

バニシング加工によるタービンエンジンの 複雑形状部品の表面改質技術

東京工業大学 工学院 機械系
助教 朱 疆
(2020 年度 一般研究開発助成 AF-2020011-B2)

キーワード：バニシング加工，表面改質，組織制御

1. 研究の目的と背景

昨今，工業製品の小型化・高性能化・低コスト化が進められてきているが，それを実現するために必要不可欠なのが加工技術，加工方法の発展である．そのなかで，疲労強度の向上は部品，製品の耐用年数の増加を実現するため，産業界でも重要な要素の一つとなっている．製品の耐久性，航続距離の向上が求められる航空宇宙や自動車産業以外にも，製品を取り換えるためには多くの負担がかかる人工関節部品の寿命向上など，医療分野においても疲労強度は必要不可欠な特性となっている[1, 2]．

バニシング加工は，図 1 のように工作物表面に高硬度の工具を押し付けて微小な凹凸を塑性変形させる[3]ことで，材料表面に加工硬化層，圧縮残留応力層を与え，疲労強度や硬度，耐摩耗性の向上といった効果を同時に得られるという特徴がある[4]．また，表面改質ばかりでなく，滑らかな表面を得ることもできるため，表面仕上げ加工としても使用されている[5]．さらに，バニシング加工は専用の装置が不要で，旋盤や CNC 工作機械等での加工が可能であり，前工程と同一の工作機械で加工できるという点でも優れている．ショットピーニングなどの専用の装置が必要になる加工方法に比べ，工期の短縮とそれに伴うコストの削減が期待できる．

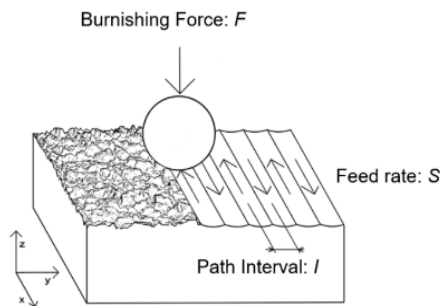


図 1 バニシング加工の概略図

一方で，工具を押し付けるという工法のため，薄板部品への加工では変形が生じてしまうという課題がある．この課題を克服することで，タービンブレードの疲労強度の向上やインプラントの耐食性の向上など，薄板部品の表面改質に適用可能となる．本研究では三次元自由曲面を有する薄板材料へのバニシング加工の適用を目的とし，バニシ

ング加工工具の設計，製作及び実験による評価を実施した．

2. 工具の開発

2.1 工具コンセプト

材料の変形の抑制，および自由曲面への追従性と，将来的な CNC 工作機械上での加工を見据え，以下のようなコンセプトに基づいて設計を行った．

- ① 材料の両側から同時に加工を行う
- ② 工具の中心に面对称な動きを実現する
- ③ 小径チップによるスライド式バニシング

①で両側から力を加えることにより，材料を曲げようとする力を互いにキャンセルし，変形の抑制が可能であると考えた．②は両側から加工する際に，別々に動くことで生じる誤差を防ぐための措置であり，また，これによって加工点中心を常に一定の位置（工具中心線上）に維持できるため，工作機械上での位置制御が容易になる．③は，小径チップによって曲面への追従性を担保し，複雑な自由曲面を有する部品への対応を可能にするためである．

2.2 工具概形

設計図と実際に開発した工具を図 2 に，各部位の名称と材質を表 1 に示す．アクチュエータとしてエアシリンダ①を使用した．エアシリンダの上下方向の運動を，2つのスライダ②，⑤と2種のリニアガイド③，④によって面对称の開閉運動に変換しており，スライダ⑤に接続されたアーム⑥およびチップ⑦が材料を両側から加工する．エアシリンダへの空気圧を制御することで，材料をはさむ力を調整可能である．加工先端部は半径 1.5mm のダイヤモンドチップを使用している．アームは着脱可能であり，片方を取り外すことで従来のように片側からの加工も可能である．

