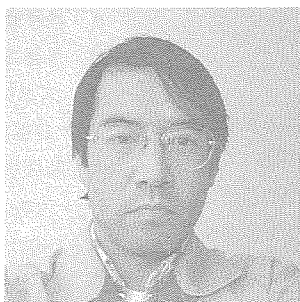
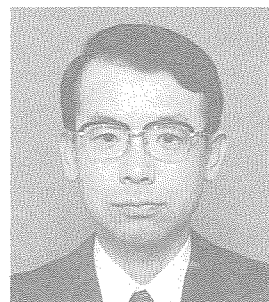


工業用純チタンの熱間摩擦特性

Characteristics of Hot Friction in Commercially Pure Titanium

高橋 一 浩^{*(1)}
Kazuhiro TAKAHASHI井 上 剛^{*(2)}
Tsuyoshi INOUE内 田 秀^{*(3)}
Shigeru UCHIDA

抄 録

チタンは熱間圧延時にロールなどとの焼き付きが要因となり表面欠陥が生じる場合がある。工業用純チタンとハイス鋼のディスクを使用した転動式熱間摩擦試験により、ロールと接触しているチタン表面の熱間摩擦挙動に及ぼす温度や潤滑油の影響を検討した。その結果、潤滑油を使用しない場合、温度が低いほど酸化硬化に起因する微小なクラックは軽減するもののスケールが薄く金属同士の接触が容易になるため摩擦係数が増加し、650℃では850℃の2倍にもなり箔状の被さりが生じた。また潤滑油により650℃で摩擦係数は半減し平滑な表面となった。これは油そのものの潤滑効果に加え酸化促進によるスケール潤滑の寄与が考えられる。

Abstract

It is said that in hot-rolling titanium surface defects are apt to occur by seizures between rolls and products. Authors have examined the effects of temperatures and lubricants on the tribological behavior of titanium strip surfaces contact with rolls using a hot rolling and sliding wear tester with commercially pure titanium disks and a high speed steel ones. Consequently in cases of water spray without lubricant oil, fine cracks due to hard layers by oxidation decrease with lower temperature, but the coefficient of friction increases because oxide scales become thin and then metals are easily in contact. The coefficient of friction at 650°C doubles in comparison with that of 850°C and foil-like overlaps occur. Addition of lubricant oil reduces the coefficient of friction at 650°C by half and smooth surfaces are obtained. The smooth surface is thought to be due to the lubrication effects of oxide-scales as well as the lubricant.

1. 緒 言

チタンの熱間圧延で発生する表面欠陥(疵)として、肌荒れ疵、飛び込み疵、すり疵、共ずれ疵などが知られており^{1,2)}、チタンは鋼に比べ活性な金属であるため熱間圧延時にロールやガイドなどと焼き付きやすく、そのことが表面欠陥の一因となる場合がある^{1,2)}。本報では熱間圧延中の焼き付き現象のうち特にロールと接触しているチタン表面の摩擦挙動に着目するため、工業用チタンを用いた転動式熱間摩擦試験により表面温度や潤滑油の影響について検討した。

2. 実験方法

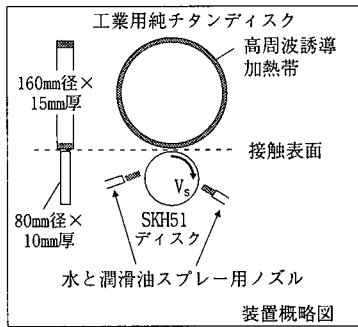
図1に転動式熱間摩擦試験の装置図と試験条件を、写真1にその

外観を示す。まず、工業用純チタンJIS 1種とハイス鋼SKH51のディスクをすべり率11%の周速差を付けて回転させ、純チタンディスクの接触面近傍温度が650、750及び850℃になるように高周波にて誘導加熱した。ハイス鋼ディスクの表面温度は400～550℃に冷却水又は潤滑油の流量にて調節した。そして温度が安定した後、両ディスクを一定荷重70kgfで接触させて、その回転トルクより接触面の摩擦係数を求めた。ここで各ディスクの温度は放射温度計にて測定した(写真1)。また650℃においてはエマルジョンタイプの潤滑油を使用した試験も実施した。上記の試験条件は、熱間圧延の仕上げスタンドにおけるロール出側先進域を想定し、摩擦特性の差を明確にするためすべり率や荷重を厳しい摩擦環境となるように設

