

板鍛造品の平面度に及ぼす金型弾性変形の影響

東海国立大学機構 岐阜大学工学部機械工学科

教授 王 志剛

(2020 年度 一般研究開発助成 AF-2020009-B2)

キーワード：塑性加工，板鍛造，製品平面度

1. 研究の背景と目的

板鍛造技術は中厚板材に深絞りなどの板成形工法と据込みや押し出しなどの冷間鍛造工法を併用し、切削仕上げと同程度の形状および肉厚精度をもつ製品の製造技術として、国内では広く使われており、海外のキャッチアップも活発である 1)。国際冷間鍛造グループの年次大会 ICFG2014, ICFG2016 および ICFG2017 では板鍛造が中心的なトピックスとして扱われ、欧州や中国からの論文の数が増えている 2)-4)。

板鍛造に適した製品形状は、シャープエッジ、半抜き部位をもつ平面形状、絞り品をベースとするカップ形状などを挙げられ、精密せん断品を除けば、ほとんどカップ形状である 5)。複雑な形状を成形しようとする、大きな材料流動を発生させるの必要があり、工具圧力が過大となりやすい 6)。この課題に対して、著者は金属切削の変形モードを鍛造加工に適用し、被加工材の塑性係数の約 30% 程度の工具平均圧力で成形できる切削鍛造法を提案した 7)。切削鍛造法は、被加工材の一部を低い鍛造荷重で自由に移動させ、従来法では成形不可能な形状や大型部品の成形が可能となるなど、据込み、押し出しに次ぐ鍛造の第三の基本工法となり得る加工法である。

一方、切削仕上げと同程度の形状精度をもつ製品を得ようとする、金型の設計にも相当な工夫が必要である。平板圧縮加工を例にすると、板面寸法と板厚の比率が大きいため、平らな工具は図 1(a)のように弾性変形し、平坦度の高い製品を得るには金型表面にクラウンを設ける必要がある。必要となる金型クラウンの形状は一般的には圧縮加工下死点における金型変形の反転形状(図 1(b))が想定される。しかし、反転形状のクラウンを金型表面に付与しても製品の平面度が想定通りに良くなる場合があり、反転クラウンを大きく修正し、最適なクラウン形状を求める必要がある。

本研究は、平板圧縮加工を対象に、負荷および除荷における被加工材および金型の変形挙動を調べ、最適なクラウン形状の求め方を提示することを目的とする。

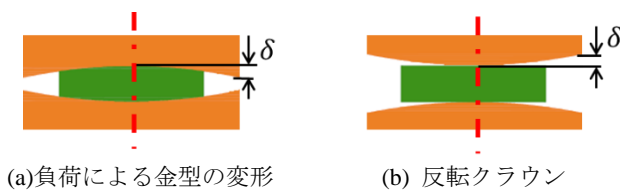


図 1 加工終端の金型表面形状と反転クラウン

2. 実験および FEM シミュレーションの条件

2. 1 実験

図 2 は平板圧縮加工における工具とセンサの配置を示す。ダイのストロークはダイプレートに取り付けた分解能 $0.1 \mu\text{m}$ の二つの接触式変位計で測定する。負荷および除荷中の平板の直径の変化は、板厚方向の中央面内に 90° おきに配置した 4 つのレーザー変位計で計測する。レーザー変位計の繰り返し測定精度は $4.0 \mu\text{m}$ である。

実験は 1000 kN の万能材料試験機で行った。圧縮荷重の負荷速度は 4.17 kN/s とし、除荷は手動モードで $1.1 \mu\text{m/s}$ で行った。

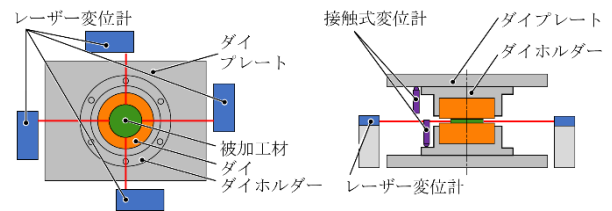


図 2 実験用ダイセット

表 1 に実験条件を示す。被加工材は板厚 0.975 mm の工業用純アルミニウム A1100-24 圧延板材を用いた。その変形抵抗は $Y = 156(\epsilon + 0.002)^{0.04} \text{ MPa}$ である。圧延板から直径 23.4 mm の円形ブランクを切り出して、供試材とした。ダイは高速度工具鋼 HAP72 (HRC=68) で作製し、その表面に厚さ $3.0 \mu\text{m}$ 、表面粗さ $0.14 \mu\text{mRz}$ の DLC コーティングを施した。圧縮加工は無潤滑で行った。

