

1.2 GPa 級高強度鋼板のピアス加工における 工具鋼の損傷解析

Damage Analysis of Tool Steels on Piercing of 1.2 GPa-Class High Strength Steel Sheet

三浦 滉大*¹ 館 幸生*²

MIURA Kodai and TACHI Yukio

1. 緒言

環境負荷低減(CO₂削減、省資源化)を推進する社会的背景から、金属加工分野の様相が変化している。例えば、軽量化および衝突安全性能の観点からは、自動車骨格部品へのハイテンの適用の拡大である¹⁾。特に、1.2あるいは1.5GPa級ハイテンの実装には、接合強度、水素脆化といった課題²⁾が挙げられる。一方、ハイテンを加工するための金型寿命の低下も課題の一つであり、先行研究としてハイテンのせん断加工における金型損傷評価が行われている³⁾⁻⁷⁾。樋口らは、ピアス加工においてコーティングしたパンチの寿命を切口のかじりの発生と定義し、鋼板強度の増加に伴いパンチ寿命が著しく短寿命化する結果を得ている⁴⁾。このようなハイテンを代表とする被加工材の高強度化に伴う金型寿命の低下は今後より進行すると予測され、金型損傷のメカニズム解明と寿命改善策の検討は重要である。

このような課題に対する取り組みとして、当社は工具鋼とPVDコーティングとの密着性に関する研究を行ってきた^{8)、9)}。これまでの研究において、代表的な要素試験であるスクラッチ試験を用いて様々な工具鋼とPVDコーティングとの密着性(臨界荷重 L_c)を評価した^{8)、9)}。摩擦力の立上りを臨界荷重と定義した場合、一次炭化物の種類やサイズによらず、市村のモデル¹⁰⁾における被膜と基材を複合体とした複合硬さ(文献には「複合硬度」と記載されているが、ここでは「硬さ」の表記で統一する)を用いて解析できることを示した⁸⁾。そして、被膜損傷の抑制という観点に絞れば、基材工具鋼の高強度化が有効であり、冷間ダイス鋼の中で最高レベルの強度を有するQCM[®]64-HARMOTEX[®]¹¹⁾(以降、QCM[®]64-H)の適用が有効であることを提案した⁸⁾。

本研究では、これまでの要素試験で得られた工具鋼の高強度化の有効性^{8)、9)}を、より実践的な「ハイテンのピアス加工」という形態で検証した。具体的には、異なる強度を

有する工具鋼製パンチを用いて、1.2 GPa級ハイテンをピアシングした時の損傷量を比較評価した。さらに、パンチの損傷状態を詳細に観察することで、損傷機構を推測し、その機構に対して工具鋼の高強度化がどのように有効であるかを述べる。

2. 実験方法

Fig. 1にピアス加工の模式図を示す。被加工材には、市販の1.2GPa級冷延鋼板(非めっき)1.6 mm厚を用いた。クランクプレスに鋼板をフィーダーで送り、 $\phi 20$ mmの穴を50 mm間隔で打抜いた。加速試験として鋼板の厚さに対するダイスとパンチのクリアランスを3%に設定し、傾斜無し、無潤滑、50 ショット/min(この時の鋼板とパンチの相対すべり速度は約0.15 m/s)の条件で実施した。ショット数は、先行研究の傾向⁴⁾⁻⁶⁾および実験費用と時間の制約を考慮して、500ショットまでとした。

Table1にパンチおよびダイスに用いた工具鋼一覧を示す。パンチには3種類の冷間ダイス鋼、高速度工具鋼(SKH51)および粉末高速度工具鋼(SPM[®]R8¹²⁾)の合計5種類を用いた。この中で、QCM[®]64-HはSKH51レベルの硬さを達成しており、従来のダイス鋼と比較して、圧縮試験

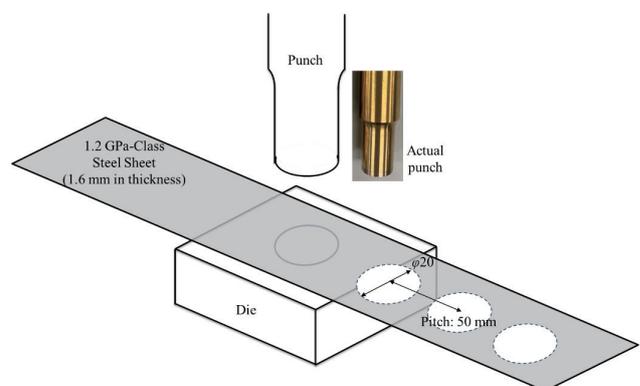


Fig. 1 Schematic view of piercing.