*⁽¹⁾ 光技術研究部 主任研究員
山口県光市島田3434 ☎743-8510 ☎(0833)71-5108

*⁽²⁾ 鉄鋼研究所 圧延研究部 主任研究員

*⁽³⁾ 鉄鋼研究所 圧延研究部 主幹研究員 工博



試験条件

ディスクの種類	試験材の条件	表面Ra (μm)	回転速度 (rpm)	試験温度 (°C)
工業用純チタン	純チタンJIS 1種, 真空アーク溶解→熱間加工→切削加工	約0.8	389	650, 750, 850
SKH51	SKH51, JIS G 4403相当の焼き入れ焼き戻し	約0.5	700	約400~550
すべり率(純チタンのディスクが先進)		11.2%		
接触荷重(一定)		約70kgf		

図1 転動式熱間摩擦試験の装置概略と試験条件

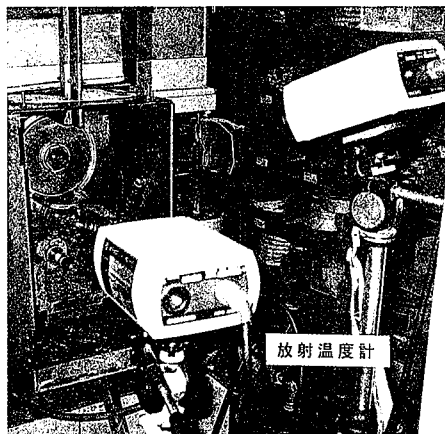
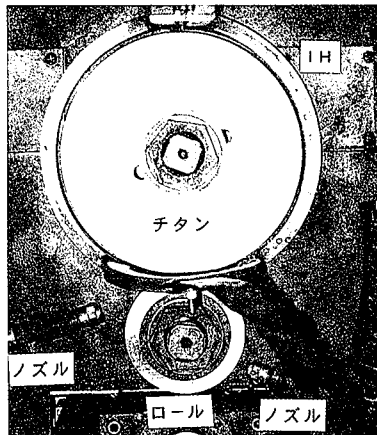


写真1 転動式熱間摩擦試験機の外観

定したものである。

試験後の工業用純チタンJIS 1種製ディスクについては、その接触面をマクロに観察した後、ミクロな形態を走査型電子顕微鏡 (SEM) にて比較するとともに、エネルギー分散型分光分析 (EDS) 及びグロー放電発光分光分析 (GDS) にて表面及び深さ方向の元素濃度を調査し、酸素や相手材である鋼との反応程度を評価した。また接触部のメタルフローを断面のミクロ組織にて観察した。

ここで工業用純チタンJIS 1種製ディスク (以下チタン製ディスクと略す) は真空アーク溶解材を熱間加工した素材を、ハイス鋼SKH51製ディスク (以下ハイス鋼製ディスクと略す) はJIS G 4403相当の焼き入れ焼き戻しを施した素材を用いており、各々切削加工にて所定の形状に仕上げた。また接触面の表面粗度Raは各々約0.8 μm, 約0.5 μmであった (図1参照)。

3. 実験結果

図2に各温度における摩擦係数を、写真2に試験後のチタン製ディスク (写真2の上段) 及びハイス鋼製ディスク (写真2の下段) の接触面を各々示す。また写真3には650°Cで潤滑油を使用しなかった場合のチタン製ディスク接触面のSEM写真を示す。

図2より摩擦係数は、潤滑油を使用していない場合には温度が低いほど高く650°Cでは0.40と850°Cの約2倍にもなる。650°Cにおいて潤滑油を使用することにより摩擦係数は半減し約0.20になる (図2の●印)。

チタン製ディスクの接触面の形態は写真2のような特徴がある。潤滑油を使用していない場合、高温側 (写真2の(a)850°Cと(b)750°C) ではマクロな割れや被さりはなくメタルフローによる一定ピッチの段差があり黒褐色を呈しており、低温の650°Cになるとマクロな箔状の被さりが発生する (写真2の(c), 写真3)。この被さりは先進しているチタン製ディスクの回転方向 (すべり方向) とは反対に被さっている。これに対して、650°Cにおいて潤滑油を使用することにより平滑な表面になる (写真2の(d))。また相手材であるハイス鋼製ディスクの接触面は、どの条件においてもマクロな欠陥はなく試験前同様の金属光沢を呈している (写真2の下段)。

