

環境に優しい潤滑技術開発のための高温摩擦・摩耗試験機の開発

熊本大学大学院 自然科学研究科産業創造工学専攻
助教 阮立群
(平成17年度一般研究開発助成 AF-2005023)

キーワード：表面積拡大，誘導加熱，摩擦係数，摩耗，ピン形工具，波状ダイス

1. 緒言

現在、複雑で高精度及び高強度を要求される冷間鍛造品が増えている。冷間鍛造加工では、これらの部品をネットシェイプ加工することが求められている。潤滑技術は高精度な鍛造品の創成において、加工成否の鍵を握る非常に重要な技術であり、実際の鍛造条件に即した効率的な鍛造トライボロジ特性の評価が急務である。

鍛造加工では、実際の鍛造生産工程に酷似でき、加工発熱を考慮した材料—工具の接触面において実際的な温度環境を実現し、高温までの温度コントロールができ、また、迅速、容易かつ正確に鍛造トライボロジ性能を高い信頼性において定量評価可能な高温の摩擦・摩耗試験機の開発が必要になる。

本研究では摩擦界面の環境を支配する重要な影響因子を考慮し冷間鍛造条件を幅広く具現できる高温・高速の摩擦・摩耗試験機を開発した。

2. 高温の摩擦・摩耗試験機

2.1 試験機の構成

Fig. 1 に示すように試験機は主駆動水平油圧シリンダー、ダイスに負荷をかけ断面減少率を与える横油圧シリンダー、三次元ロードセルを組み込むダイセット、行程変位計、材料の揺れを防止するための案内ローラーおよびチャック等で構成されている。また、高周波電源による電磁誘導加熱とヒーター加熱システム、冷却システム、温度計測システム、温度自動コントロール部分、信号拡大・信号変換器とデータ記録システムを含む。

2.2 試験機の操作

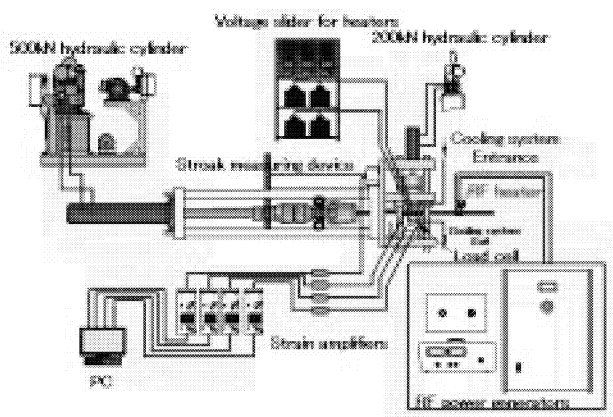


Fig. 1 高温・高速の摩擦・摩耗試験機

試験 (Fig. 2) では、材料を主駆動シリンダーで引抜く。試験材料は試験機のチャックとスパーサー部にある案内ローラーで支えられる。材料はダイスで横油圧シリンダーを用いて押し付けられる。鍛造過程で被る負荷と同程度の圧力がダイスに与えられる。スパーサーでダイス間隙を調節し断面減少率を設定する。

工具負荷を計測するロードセルは 3 方向の数本のはりで構成されており、これらのはりで工具を支えられている。はりに貼られた歪みゲージから摩擦係数を算出する。変位変換によってパソコンの画面で動的な摩擦係数グラフが得られる。

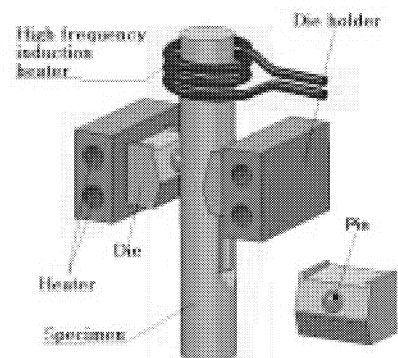


Fig. 2 摩擦・摩耗試験機の引抜き

3. 三次元のロードセル

3.1 ロードセルの形状

Fig. 3 に示すような三次元のロードセルを開発した。このロードセルを利用することによって平面ひずみ変形だけではなく 3 方向の荷重を計測することができる。

ダイス負荷を計測するロードセル (Fig. 6) は 5 本のはりで構成されており、これらのはりでダイスが支えられている。ダイスに働く X、Y と Z 方向のそれぞれ分力である P_x 、 P_y と P_z ははりに貼られた歪みゲージのブリッジの出力電圧 mV により求められる。