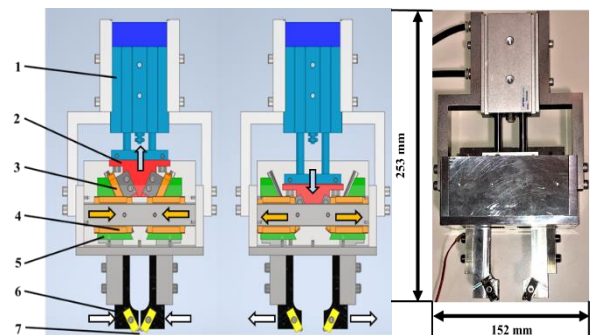


図 2 工具概形

表 1 部位名称

No.	Name	Model number/material
1	Air Cylinder	TR-16X30-S-P, Air TAC
2	Longitudinal slider	SUS 304
3	Longitudinal Linear Guides	SSEBWV9L-50, MISUMI
4	Lateral Linear Guides	SSE2BWV12L-110, MISUMI
5	Lateral sliders	SUS 304
6	Arms	SUS 304
7	Processing part	DT4D1, SUGINO
	Other Parts	SUS 304

2・3 変形抑制効果の確認

製作した工具が加工中の薄板材料の変形抑制可能かを確認するため、電気マイクロメータ (DS812SR, Magnescale .Co) を用いて表面の変位を測定した。厚さ 2.5mm, 面積 100mm × 100mm の AZ31 を試験片とし、無負荷の状態、両側から負荷、片側から負荷の 3 条件で実施した。図 3 の状態で、試験片を 100mm/min の速度で Z 軸の正方向にのみ移動させ、Y 軸の表面変位を測定したところ、図 4 に示すような結果が得られた。

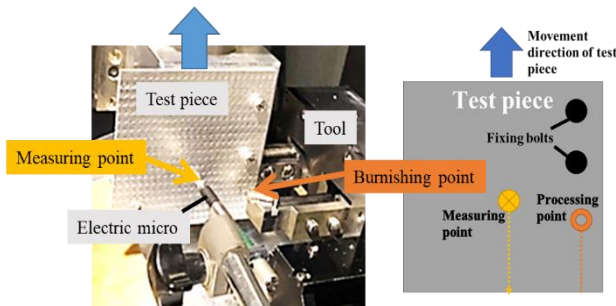


図 3 薄板材料加工時の変形量測定実験

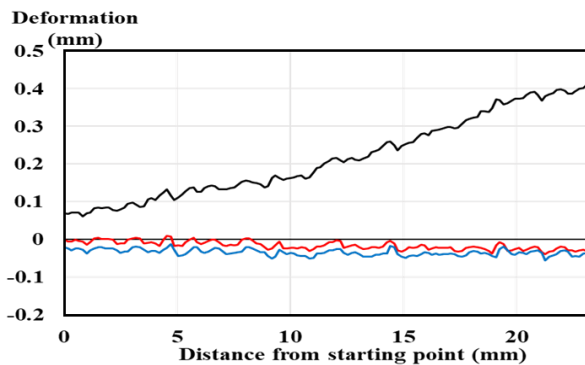


図 4 変形量測定結果

両側からの加工では測定開始時の差を維持しているのに対し、従来の片側からの加工では最大 0.4mm と大きく変形している。この値は板厚の 16% に相当し、この状態では意図した加工を行うことは困難である。一方、両面から加工した場合、加工前の状態との差は約 0.02mm で板厚の約 1% であった。

以上の結果から、両側から荷重を加えるというコンセプト

トが、本研究の目的である曲げ変形の抑制を達成したことを確認した。

3. 製作した工具による表面強化の評価

開発した工具の性能を評価するため、Mg 合金(AZ31)、Al 合金(A5052)、ステンレス鋼(SUS304)、Ti 合金(Ti64) を試験片として、バニシング加工前後の機械的特性を調査した。これらの試験片は、バニシング加工を行う前に表面を薄く削ることで、実際の製品加工で使用される環境を再現している。試験片へのバニシング加工は図 5 のように、分解能 0.5 μm の 3 軸モデリングマシン(NC-5K, ミマキエンジニアリング)上で実施した。試験片を走査線型に動かすことで、指定した領域全体をバニシング加工している。

