

氏名（本籍）	小見山 忍（東京都）
学位の種類	博士（工学）
学位授与番号	甲第 386 号
学位授与日付	平成 22 年 3 月 25 日
専攻	生産開発システム工学専攻
学位論文題目	鋼線の冷間鍛造を対象とした摩擦試験法の開発 (Development of Tribometer for Cold Forging of Steel Wire)
学位論文審査委員	(主査) 山 縣 裕 (副査) 戸 梶 恵 郎 平 野 元 久 王 志 剛

論文内容の要旨

冷間鍛造は、複雑形状部品を高精度かつ低コストで量産することができるため、自動車関連産業を中心に各種機能部品の製造に多用されている。冷間鍛造を成り立たせているキーテクノロジーのひとつに潤滑技術がある。鋼の冷間鍛造では、金型と被加工材との摩擦界面における接触圧力は数千 MPa、摩擦面温度は 500℃、表面積拡大比は局所的に数十倍にも達する。潤滑技術は、このような過酷な摩擦条件を克服して、金型と被加工材間の焼付を抑制し、摩擦力を低く抑える必要がある。冷間鍛造用潤滑被膜として古くからボンデ被膜が用いられてきた。ボンデ被膜は鉄鋼表面との反応析出により形成される化成被膜の一種で、石けん系潤滑剤と併用される。冷間鍛造におけるボンデ被膜は、素材表面との強固な密着と、結晶のへき開による補修被覆により被加工材下地表面を保護し、優れた耐焼付能を発現する。しかし、ボンデ被膜の処理プロセスにおいて、反応副生成物や、水洗工程からの重金属含有廃水および廃石けんなどの産業廃棄物が多量発生し、環境保護の観点から問題とされている。近年、この問題を解決すべく、環境保全型の新しい潤滑被膜が開発されている。新型被膜は、被膜処理液を被加工材表面に塗布し、次いで乾燥するだけの簡単な工程にて潤滑被膜が形成できるため、一液潤滑被膜と呼ばれる。一液潤滑被膜の処理プロセスからは廃水や産業廃棄物などは発生せず、要するスペースやエネルギーも小さいことから小規模な工場でも容易に導入でき、ものづくり現場のレイアウトを大幅に改善できる可能性をもつ。

工業的に様々なメリットが期待される一液潤滑被膜であるが、潤滑被膜としての実力は十分に認知されているわけではない。潤滑被膜の潤滑特性は、通常、実際の鍛造を模擬した摩擦試験法によって調べられる。これまでに多くの鍛造形摩擦試験法が提案され、一液潤滑被膜の開発にも活用されてきた。冷間鍛造用潤滑被膜のスタンダードは依然としてボンデ被膜であり、金型や加工工程のレイアウトは長年かけてボンデ被膜を前提に最適化されてきている。一液潤滑被膜が受け入れられるためにはボンデ被膜に酷似した潤滑特性を付与する必要がある。具体的には、摩擦特性と極限状態での耐焼付能については、ボンデ被膜とほぼ同一の性能が必要とされる。

鍛造をシミュレートした摩擦試験法による評価結果を基に設計され、市場投入された各種一液潤滑被膜に対する冷間鍛造現場の評価では、以下の 2 点が問題となっている。

- ① 同一の金型と同一鍛造工程を用いて、鍛造品形状はボンデ被膜使用時と異なり、形状不良と見なされている。
- ② 複雑形状部品の多段鍛造において焼付に至りやすい。

本研究では、これらの問題点を解決するために必要な摩擦試験法を開発し、一液潤滑被膜とボンデ被膜の潤滑性の差異を明らかにすることを目的としている。得られた成果をまとめると以下の通りである。

1. 高感度に潤滑被膜の摩擦特性を評価できる試験法としてバルジ変形を伴う押し出し形摩擦試験法を検討した。摩擦特性を加工品の形状差に感度良く表現でき、それを評価尺度とした有限要素解析にて加工界面での摩擦せん断係数を導出できる金型条件を見出した。これを用いた実験により、ボンデ被膜と一液潤滑被膜の摩擦特性差を目に見えて明らかにした。
2. 鋼線からの多段鍛造で潤滑被膜が受け得る繰り返しのダメージと大変形量加工での焼付挙動を比較するために、複合的に異なる加工形態を組み合わせた据込み－押し出し形摩擦試験法を設計した。試料表面の移動量と加工荷重の実測により、表面積拡大比が大きく異なる加工表面での摩擦せん断係数を個別に導出できるように工夫した。また、加工過程の表面分析により本加工が潤滑被膜に与える影響を明らかにした。