圧縮加工後の板厚は以下の手順で測定した。圧縮された板をゲージブロックで挟み、樹脂で焼き固めた後に垂直に切断した。切断面を研磨した後、レーザー顕微鏡で板厚を測定した。

表 1 実験条件

パラメータ	単位	値
被加工材		A1100-H24
被加工材のヤング率, E_B	GPa	70
被加工材のポアソン比, ν_B		0.33
変形抵抗	MPa	$Y = 156(\epsilon + 0.002)^{0.04}$
被加工材の直径/半径, d_0/r_0	mm	23.4 / 11.7
被加工材の板厚, t_0	mm	0.975 ± 0.007
板エッジでの板厚減少率, e_r	%	10
ダイ材料		粉末ハイス HAP72
ダイのヤング率, E_D	GPa	230
ダイのポアソン比, ν_D		0.3
ダイ直径/半径, D_0/R_0	mm	60 / 30
ダイ高さ, H	mm	25
ダイコーティング		DLC

2. 2 シミュレーション

図3にFEMシミュレーションモデルを示す. FEMシミュレーションは商用解析コードDEFORM2Dを用いた. 板材は弾塑性体とし, 変形抵抗は $Y = 156(\epsilon + 0.002)^{0.04}$ MPa とした. ダイはヤング率230GPaの弾性体とし, 剛体のダイホルダーで一定の速度で圧下される. 摩擦モデルは著者が提案した摩擦法則⁸⁾とし, 摩擦係数は0.15とした. メッシュサイズは板材では0.02-0.04 mmの正方形とし, ダイでは接触領域付近で0.05-0.06 mmとした.

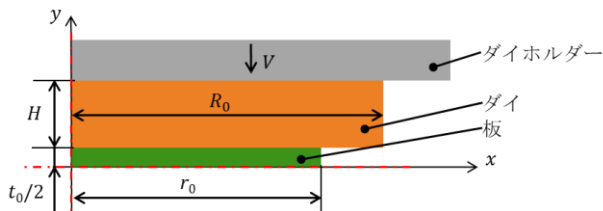


図3 FEM解析モデル

3. シミュレーションの結果

3. 1 負荷時の変形挙動

図4に負荷における接触圧力の分布を示す. 板端での板厚減少率 e_t の増加に伴い, 圧力のピークは板材の中心部に移動し, その値も増加する.

図5に負荷時の板材およびダイにおける速度分布を示す. 接触圧力の最大値の位置において, 板材の分流が発生する. ダイの圧下速度は分流点の外側では内側より大きい. この差異はダイの弾性変形によるもので, 内側への材料流れを引き起す. 圧縮の進行に伴い, 内側流れが次第に弱まり, $e_t = 10\%$ で消滅する.

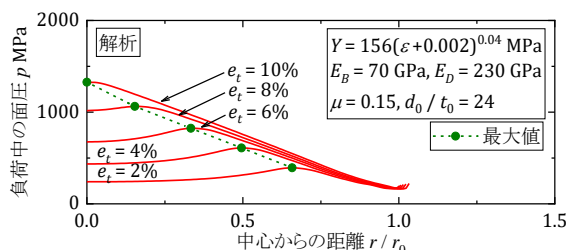


図4 負荷における接触圧力の分布

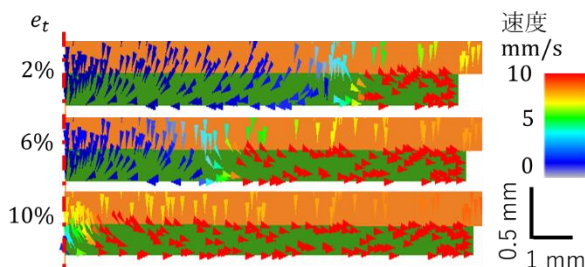


図5 下死点における速度分布

3. 2 除荷時の変形挙動

図6に除荷による板厚の変化を示す. 除荷過程は除荷開始点からのストロークを除荷の全ストロークで除した除

荷率で表現した. $e_t = 5\%$ の場合, 全領域にわたって板厚が増加するが, 図6(b)に示すように, $e_t = 10\%$ の場合には板端付近を除き, 幅広い領域において除荷によって板厚が減少する.

