

チタンの爆発圧接と爆発成形について

爆発圧接について	猪股 茂男	後藤 朝彦	矢野 要
	樋本 正之	柴田 昭二郎	藤井 俊昌*
爆発成形について	猪股 茂男	後藤 朝彦	矢野 要
	樋本 正之*		
	桜井 武尚	金本 光郎**	

I. 緒 言

われわれは種々の化学機器、装置について多くの製作実績と製造技術を有している。これら化学機器、装置で特に耐食性が要求されるものについて主として、チタンライニングが適用されている。チタンライニング方法にはルーズライニング、部分溶接ライニング、爆発圧接ライニング、爆発成形ライニングがあり、高温、高压、負圧などの苛酷な使用条件についてのライニング方法は部分溶接ライニング、爆発圧接ライニング方法が多く用いられる。

本報告では爆発圧接、爆発成形によるライニングについてのべる。金属の爆発加工は、爆薬の爆轟の際に発生する強力な衝撃波を利用する方法であつて、今日実用化されている金属の爆発加工には、硬化、成形、圧接の3つの分野がある。われわれはチタンライニングの製作に爆発圧接、爆発成形を利用し、化学装置の製作に適用している。

部分爆発圧接は旭化成工業株式会社と業務協定により実施している。またわれわれはこの部分爆発圧接方法にアイデアを加えた新しい圧接技術も開発した。

爆発成形については日本油脂株式会社と共同開発し、従来のプレス加工、ピーニング加工に代る成形方法として、チタンライニングの鏡板などの成形に利用し、きわめて簡単に、しかも精度よくライニングすることができる。

II. チタンの爆発圧接について

1. 爆発圧接によるライニング方法

チタンの爆発圧接は Fig. 1(a)に示すように、クラッド材と母材の間に間隙をもうけて、クラッドを重ね合せ、クラッド材の表面に爆薬を置き Fig. 1(b)に示

すように、爆発させることにより、クラッド材と母材を圧接させる方法である。

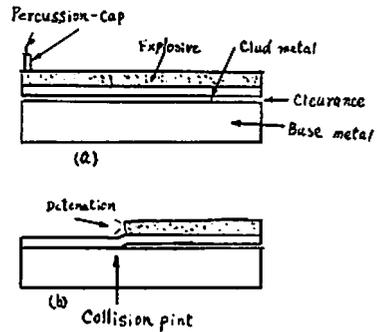


Fig. 1 Bonding method

部分爆発圧接は線状に部分的に圧接する方法で、Fig. 2に示すように圧接する部分に特殊導爆線を設置し、これを爆発させて圧接を行なう。

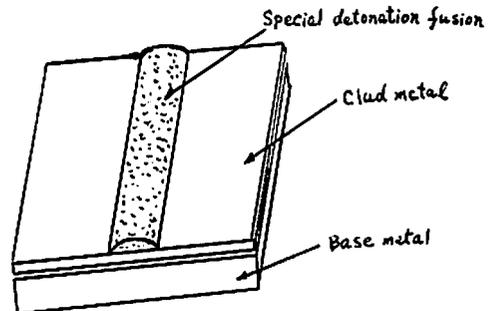


Fig. 2 Partial explosion bonding method.

なお、この特殊導爆線は爆薬をひも状に細長く圧伸したもので、圧接を行なう金属の形状に応じて、自由に屈曲できるように柔軟性をもたせている。

部分爆発圧接はこのように爆薬量が少ないので、市街地の工場内でも手軽にしかも設備も必要なく安価に

昭和44年7月4日受理

* (株) 神戸製鋼所 大久保化工機工場 明石市大久保町福田 123

** 日本油脂 (株) 武豊工場 愛知県武豊町

施工できる利点がある。

全面爆発圧接はチタンクラッド鋼板の製造に利用され、部分爆発圧接と異なり、クラッド材の全面に爆薬を置いて行なうので、多量の爆薬を必要とし、また施工場所などに制約がある。

