手方向の投射角度はノズル往復運動により, 振幅の大きい条件 A では $+82^\circ \sim -82^\circ$ と変わるが, 後述するように角度変化はピーニング強度に対して $\sin 82^\circ$ で影響し, 90° に対する誤差は 1% 程度である. Table 1 に示すノズル速度はスタンドオフ距離 $L = 300$ mm での振幅中心部での速度を示している. アルメンストリップのタイプを区別するため, 今後, N 片を用いたピーニング強度を I_N , A 片を用いたピーニング強度を I_A と記載する. 本試験ではピーニング領域内でのピーニング強度分布をより詳細に確認するため, アルメンストリップを 3 分割して幅: 約 6 mm × 長さ: 79 mm とした. Fig. 1 に示すようにノズルの振幅方向にアルメンストリップの長手方向を平行に複数並べて, ノズル移動方向に直交する方向 (x 方向) のピーニング強度分布を計測した. スタンドオフ距離 L と傾斜角度 θ の定義を Fig. 2 に示す. 小川らの実験式⁷⁾で計算すると, 条件 A でのショット速度は約 50 m/s, 条件 B では約 55 m/s である.

3. 実験結果

3.1 アルメンストリップサイズの影響

アルメンストリップを 3 分割して実験を行ったため, サイズの影響を検証した. 条件 A で $L=300$ mm, $\theta=90^\circ$, ピーニング時間 $t=40$ s の I_N 分布の計測結果を Fig. 3 に示す. アルメンストリップのアーカハイト (ピーニング強度) はアルメンゲージで計測した. ショットピーニングを行うとアルメンストリップは球面状 (長手方向と幅方向の曲率半径 $R = (d^2 + h_d^2)/2h_d$) に変形する (Fig. 3 参照). 通常のアルメンストリップでは中央でアーカハイトを計測するため, 長手方向のアーカハイト h_d と幅方向のアーカハイト h_w の合計を計測している. 一方, 3 分割すると, h_w が小さくなるため, $h_w = \sqrt{R^2 - w^2} + R$ を用いて, 通常のアルメンストリップの幅 w に対するアーカハイトを補正した.

3 分割したアルメンストリップで計測した I_N と通常のアルメンストリップで計測した I_N には差がなく, アルメンストリップを 3 分割することで細かな I_N 分布が計測できることを確認した.

3.2 ピーニング時間 t の影響

条件 A で $L=200$ mm, $\theta=90^\circ$ でピーニング時間 t を変化させて I_N を計測した. I_N の分布を Fig. 4 に示す. t の増加とともに, I_N のピークは大きくなり, ピーニング範囲も増加する.

t とピーニング強度 (I_N , I_A) の関係を Fig. 5 に示す. 条

Table 1 Experimental conditions

A	Shot diameter	ARS-170 (Average: 0.50 mm)
	Air pressure	0.20 MPa
	Nozzle velocity	1.18 m/s at $L=300$ mm
	Almen strip	N-type (Thickness: 0.76 - 0.81 mm)
B	Shot diameter	ASR-230 (Average: 0.71 mm)
	Air pressure	0.38 MPa
	Nozzle velocity	0.65 m/s at $L=300$ mm
	Almen strip	A-type (Thickness: 1.27 - 1.32 mm)

Fig. 1 Experimental equipment

Fig. 2 Experimental parameters

Fig. 3 Intensity distributions of normal Almen strips and divided Almen strips

件 A ではショットの中心 ($x=0$) 付近の 3 枚の 3 分割アルメンストリップ (N 片) の I_N をプロットしている. 図中の線は最小二乗法 (対数関数) で求めた. 通常, t が 2 倍となってもピーニング強度の増加が 10% 以下となった時点を超えて飽和ピーニング強度と定義する⁹⁾. そこで, 条件 A では飽和ピーニング強度となる t を 40 s とした. 条件 A の $L=300$ mm の場合の結果も Fig. 5 に示すが, $L=200$ mm に比べて, I_N は低いと同じ傾向である. Fig. 5 には条件 B の結果もプロ

ットしている。条件Bは通常のアルメストリップ(A片)の結果である。条件Bでも条件Aと同じ傾向であり、飽和ピーニング強度となる t を32sとした。

条件Aに比べて、条件Bの方がショットの運動エネルギーは高い。しかし、条件Bでは板厚が厚いアルメストリップA片を用いるため、ピーニング強度(アークハイト)が条件Aに比べて小さくなっている。