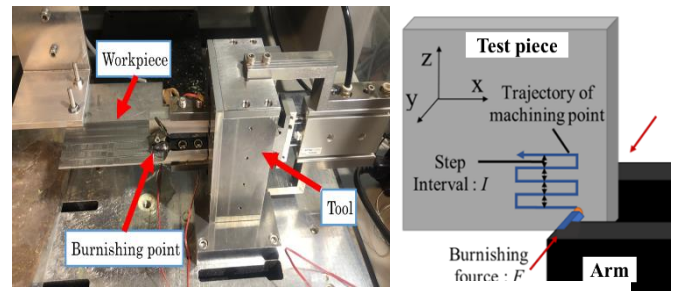


図 5 開発した工具によるバニシング加工

3・1 表面粗さの評価

バニシング加工前後の試験片表面のステップ幅方向(図 5 の Z 軸方向)に対し、非接触式三次元表面形状測定機(μ Surf-S, Nano Focus)によって算術平均粗さ Ra を計測した。それぞれの条件に対して 5 か所で測定を行い、その平均値をデータとして使用している。バニシング加工は、ステップ幅とバニシング力の条件を変更しながら、それぞれの条件で 5mm × 5mm の範囲に実施した。測定結果を図 6 に示す。青色が元の表面およびステップ幅 0.01mm での加工結果、黒色がステップ幅 0.03mm での加工結果となっている。図 6 の結果からは以下のことが読み取れる。

- ・ 両面の差は概ね Ra0.1 μm 以内の結果になったが、大きく乖離する条件もあった。
- ・ A5052, SUS304, AZ31 では表面粗さ改善の効果があつたが、Ti64 では悪化した
- ・ A5052, SUS304 は最大で Ra0.1 μm 程度まで改善したが、AZ31 は Ra0.5 μm 程度にとどまった
- ・ A5052 はバニシング力が小さいほど、SUS304 では大きいほど良い結果が得られた。
- ・ ステップ幅は 30 μm より 10 μm の方が良い結果を示すが、バニシング力が大きくなると表面が傷つくこともあつた。

Ti64 で表面粗さが悪化したのは、チタンが塑性変形をおこしにくい六方最密構造であることが要因として挙げられる。加工による塑性変形と材料の流動が十分に生じなかったために、表面の改善が達成できなかったと考えられる。図 7 はバニシング加工後の A5052 と Ti64 の表面の

写真である。Ti64には縦にはっきりとした筋が見えるが、A5052は明瞭な模様ではない。この写真も、Ti64では材料の流動が十分に起きなかったためと説明可能であり、今回の考察を裏付ける要素となりうる。

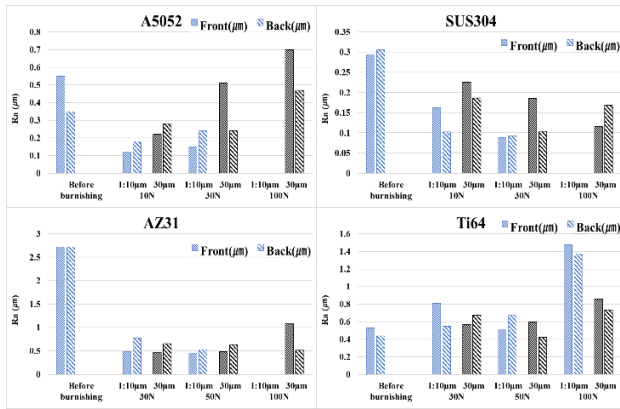


図6 表面粗さの結果

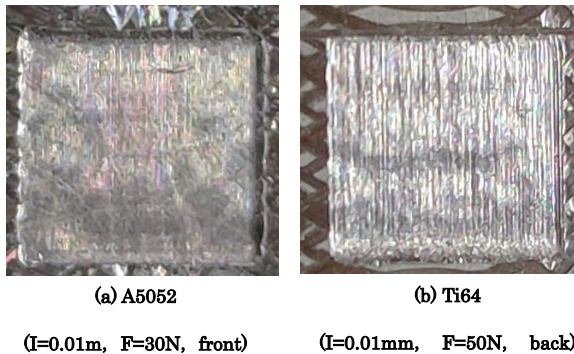


図7 バニシング加工後の表面

A5052とSUS304でバニシング力と表面粗さの関係が異なっているが、A5052では高いバニシング力の条件で材料表面に剥離が生じており、表面粗さの悪化の原因と考えられる。これは、過大な力によって必要以上の材料が流動して工具前方に波のような盛り上がりが生じ、更に工具で押しつぶす際にせん断応力が発生し、盛り上がり部が剥離すると考えられている[6][7]。一方のSUS304はA5052に比べて硬く、チップの食い込み量が小さかったため、実施した条件の中では表面の悪化に至るほどではなかったと考えられる。