2. 爆発圧接における表面処理

爆発圧接を行なう場合、クラッド材および母材の圧接面は、脱スケール、脱脂を行なうことは当然であるが、しかしクラッド材、母材の表面あらさについてはほとんどの文献に述べられていない。特に爆発接材は曲げ加工、溶接加工などの製作過程において、または高温、高压、負圧などの化学機器、装置の使用において、圧接性の良好なことが要求される。

爆発圧接は従来の溶融溶接では、溶接不可能な異種金属の接合が可能であることがいちぢるしい利点である。溶融溶接で溶接不可能な理由は、両金属の融合により、その溶接部に金属間化合物などの、ぜい化層の析出のため、割れが発生する。例えばチタンと鉄では、ぜい弱な Ti-Fe の金属間化合物が形成され、溶接部に割れが発生し、簡単に破断する。爆発圧接では金属を直接溶融せず、またぜい化層を析出せずに接合が可能であるとされている。しかし Photo. 1 に示すように、爆発圧接においても爆薬の衝撃圧力で、そ性流動による拡散、接触面の摩擦エネルギーによる温度上昇によつてわずかではあるが、クラッド材と母材の圧接境界部にミクロ的に金属間化合物、または融合層などの析出により、ぜい化層を形成するものもある。このようなミクロ的なぜい化層の形成が圧接性の低下の原因となる。



Photo. 1 Bond zone by conventional bonding method. $\times 400$

われわれは部分爆発圧接において、クラッド材と母材の表面処理方法を種々検討し、ぜい化層が全く形成しない方法を得た。すなわち、クラッド材と母材の表面あらさを Have 0.7μ 以下に研磨すると、Photo. 2 に示すように、Ti-Fe の金属間化合物の形成されなくなり良好な圧接状態を示すようになる。



Photo. 2 Bond zone by new explosive bonding method. $\times 400$

Fig. 3 に部分爆発圧接におけるクラッド材と母材の表面あらさと、圧接部のはく離強さの関係を示す。

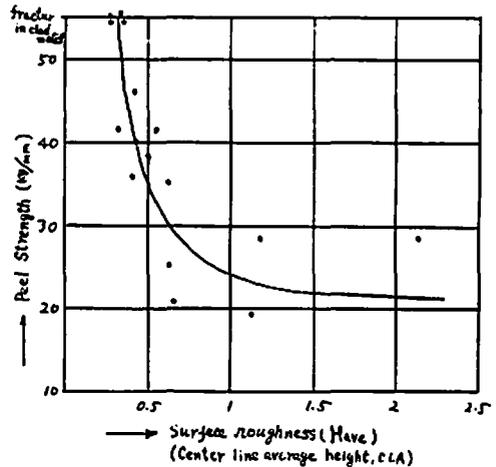


Fig. 3 Relation of peel strength v. s. surface roughness of metals.

Fig. 3 に示すように、Have 0.5μ 以下になると、はく離強さが著しく高くなり、Have 0.5μ 程度になると、圧接部よりはく離せず、クラッド材より破断するようになる。

なお部分爆発圧接のはく離強さの測定は、抵抗溶接の測定方法を参考にして、Fig. 4, 5 に示す方法により行なっている。

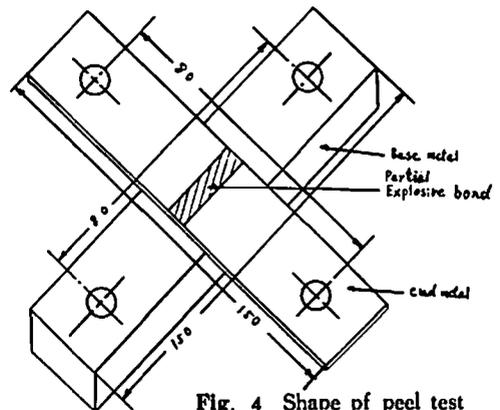


Fig. 4 Shape of peel test piece (unit mm)