3.3 スタンドオフ距離 L の影響

条件Aでは $\theta = 90^\circ$, $t = 40$ sで L を変化させて I_N の分布を計測した。計測結果をFig. 6に示す。 L が増加すると、ピーニング領域が増加する。一方、ピークの I_N は $L = 200$ mmと300 mmを比較すると L が増加するとわずかに減少するが、 $L = 300$ mmと400 mmではほぼ同じである。

条件Bでは $\theta = 90^\circ$, $t = 32$ sで L を変化させて I_A の分布を計測した。計測結果をFig. 7に示す。条件Bでは中央部付近が比較的フラットな分布となる。条件Aと同等に L が増加すると、ピーニング領域が増加する。一方、ピークの I_A はほとんど変化がないが、 $L = 400$ mmでわずかに減少する。

空気はノズルを出た直後はほぼ均一な速度であり、周辺の停止した空気とのせん断摩擦により、速度が減少して拡散していくが、中央部は均一な速度分布が保持されている領域がある^{7,8)}。ショット速度は空気により加速され、ノズルよりある程度離れた位置で最大の速度となり、その後減速するが、ショットは慣性力により空気よりも減速が遅い^{7,9)}。

条件Aではショット径が小さく、空気圧が低かったので、 $L = 200$ mmにおいても、ショットの減速と拡散が大きく、

Fig. 4 Effect of peening time t on intensity I_N distributions

Fig. 5 Relationship between peening time t and intensity

Fig. 6 Effect of standoff distance L on intensity I_N distributions under experimental condition A

Fig. 7 Effect of standoff distance L on intensity I_A distributions under experimental condition B

I_N はピーク付近のフラットな領域が少ない。一方、条件Bではショット径が大きく、空気圧が高いことにより、 $L = 300$ mmにおいても中心付近に比較的フラットな I_A の領域が存在したと考えられる。

4. ピーニング強度分布の関数近似

4.1 関数近似法

ショットピーニングにおける噴流内のカバレッジ分布、あるいはショット速度をガウス分布で関数近似した報告がある^{5,10)}。また、ショットの速度分布を計測し、噴流内を3領域に分けて折れ線でピーニング強度分布を表現した報告もある⁶⁾。しかし、これらの関数ではFig. 7に示すような中心部がフラットな分布を表現することができない。そこで、本研究ではピーニング強度分布を表す関数として、ガウス分布と複数回施工時のカバレッジの計算式⁵⁾ $C_n = 1 - (1 - C_1)^n$ を複合させた式(1)を提案する。ここで、 C_n は同じ条件で n 回ショットピーニング後のカバレッジ、 C_1 は1回のショットピーニング後のカバレッジである。

$$h(x) = h_0 \left[1 - \left\{ 1 - \frac{b}{h_0 a \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{a^2}\right) \right\}^m \right] \quad (1)$$

ここで、 $h(x)$ は中心から距離 x の位置のピーニング強度、 a はピーニング領域を表す係数、 b はピーニング強度を $-\infty \sim +\infty$ まで積分した総計を表す係数、 h_0 は飽和ピーニング強度を表す係数、 m は衝突回数を表す係数である。 $m = 1$ の

とき、式(1)はガウス分布となる。式(1)はショットピーニングの衝撃圧分布の近似に用いられ、 $x=0$ 付近が凸の分布やフラットな分布、凹な分布も表現できる関数である⁸⁾。 h_0 はFig. 5より、条件Aでは0.6 mm、条件Bでは0.5 mmとした。

条件Bの $L=300$ mmを対象に m が変化した場合の式(1)を用いた近似線をFig. 8に示す。係数 a および b は実験結果と近似値の誤差の2乗和 S_e が最小になるように決定した。 $m=1$ ではガウス分布となるため、ピーク付近がフラットにならず、裾野が広い分布となる。一方、 $m=2$ 以上ではピーク付近がフラットになり、裾野もシャープな分布となり、実験結果を近似できている。Fig. 9には m と S_e の関係を示す。条件A、Bはともに、 $m=1$ に比べ、 m が2以上では S_e が減少し、 $m=4$ 以上では S_e の変化は小さい。本研究では条件AとBともに $m=4$ として検討を行った。