3. 潤滑被膜の耐焼付性能に及ぼす金型表面性状の影響調査を行った。金型の表面性状を解像度良く表現できるパラメータとして突出山部高さ R_{pk} が有効であることを見出し、金型表面の R_{pk} による潤滑被膜の焼付挙動の差異を調査した。焼付臨界点を越える焼付の遷移領域では潤滑被膜の焼付挙動が被膜により大きく異なることから潤滑被膜の焼付挙動の評価尺度として有用であることを明らかにした。

4. 鍛造加工界面での薄膜摺動における一液潤滑被膜の焼付挙動に対する、被加工材の表面性状や固体潤滑薄膜付与の影響について、焼付の R_{pk} 遷移領域に調整した金型を用いた据込み一押し形試験法で調査を行った。下地処理を工夫することで、極限状態に近い加工界面でも潤滑状態を保てるようになり、一液潤滑被膜の耐焼付能をボンデ被膜以上に引き上げられることを見出した。

本研究の一連の成果により、潤滑被膜の摩擦特性と耐焼付能の実状に合う評価ができるようになった。今後、ボンデ被膜と同等以上に安定な潤滑状態を供給できる、新世代の一液潤滑被膜の開発と発展に大きく貢献できるものと期待できる。

論文審査結果の要旨

冷間鍛造は、複雑形状部品を高精度かつ低コストで量産することができるため、自動車関連産業を中心に各種機能部品の製造に多用されている。冷間鍛造を成り立たせているキーテクノロジーのひとつに潤滑技術がある。鋼の冷間鍛造では、金型と被加工材との摩擦界面における接触圧力は数千 MPa、摩擦面温度は 500℃、表面積拡大比は局所的に数十倍にも達する。潤滑技術は、このような過酷な摩擦条件を克服して、金型と被加工材間の焼付を抑制し、摩擦力を低く抑える必要がある。鋼の冷間鍛造の潤滑には通常ボンデ被膜が用いられる。ボンデ被膜は鉄鋼表面との反応析出により形成される化成被膜の一種で、石けん系潤滑剤と併用される。冷間鍛造においてボンデ被膜は、被加工材表面との強固な密着と、結晶のへき開による補修被覆により被加工材下地表面を保護し、優れた耐焼付能を有する。しかし、ボンデ被膜の処理プロセスにおいて、反応副生成物や水洗工程からの重金属含有廃水および廃石けんなどの産業廃棄物が多量発生し、環境保護の観点から問題とされている。近年、この問題を解決すべく、環境保全型の新しい潤滑被膜が開発されている。新型被膜は、被膜処理液を被加工材表面に塗布し、次いで乾燥するだけの簡単な工程で潤滑被膜が形成できるため、一液潤滑被膜と呼ばれる。一液潤滑被膜の処理プロセスからは廃水や産業廃棄物などは発生せず、必要なスペースやエネルギーも小さいことから小規模な工場でも容易に導入でき、ものづくり現場を大幅に改善できる可能性をもつ。

工業的に様々なメリットが期待されているが、一液潤滑被膜の実力は十分に把握されていない。冷間鍛造用潤滑被膜のスタンダードは依然としてボンデ被膜であり、金型や鍛造工程はボンデ被膜を前提に長年かけて最適化されてきている。一液潤滑被膜が受け入れられるためにはボンデ被膜に酷似した潤滑特性を付与する必要がある。具体的には、摩擦特性と極限状態での耐焼付能については、ボンデ被膜とほぼ同一の性能が必要とされる。