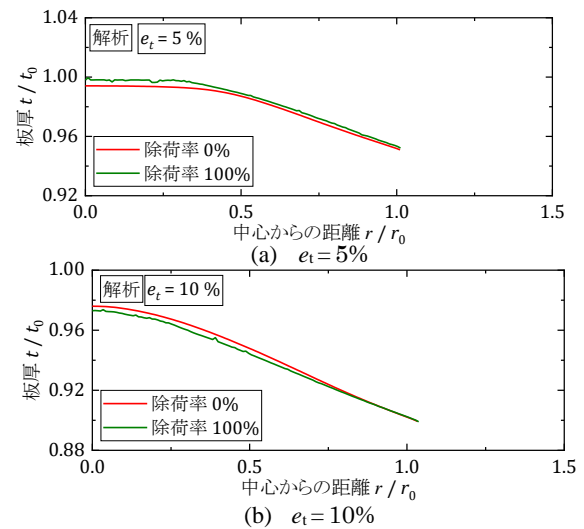


図6 除荷による板厚の変化

除荷における板厚減少の原因を究明するため, 除荷における板材およびダイの速度分布を調べた. 図7に示すように, $e_t = 5\%$ では, 除荷率10%でダイの速度は中心部および板端付近で上向きとなっているが, 分流点付近の領域では下向きのままである. 除荷率の増加に伴い, 速度が上向きの領域が拡がり, 除荷率が30%に達すると, 全領域にわたりダイの速度が上向きとなっている. $e_t = 10\%$ では, 除荷開始とともに, ダイ速度は板端付近では上向きとなったものの, 接触領域の大半において下向きのままで, ダイ表面は板材を押し続ける. 除荷率が40%に達すると, ダイ速度は全領域にわたって上向きとなっている.

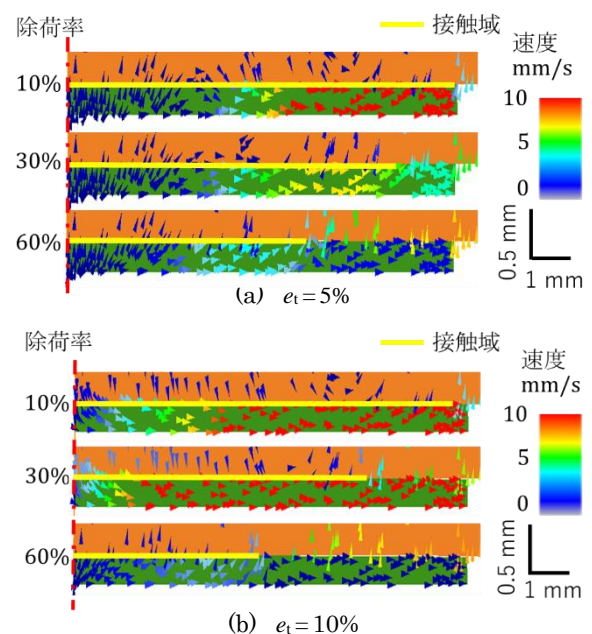


図7 除荷過程における速度変化

図 8 に除荷におけるダイ表面の輪郭線の変化を示す。 $e_t = 5\%$ では、分流点付近のダイ表面は除荷率 20%においても負荷ストロークの下死点よりも若干下に位置しており、除荷による僅かな圧縮変形が生じる。図 8(b)に示すように、 $e_t = 10\%$ において除荷による付加変形は接触の大半の領域において発生し、中心付近のダイ表面は除荷率 100%においても負荷ストロークの下死点よりも下に位置している。