4.2 ピーニング時間 t の影響

Fig. 4には条件Aの実験結果($L=200$ mm)を式(1)で近似した近似線を示している。式(1)の係数 a および b は実験結果と近似値の誤差の2乗和 S_e が最小になるように決定した。 t の増加とともに、 I_N のピークは大きくなり、ピーニング範囲も増加する傾向を式(1)により近似できていることを確認した。

Fig. 10には条件Aにおける t と式(1)の係数 a 、 b の関係を示す。 a は t が増加すると増加する。 a はピーニング領域を示す係数であり、Fig. 4に示した傾向と一致する。また、 $L=200$ mmと $L=300$ mmではFig. 6に示したように、 $L=300$ mmの方がピーニング領域が広く、 a が大きいことと一致する。 b は t が増加するとわずかに増加する。 b は I_N の総数を示す係数であり、 t とともに増加する実験結果(Fig. 4)と一致する。Fig. 10中の線は最小二乗法で $a = C_1 \ln(t) + C_2$ 、 $b = C_3 \ln(t) + C_4$ に近似したものである。ここで、 $C_1 \sim C_4$ は係数である。実験でピーニング強度分布を計測していない t における I_N 分布も式(1)とFig. 10を用いることで計算可能である。

4.3 スタンドオフ距離 L の影響

Fig. 6には条件Aの実験結果を式(1)で近似した近似線を示している。式(1)の係数 a および b は実験結果と近似値の誤差の2乗和 S_e が最小になるように決定した。

Fig. 8 Effect of m in Eq. (1) on intensity distribution calculated using Eq. (1)

Fig. 9 Relationship between square sum of error (S_e) and m in Eq. (1). N is number of measured data

Fig. 10 Relationship between peening time t and coefficients a and b in Eq. (1) under condition A

$L=200$ mm, 300 mm, 400 mmにおいて、 L の増加とともにピーニング領域が広がること、 I_N のピークが $L=300$ mmと 400 mmで差がないことを式(1)で近似できることを確認した。

Fig. 7には条件Bの実験結果を式(1)で近似した近似線を示している。Fig. 4と同様に式(1)の係数 a および b を決定した。 $L=300$ mm, 350 mm, 400 mmでも L の増加とともにピーニング領域が広がること、 I_N のピークは L の影響が小さいことを式(1)で近似できることを確認した。

以上のように、異なる条件AとBのいずれでも式(1)でピーニング強度分布を近似できることを確認した。

L と式(1)の係数 a と b の関係をFig. 11に示す。条件A、Bともに、 L が増加すると a は線形で増加する。 a はピーニング領域を示す係数で、Fig. 6、Fig. 7に示したピーニング強度の分布の傾向と一致する。 b はピーニング強度の総計を表す係数で、 L が増加するとピークのピーニング強度がほとんど変化せずにピーニング領域が増加するので、 b も増加する傾向で、実験でのピーニング強度分布の傾向と一致する。式(1)とFig. 11の L と a 、 b の関係をj用いることで、計測した L 以外のピーニング強度分布も計算可能である。

4.4 傾斜角度 θ の影響

Fig. 2に示すように傾斜した板面では位置 x により L と θ が異なる。そこで、位置 x でのスタンドオフ距離 L' と傾斜角度 θ' を式(2)と式(3)で求めた。ただし、 $\theta=0^\circ$ ではショットピーニングが成立しないので、 $0 < \theta \leq 90^\circ$ の制約がある。

$$L' = L - \frac{x \sin \theta}{\tan \theta} \quad (2)$$

$$\theta' = \theta + \tan^{-1} \frac{x \sin \theta}{L'} \quad (3)$$

傾斜した板面の位置 x でのピーニング強度 $h(x)$ は式(4)で示される。

$$h(x) = h_0 \left[1 - \left\{ 1 - \frac{b(L)}{h_0 a(L') \sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-x^2}{a(L')^2}\right) \right\}^m \right] \sin \theta' \quad (4)$$

