

水平押込み法による基材に機械加工を施した Fe 溶射膜のはく離強度評価

加藤 昌彦*

Evaluation of Delamination Strength of Thermally Sprayed Coating Deposited on
Mechanically Grooved Substrate by Horizontal Loading Method

Masahiko KATO

ABSTRACT

Interfacial fracture toughness of Fe coated aluminum alloy, which was used for spraying engine, was evaluated by horizontal loading method. Horizontal or orthogonal groove was machined at interface followed by Fe coating with various thickness to evaluate the influence of coating thickness. The result showed that delamination occurred at interface, and the interfacial fracture toughness decreased with increasing coating thickness. The interfacial fracture toughness with orthogonal groove was higher than that with horizontal groove.

キーワード：皮膜，せん断はく離強度，破壊靱性値，溶射

Keywords: Coating, Shear Delamination Strength, Fracture Toughness, Spraying

1. 緒言

自動車エンジンでは燃費の向上，CO₂排出削減が重要な課題となっている。そのためには車体の軽量化が有効であるのでアルミニウム合金が多く用いられるようになっている[1, 2]。自動車を構成する部品の中で重量割合が大きなエンジンへもアルミニウム合金の使用がすすんでいる。しかし，アルミニウム合金は

軟質であるので，ピストンがしゅう動するシリンダーをアルミニウム合金のまま使用すると，硬質なピストンリングにより摩耗が進行するので，シリンダーには鉄のスリーブが設けられている。しかし，鉄のスリーブは1mm以上と厚いので，重量増加の原因になる。さらに，ピストン間隔を縮めることの障害となるので，エンジンが大型化して重量増に結びつく。そのため，鉄を溶射により200～300μmの厚さに抑え軽量化をは

かる溶射エンジンの開発が進んでいる。溶射とは、熔融状態の金属、セラミックスを吹き付けて表面をコーティングする技術であり、耐熱性、耐摩耗性を改善させる手段として広く用いられる[3]。しかし、溶射は異材を吹き付ける方法であるので、界面での応力が生じ、はく離が問題となる。

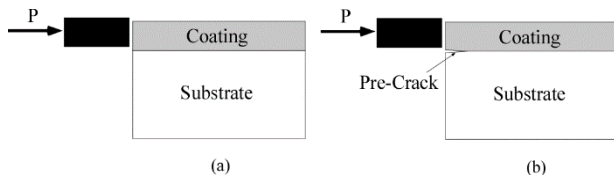


図1 一般的なせん断試験法. (a)予き裂あり, (b)予き裂なし

Fig.1 Conventional shear test method. (a)without pre-crack (b)with pre-crack.

これら皮膜のはく離はせん断荷重により生じる。せん断はく離強度評価法は多くあるが、この用途に適用可能なはく離強度評価法はないようである[4-8]。一般的な評価法は図1(a)に示す方法である。この方法で試験して得られた破面を図2(a)に示す。界面強度が高い皮膜の場合、界面ではく離しない場合がある。図1(b)のように、界面に予き裂を導入すると、図2(b)のように、界面ではく離する。しかしながら、押し込みによりき裂は開口してゆき、せん断はく離強度が得ることが難しくなる。

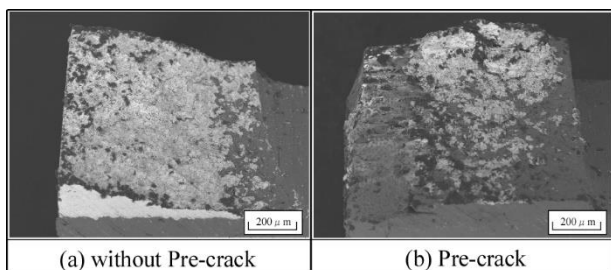


図2 一般的なせん断試験法によるはく離の様子. (a)予き裂あり, (b)予き裂なし

Fig.2 Delamination surface by conventional shear test method. (a)without pre-crack (b)with pre-crack.