3.2 負荷計測と摩擦係数算出

工具材料接触界面の相当摩擦係数は、計測した荷重によって算出する。工具形状の差異により計算式が異なる。平面ひずみの場合、

$\mu = (1/C) \tan \{ \text{Arctan}(P_v/P_c) - \theta \}$ で計算できる。

ここで、 P_v は引抜き力の 1/2、 P_c はダイス押広げ力、 θ はダイス半角である。C は輪郭長さ補正の係数である。

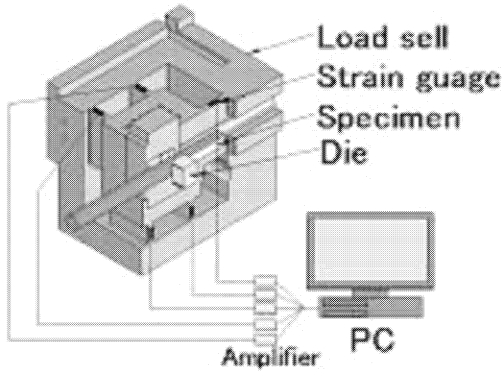


Fig. 3 三次元のロードセル

4. 高温摩擦環境と加熱

4.1 変形発熱と摩擦熱

実際には冷間鍛造の大量連続生産において工具の温度は一般に 200℃程度になることがしばしば見られ、最高 400℃になる報告もある。潤滑膜にとって良好な潤滑状態を維持するためには、加工発熱による温度上昇と多段鍛造における前工程での材料温度上昇も無視できない。

工具と素材の接触界面（摩擦界面）において摩擦仕事の 95%が熱に変換される。摩擦熱は、材料と工具へ温度伝導率に応じて伝導する。その伝達距離 δ は、有限要素法解析より $\delta = 1.5 (t_c \lambda / \rho c)^{0.5}$ と近似する。摩擦界面において冷間鍛造加工発熱（摩擦すべり仕事）は材料工具相対滑り速度 v_f 、せん断摩擦力 τ_f および接触時間 t の積で決められる。摩擦界面上昇温度は被加工材料と工具の密度 ρ 、比熱 c および熱伝導率 λ などの物性値と関係しているが、すべり距離 l_s を用いて、摩擦界面上昇温度 ΔT_f は次式で計算できる。

$$\Delta T_f = 1.26 \tau (l_s v_{sm})^{1/2} / \{ (\rho_T c_T \lambda_T)^{1/2} + (\rho_M c_M \lambda_M)^{1/2} \}$$

従って、さまざま温度上昇を考慮した摩擦試験温度の設定も必要になる。

4.2 高周波誘導加熱システムの導入

Fig. 4 に示すように本試験機では非接触で自身発熱の高周波誘導加熱システムを導入していた。

この高周波誘導加熱システムは省エネルギーで被加熱物の単位面積に供給される単位時間当りのエネルギーが大きいので、高速加熱・高温加熱が可能である。加熱コイルに高周波電流を流し、コイル周辺に強い磁場 (Fig. 5) を形成する。これにより交番磁束が金属を貫通し、非常に密度の高い渦電流が誘導される。そのジュール熱で金属自身が加熱される。

また、誘導加熱は効率がよく、温度制御が容易になり、コイルの配置と周波数を選定することにより迅速に加熱可能である。コイルを設計するために所有している 1kW 高周波電源に合わせて温度試験を行ったが結果は Fig. 6 に示している。加熱時間と上昇温度はコイルのターン数と内径に関係している。各金属の電気抵抗が異なっているが加熱速度と上昇温度に影響する。本試験機ではコイルの交