3・2 硬度の評価

硬度の単位としてヴィッカース硬度(HV)を用いた。測定にはマイクロヴィッカース硬度計(HM-210C, Mitutoyo)を使用し、バニシング加工前後の試験片表面の硬度を測定した。それぞれの条件に対して5か所で測定を行い、その平均値をデータとして使用している。計測条件は試験力0.1kg、負荷時間4s、保持時間10s、除去時間4sとした。各材料における試験結果を図8に示す。表面粗さと同様、元の表面とステップ幅(I)0.01mmの結果は青、ステップ幅0.03mmの結果は黒で示してある。図8

の結果からは以下のことがわかる。

- 全ての材料で10~30Nの低いバニシング力でも硬度が向上し、元の値の25~40%程度向上した。
- ステップ幅10μmと30μmでは結果に明確な差異はみられなかった。
- A5052のみバニシング力の増加に伴い硬度も向上したが、残りは変化がなかった。

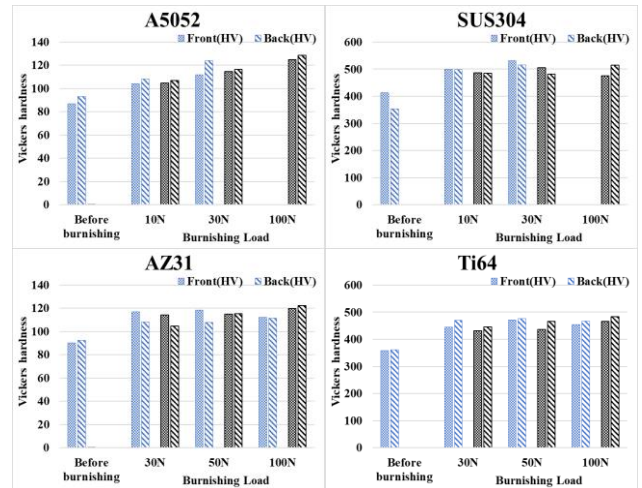


図8 硬度の結果

3・3 結晶観察

バニシング加工した試験片を切断し、加工硬化層の確認を試みた。結晶観察は観察面(断面)をサンドペーパー(400番から4000番)で研磨した後、バフ研磨を経てエッチングを行う。エッチングは粒界を腐食させて観察を容易にするために実施する。エッチング液の組成は材料により異なり、AZ31はピクリン酸2.1g、酢酸5ml、蒸留水5ml、エタノール(95%)35mlで、この液に試料を20秒浸漬する。SUS304では10%シュウ酸溶液において1A/cm²の条件で90秒間の電解エッチングを行った。

処理したAZ31、SUS304を光学顕微鏡で観察し、得られた写真が図9,10である。AZ31では、材料表面に近い領域では結晶が小さく、表面から離れるにつれて大きな結晶になっていく。これはバニシング加工の力によって表面近傍の結晶が微細化されたためと考えられ、小さな結晶の層が加工硬化層を意味する。赤い矢印で示すように、両側とも200~300μmの加工硬化層が形成されている。

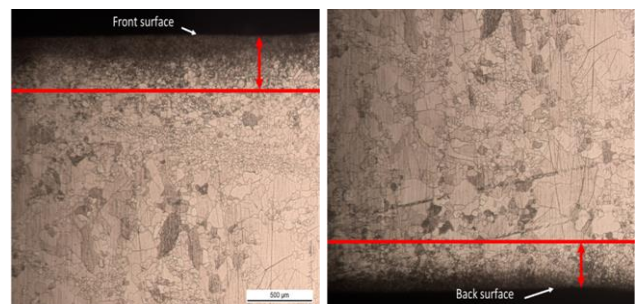
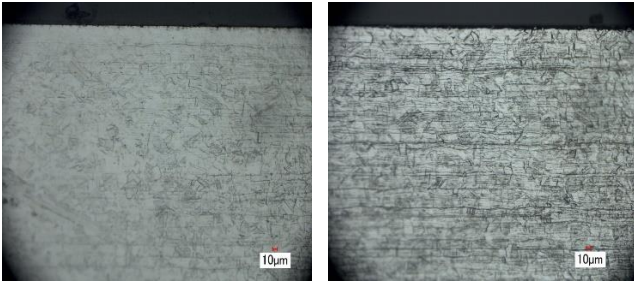