チタン製ディスクの接触面をミクロに観察すると写真4に示すように、潤滑油を使用していない場合には温度が高いほど微細なクラックが顕著であり650°Cの低温になると軽度になる (写真4の(a), (b), (c))。更に潤滑油を使用することによりミクロな欠陥は極めて少なくなる (写真4の(d))。

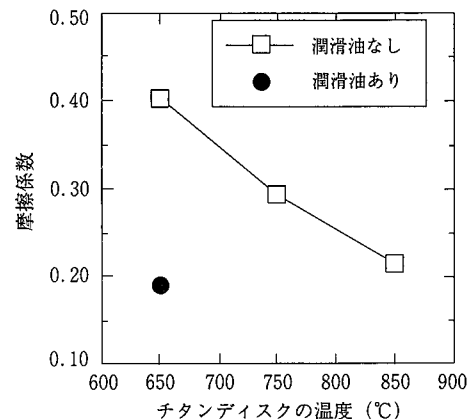


図2 熱間の摩擦係数に及ぼす表面温度と潤滑油の影響

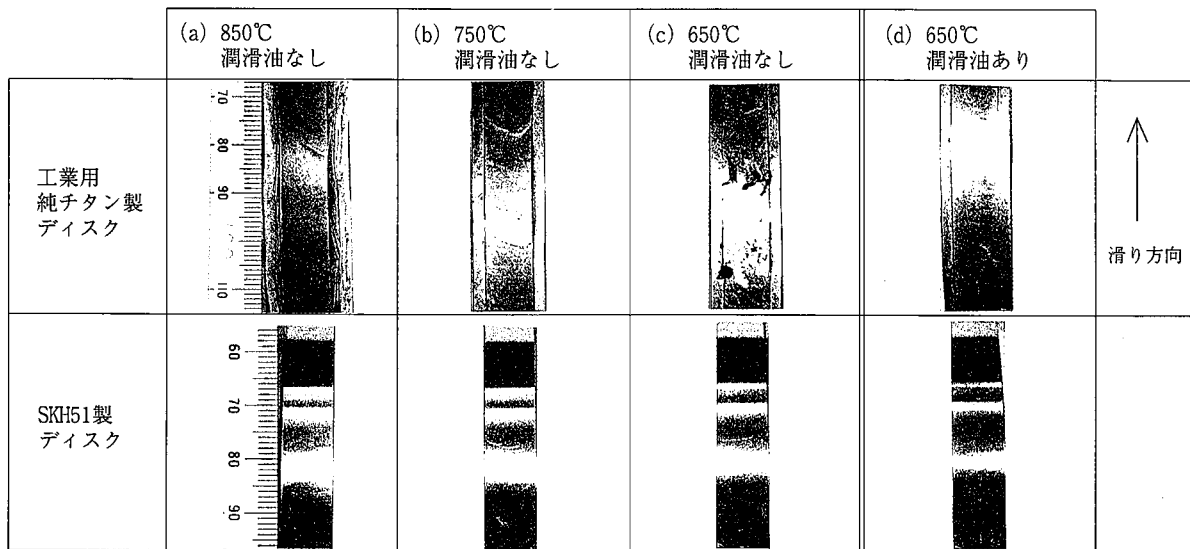


写真2 熱間摩擦試験後のディスク接触面の外観比較(上段がチタン製, 下段がハイス鋼製)