冷間鍛造をシミュレートした摩擦試験法による評価結果を基に設計され、市場投入された各種一液潤滑被膜に対する冷間鍛造現場の評価では、以下の2点が問題となっている。

(1) 同一の金型と同一鍛造工程を用いて、鍛造品形状はボンデ被膜使用時と異なり、形状不良と見なされている。

(2) 複雑形状部品の多段鍛造において焼付が発生しやすい。

本研究はこれらの問題点を解決するために必要な摩擦試験法を開発し、一液潤滑被膜とボンデ被膜の潤滑性の差異を明らかにすることを目的とした。

鍛造品の形状不良に繋がる潤滑被膜の摩擦特性差を高感度に抽出できる摩擦試験法として、バルジ変形を伴う前方押し形摩擦試験法を開発した。摩擦せん断係数 m を求める評価基準としての成形荷重と成形品形状との有用性を整理し、高感度に摩擦が捉えられる金型の形状を見出した。さらに鍛造実験を行い、各種潤滑被膜間の摩擦特性の差異を検討した。その結果、潤滑被膜間の僅かな差異が目に見える鍛造品の形状差として、また摩擦せん断係数の絶対値の差として評価できることがわかった。一液潤滑被膜の摩擦せん断係数 m は、ボンデ被膜と比較して、室温では著しく低く、200℃では若干高くなることを明らかにした。

鋼線の多段鍛造における焼付挙動を検討できる摩擦試験法として、据込み一押し形摩擦試験法を開発

した。端面拘束条件での据込み工程による自由表面への張出しで鋼線側面部の潤滑被膜にダメージを与え、次いで連続的に行われる後方押し出し工程では、ダメージを受けた潤滑被膜に大きな表面積拡大と高面圧下での滑りを与えることで焼付を惹き起こす試験法とした。本試験法においては、端面拘束の据込み工程により摩擦評価に必要な被加工材変形抵抗曲線を導き出し、押し出し工程ではあらかじめ試験片に罫書いた中心線の加工後位置と成形荷重とを用いた校正線図により、表面積拡大比が大きく異なる二つの摩擦面（カップの内・外壁面）の摩擦せん断係数を同時に得ることができる。評価試験の結果、表面積拡大比と滑り長さの増大により焼付が生じやすくなることがわかった。この傾向はボンデ被膜に比べて一液潤滑被膜の方が顕著であることが確認された。これは、実際の鍛造現場の評価に一致するもので、一液潤滑被膜の性能が高く評価される従来の摩擦試験法では再現できていない現象である。据込み－押し出し形摩擦試験法は、一液潤滑被膜の焼付挙動を表現できていると考えられ、ボンデ被膜に匹敵する耐焼付能を有する被膜開発には有効な評価法と言える。

鍛造現場での焼付は鍛造の繰り返しに伴う金型表面の劣化によって加速される。金型表面性状の管理基準を明らかにするために、開発した据込み－押し出し形摩擦試験法を用いて潤滑被膜の焼付挙動に及ぼす金型表面性状の影響を検討した。まず、金型表面性状を管理する粗さパラメータとして、一般に用いられる最大高さ R_z よりも突出山部高さ R_{pk} が摩擦評価に対して有効であることを示した。その上で、金型の R_{pk} を変化させて鍛造実験を行い、ボンデ被膜と各種一液潤滑被膜に共通する焼付の R_{pk} 遷移領域を見出し、この領域でのボンデ被膜の焼付挙動は R_{pk} の上昇に対して緩慢であるが、一液潤滑被膜では急激であることがわかった。

一液潤滑被膜の耐焼付能を引き上げる方法を見出すために被膜下地処理の効果を検討した。被膜下地処理としては、酸洗やブラスト処理を利用した表面粗化、ブラスト処理を利用して形成した固体潤滑薄膜などの工業的に簡便に行える処理法を選んだ。通常ブラスト処理での比較的大きな粗さに微細な粗さを重畳した二段階のブラスト処理による複合表面、およびブラスト処理により形成したリン酸亜鉛薄膜処理の被膜下地処理によって、一液潤滑被膜にボンデ被膜を超える耐焼付能を付与できることが確認された。

本研究で開発した摩擦試験法は、潤滑被膜の摩擦特性と耐焼付能について鍛造現場の評価と一致する評価結果を与え、今後、ボンデ被膜以上に安定な潤滑性能を有する次世代一液潤滑被膜の開発と発展に大きく貢献できるものと期待される。これらの成果は学術的、工学的に優れており、学位論文に値するものであると判定された。

最終試験結果の要旨

学位論文の内容および関連する専門分野に関する口頭試問を行った結果、学位申請者は学位授与に相応した高い学力を有することが認められたので、最終試験を合格と判定した。