*1 研究・開発センター 新商品開発室 商品開発2グループ

*2 研究・開発センター 新商品開発室 商品開発2グループ長

における0.2%耐力が高い。これらの工具鋼を焼入焼戻し、パンチ形状に仕上げ、 $R_a \approx 0.35 \mu\text{m}$ に仕上げた。その後、パンチに市販のTiN(イオンプレーティング法)を約 $3 \mu\text{m}$ を成膜し供試材とした。ダイにはQCM[®]8の非コーティング材を用いた。

損傷量の評価は、興津らの先行研究^{5), 6)}を参考に、パンチ側面の被膜がはく離した面積を損傷量の指標(損傷面積)とした。Fig. 2に、SKH51製パンチで500ショット打抜いた後の損傷面積計測例を示す。デジタルマイクروسコープにてパンチ先端を50倍で観察し、視野中央部の幅3 mm領域の損傷面積を計測した。幅3mmの場合、真の弧の長さに対する平面に投影された幅の誤差は約1%未満であるため、損傷面積に与える曲率の影響は小さいと考えられる。計測箇所は、パンチ円周12か所を実施し、その合計量を損傷量の指標とした。なお、損傷面積は、基材露出面積と被加工材である鋼板が移着した面積の和であることを断面観察から確認した。しかし、基材露出面積は鋼板の移着面積よりも定性的に大きいため、近似的に損傷面積は基材露出面積である。

ピアス加工の損傷形態を考察するため、スクラッチ試験を合わせて実施した。スクラッチ試験はCSR1000(レスカ製)を用いて、圧子半径200 μm 、初期荷重5 N、最終荷重155 N、走査速度10 mm/minの条件で実施した。試験片は、パンチと同じ材料である。表面粗さはいずれも $R_a \leq 0.02 \mu\text{m}$ に仕上げた。Fig. 12(a)に示すよう

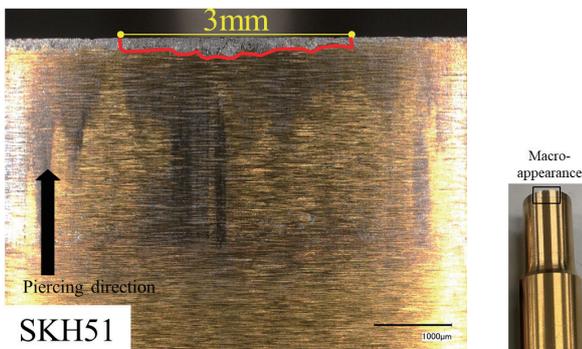


Fig. 2 Example of measurement of damaged area.

に、本研究ではアコースティックエミッション(AE)の立上りを臨界荷重と定義した。そして、前報同様に市村のモデル¹⁰⁾を用いて、臨界荷重を解析した。詳細は省略するが、膜と基材を複合体とした複合硬さをビッカース試験機の荷重を変えて求めた値を解析に用いた。

これらの評価に加えて、外観観察およびFIB(Focused Ion Beam)で加工した断面観察を実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 損傷面積評価

Fig. 3にショット毎のSKD11パンチ側面の損傷状態を示す。ショット数の増加に伴いパンチ側面の損傷面積が増加している。また、一部の損傷は、刃先から離れた箇所でも観察された。Fig. 4に鋼種毎のパンチ側面の損傷状態(500ショット)を示す。SKD11と比較し、QCM[®]64-Hの損傷は小さい。Fig. 5に損傷面積と硬さの関係を示す。基材硬さの増加に伴い損傷面積は減少し、SPM[®]R8が最も小さかった。この硬さに対する損傷面積の挙動は先行研究⁵⁾と一致する。QCM[®]64-Hの損傷面積はSKD11に対して1/2未満、SKH51とは同等程度である。これら

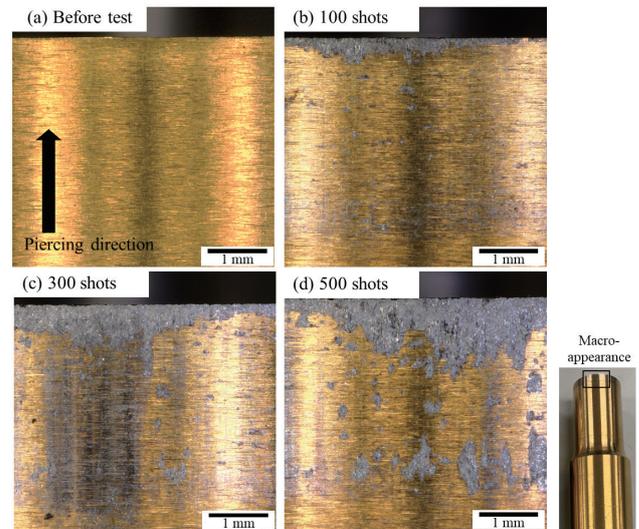


Fig. 3 Appearances of punch in SKD11, (a) before test, (b) after 100 shots, (c) 300 shots, (d) 500 shots.