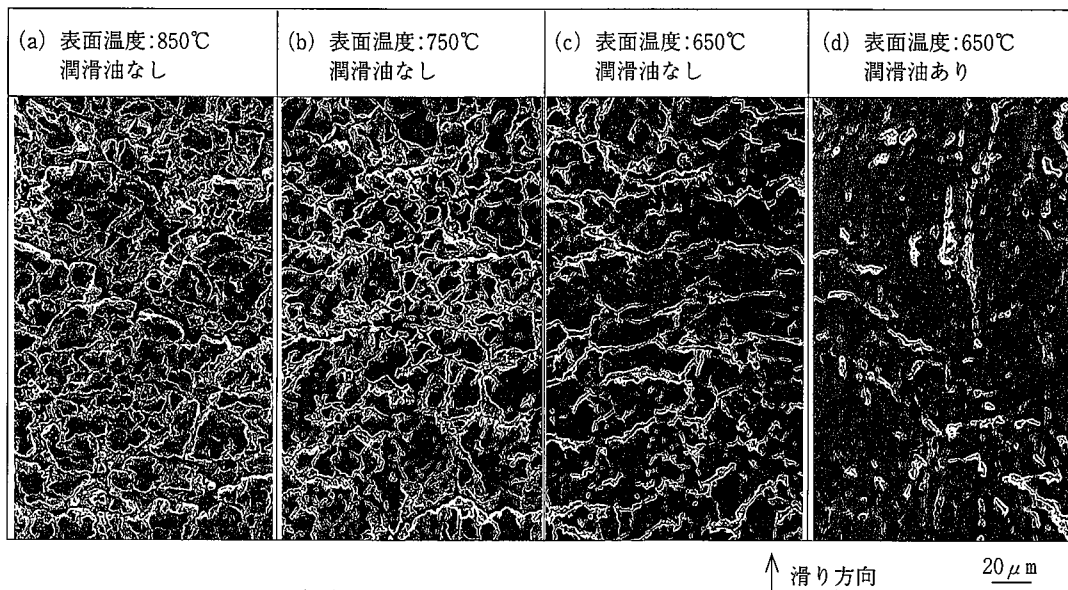


写真4 チタン製ディスク接触面の表面肌

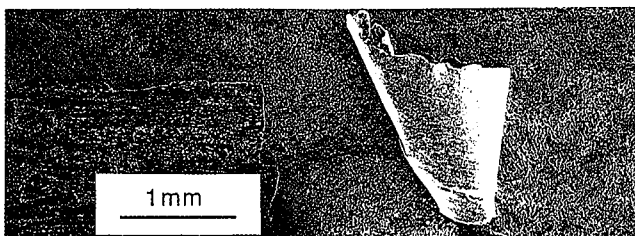


写真3 チタン製ディスク接触面の被さり部の拡大(試験条件:650℃, 潤滑油なし)

4. 考 察

以上のように熱間におけるチタンの摩擦特性は温度と潤滑によって大きく変化しており、摩擦係数や接触面の形態の違いとして明確にとらえられる。以下に温度と潤滑油がどのように表面に影響し上記の現象が起きているのか、その機構を考察するとともに実際の熱間圧延との関連について推察する。

まずEDSにてチタン製ディスクの接触面における酸化の程度を比

較すると、図3に示すように潤滑油を使用していない場合には温度が高いほどチタンに対する酸素のピークが強くなり、より酸化されていることが分かる(図3の(a), (b), (c))。これは高温ほどチタンと酸素との反応が活性になることに対応している³⁾。低温の650℃で潤滑油を使用すると、未使用の場合と比べ酸素のピークが著しく強く酸化が促進されており(図3の(d))、潤滑油が酸素の供給源となっていると考えられる。また図4に示すGDSによる深さ方向の元素濃度もEDSと同様の傾向であり、温度が高いほど表面付近の酸素濃度が高く、酸素の侵入深さも850℃と750℃では約5 μmであるが650℃では約2.5 μmと浅くなっている(図4の(a), (b), (c))。潤滑油の使用により表面付近の酸素濃度は高くなり鉄の濃度が減少していることから(図4の(d))、チタン表面の酸化物層及び潤滑油膜が相手材であるハイス鋼と金属チタンとの接触を抑制していると考えられる。

従って、チタン製ディスクの表面は酸素濃度の高い酸化物(スケール)層で覆われており、温度が高いほどその層は厚くなることから、酸化硬化層³⁾が加工により割れて微細なクラックが生じる一方でチタンの酸化物が金属同士の接触を抑制することによる潤滑効