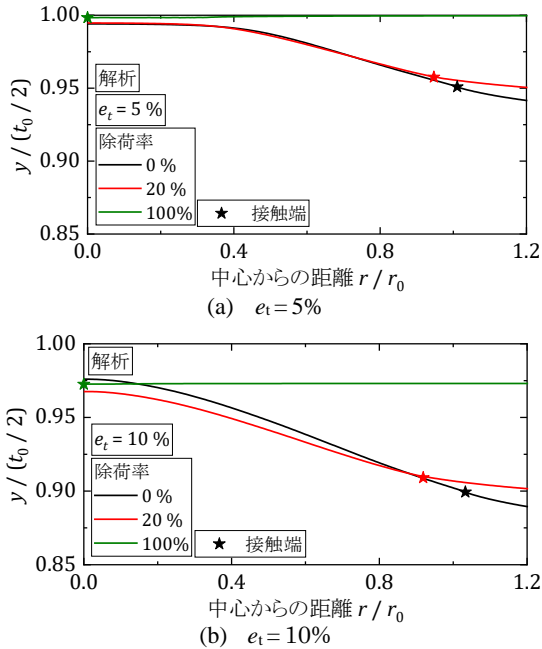


図 8 除荷過程におけるダイ表面輪郭の変化

図 9 に除荷による板厚方向の塑性ひずみの付加状況を示す。負荷ストローク下死点における弾性ひずみも付記している。除荷による塑性ひずみの付加量は $e_t = 5\%$ では下死点での弾性ひずみより小さく、 $e_t = 10\%$ では接触領域の大半において下死点の弾性ひずみよりも大きい。

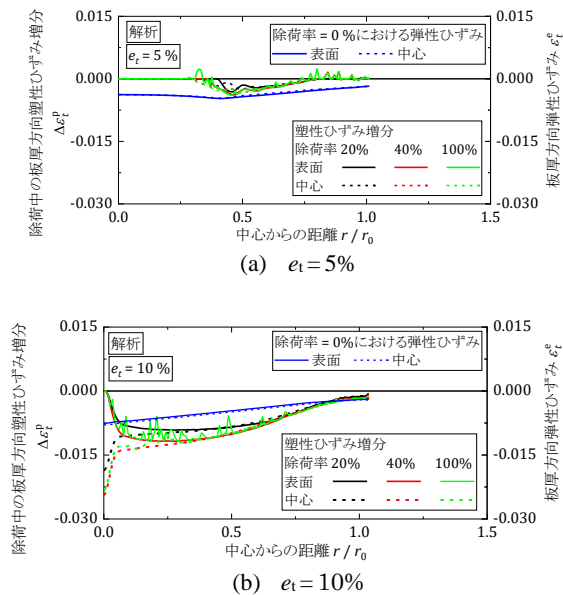


図 9 除荷による塑性ひずみの付与

図 10 に除荷による板中心部の板厚の変化を示す。 e_t の増加に伴い、板中心における板厚は $e_t = 8\%$ で増加から減少に転じ、 e_t が 8%より小さい場合は、除荷による板中心部での圧縮の追加がなく、弾性回復による板厚の増加が e_t の増加とともに大きくなる。 e_t が十分に大きくなると、除荷による板中心部での圧縮付加が弾性回復よりも大きくなり、除荷による板厚減少がみられるようになる。

除荷による圧縮の付加は板直径の増加を引き起す可能性がある。図 11に見られるように、板の直径は $e_t = 5\%$ では僅かに増加するが、 $e_t = 10\%$ ではその増加量は明確となっている。

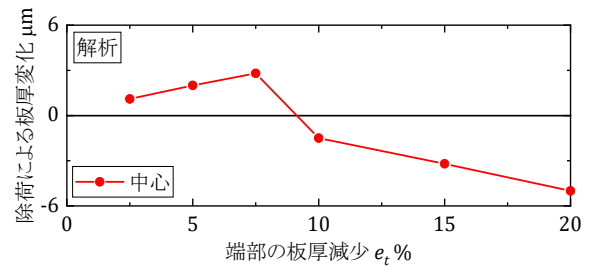


図 10 除荷による中心部板厚の変化

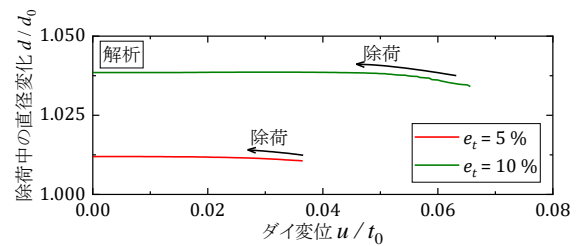


図 11 除荷による板直径の変化 (シミュレーション)