Table 1 Materials for die set and scratch test.

Tool steel	Use	Substrate hardness (HRC)	0.2% proof stress in compression (MPa)	Coating
SKD11		59	2258	
QCM [®] 8		62	2373	
QCM [®] 64-HARMOTEX [®]	Punch Scratch test	64	2562	TiN (3 μm)
SKH51		65	—	
SPM [®] R8		66	—	
QCM [®] 8	Die	62	2373	—

の結果は、ピアス加工における被膜損傷抑制に対する基材工具鋼の高強度化の有効性を示す。特に、損傷面積と金型寿命に相関があると仮定すれば、高速度鋼と比較し、省合金、安価である高強度冷間ダイス鋼QCM[®]64-HはSKH51と同等のパフォーマンスを発揮すると予測される。

次節以降では、パンチの刃先および側面の損傷を観察し、工具鋼の高強度化がどのように有効であるかを考察する。

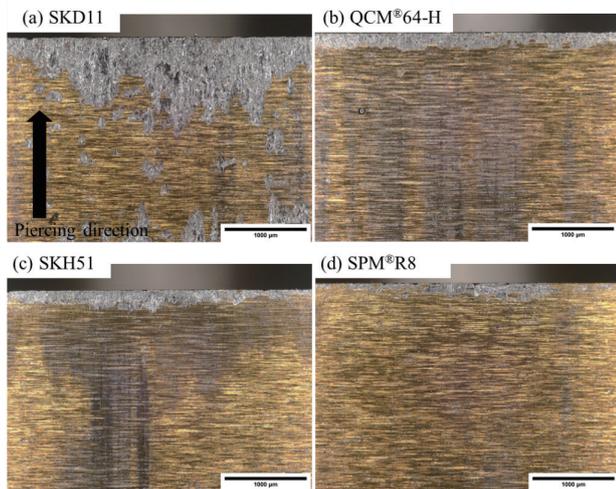


Fig. 4 Appearances of punch after 500 shots, (a) SKD11, (b) QCM[®]64-H, (c) SKH51, (d) SPM[®]R8.

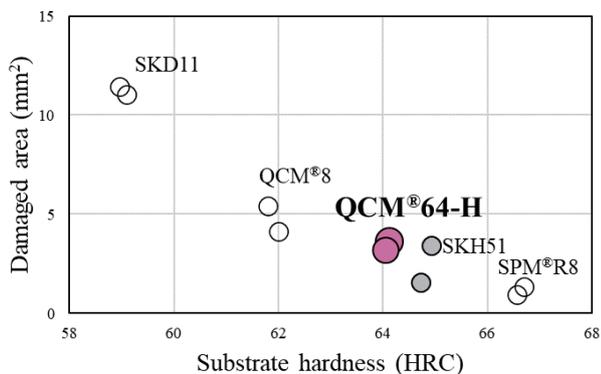


Fig. 5 Relation between damaged area and substrate hardness.

3.2 刃先の塑性変形

Fig. 6にSKD11とQCM[®]64-Hの刃先断面の反射電子(BSE)像およびSIM像を示す。両鋼種の刃先において、TiNは完全にはく離していた。刃先形状は、SKD11の方が丸みを帯びているのに対して、QCM[®]64-Hの刃先形状は維持されている。さらに、Fig. 6(a) (b)の白枠部をSIM像で観察すると、QCM[®]64-Hはマルテンサイト組織を反映した等方的な針状組織であるのに対し、SKD11は白矢印方向へ異方的に配向した組織である。SIM像では結晶方位を反映したコントラストが得られることから、SKD11製パンチの刃先では塑性変形が生じていると考えられる。このような刃先での塑性変形は、安富ら³⁾によっても報告

されており、パンチ先端での応力集中³⁾、¹³⁾に起因していると考えられる。このような刃先の変形に対して、工具鋼の高強度化は有効である。

しかし、パンチの損傷は刃先に限定されるものではなく、ピアス方向と逆方向に拡大する(Fig. 3)。この損傷面積の拡大は、最終的に鋼板切口のかじり³⁾、⁴⁾や、バリの増大をもたらすと考えられる。そこで本研究では、次節に示すパンチ側面の損傷に注目する。

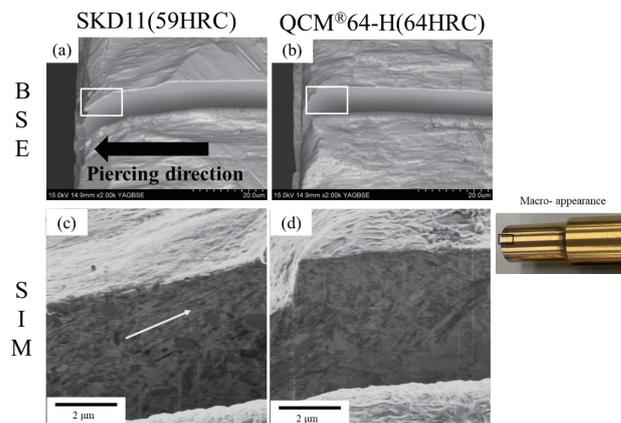


Fig. 6 Cross-sections of edge part of punch after 500 shots. (a), (b) BSE images. (c), (d) SIM images highlighted by white frames in (a) and (b). (a), (c) SKD11. (b), (d) QCM[®]64-H. These images are observed at 40° tilted in FE-SEM or FIB.