係数 a と b は Fig. 11 に示すように L' と線形の関係であり、 L' の関数とした。板に垂直方向のショット衝突速度はノズルから投射された速度の $\sin \theta'$ 倍となるので、式(4)では $\sin \theta'$ 倍とした^{2),11)}。式(4)を用いると、 $\theta = 90^\circ$ で求めた L と a , b の関係 (Fig. 11) を用いて、任意の θ でのピーニング強度分布を計算することができる。

条件 A における $L = 300$ mm で、 $\theta = 90^\circ$, 45° および 30° における I_N の分布を式(4)を用いて計算した結果を Fig. 12 に示す。ただし、式(1)と同様に $m = 4$, $h_0 = 0.6$ mm とした。 θ が減少すると I_N のピーク値が減少するとともに、ピークの位置が x の+方向 (L' が減少する方向) にシフトする。 x の-方向 (L' が増加する方向) ではピーニング領域の拡大は顕著である。Fig. 12 には I_N の実験結果もプロットしているが、 $\theta = 90^\circ \sim 30^\circ$ の範囲で式(4)の計算結果と一致する分布であることを確認した。

条件 B の $L = 300$ mm での計算結果と実験結果 I_A を Fig. 13 に示す。式(1)と同様に $m = 4$, $h_0 = 0.5$ mm とした。Fig. 12 と同じ傾向であり、実験結果と計算結果の分布は一致する。

以上のように、異なる条件でも式(4)を用いることで、種々の傾斜した板面でのピーニング強度分布を予測できることを確認した。

4.5 2 か所ピーニングの影響

1 回のショットピーニング後にアルメンストリップの位置を x 方向に D 移動させて、2 回目のショットピーニングを実施した。ショットピーニングを 2 か所に行った場合、ピーニング領域が重なった位置ではピーニング強度は 2 回のショットピーニングの影響を受ける。そこで、複数回施工時のカバレッジの計算式⁵⁾を応用して、式(5)を用いて、重なり領域のピーニング強度への影響を計算した。

$$h(x) = h_0 \left\{ 1 - \left(1 - \frac{h_1}{h_0} \right) \left(1 - \frac{h_2}{h_0} \right) \right\} \quad (5)$$

Fig. 11 Relationship between standoff distance L and coefficients a and b in Eq. (1)

Fig. 12 Intensity I_N distributions under variable angle θ conditions for experimental results and analysis results using Eq. (4)

Fig. 13 Intensity I_A distributions under variable angle θ conditions for experimental results and analysis results using Eq. (4)

Fig. 14 Intensity I_N when $D=70$ mm for experimental results and analysis result using Eq. (4) and Eq. (5)

ここで、 h_0 は式(4)と同じ飽和ピーニング強度、 h_1 , h_2 はそれぞれ、1 回目、2 回目のピーニング時の位置 x での式(4)を用いた計算値である。

Fig. 14 には条件 A で $L = 300$ mm, $\theta = 90^\circ$, $t = 40$ s において、2 か所 ($D = 70$ mm) にショットピーニングした場合の式(4)と式(5)を用いた I_N の計算結果を示す。式(1)と同様に $m = 4$, $h_0 = 0.6$ mm とした。ここで、1 回目のショットピーニングの中心は $x = +35$ mm, 2 回目のショットピーニングの中心は $x = -35$ mm であり、その間で 2 回のショットピーニングの領域が重なっている。このため、 $x = 0$ mm 付近

ではわずかに I_N は低下するが、ほぼ均一な I_N となる。Fig. 14 には実験結果もプロットしている。式(4)と式(5)を組み合わせた計算結果と実験結果の傾向はほぼ一致することを確認した。

以上のように、式(4)と式(5)を用いることで、少数の実験結果から、種々の L , θ , t および複数回ピーニング時のノズル移動距離 D の影響を計算することが可能であり、空気式ショットピーニングのノズル軌跡を求める基本式として有効であることが確認できた。

5. 結 言

ショットピーニング領域でのピーニング強度分布を異なる 2 条件 (条件 A と B) で詳細に計測し、簡易な関数で近似する方法を提案した。得られた結果は以下の通りである。

1) 傾斜角度 $\theta = 90^\circ$ では、計測されたピーニング強度はピーニング条件により、ピーク付近がフラットな分布となる。いずれの条件でも、式(1)でピーニング強度分布を近似可能である。

$$h(x) = h_0 \left[1 - \left\{ 1 - \frac{b}{h_0 a \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{a^2}\right) \right\}^m \right] \quad (1)$$