換で実験材料に対応する。

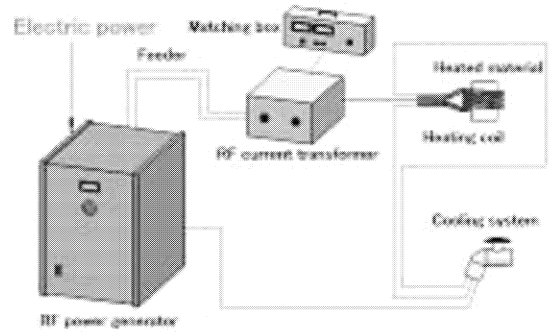


Fig. 4 高周波誘導加熱システム

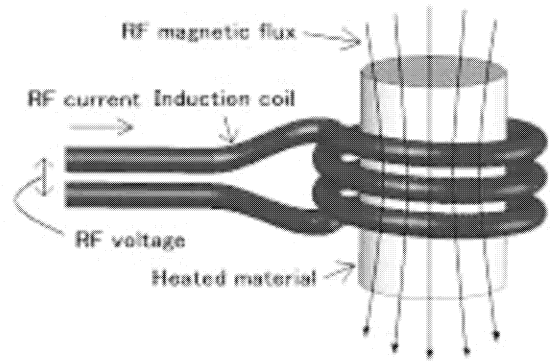


Fig. 5 高周波誘導加熱の原理

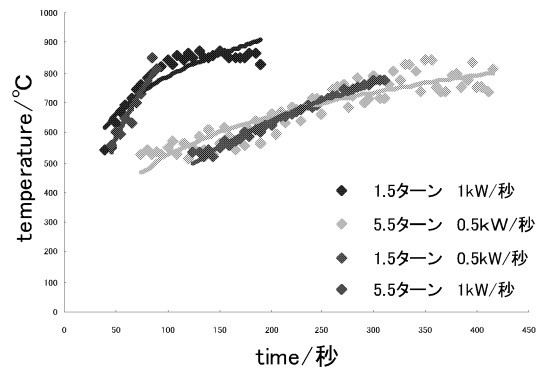


Fig. 6 誘導加熱コイルのターン数と温度

4.3 電磁誘導加熱法の特徴

電磁誘導加熱法の特徴として外部から被加熱物へ熱を加える必要が無いので、周波数の選定によって局所的に加熱できる。間接加熱による安全性向上が期待され、酸化せず寿命が長いので、この試験機の試験に有効である。特に、この省スペースの加熱方式は本試験機にとって最適と言える。

特に、高周波誘導加熱するのは材料の表面温度が高くなる現象が起こる。この渦電流は被加熱物の表面に近いほど強くなる。鍛造トライボロジ評価に対して最適と考えられる。

また、高温で燃えやすく、その粉塵が爆発しやすいマグネシウム合金の温・熱間鍛造成形に対して安全性が高く、成形温度のコントロールに役立つ。

4.4 温度の設定と制御

この試験機はロードセル内のダイス固定部の周囲に、ひずみゲージ保護のため冷却用管路を有している。また、この加熱と冷却システムによって、室温～600℃の範囲で温度を任意にコントロールできる。

4.5 温度測定器

ダイス出口近傍の温度計測においては放射式の温度計がよく使われているが、金属材料の表面の光沢がそれぞれ異なるために反射率もかなりばらつきがある。正確な温度計測が難しいため、動的な高温材料と直接接触する温度計測器を開発した。

5. 引き抜き工具

5.1 波状ダイス

工具形状には平面タイプと引抜き方向に対して平行な波形の山を持つタイプがある。断面減少を伴う領域で変形を局所化する目的の波形ダイスは焼付きや摩耗を促進する。

引抜き工具界面に色々な変形パターンを具現するために、平面ダイスより輪郭の長さを 18～48%程度増加させた波形ダイスを用意した。Fig. 7 に示す W17 ダイスの表面積拡大率は 700%に達している、ダイスの波の高さ、先端丸み（半径）及び輪郭形状を変更することで断面減少率を変更でき、鍛造加工で表れる様々な厳しい変形状態を実現することができる。これらのダイスは有限要素法解析によって計算された表面積拡大に対応している。十分な表面積拡大を実現できるため、工具プロフィール形状を容易に変更でき、表面積拡大率は 1200%までの工具を用意する予定である。

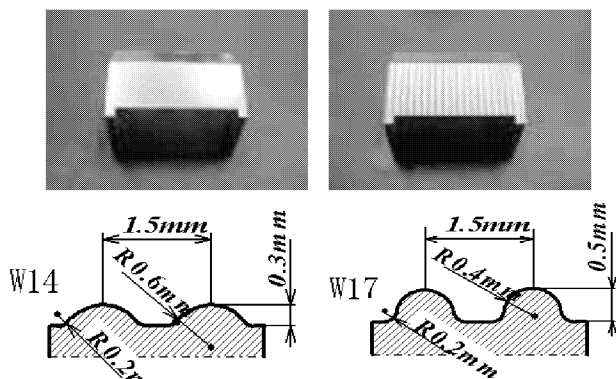


Fig. 7 波状ダイス

実際の表面積拡大率を求めるには軸方向の伸びによって引き起こされる表面積拡大も加える必要がある。この軸方向伸びによる表面積拡大を含む表面積拡大率は式 $SE(\%) = SE_B(\%) + Re(\%)SE_B(\%) + Re(\%)$ で計算できる。式中の Re は材料を引抜き加工するときの断面減少率である。