3.3 パンチ側面の損傷

Fig. 7にQCM[®]64-H製パンチ刃先より2.5 mm離れた位置におけるTiNのチッピングの例を示す。この損傷形態は、TiNが浅くはく離し(基材は露出していない)、円周方向に広がっている。膜のチッピングのサイズは、ピアス方向に約13 μm程度であった。このような膜のチッピングは、刃先からの距離によらず観察された。なお、ここでいうチッピングは、パンチのマクロな欠損ではなく、ミクロ

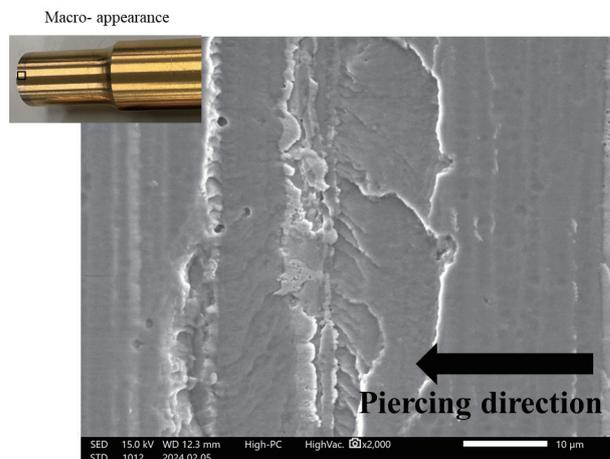


Fig. 7 Chipping of TiN at 2.5mm away from edge part of punch in QCM[®]64-H.

な膜(TiN)の浅いはく離を指している。

Fig. 8にパンチ側面における被加工材の移着状態を示す。黒矢印で示した箇所は膜のチップングによって生じた凹部であり、その凹部を埋めるようにして、被加工材が移着している。これは、ピンオンディスク試験におけるAg/Feの摩耗面¹⁴⁾と類似した形態であり、膜のチップングによって生じた凹部の形成によって、被加工材側がアプレシブ摩耗的に削られた結果である。

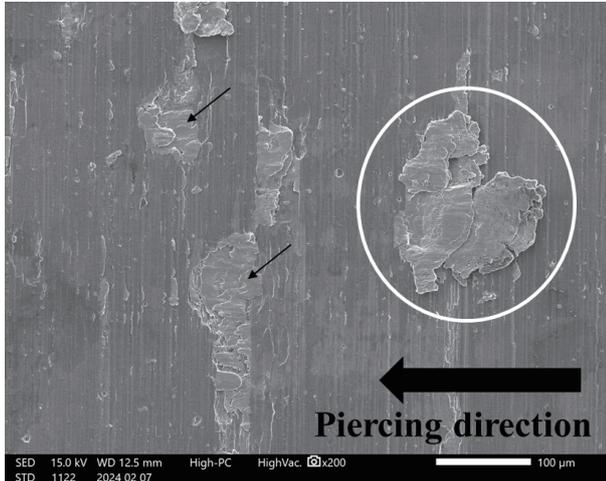


Fig. 8 Secondary electron image of side surface of punch in QCM®64-H.

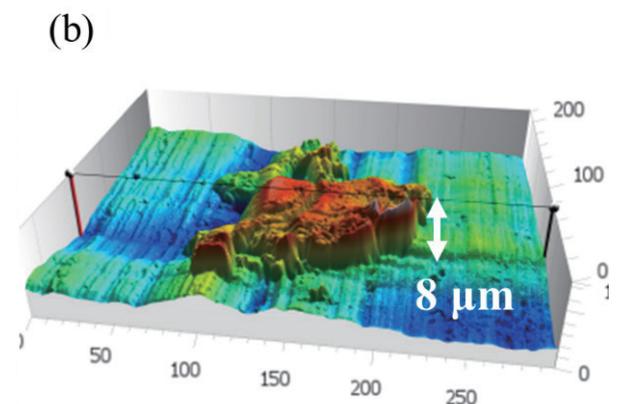
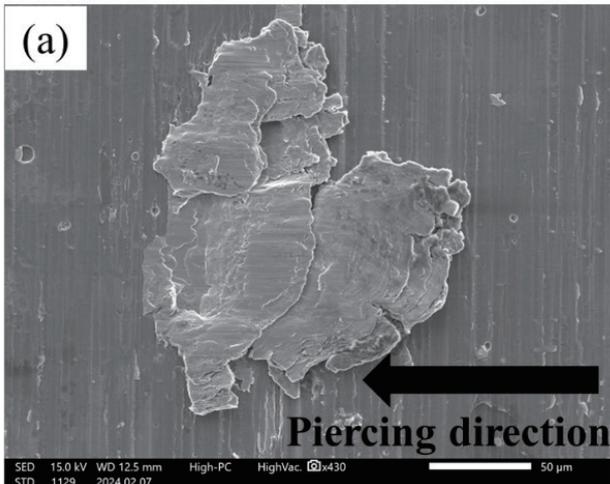