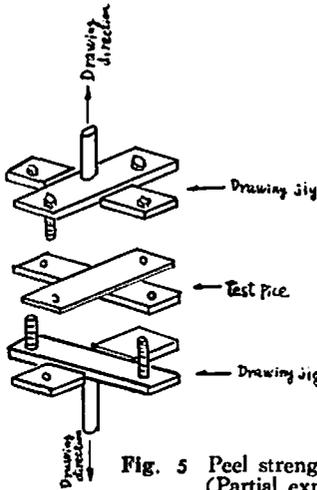


Fig. 5 Peel strength test method, (Partial explosive bonding)

部分爆発圧接のはく離試験片は、Fig. 4 に示すように線状に圧接されている。はく離試験では、圧接部端部より順次中央部にはく離が進行する状態になるので、その強度は圧接面積に関係なく、線状の圧接部の長さ に比例する。したがって、はく離強さは、引張荷重を圧接部の長さ(50mm)で除した kg/mm で表わした。

全面爆発圧接においても、クラッド材および母材の表面あらさを、Have 0.7 μ 以上にすると、部分爆発圧接と同様、第1表に示す高い圧接性を有するようになる。

表1 全面爆発圧接の圧接性の一例

クラッド材	母材	はく離強さ (kg/mm^2)	破断位置
チタン 2mm t	SS 41p 12mm t	42.9以上	クラッド材破断
チタン 3mm t	SS 41p 12mm t	50.9	圧接部
チタン 5mm t	SS 41p 12mm t	47.5	圧接部

表1に示すように、チタンの板厚が2mm以下になると、圧接部よりはく離せずクラッド材で破断するようになる。なお全面爆発圧接の測定方法は Fig. 6 に示す。

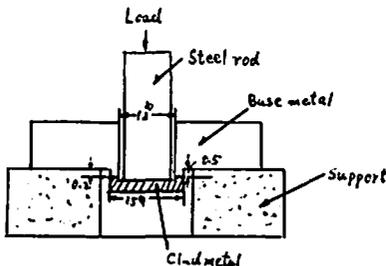


Fig. 6 Peel strength test method, (Unit mm, whole surface explosive bonding)

Fig. 6 に示すように、鋼柱に荷重をかけクラッド材をはく離させる。はく離強さは、はく離に要した最高荷重を、圧接面積で除した kg/mm^2 で表わした。

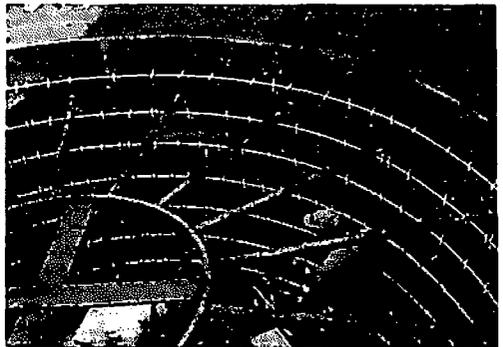
このように、クラッド材および母材の爆発圧接する表面を Have 0.7 μ 以上に研磨すると、従来の爆発圧接にはみられないような高いはく離強さおよび安定した圧接性を有するようになる。

3. 当社における爆発圧接法による加工法

部分爆発圧接は、Photo. 3 に示すように母材を成形、溶接加工を完成した後、構造物の状態で、クラッド材を母材に圧接する方法と、母材を成形、溶接加工を行なわない Photo. 4 に示すように、平板の状態でクラッド材を母材に圧接する方法がある。構造物の状態で爆発圧接を行なうには、Photo. 2 に示すように、母材とクラッド材を微細間隙に重ね合わせるために、拘束治具を使用しなければならない。これに対して平板の状態で爆発圧接を行なうと、母材とクラッド材を重ね

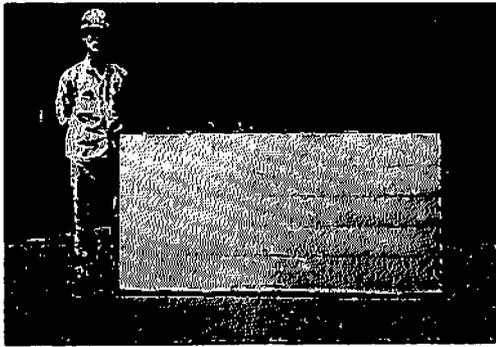


(Clad metal: titanium 1.5mm t)
(Base metal: mild steel 12mm t)



(Clad metal: titanium 2mm t)
(Base metal: mild steel 9mm t)

Photo. 3 Setting of partial bonding in state of construction.