そこで本研究では、溶射エンジン用皮膜のはく離強度評価に適用可能なせん断押し込みによる皮膜はく離強度評価法を新たに提案するため、解析および実験を行った。

2. 実験方法

2. 1 試験片

基材には表面仕上げされた鋳造用アルミニウム合金を使用した。基材表面に機械加工により溝を設けたのち、粒径 $71\mu\text{m}$ の鉄系粉末 XPT512 (化学組成, C:1.18, Mn1.40, Cr:1.48, Si:<0.001, Fe:bal.) を大気圧プラズマ溶射により、所定の厚さ B_1 になるように成膜したものが、供試材として共同研究先より提供された。これを所定の幅 b にレーザー加工した。試験片を模式的に図2-1(a)および(b)に示す。はく離荷重負荷方向に対する溝の方向により、(a)平行溝、および(b)直交溝と定義する。

溶射膜物性評価には、溶射膜単体を取り出す必要があるので、図2に示すように引張試験片状に加工した基材に粉末を、自然はく離するまで溶射し、はく離した膜を溶射膜物性評価試験片とした。

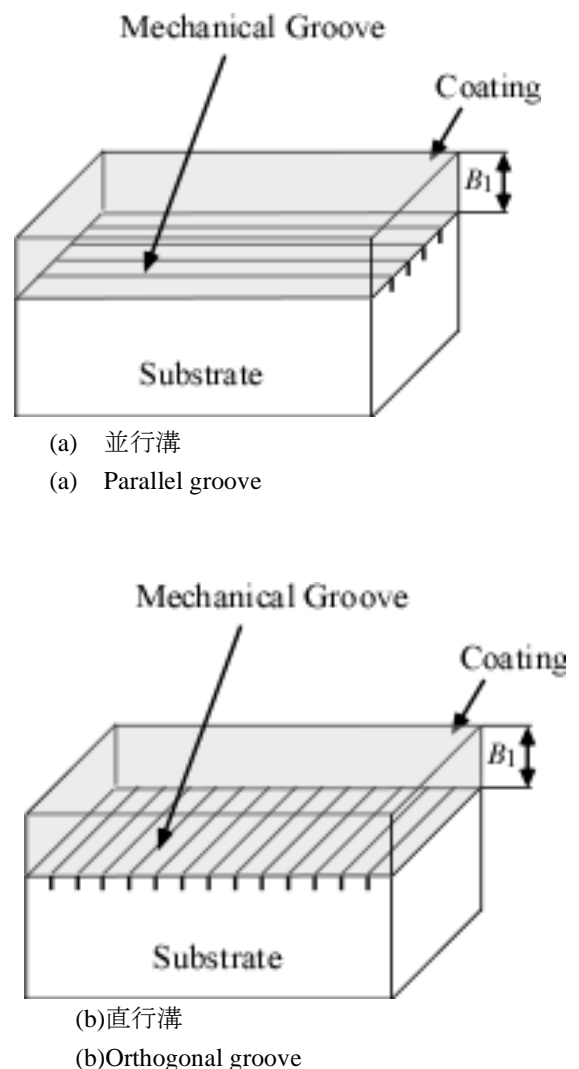


図1 試験片.

Fig.3 Specimen.

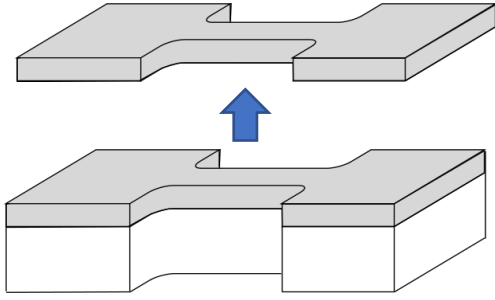


図2 溶射膜物性評価試験片.

Fig.2 Specimen for coating property evaluation.

2. 2口はく離強度評価試験

はく離強度評価には、図3に示す、自作の水平押し込み試験機を使用した。



図3 水平押し込み試験機.

Fig.3 Horizontal loading machine.

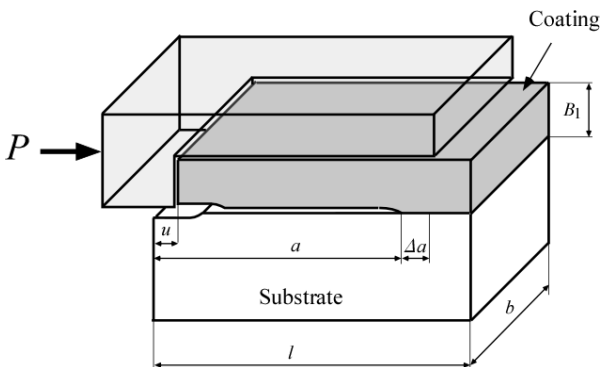


図4 水平押し込み試験の模式図.