図9 AZ31の結晶観察



(a) After burnishing (100N) (b) Non burnishing

図 10 SUS304 の結晶観察

SUS304 は、表面から 30 μm 程度の厚さに結晶粒界が見当たらない層が存在した。全体に結晶粒がはっきりとみられないため判断はしづらいが、この表層の部分が、田中ら [8] が SUS316 でのバニシング加工で確認している塑性流動層であることが考えられる。

3・4 引張強さの評価

引張試験機(Autograph AGX-20kNVD, Shimadzu)を使用して SUS304, A5052, Ti64 の 3 種の材料に対して引張試験を実施した。試験は引張速度 1mm/min で実施した。試験片は 13B 号試験片(JIS Z2201 規格)を採用し、バニシング加工前後の材料をワイヤーカット放電加工機で切り出して製作した。ステップ幅 30 μm , 加工速度 1500m/min でバニシング加工を行っている。各材料の結果をまとめると、以下ようになる。

- SUS304 ではバニシング力の増加に伴って引張強さ、降伏応力が向上した。
- 板厚が薄いほどバニシング加工の効果が高い。
- A5052 では F=10N で引張強さが 40%以上向上するが、F=100N でも同程度であった。
- Ti64 は、F=100N までのバニシング加工では引張強さが 3%程度しか向上しない。

板厚が薄いほど引張強さの向上が大きくなるのは、バニシング加工によって強化された層の厚さが元の板厚に占める割合が大きくなるためだと考えられる。

また、A5052 でバニシング力を増加させても、F=10N での条件から引張強さが向上しなかったことから、引張強さの向上には上限値があると考えられる。

Ti64 の引張強さがあまり向上しなかった理由として、より大きな力が必要であるということが考えられる。しかしながら、100N でのバニシング加工後の材料表面では切粉の生成が確認されており、これ以上バニシング力を増加させると表面の悪化が予想される。このため、製作したバニシング工具では Ti64 の引張強さの向上は難しいといえる。

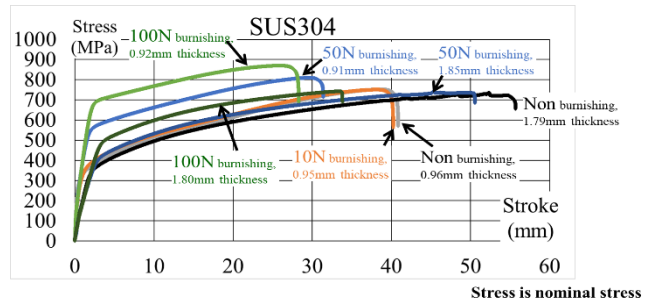


図 11 SUS304 の引張試験結果

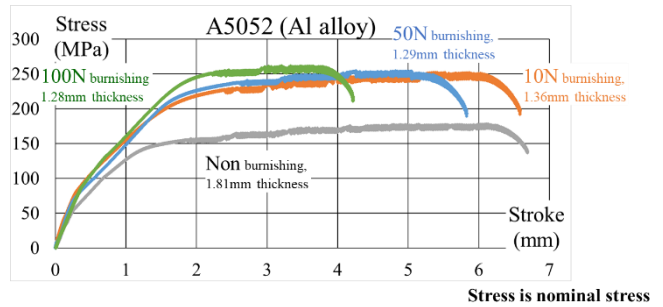


図 12 A5052 の引張試験結果

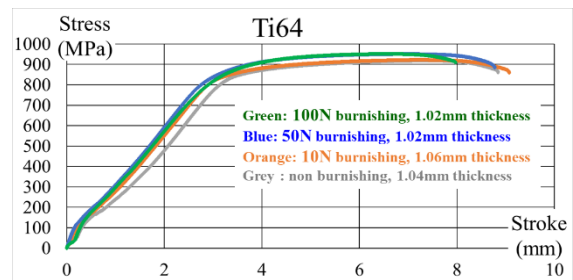


図 13 Ti64 の引張試験結果

3・5 疲労強度の評価

SUS304 を対象とし、疲労試験機を使用して引張の疲労試験を実施した。引張-圧縮の試験では座屈が生じる可能性があるため、引張-引張の条件で実施した。105 サイクル程度で破断が起きるよう、応力振幅を 225MPa とし、応力比は 0.1, 与える荷重は 30Hz の sin 波に設定した。応力比は図 14 のように定義された値である。試験片は 1/2 スケールの 13B 号試験片(JIS Z2201 規格)を使用し、フライス加工前、フライス加工後、フライス加工後にバニシング力 100N で加工したものの 3 種類を用意した。