Fig. 9 (a) Secondary electron image of transfer particle. (b) 3D analysis of transfer particle. The transfer particle is indicated by white circle in Fig. 8.

また、Fig. 8の白丸で囲んだ箇所において、被加工材の移着粒子が観察された。Fig. 9に移着粒子の拡大画像および3次元解析の結果を示す。被加工材の移着粒子は約8 μ mの凸部である。結果は省略するが、FIBにより断面加工した凸部を観察すると、膜のチップングが生じたと推測される凹部に移着粒子が堆積していることを確認している。したがって、凹部を起点としてパンチ側面の移着が進行し、Fig. 9に示すサイズまで成長したと考えられる。

次に、TiNが移着粒子と共に脱離する様子を可視化した結果を示す。Fig. 10(a)は、FIBにより加工する前の反射電子像であり、Fig. 8と同様に凹部に被加工材が移着している。Fig. 10(b)は(a)の黒破線に沿ってFIB加工した後、FE-SEMで断面観察した結果である。元々凹部に埋め込まれていた移着粒子は、FIB加工により圧縮残留応力が開放され、浮き上がる。そして、移着粒子と工具表面の界面に注目すると、移着粒子と共にTiNは表面から脱離している。Fig. 10の場合は残留応力を開放することで移着粒

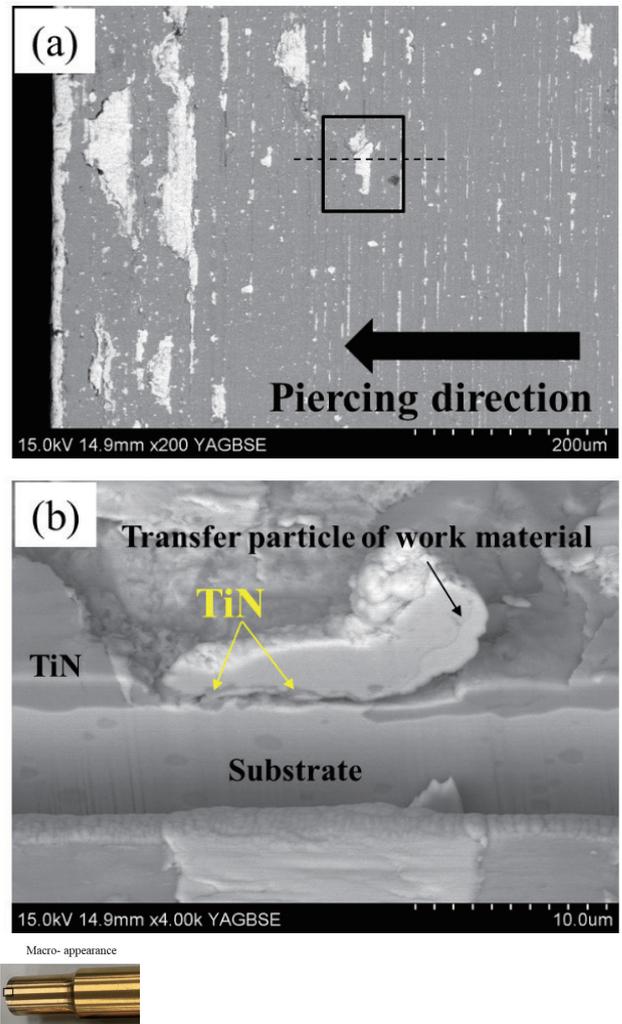


Fig. 10 (a) Back scattering image of side surface of punch in SPM®R8 before sectioning with FIB. (b) Cross-section along black dashed line in Fig. 10(a). Yellow arrows indicate TiN which flaked from surface of punch and included in transfer particle.