Fig.4 Schematic illustration of horizontal loading method.

図4に模式図を示す通り、界面にレーザにより予き裂を導入した試験片に界面に平行荷重 P を徐々に負荷する。押し込み治具は皮膜上面の変形を抑制する構造である。これは、これまでの有限要素解析により、抑制構造がないとモードI比率が増加することを明らかにしており、モードII変形を実現させるために、設けている。

2. 3口界面破壊じん性値評価

皮膜のはく離強度を評価するための界面破壊じん性値を破壊力学的に導くことを検討する。図4に示すように、圧子に水平荷重 P により長さ a の界面き裂が Δa だけ進展するとする。皮膜に塑性変形が生じているとし、塑性変形領域を直線硬化材で近似する。皮膜の弾性係数、降伏応力、塑性係数を、それぞれ E_{e1} 、 σ_{ys1} 、 E_{p1} とする。皮膜内の圧縮ひずみ(厚さおよび幅方向に分布はないとする)を ε とすると、皮膜の圧縮応力 σ との関係は以下で表される。

$$\sigma = \sigma_{ys1} f\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ys}}\right) = E_{e1} \varepsilon_{ys1} f\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ys}}\right)$$

$$f\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ys}}\right) = (1 - \beta) + \beta \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ys}}\right)$$

$$\beta = \frac{E_{p1}}{E_{e1}} \quad (1)$$

皮膜に水平方向に加わる力 P による皮膜の変位を u とすると、

$$\frac{P}{bB_1} = \sigma_{ys1} \left\{ (1 - \beta) + \beta \left(\frac{u}{\varepsilon_{ys} a}\right) \right\}$$

より、

$$u = \frac{\varepsilon_{ys}}{\beta} \left\{ \frac{P}{bB_1 \sigma_{ys1}} - (1 - \beta) \right\} a \quad (2)$$

となる。

$\sigma \geq \sigma_{ys2}$ において、荷重0までの除荷において弾性回復する場合、残留変位 u_p は

$$u_p = \frac{\varepsilon_{ys}}{\beta} \left\{ \frac{P}{bB_1 \sigma_{ys1}} - (1 - \beta) \right\} a - \frac{P}{bB_1 E_1} a = \left\{ \left(\frac{1}{E_{p1}} - \frac{1}{E_{e1}} \right) \frac{P}{bB_1} - \frac{\varepsilon_{ys}}{\beta} (1 - \beta) \right\} a \quad (3)$$

となる。

界面き裂が微小長さ Δa だけ進展したときの、皮膜変位の微小増分 Δu 、 Δu_p は以下のように求まる。

$$\Delta u = \frac{\varepsilon_{ys}}{\beta} \left\{ \frac{P}{bB_1 \sigma_{ys1}} - (1 - \beta) \right\} \Delta a$$

$$\Delta u_p = \left\{ \left(\frac{1}{E_{p1}} - \frac{1}{E_{e1}} \right) \frac{P}{bB_1} - \frac{\varepsilon_{ys}}{\beta} (1 - \beta) \right\} \Delta a \quad (4)$$

Δu_e は Δu と ΔU_p の差より求まる.

$$\Delta u_e = \Delta u - \Delta U_p = \frac{P}{bB_1 E_1} \Delta a \quad (5)$$

き裂が Δa だけ進展したときの, 界面エネルギーの増加分を ΔW_{12} , 全仕事の増加量を ΔL , 全ひずみエネルギー, 弾性ひずみエネルギー, および塑性散逸エネルギーの増加量をそれぞれ ΔU , ΔU_e , および ΔU_p とすると, それぞれ以下のようになる.

$$\Delta W_{12} = Gb\Delta a \quad (6)$$

$$\Delta L = P\Delta u = P \frac{\varepsilon_{ys}}{\beta} \left\{ \frac{P}{bB_1 \sigma_{ys1}} - (1 - \beta) \right\} \Delta a \quad (7)$$

$$\Delta U = \frac{1}{2} P \Delta u = P \frac{\varepsilon_{ys}}{\beta} \left\{ \frac{P}{bB_1 \sigma_{ys1}} - (1 - \beta) \right\} \Delta a \quad (8)$$

$$\Delta U_e = \frac{1}{2} P \Delta u_e = \frac{P^2}{2bB_1 E_1} \Delta a \quad (9)$$

$$\Delta U_p = \frac{1}{2} P \Delta u_p = \frac{P}{2} \left\{ \left(\frac{1}{E_{p1}} - \frac{1}{E_{e1}} \right) \frac{P}{bB_1} - \frac{\varepsilon_{ys}}{\beta} (1 - \beta) \right\} \Delta a \quad (10)$$