(Clad metal: titanium 2mm t)
(Base metal: mild steel 9mm t)

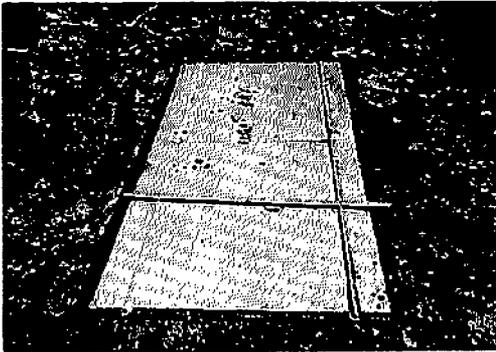
Photo. 4 Partial bonding in state of flat plates.

合せるのに簡単な拘束治具でよいが、爆発圧接後所定の構造物の形状に成形加工を行なわなければならないので、圧接部の圧接強度が高くなければ、成形加工中にはく離を生ずる欠点がある。

しかし、前述のような表面処理をほどこして、爆発圧接を行なっているので、高い圧接強度を有し、成形加工を行なってもはく離を生じない。

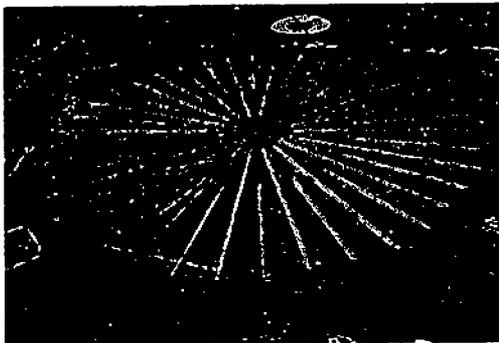
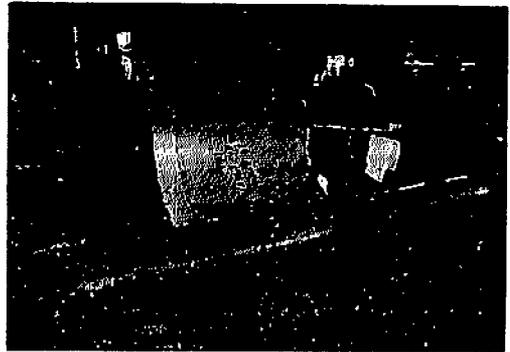
また Photo. 5, 6 にチタンライニングの爆発圧接の状態および圧接後の成形加工の状態を示す。

写真に示すように部分爆発圧接は、一定の間かくで圧接を行なっている。この間かくは装置の使用条件によつて異なるが、通常 50~700 mm 程度である。



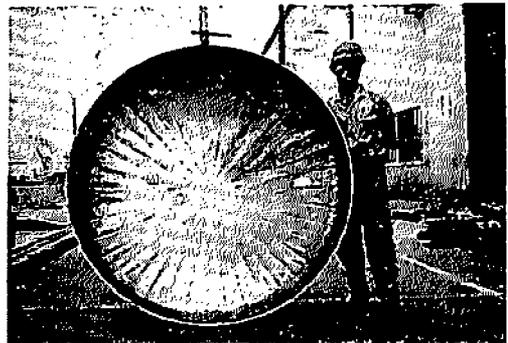
(Clad metal: titanium 2mm t, Base metal: mild steel 9mm t)

Photo. 5 Condition of partial bonding and bent forming



(Clad metal: titanium 1.5mm t, Base metal: mild steel 12mm t)

Photo. 6 Condition of partial bonding and press forming.