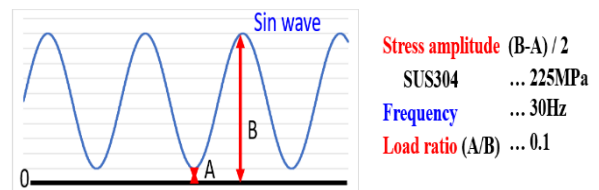


図 14 疲労試験条件

疲労試験の結果を図 15 に示す。同じ色のデータは、それぞれ同じ板から作成した試験片であることを示す。

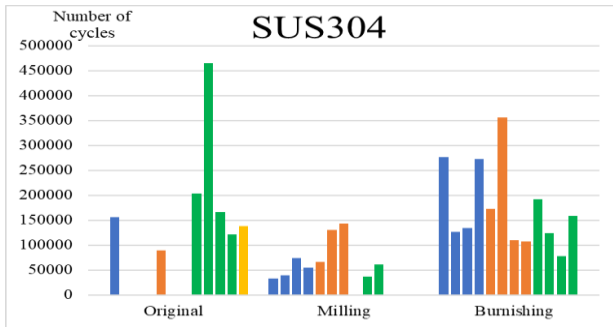


図 15 疲労試験結果

全体の傾向として、フライス加工によって疲労強度が減少するが、更にバニシング加工を実施することで元の状態かそれ以上まで疲労強度が回復した。疲労強度に影響を及ぼす要因の 1 つとして表面の残留応力が知られており、圧縮の残留応力は疲労き裂進展を抑制するため、疲労強度を向上させる。フライス加工では引張の残留応力が、バニシング加工では圧縮の残留応力が生じることが知られており、今回の傾向は予想と合致するものであった。一方で、バニシング加工後でも疲労強度が元の材料と同程度か下回るデータも多かった。これは表面の状態が関係する。亀裂の発生は表面の微小な凹凸が起点となるため、表面粗さの悪化は疲労強度の低下につながる。今回のバニシング加工は $F=100N$ で行っており、加工時には微小な切粉が生じていたことを確認している。この切粉の生成によって微小な凹凸が残存し、圧縮残留応力による疲労強度向上の効果を打ち消してしまった可能性がある。

以上の考察から、製作したバニシング工具は SUS304 薄板の疲労強度の向上に効果があるといえるが、加工中の切粉の生成を防ぐことで更なる疲労強度の向上が達成可能であると考えられる。

3・6 残留応力の評価

X 線回析装置(X`Pert-MPD-OES)を使用し、残留応力を計測した。試験片は A5052 を使用した。残留応力の深さ方向の分布を確認するため、ワイヤーカット放電加工機を使用して 0.05mm 間隔で表面を削り、紙やすりで影響層を除去後、計測を行うという作業を繰り返した。

試験片は未加工の材料、フライス加工後の材料、フライス加工後にバニシング力 100N で加工した材料の 3 種類に対して深さ方向の残留応力を測定した。残留応力の測定結果を図 16 に示す。正の値が引張、負の値が圧縮の残留応力である。青系色がバニシング加工後のもの、灰色がフライス加工後、黄系色が未加工の材料のデータである。この結果から以下のことが言える。

- ・ バニシング加工によって深さ 0.15mm まで 80MPa 程度の圧縮残留応力が与えられた
- ・ 深さ 0.2mm 以降では 3 条件で明確な違いは見られず、