界面エネルギーの増加分は,

$$\Delta W_{12} = \Delta L - \Delta U \quad (11)$$

であるので, Δa 微小増加した際の界面エネルギーの増加分は以下となる.

$$\frac{\Delta W_{12}}{\Delta a} = \frac{P}{2} \frac{\varepsilon_{ys}}{\beta} \left\{ \frac{P}{bB_1 \sigma_{ys1}} - (1 - \beta) \right\} \quad (12)$$

これより, 界面エネルギー解放率は以下で得られる.

$$G = \frac{P}{2} \frac{\varepsilon_{ys}}{b\beta} \left\{ \frac{P}{bB_1 \sigma_{ys1}} - (1 - \beta) \right\} \quad (13)$$

上式より, 界面エネルギー解放率は, き裂長さに依存しないことがわかる. 皮膜はく離時の圧子荷重を P_d とすると, 界面破壊じん性値 G_C (界面エネルギー解放率の臨界値) は, 上式 P を P_d に置き換えた以下の式で求まる.

$$G_C = \frac{P_d}{2} \frac{\varepsilon_{ys}}{b\beta} \left\{ \frac{P_d}{bB_1 \sigma_{ys1}} - (1 - \beta) \right\} \quad (14)$$

皮膜が弾性範囲内のときは, $\beta=1$ とおけばよく, 以下が得られる.

$$G_C = \frac{P_d^2}{2b^2 B_1 E_1} \quad (15)$$

2. 4 □溶射膜物性値評価試験

図2のようにして取出した試験片を万能引張試験機(AG-50kNI, 島津製作所(株)製)に取り付け, 引張荷重を負荷した. 荷重 P はロードセルを使用し, ひずみ ε は, 試験片に貼付した塑性域ひずみゲージ

(YHFLA-2-3LJCT-F, (株)東京測器製)を使用して測定した.

3. 実験結果及び考察

3. 1 溶射膜物性値評価

溶射膜の引張試験により得られた荷重 P を断面積で除して求めた応力 σ と, ひずみ ε の関係を図5に示す. 応力-ひずみ関係はほぼ線形であり, 塑性変形挙動は認められない. 応力が 100MPa 程度にまで増加すると破断した. 皮膜の弾性係数 E_1 は, 図の勾配である, 式(16)により求め, 36.5GPa が得られた.

$$E_1 = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (16)$$

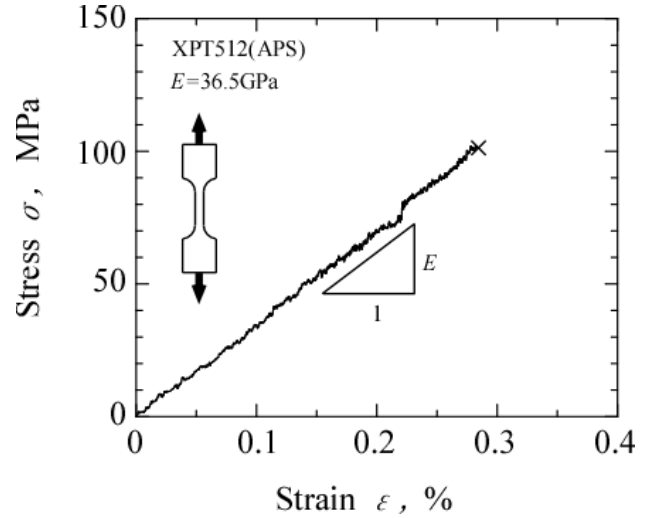


図5 溶射膜の応力-ひずみ関係

Fig.5 Stress-strain relationship of coating.

3. 2 □水平押し込み試験

試験片に水平押し込み試験を行い, 式(15)より求めた界面破壊じん性値 G_C を, 膜厚 B_1 で整理して図6に示す. なお, 計算に際して, 皮膜の弾性係数 E_1 は 3.1 で得られた 36.5GPa を用いた.