子を表面から脱離させた。しかし、実際の損傷プロセスでは、Fig. 9に示すような粗大な移着粒子に成長した後、TiNと共に系外へ脱離することが想像される。つまり、移着の進行がTiNの損傷を促進している。

さらに、Fig. 11に500ショット後の鋼板切口破断面(パンチ材:SKD11)の観察結果を示す。EDSマッピングにより、破断面においてTiの濃化領域が観察された。このようなTiの濃化は、他のパンチ材を用いた場合も観察された。鋼板の組織において、鋼板厚み方向(ピアス方向)に延びた介在物は存在しないことを断面観察から確認している。したがって、Tiの濃化は被膜のTiNに起因したスペクトルであると考えられる。Fig. 11は凝着摩耗の特徴である相互移着の結果であり、パンチの損傷が凝着摩耗を主体として進行する^{5), 6)}ことを支持する観察結果である。

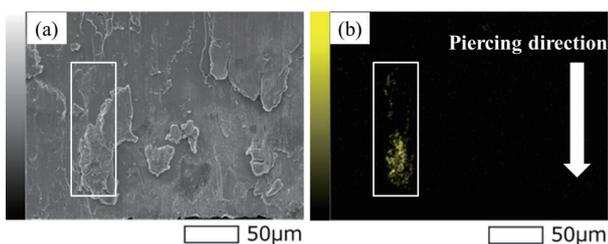


Fig. 11 Images of pierced surface of steel sheet pierced by punch in SKD11. (a) Secondary electron image. (b) Ti map with EDS.

3.4 パンチの損傷機構

ここまでの観察結果より、興津ら^{5), 6)}によって報告されているように被加工材の移着がパンチ側面において観察された(Fig. 8 -10)。さらに、移着粒子による凸部の形成(Fig. 9)、移着粒子と共に脱離するTiN(Fig. 10)、および鋼板への相互移着(Fig. 11)を可視化した。これらの観察結果から、パンチ側面の損傷は、笹田の凝着摩耗における移着成長モデル¹⁴⁾と類似したプロセスと考えられる。笹田の移着成長モデルは、表面の微小な凹凸に起因した真実

接触部での移着素子の形成、摩擦面における素子の相互移着、素子の移着粒子への成長、移着粒子の系外への脱離・排出というプロセスを経る¹⁴⁾。この移着成長モデルと3.2~3.3の観察結果を踏まえ、以下に想定されるパンチの損傷機構を示す。

- ・凝着摩耗が進行する起点は次の2箇所である。刃先の塑性変形に伴う被膜がはく離した基材露出部、および摩擦によって生じる膜のチッピングに起因した凹部である(Fig. 7、8)。
- ・基材露出部あるいは凹部に被加工材が移着する(Fig. 8)。移着部は、被加工材同士のいわゆる「ともがね」の摩耗¹⁴⁾になるため、局所的に移着が進行する。また、移着部は、被膜や基材よりも軟らかい被加工材($H_v \approx 370$)が堆積しているため、局所的な複合硬さが低下し、膜のチッピングはさらに進行する。
- ・移着粒子の成長(Fig. 9)に伴って粒子に加わる力のモーメントは大きくなり、最終的に系外に脱離する¹⁴⁾。脱離する際は被膜の破壊を伴う(Fig. 10)。

この損傷機構において、以下の2点の理由から、膜のチッピングに注目する。1つ目は、笹田の移着成長モデルにおける摩耗量は、摩擦する2面の軟らかい材料の硬さに律速される¹⁴⁾ことから、本試験における損傷面積の硬さ依存性を説明するには、笹田のモデル以外のプロセスを考慮する必要がある点である。2つ目は、膜のチッピングは応力集中する刃先から離れた箇所でも観察されることから(Fig. 7、8)、より低い応力で生じる重要な初期損傷プロセスと考えられる点である。この膜のチッピングしやすさは、被膜の物性に依存するであろうが、基材硬さ依存性があるかは不明である。次節では、膜のチッピングに焦点を絞り、スクラッチ試験を用いてチッピングのしやすさを評価した結果を示す。

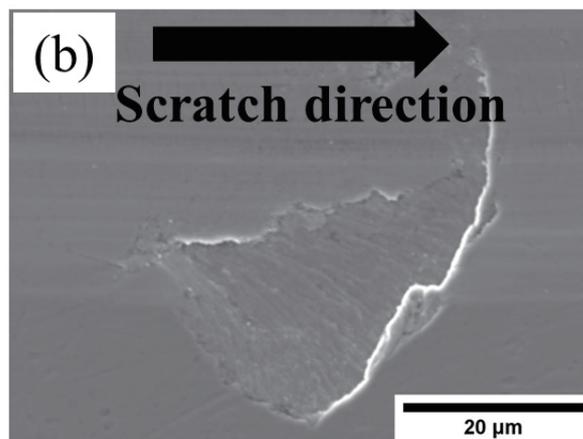
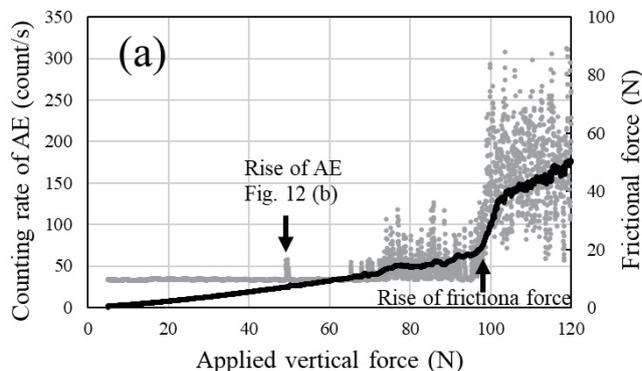