5.2 摩耗を促進するピンの複合ダイス

最近、高性能鍛造用潤滑剤の使用と DLC などの硬質皮膜

を施した金型の使用が増加している。そのコーティング金型の耐焼付き性、耐摩耗性、被膜のはく離強度を評価が期

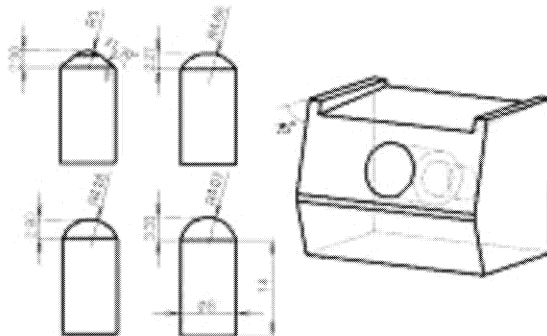


Fig. 8 複合ダイスピンの寸法

待されている。

工具と材料の接触摩擦面は、通常、見かけ接触面積より 1/1000 以下となる非常に小さい真実接触部で接しており、その部分は摩擦に伴い極端に高面圧・高温に曝される。そのため、通常では生じないようなトライボ・ケミカル反応を誘引することがあり、その化学反応により表面が減量する摩耗も存在する。また、工具に対してその材質、形状、面圧、速度などの力学条件の影響を敏感に受けられ、容易に工具の摩耗量が増減することを予測できる。

本研究では鍛造における工具摩耗を迅速に計測するため、過酷な変形状態を想定して工具の表面を快速に摩耗させるよう、平面ダイスの上にさまざまな表面積拡大率を表せるピンを差込んで引き抜く法を提案している。

Fig. 8 に示すような丸み寸法の異なる 4 種類のピンを用意している。その丸みの荒さ R_t は 0.2 まで研磨した。ダイス面の荒さ R_t は 0.6 位である。評価する硬質皮膜をピンにコーティングする。ピンとダイスを組み合わせて実験を行う。実験前後のピンの重さで耐焼付きと耐摩耗を評価する。

5.3 ピン形工具における表面積拡大の解析

鍛造加工における変形の厳しさを定量評価し、評価対象となっている鍛造トライボ条件をシミュレートするために必要となる工具形状の選択には、加工時の材料表面積拡大の検討が不可欠である。

工具形状、摩擦条件、断面減少率などの成形条件によって、工具角部や材料角部などで大きな表面積拡大が生ず

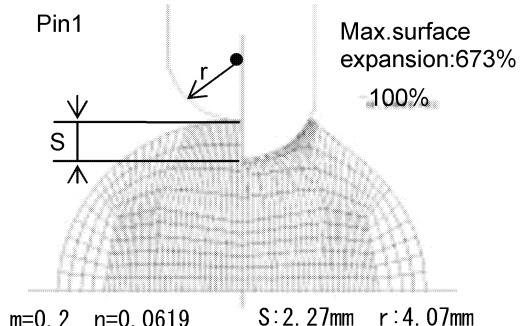


Fig. 9 Pin1における表面積拡大率

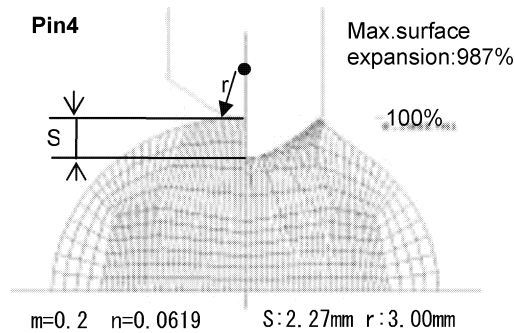


Fig. 10 Pin4における表面積拡大率

る。表面積拡大が数十～数百%まで大きく変化していることが知られる。

新たに提案する摩擦摩耗試験法は、ピン形工具で被加工材料を挟んで引抜くことで、鍛造加工で生ずる変形をシミュレートできる。解析を容易にして表面積拡大の特徴を明らかにするために、引抜き軸方向へのすべりや伸び変形を断面減少率で考えているが、ピン形工具を丸棒素材に軸対称ひずみの下で押し込む変形を解析してみた。