ここで、 h_0 は中心から距離 x の位置のピーニング強度、 a はピーニング領域を表す係数、 b はピーニング強度の総計を表す係数、 h_0 は飽和ピーニング強度を表す係数、 m は衝突回数を表す係数である。 $m \geq 2$ において、実験結果との誤差が小さくなる。本研究では $m = 4$ とした。

2) 式(1)の係数 a , b はピーニング時間 t では $a = C_1 \ln(t) + C_2$, $b = C_3 \ln(t) + C_4$, スタンドオフ距離 L では $a = C_5 L + C_6$, $b = C_7 L + C_8$, で表すことができ、少数の実験結果から、実験結果以外の L および t のピーニング強度分布を予測可能である。ここで、 $C_1 \sim C_8$ は係数である。

3) 傾斜角度 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ では位置 x ごとに L と θ が変化するため、ピーニング強度は非対称の分布となる。ピーニング強度は式(4)で近似できる。

$$h(x) = h_0 \left[1 - \left\{ 1 - \frac{b(L)}{h_0 a(L') \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{a(L')^2}\right) \right\}^m \right] \sin \theta' \quad (4)$$

ここで、 L' は位置 x でのスタンドオフ距離、 θ' は位置 x での傾斜角度であり、係数 a と b は L' と線形の関係にある。

4) 2 か所ピーニングでは、1 回目のピーニング領域と 2 回目のピーニング領域が重なり、ピーニング強度分布は 1 回のピーニング時と異なる。式(5)を用いることで、重なり部

のピーニング強度を近似できることを確認した。

$$h(x) = h_0 \left\{ 1 - \left(1 - \frac{h_1}{h_0} \right) \left(1 - \frac{h_2}{h_0} \right) \right\} \quad (5)$$

ここで、 h_1 , h_2 はそれぞれ、1 回目、2 回目のピーニング時の式(4)を用いた位置 x での計算値である。

5) 式(4)と式(5)を用いることで、少数の実験結果を行い、係数 a , b , h_0 , m を決定することで、種々の L , θ , t および複数回ピーニング時のノズル移動距離 D の影響を計算することが可能であり、空気式ショットピーニングのノズル軌跡を求める基本式として有効であることが確認できた。また、式(1)は係数により、中央が凸の分布、フラットな分布や凹な分布も表現可能であり、幅広いショットピーニング条件に適用可能と考えられる。

最後に本研究の実験に協力してくれた東海大学工学部生の福田拓也君と藤森雄樹君に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Chen, Z., Yang, F. & Maguid, S. A.: J. Eng. Mater. and Technol., **136** (2014), 041002-1 - 041002-7.
- 2) Hisamatsu, S.: Sci. Mach., **38**-12 (1986), 1342-1346.
- 3) Miao, H. Y., Larose, S., Perron, C. & Lévesque, M.: Surf. & Coat. Technol., **205** (2010), 2055-2066.
- 4) Miyawaki, K., Saito, Y., Hirai, Y., Miyazaki, T. & Okubo, H.: Trans. JSME, Ser. C, **65**-629 (1999), 361-368.
- 5) Kopp, R., Wüstefeld, F. & Linemann, W.: Proc. 5th Int. Conf. on Shot Peening (ICSP-5), (1993), 91-102.
- 6) Gariépy, A., Larose, S., Perron, C., Bocher, P. & Lévesque, M.: Finite Elements in Analysis and Design, **69** (2013), 48-61.
- 7) Ogawa, K., Asano, T., Saito, A., Kawamura, K., Ogino, M. & Aihara, H.: Trans. JSME, Ser. C, **60**-571 (1994), 1120-1125.
- 8) Ohta, T.: Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., **83**-851 (2017), DOI:10.1299/transjsme.17-00153.
- 9) Kirk, D.: Shot Peener, **27**-3 (2013), 24-32.
- 10) Linnemann, W., Kopp, R., Kittel, S. & Wüstefeld, F.: Proc. 6th Int. Conf. on Shot Peening (ICSP-6), (1996), 118-129.
- 11) Young, K.: Proc. 11th Int. Conf. on Shot Peening (ICSP-11), (2011), 417-422.