部分爆発圧接、全面爆発圧接材の成形後の溶接施工法は、チタンと鉄が融合すると、極めてもろい合金となり、容易に割れが発生するので、Fig. 7 に示すように行なわなければならない。すなわち Fig. 7 (a) に示すように母材を溶接する際の溶接熱のため、クラッド材(チタン)が母材(鉄)と融合して、割れの原因にならないように、また熱影響を受けて酸化しないよ

うに、前もつてチタン部分を機械切削などにより除去する。母材部は第1層を溶接で行ない、第2層以後はチタンに熱影響をおよぼさないように注意して、普通のアーク溶接で行なう。

クラッド材の溶接は、クラッド材と同種のチタン当板をライニングして、クラッド材とラップ溶接を行なう。溶接した状態を Photo. 7 に示す。

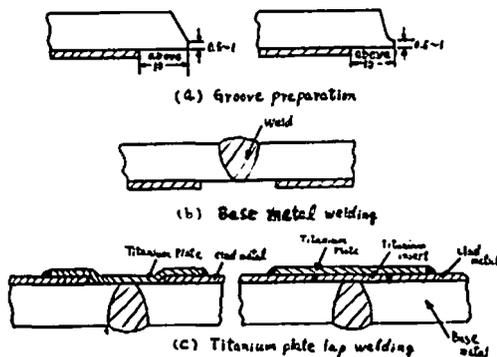


Fig. 7 Butt joint of explosive bonded plate



Photo. 7 Instance of butt joint of partial explosive bonded plate

現在チタンの部分爆発圧接は、爆薬の制約もあり、チタンの板厚3mm程度以下の圧接を経験している。

4. 爆発圧接部の諸性質

爆発圧接部の圧接状態、硬度変化、圧接強度、などについてのべる。

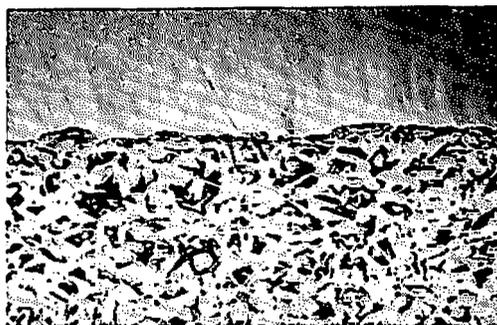
① 爆発圧接部の圧接状態

チタンと鉄の圧接境界部に Ti-Fe の金属間化合物が形成しない技術を開発した。

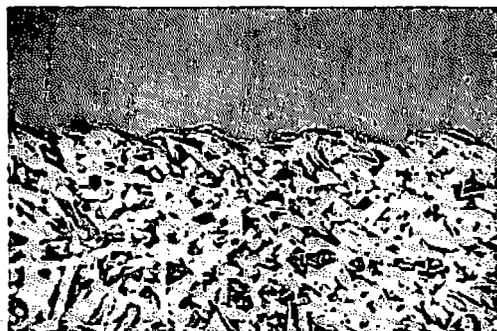
また、圧接部の顕微鏡組織では、Photo. 8 に示すように、爆発圧接を行なえば、クラッド材および母材の圧接部境界に、変形による波形が認められるが、この波形の大きさは、爆薬の起爆位置付近は、波形が小さいが、起爆位置より離れると、波形が大きくなる傾向が認められる。しかし圧接部の波形の大きさと圧接部の波形の大きさと圧接強さ（はく離強さ、せん断強さ）には、全く影響を示さない。

チタンと銅板との爆発圧接で圧接性に影響をおよぼすのは、圧接部境界の Ti-Fe の金属間化合物（ぜい化層）であるが、爆薬については、爆薬のエネルギーが必要以上に境界で消費されると、境界部分が溶融され、さらに大きなエネルギーが境界で消費されると、

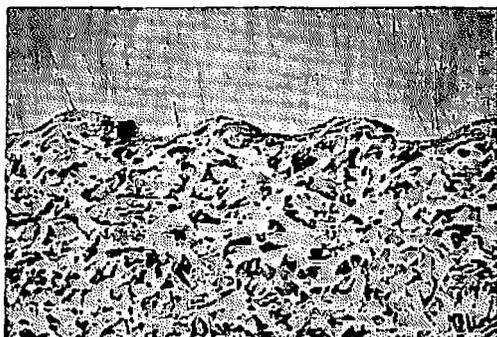
境界全面が溶融され、金属間化合物が形成される。われわれは使用する爆薬量を考慮して、前述の表面処理を行なつて、金属間化合物を形成しない方法を開発した。



(Parts of 270mm distance from detonation point.)