工具のピンの丸み半径 r と押し込み量 S が頂部要素の表面積拡大率 SE_B (%) に与える影響を示したものである。ここで $\sigma = 752 \epsilon^{0.06}$ である S25C 材料を使用した。

本研究の代表的モデル工具であるピン1（丸み半径 $r=4.07\text{mm}$ ）とピン4（丸み半径 $r=3.0\text{mm}$ ）について、二次元剛塑性有限要素法解析によって表面積拡大を求めた。押し込み量 S と丸み半径 r の変化によって表面積拡大は異なる。同等な押し込み量（ 2.27mm ）における表面積拡大率の計算例（摩擦せん断係数 $m=0.2$ ，材料のひずみ硬化指数 $n=0.0619$ ）を Fig. 9 と Fig. 10 に示している。

この場合、局所的な表面積拡大率の最大値は丸み半径 r の小さいピン4で現れる。ピン1とピン4を材料に押し込んだ時の軸方向伸びを無視した表面積拡大率の最大値はそれぞれ 673% と 987% となる。表面積拡大は工具丸み半径の減少につれて増加する。

Fig. 11 に、二次元剛塑性有限要素法解析によって軸対称ひずみ変形における表面積拡大率と押し込み量の関係を示す。表面積拡大は押し込み量の増加につれて増加する。

新たに提案する性能試験法では、ピン形工具の形状および断面減少率を選ぶことで表面積拡大を自由に設定することができる。

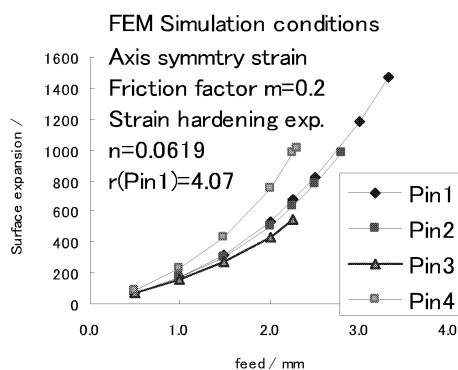


Fig. 11 Pin1, Pin2, Pin3 と Pin4 における表面積拡大率と押し込み量の関係

6. 実験結果

開発した局所引き抜き試験機型摩擦試験機を利用して引き抜き速度やダイス温度等の条件を変えてマグネシウム合金 AZ31 と AZ61 を材料とした摩擦界面の摩擦係数を計測した。摩擦試験では数種

類の潤滑膜について鍛造加工における様々な厳しい変形状態を実現することが出来る波型ダイスを用いた。なお、変形後の材料組織変化を観察し、工具の焼き付と摩耗状況を調べた。

6.1 マグネシウム合金の温熱間変形の摩擦係数の評価例

マグネシウム合金 AZ31 材料の相対摩擦係数を Fig. 12 に示している。ダイスの設定温度は 400°C であるが、Fig. 13 は Fig. 12 に対応しているダイス出口近傍の実測した温度を示している。引き抜き速度が低いため温度の変化も大きくない。