4. 実験結果

図 12 に負荷および除荷における板直径の変化を示す。負荷における直径の増加はシミュレーションよりも実験はやや緩やかであるが、除荷における実測値はシミュレーション値よりもやや大きくなっている。全体的には実験とシミュレーションはよく合っている。また、図 13 に示すように、圧縮加工後の板厚の実測値はシミュレーションの結果とよく一致している。

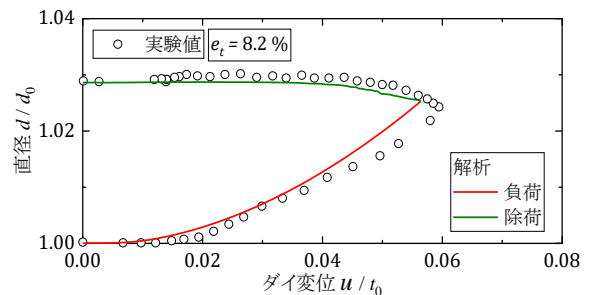


図 12 除荷における板直径変化の実測値

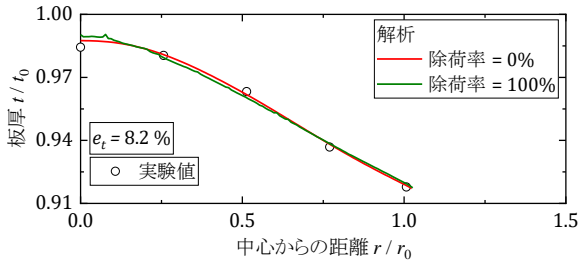


図 13 圧縮加工後の板厚

5. 考察

5.1 摩擦および板材寸法の影響

図 10 に示すように、板厚減少率の増加に伴い、除荷によって板厚が増加から減少に転じる。この転換点における板端での板厚減少率を e_{tr} と表記する。

表 2 に e_{tr} に及ぼす摩擦係数 μ および板材直径と板厚の比率 d_0/t_0 の影響を示す。 e_{tr} は $e_t \leq 20\%$ の範囲において調べた。表中の「-」は当該条件における e_{tr} は調査範囲外の 20% 以上であることを示す。摩擦係数 μ と d_0/t_0 が大きいほど e_{tr} は小さくなる。

表 2 e_{tr} に及ぼす摩擦係数 μ の影響

Friction coefficient μ	12	d_0/t_0	24
0.05	-	18	-
0.10	-	-	16 %
0.15	-	18 %	8 %
0.30	-	9 %	8 %

図 14 に除荷による板直径の増加と負荷時の摩擦丘の関係を示す。 p_c は中心部の圧力で、 p_e は板端での圧力である。 d_0/t_0 の増加に伴い、負荷時の摩擦丘が急峻になっていき、除荷における板材直径の増加も顕著になる。

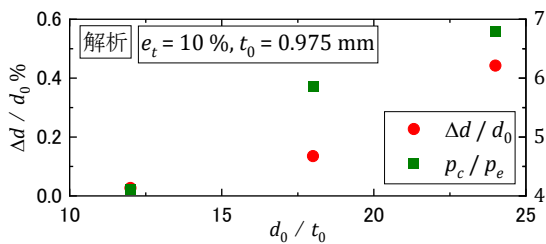


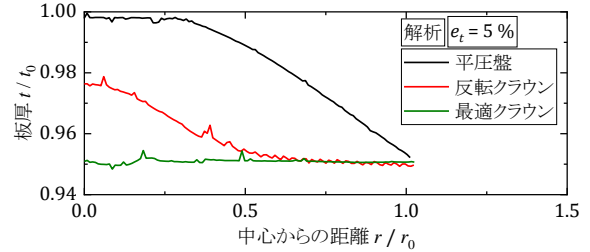
図 14 除荷における板直径の増加量と負荷時の摩擦丘との関係

5.2 ダイクラウンの効果

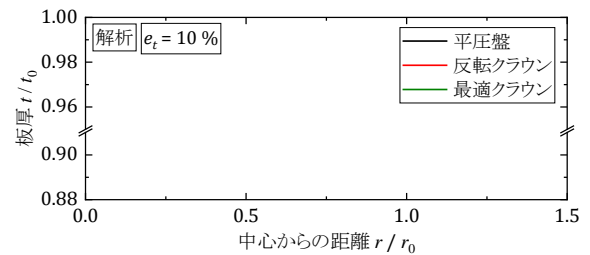
図 15 に板厚の分布に及ぼすダイクラウンの影響を示す。反転クラウンは負荷ストローク下死点における平面ダイの表面プロファイルの反転形状であり、最適クラウンは反転クラウンダイで得られた板表面プロファイルの反転形状を反転クラウン形状に足したものである。 $e_t = 5\%$ の場合、板厚の最大差異は反転クラウンでは $27 \mu\text{m}$ で、最適クラウンでは $3 \mu\text{m}$ となっている。一方、 $e_t = 10\%$ においては、板