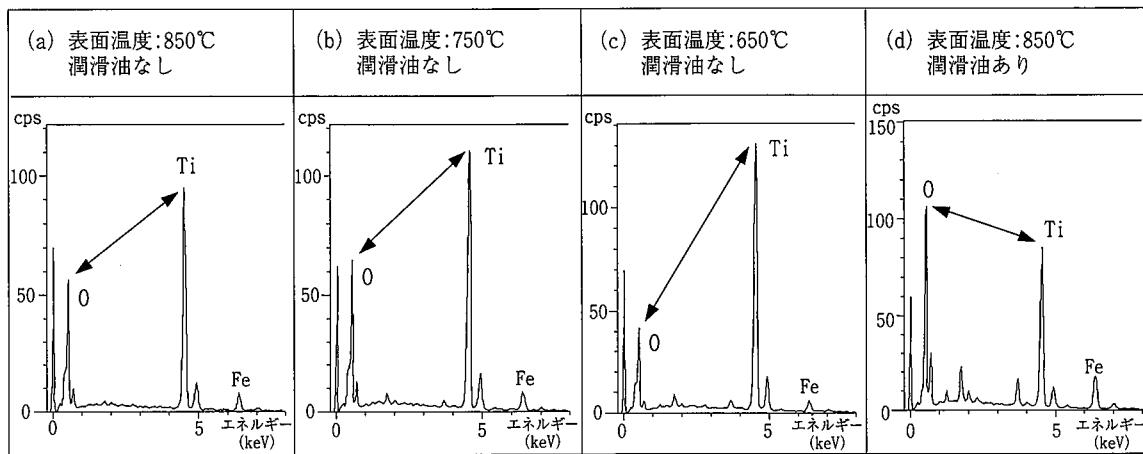


図3 熱間摩擦試験後のチタン製ディスク接触面におけるEDSスペクトルの比較(図中の矢印は酸素とチタンのピーク強度を比較するために挿入)