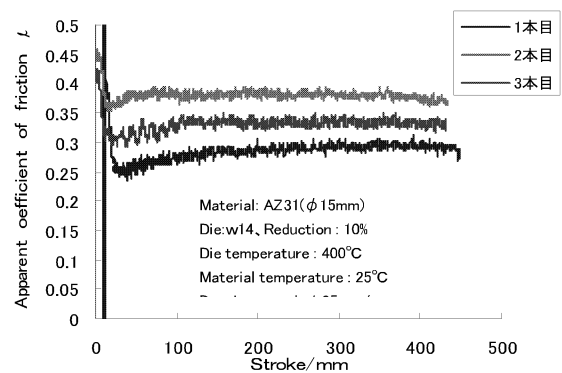


Fig. 12 マグネシウム合金AZ31材料の相対摩擦係数

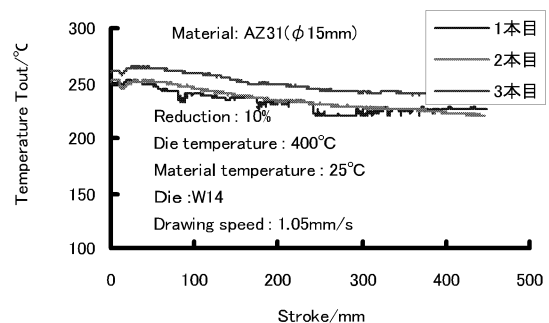


Fig. 13 ダイス出口近傍の実測した温度

6.2 ダイスへの焼き付き例

ダイスへの焼き付き量は実験前後のダイスの重さを測定することによって評価した。Fig. 14 は表面積拡大率が異なるダイスにおいて試験後のダイス焼き付き量の比較である。マグネシウム合金においてはダイスの焼き付き量は他の材料と異なり、温度が高くなるほど焼き付き量が多くなっており、温度の影響が大きく表れている。温度による摩擦係数の変化に逆傾向が表れている。

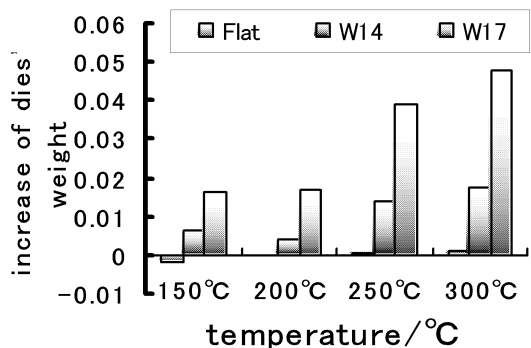


Fig. 14 表面積拡大の異なるダイス形状による焼付きと摩耗の比較

6.3 ピンダイスの実験例

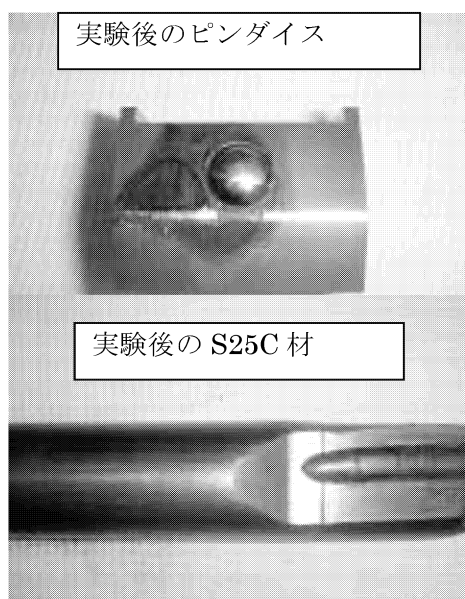


Fig. 15 実験後のピンダイスと材料

Fig. 15 に実験後のピンダイスと材料の様子を示している写真である。SKD11 材料のダイスとピン 1 を組み合わせて S25C 棒材を引き抜いた。変形後の材料の溝部を観察すると最も表面積拡大率の大きいピンによる変形は平面部よりかなり厳しい。この場合、材料溝部の表面積拡大率はピンの表面拡大率に断面減少率を加えて考えている。

7. まとめ

本研究では、材料が鍛造される時の表面積拡大を二次元剛塑性有限要素法によって解析した。摩耗を促進するピンの複合ダイスを用いる試験法を提案した。摩擦面温度環境を実現できる高周波誘導加熱システムの導入、温度計測器と三次元ロードセルの創製したことに基づいて、冷間鍛造条件を具現する厳しい変形を伴う実際の鍛造生産に酷似できる高温摩擦・摩耗試験機を開発した。

本試験機を用いることにより、複雑形状品の精密鍛造で摩擦界面の特性に対応させ、界面温度及び表面積拡大率を任意に変更でき、冷間鍛造用高性能潤滑剤の正確な評価をすることができる。また、環境に優しい潤滑法、潤滑剤の開発および金型表面処理の模索が容易になる。

今後、高性能鍛造用潤滑剤と DLC など金型表面の硬質皮膜性能を迅速かつ正確に評価することが期待できる。

参考文献

LiqunRuan, HiroyukiSaiki, Yasuhiro, YasuhiroImamura, 「Evaluation of coating-based lubricants for cold forging using The localized rod-drawing test」, WEAR 259 (2005) 1117-1122

謝 辞

本研究は天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成を受けたことを記し、ここに同財団に深甚なる謝意を表します。