厚の最大差異は反転クラウンでは $5 \mu\text{m}$ で、最適クラウンの $2 \mu\text{m}$ と僅差となっている。

板鍛造において、被加工材の板厚のばらつきをなくすために、板厚減少率の小さい圧縮加工が多用されるが、反転クラウンのダイでは、板の平面度が保てないことに留意する必要がある。



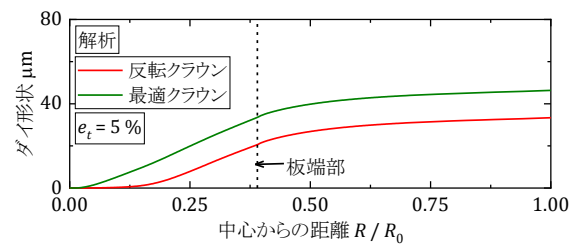
(a) $e_t = 5\%$



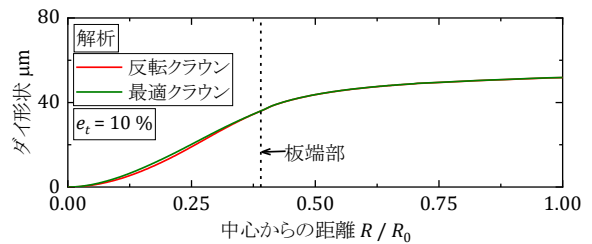
(b) $e_t = 10\%$

図 15 圧縮加工後の板厚分布に及ぼすダイクラウンの影響

図 16 にダイクラウンのプロファイルを示す。反転クラウンと最適クラウンの差は $e_t = 5\%$ では大きいですが、 $e_t = 10\%$ では僅かである。



(a) $e_t = 5\%$



(b) $e_t = 10\%$

図 16 反転クラウンと最適クラウンの形状差

6. 結言

平板圧縮加工におけるダイクラウンの最適化を図るために、DLC コーティングしたダイを用いて、アルミニウム板材の圧縮変形挙動を実験と FEM シミュレーションの両面で調べた。

- (1) 負荷による板厚減少率の増加に伴い、除荷による板厚の変化は増加から減少に転じ、除荷による塑性ひずみの付加が顕著となる。
- (2) 除荷による塑性ひずみの付加は、除荷時の圧縮円板の直径増加を実測することで実証された。
- (3) 負荷による板厚減少率の小さい場合においては、反転クラウンと最適クラウンの形状差異が大きい。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、公益財団法人天田財団の 2020 年度の研究開発助成をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表します。また、実験の遂行に岐阜大学助教箱山智之氏、名城大学吉川泰晴氏の協力をいただいた。

参考文献

- 1) 西野創一郎ほか：プレス加工による板鍛造成形技術，塑性と加工，51-594(2010)，642-646.
- 2) M. Merklein, et. al.: Plastic flow and its control in sheet-bulk metal forming of thin-walled functional components, Annals of the CIRP, 64(2015), 245-248.
- 3) T. Schiemann, et. al.: Mechanisms of fold formation during flange upsetting of tubular parts, AIP conference Proceedings, 1532(2013), 284-290.
- 4) X.Y. Wang, et. al.: Stamping-forging hybrid forming of double layer cup with different wall thicknesses, Materials research innovations, 15(2011), S435-S438.
- 5) 中野隆志：板成形と鍛造の複合技術，塑性と加工，42-484(2001)，388-392.
- 6) 王志剛：板鍛造の技術要点，精密工学会誌，80-12(2014)，1049-1052.
- 7) Z.G. Wang, et. al.: Annals of the CIRP, **68** (2019), 273-276.
- 8) Z.G. Wang, et. al.: Annals of the CIRP, **63** (2014), 277-280.