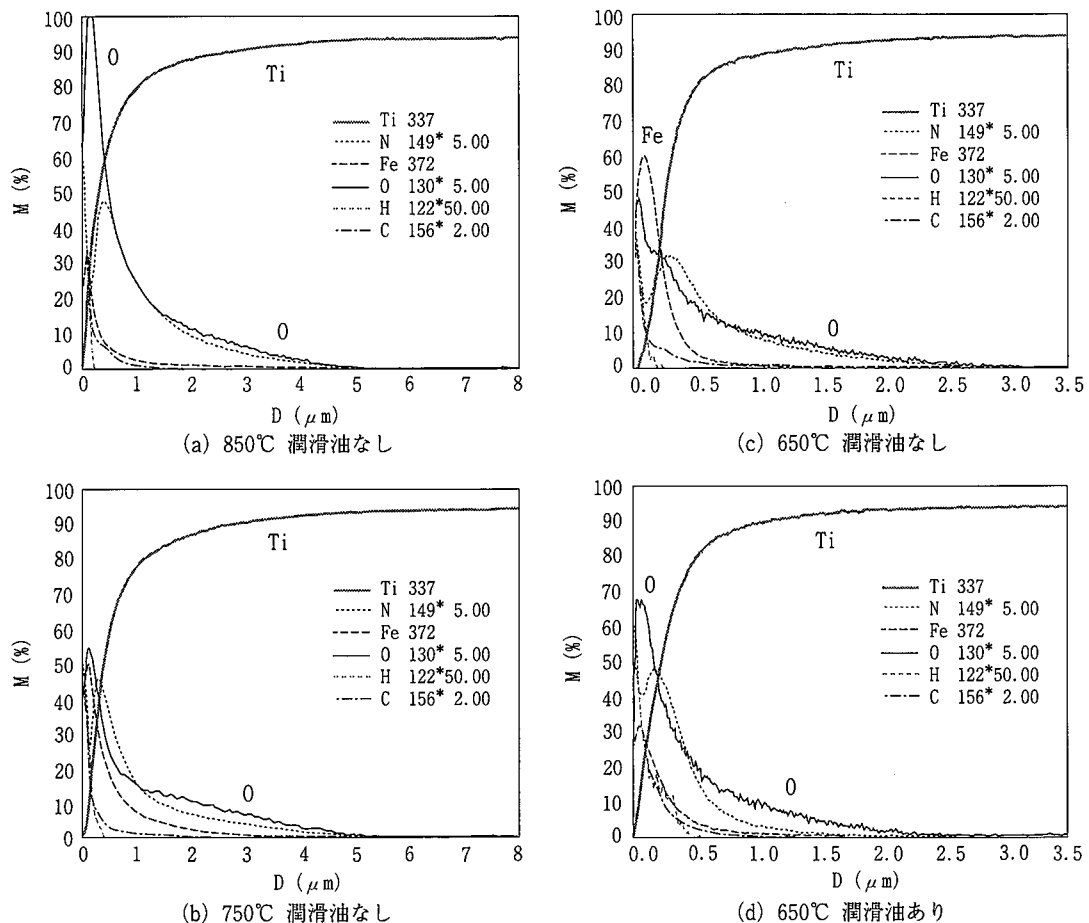


図4 熱間摩擦試験後のチタン製ディスク接触面におけるGDSによる深さ方向の元素濃度分布

果、いわゆるスケール潤滑が摩擦係数を低減させている。一方、温度が低いとスケールが薄くなるため金属同士の接触が容易となり摩擦係数は増加すると考えられる。また潤滑油は油膜そのものの潤滑効果に加え、酸化促進によるスケール潤滑も寄与していると推測される。但し、実際の熱間圧延では圧延に伴い金属チタンが表面に随時出現してくるためスケール再生に及ぼす温度や潤滑油の影響を更に考慮しなければならない。

チタン製ディスクの接触部の断面組織を観察すると写真5に示すように温度が低いほどメタルフロー又は加工再結晶している微細組織の層が浅く、650℃では200μm前後であり潤滑油を使用してい

ない写真5(c)では箔状の被さが観察される。このことから、本試験では誘導加熱のため温度が低いほど接触部の塑性流動可能な高温域が浅くなっていると考えられる。低温で潤滑油を使用しない場合にはチタン表面のスケールが薄く金属同士の接触が容易であり(摩擦係数が大きく)、チタンがハイス鋼と焼き付き、加えて誘導加熱に起因して塑性流動可能な高温域が浅いため、せん断変形箔状の被さが形成され则认为される。

図5に以上の考察を含み、(a)高温で潤滑油なし、(b)低温で潤滑油なし、(c)低温で潤滑油ありの三つの場合について本試験における接触面での摩擦現象を模式的に示す。