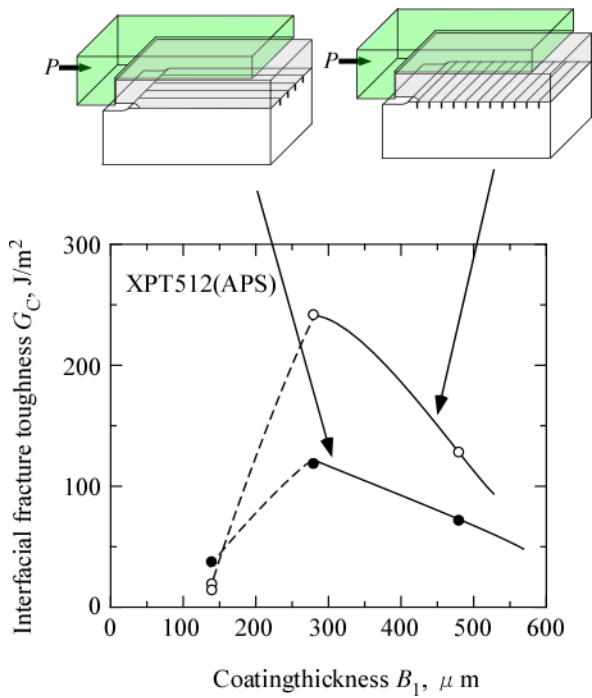


図6 膜厚と界面破壊じん性値の関係

Fig.6 Relationship between coating thickness and interfacial fracture toughness.

押し込み方向に平行方向，直交方向のいずれも，膜厚が低下すると界面破壊じん性値が増加する．これはプラズマ溶射膜でみられる現象であり，膜厚が増加すると残留応力が増加することによる．

3. 3□はく離面観察

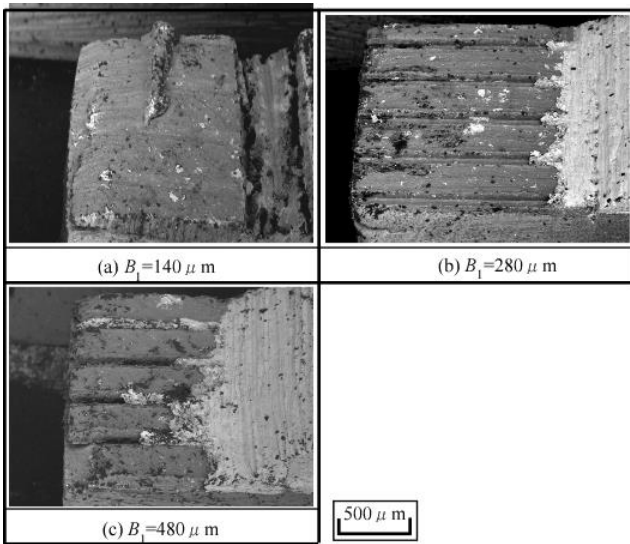


図7 はく離面(平行溝)

Fig.7 Delamination surface(Parallel groove).

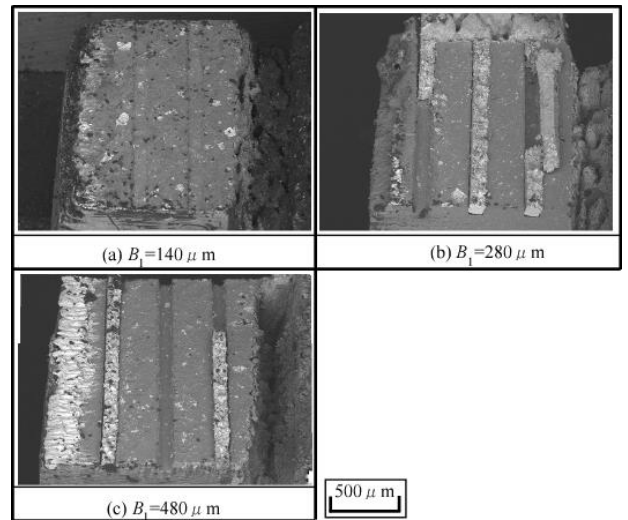


図8 はく離面(直交溝)

Fig.8 Delamination surface(Orthogonal groove).