バニシング加工の効果はない

- ・ 深さ 0.05mm までは、バニシング加工によって圧縮残留応力が 60MPa 程度の顕著に向上した

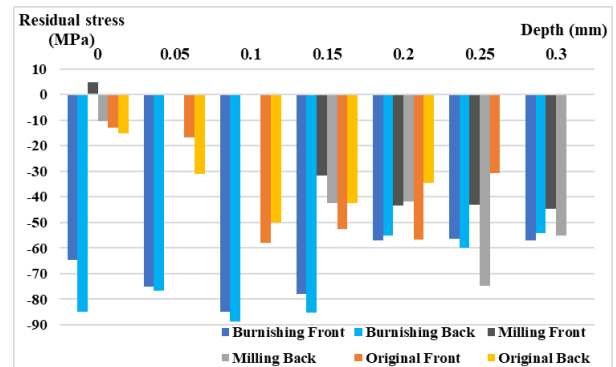


図 16 残留応力の結果

4. 結論

本研究では、薄板の変形を抑制しながらバニシング加工可能な工具を考案、製作し、その工具の性能の検証を行った。以下に得られた知見を示す。

- ・ 両側から荷重を与えるバニシング工具により、板厚 1mm 程度の薄板を加工中の変形を抑制しながらバニシング加工することが可能になった。
- ・ SUS304, A5052, Ti64, AZ31 の 4 種類の 1-2mm 厚薄板材料を対象に、製作した工具によるバニシング加工を実施し、表面性能の変化を調査した。
- ・ 表面粗さの評価結果により、A5052, SUS304, AZ31 では表面粗さ改善の効果があつたが、Ti64 では悪化した。A5052, SUS304 は $Ra0.1 \mu m$ 程度まで改善したが、AZ31 は $Ra0.5 \mu m$ 程度にとどまった
- ・ 硬度の評価結果により、今回の実験で使用した全ての材料で 10~30N の低いバニシング力でも、元の 25~40%程度硬度が向上した。
- ・ 引張強さの評価結果により、SUS304 ではバニシング力の増加に伴って引張強さ、降伏応力が向上した。A5052 では $F=10N$ で引張強さが 40%以上向上するが、 $F=100N$ でも同程度であった。Ti64 は、 $F=100N$ までのバニシング加工では引張強さが 3%程度しか向上しない。板厚が薄いほどバニシング加工の効果が高い。
- ・ SUS304 はバニシング加工によって疲労強度が向上したことが確認した。A5052 においてはバニシング加工によって深さ 1.5mm 程度まで圧縮残留応力層がえられた。

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団一般研究開発助成 (AF-2020011-B2) を受けたものであり、深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) MOHAMMADI, Farough; SEDAGHATI, Ramin; BONAKDAR, Ali. Finite element analysis and design optimization of low plasticity burnishing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 70. 5: 1337-1354.
- 2) SLAVOV, Stoyan, et al. Impact of ball burnished regular reliefs on fatigue life of AISI 304 and 316L austenitic stainless steels. *Materials*, 2021, 14. 10: 2529.
- 3) C. Cao, J. Zhu, T. Tanaka, F.-J. Shiou, S. Sawada, and H. Yoshioka, "Ball Burnishing of Mg Alloy Using a Newly Developed Burnishing Tool with On-Machine Force Control," *Int. J. Automation Technol.*, Vol. 13, No. 5, pp. 619-630, 2019.
- 4) LOH, N. H. ; TAM, S. C. Effects of ball burnishing parameters on surface finish—a literature survey and discussion. *Precision Engineering*, 1988, 10. 4: 215-220.
- 5) 二村優. 疲労寿命向上と摺動性向上を兼ね備えた高速鏡面仕上げ- ローラバニシング加工-. *精密工学会誌*, 2015, 81. 12: 1053-1056.
- 6) 田中秀岳, et al. 高硬度鋼材表面仕上げにおける前加工の表面性状がバニシング加工面へ及ぼす影響- ダイヤモンドチップバニシング工具を用いた高硬度鋼材表面仕上げ加工に関する研究-. *塑性と加工*, 2009, 50. 581: 555-559.
- 7) DZIONK, Stefan; DOBRZYNSKI, Michal; ŚCIBIORSKI, Bogdan. Jumping wave characteristic during low plasticity burnishing process. *Materials*, 2021, 14. 6: 1441.
- 8) 田中秀岳; 石井渉; 柳和久. ステンレス鋼およびアルミニウム合金のバニシング加工による表面改質における最適加工条件と表面層の機械的性質. *塑性と加工*, 2011, 52. 605: 726-730.
- 9) PREVE' Y, Paul S., et al. Case studies of fatigue life improvement using low plasticity burnishing in gas turbine engine applications. In: *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. 2003. p. 657-665.