Fig. 12 (a) Counting rate of acoustic emission and frictional force as a function of applied vertical force in SKH51. (b) Secondary electron image of chipping at rise of AE indicated by black arrow in (a).

3.5 アコースティックエミッション(AE)を用いたスクラッチ試験

これまでの報告では、スクラッチ試験において、摩擦力を用いて臨界荷重を評価した^{8), 9)}。摩擦力の立ち上がりで現れる損傷は基材の露出であり、主に圧子先端の盛り上に起因した現象であると推定した^{8), 9)}。一方で、ピアス加工のパンチに現れる重要な初期損傷は膜のチッピングである。したがって、損傷形態の違いから、摩擦力はチッピングの抵抗(チッピング強度)評価に適さない。

そこで本研究では、AEおよび摩擦力の立上りでそれぞれ定義した臨界荷重を比較した。Fig. 12(a)にSKH51におけるスクラッチ試験結果を示す。摩擦力は96 N近傍で立ち上がるのに対し、AEは約50 Nである。Fig. 12(b)にAEの立上り位置におけるスクラッチ痕の縁に生じた損傷を示す。Fig. 12(b)の損傷は、Fig. 7で観察された膜のチッピングと形態およびサイズともに類似している。この観察結果を根拠として、本研究ではチッピング強度をAEにより定義した臨界荷重で評価する。なお、本研究のすべての試験片のAEの立上りで観察される損傷は、スクラッチ痕内あるいは縁に生じるチッピングであった。なお、この膜のチッピングは基材と被膜の界面におけるはく離(Adhesion)ではなく、主に被膜内部あるいは表面でのはく離(Cohesion)を想定していることに注意されたい。

Fig. 13にAEで定義した臨界荷重を臨界複合硬さでプロットした結果を示す。この実験では、TiNの厚さを約3 μm に統一しているため、臨界複合硬さの増加は主に基材硬さの増加を反映している。摩擦力で定義した場合^{8), 9)}と同様に、AEで定義した臨界荷重は臨界複合硬さの増加に伴い増加する。また、本研究の結果は、Ichimuraらの報告値¹⁵⁾と一致する。

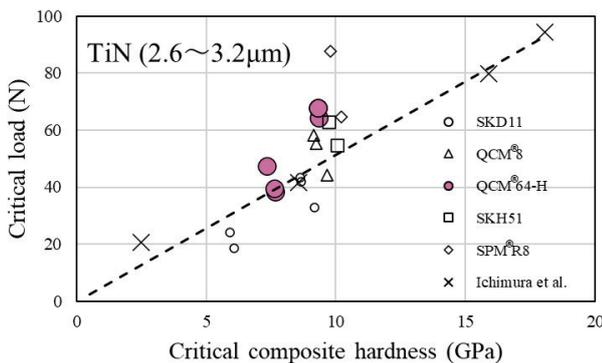


Fig. 13 Critical load defined by AE as a function of critical composite hardness.

このように摩擦力⁸⁾あるいはAEのいずれのパラメータで定義しても、臨界荷重と臨界複合硬さの比例関係は成立する。これは、盛り上り⁸⁾や膜のチッピングといった損傷に対する駆動力が「押し込み深さ」であることを示唆している。しかしながら、損傷形態や発生する荷重が大きく異なる

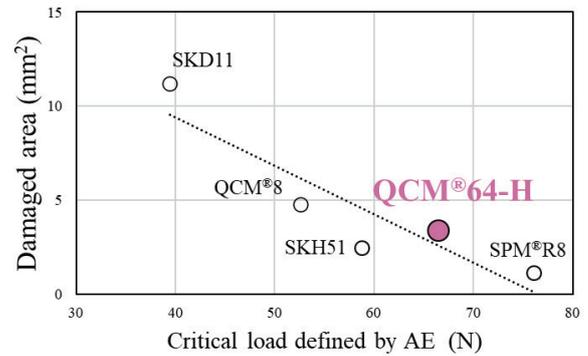


Fig. 14 Relation between damaged area and critical load defined by AE.