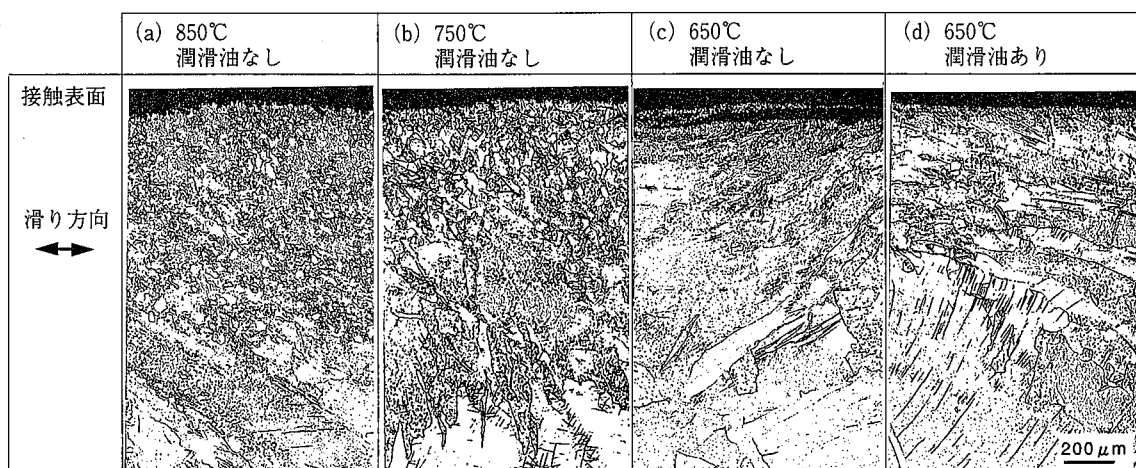


写真5 チタン製ディスク接触面直下の断面組織

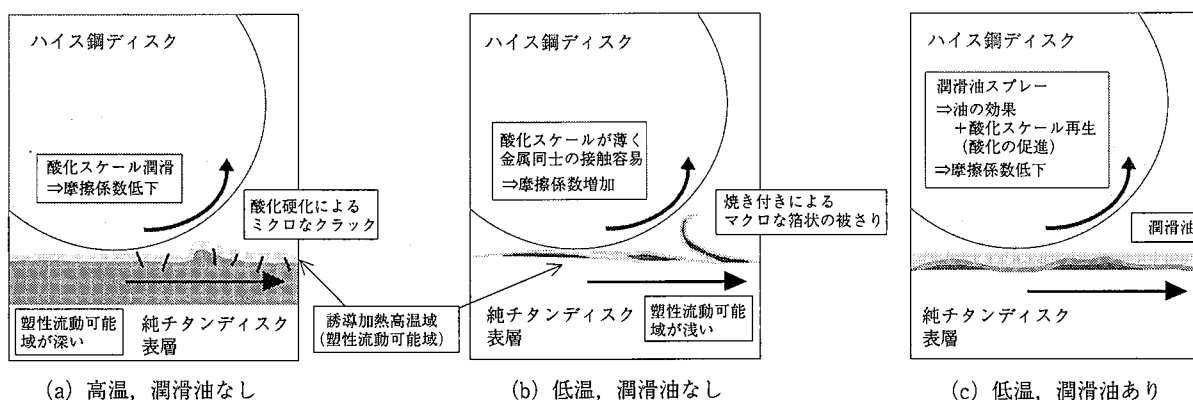


図5 熱間摩擦試験のチタン製ディスク接触面における摩擦現象の模式図(表面温度と潤滑油の影響)

(a) 高温で潤滑油なし：高温にて酸化されるためスケール潤滑により摩擦係数は低下するが厚い酸化硬化層が割れてマイクロなクラックが発生する。

(b) 低温で潤滑油なし：低温であることからスケールが薄く金属同士の接触が容易となり摩擦係数が増加するためチタンとハイス鋼が焼き付き、表層の塑性流動可能な領域が浅いことも加わりマクロな箔状の被さりとなる。

(c) 低温で潤滑油あり：油による潤滑効果に加えて、油が酸素供給源となり酸化が促進されるためスケール潤滑も寄与し摩擦係数が低下する。そのため焼き付きが抑制されて表面の欠陥も軽減する。

以上の熱間摩擦特性より実際の熱間圧延中の摩擦現象を考えると、圧延材であるチタンの温度が高い場合にはスケール潤滑の効果が期待できるが、温度が低い場合には油膜が切れて潤滑状態が悪化するとスケール潤滑が寄与しなくなり、摩擦係数が高まり、加えて変形抵抗が高いため(温度が100℃下がると変形抵抗は約2倍²⁾)摩擦力そのものが増大し、更に厳しい摩擦環境となることから焼き付きが生じやすくなると推察される。

5. 結 言

工業用純チタンの熱間摩擦特性に及ぼす表面温度と潤滑油の影響について、転動式熱間摩擦試験により摩擦係数と接触面の形態を中心に検討し、以下の結論を得た。

(1) 潤滑油を使用しない場合には、650～850℃の温度域での摩擦

係数は温度が低いほど大きくなり650℃では850℃の約2倍になる。

(2) 接触面は温度が高い場合には酸化硬化に起因する微小なクラックが発生し、650℃と低い場合にはマクロな箔状の被さりが生じる。これに対して650℃で潤滑油を使用すると摩擦係数は半減し両欠陥とも軽減され平滑な表面となる。

(3) チタン表面は温度が高いほど酸化されており、酸化物(スケール)層で覆われていることから、この層が金属同士の接触を抑制しスケール潤滑として作用すると考えられる。また潤滑油は油膜の潤滑効果に加え酸化も促進されることからスケール潤滑への寄与も考えられる。

(4) 温度が650℃と低く潤滑油を使用しない場合には、スケールが薄く金属同士の接触が容易となり摩擦係数が増加するためチタンとハイス鋼が焼き付き、これに加え本試験は誘導加熱であるためディスク表層の塑性流動可能な高温域が浅くなり、せん断変形により(2)のマクロな箔状の被さりとなる。

参考文献

- 1) 廣幡一明:日本でチタンの研究開発はどこまで進んでいるか、日本鉄鋼協会基礎研究会耐熱強靱チタン研究部会, 1993, p.87-91
- 2) 草道英武ほか共著:日本のチタン産業とその技術, 初版, 東京, アグネ技術センター, 1996, p.127-133
- 3) 例えば, 高山 勇:新日鉄技報, (352), 50(1994)