平行および直交溝試験片の，水平押し込み試験後のはく離面の様子を図7および8に示す．いずれも界面ではく離していることがわかる．平行溝では溝での皮膜の残留はほとんどなく，溝の凹凸に沿ってはく離していることがわかる．また， $B_1=140\mu\text{m}$ には，非常に浅い溝しか確認されない．このため，図6で示した界面破壊じん性値が低下したと考えられる．

直交溝においても， $B_1=140\mu\text{m}$ では浅い溝しか確認できず，このために界面破壊じん性値が低下したと考えられる．十分な溝が形成されている $B_1=280\mu\text{m}$ および $480\mu\text{m}$ では，溝部に皮膜の残留が認められ，アンカー効果が認められる．

3. 4□はく離過程

平行および直交溝試験片のはく離の模式図を図9(a)および(b)に示す．(a)に示す平行溝の場合，はく離は溝に沿って生じているので，溝の凹凸分（壁面分）進展面積が増加するが，溶射に直交方向の界面破壊じん性値 G_{C12} は溶射粒子の運動エネルギーの寄与分高くなるが，壁面の界面破壊じん性値 G_{C12}' は，溶射粒子の運動エネルギーの寄与がないので，低いと考えられる．したがって，溝の凹凸分（壁面分）進展面積が増加しても，界面破壊じん性値増加への寄与は少ないと考えられる．

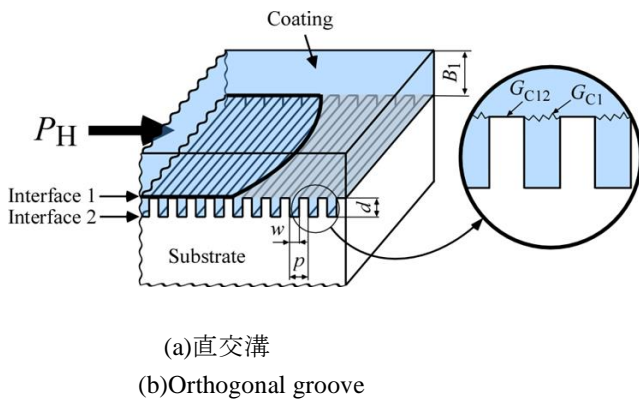
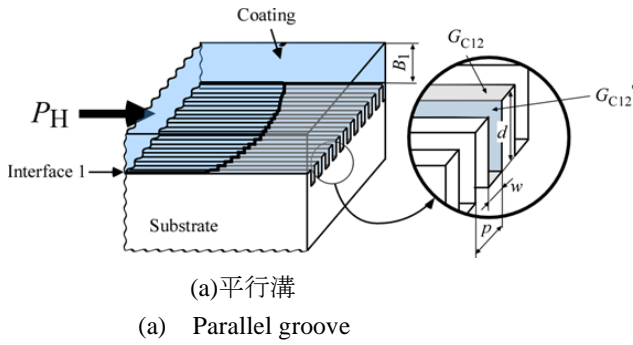


図9 はく離プロセスの模式図

Fig.9 Schematic illustration of delamination process.

一方、(b)に示す直交溝の場合、はく離は溝部の皮膜を破断するように進展する。したがって、界面破壊じん性値は、界面 G_{C12} と皮膜 G_{C1} の混合となる。皮膜の破壊じん性値は高いので、その分増加したと考えられる。

結言

実用に即したはく離強度評価法である水平押込み法を使用し、溶射エンジンに使用される鉄系溶射膜(XPT512)のはく離強度を評価した。以下は本研究で得られた結果である。

- (1) 引張試験の結果、XPT512 溶射膜は弾性変形挙動を示し、その弾性係数は 36.5GPa である。
- (2) 水平押込み法により、溶射膜は界面ではく離する。
- (3) 界面破壊じん性値は、膜厚の低下とともに増加する。また、荷重負荷方向に直交する溝を界面に有する試験片の界面破壊じん性値は、荷重負荷方向に平行な溝を有する試験片のそれより高い。

- (4) 荷重負荷方向に平行な溝を有する試験片のはく離面には皮膜の残留はほとんどなく、溝に沿ってはく離する。荷重負荷方向に直交する溝を界面に有する試験片では、溝に皮膜が一部残留する。このアンカー効果が高い界面破壊じん性値かえられた理由と考えられる。

参考文献

- [1] 牛尾英明 and 林直義：自動車用アルミニウム複合材の開発，軽金属，Vol.41，No.11，pp.778-786 (1991)
- [2] 長坂秀雄：金属溶射法を利用したアルミニウムエンジンシリンダ，金属表面技術 現場パンフレット，Vol.14，No.4，pp.8-11 (1967)
- [3] 淳・蓮井，“溶射工学” (1996) 産報出版。