ことから、ピアス加工におけるパンチの損傷を解析する場合、AEで定義した臨界荷重を用いて議論するべきである。Fig. 14に損傷面積とAEで定義した臨界荷重の関係を示す。臨界荷重の増加に伴い損傷面積は減少する。このようにパンチの損傷は、チッピング強度としてAEで定義した臨界荷重(あるいは複合硬さ)の違いに帰着できる。なお、損傷に与える他の因子として、被膜の耐酸化性や摩擦係数が考えられる^{5), 6)}。これらの因子は標準のスクラッチ試験では評価できないが、後者の摩擦係数の低減は臨界荷重の増加に寄与し¹⁶⁾、損傷面積を減少させると考えられる^{5), 6)}。

4. 結言

本研究では、金型損傷に対する工具鋼の高強度化の有効性を検証するため、1.2 GPa級ハイテンを用いたピアス加工試験を実施した。異なる強度の工具鋼製パンチの損傷量の比較評価と損傷解析を行ない、以下の結論を得た。

(1) 基材硬さの増加に伴いTiNのはく離した面積(損傷面積)は減少した。この損傷面積の挙動は先行研究の傾向と一致した。この結果は、ピアス加工における被膜損傷の抑制に対する基材工具鋼の高強度化の有効性を支持する。特に、高速度鋼と比較し、省合金、安価である高強度冷間ダイス鋼QCM®64-HはSKH51と同等のパフォーマンスを発揮すると予測される。

(2) 被膜損傷に対して工具鋼の高強度化が有効である理由を考察するため、パンチの刃先から側面の観察を実施した。刃先断面の観察から、高強度化により刃先の塑性変形が抑制され、刃先形状が維持されることを確認した。また、パンチ側面の損傷面積の拡大は、TiNのチッピングを起点とした被加工材(ハイテン)の移着によって進行すると考えられる。

(3) ピアス加工で観察されるTiNのチップングは、スクラッチ試験のアカースティックエミッション(AE)によって検出されるチップングと類似していた。この観察結果を根拠として、膜のチップングに対する抵抗(チップング強度)をスクラッチ試験で評価した。その結果、AEで定義したチップング強度としての臨界荷重は、基材硬さの向上を反映した臨界複合硬さに比例した。この解析結果から、工具鋼の高強度化の効果は、移着の起点となる刃先の塑性変形と膜のチップングの抑制に帰着できると考える。

謝辞

ピアス加工試験は日鉄テクノロジー株式会社研究試験事業所尼崎地区にて実施頂きました。その際、ピアス加工の金型設計から試験条件まで中田友平様、廣瀬洋三様に多大なご協力を頂きました。ここに改めて御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 斎藤和也, までりあ, 53(2014)12, pp. 584-588. <https://doi.org/10.2320/materia.53.584>.
- 2) 前田浩和, はままつ超ハイテン研究会資料, (2023).
- 3) 安富隆, 西村隆一, 米村繁, 中田匡浩, 中田亨, 水村正昭, 日本製鉄技報, 412(2019), 28-34.
- 4) 樋口成起, 増田哲也, 清水崇行, 松野崇, 佐藤浩一, 電気製鋼, 85(2014)1, 39-46.
- 5) 興津貴隆, 三宅弘人, 新宮豊久, 山崎雄司, 塑性と加工, 64(2023)747, 57-64. <https://doi.org/10.9773/sosei.64.57>.
- 6) 興津貴隆, 素形材, 64(2023)9, 15-20.
- 7) 水田直気, 林田康宏, 山本兼司, 素形材, 64(2023)9, 31-36.
- 8) 三浦滉大, 舘幸生, Sanyo Technical Report, 30(2023)1, 38-43.
- 9) 三浦滉大, 舘幸生, 型技術者会議講演論文集, 37(2023), 186-187.
- 10) 市村博司, 池永勝, “薄膜の基礎と応用”, 日刊工業新聞社, 2005.
- 11) Sanyo Technical Report, 26(2019)1, 70-71.
- 12) 清水敬介, 春名靖志, 西川俊一郎, 馬野則之, までりあ, 48(2009)1, 35-37. <https://doi.org/10.2320/materia.48.35>.
- 13) 吉田佳典, 塑性と加工, 58(2017)681, 903-907. <https://doi.org/10.9773/sosei.58.903>.
- 14) 笹田直, “摩耗”, 養賢堂, (2005).
- 15) H. Ichimura, A. Rodrigo, Surface and Coating Technology, 126(2000)2-3, 152-158. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00541-7](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00541-7).
- 16) P. A. Steinmann, Y. Tardy, H. E. Hintermann, Thin Solid Films, 154 (1987) 1-2, 333-349. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(87\)90377-4](https://doi.org/10.1016/0040-6090(87)90377-4).