(Parts of 320mm distance from detonation point.)



(Parts of 720mm distance from detonation point.)

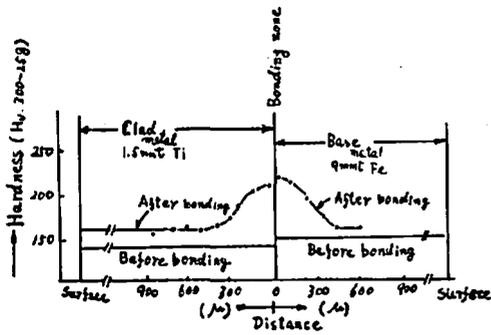
Photo. 8 Wave of explosive bond zone.

(Whole surface bonding, $\times 100$)
 (Clad metal: titanium, 2mm t)
 (Base metal: mild steel 14mm t)

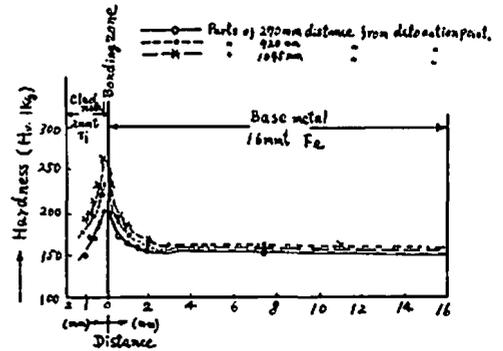
② 爆発圧接部の硬度分布

爆発圧接されるクラッド材と母材が、爆薬の衝撃圧により加工硬化をおこす。

Fig. 8 に部分爆発圧接および全面爆発圧接の断面の硬度分布の一例を示す。



(a) Partial explosive bond.



(b) Whole surface explosive bond.

Fig. 8 Hardness of explosive bonding zone

部分爆発圧接部は圧接境界を中心として0.5mm程度の範囲で硬度が変化している。

③ 爆発圧接部の強度

一般にライニング材の強度については、クラッド材は耐食性のみを目的として、強度は母材の強度により設計している。

部分爆発圧接材の母材部分より、試験片を採取し、引張試験を行ないその結果を第2表に示す。なお参考のために爆発圧接したクラッド材の引張性質を第2表に示す。

表2 部分爆発圧接のクラッド材、母材の引張試験

種別	引張強さ (kg/mm ²)	降伏点 (kg/mm ²)	伸び (%)
圧接前の母材 (鋼板 9mm t)	48.3	28.8	38.0
圧接後の母材 (鋼板 9mm t)	48.8	29.1	31.5
圧接前のクラッド材 (チタン1.5mm t)	41.6	—	44.1
圧接後のクラッド材 (チタン1.5mm t)	44.0	—	34.0

全面爆発圧接したチタンクラッド鋼板の引張性質を第3表に示す。

表3 全面爆発圧接したチタンクラッド鋼板の引張強さ

種別	板厚 (mm)	圧接前の引張強さ (kg/mm ²)	圧接後の引張強さ (kg/mm ²)	
			計算値	実測
母材 (鋼板)	9	43	42.8	48
クラッド材 (チタン)	1.5	42		

爆発圧接を行なっても母材の引張性質には、ほとんど影響は認められないが、合材は直接爆薬の衝撃圧を受けるので、加工硬化のために引張強さが高く、伸びが減少している程度である。

爆発接材のせん断強さは、ステンレスクラッド鋼板について、ASTMA 264—63 その試験方法が規定され、圧接性を評価されている。チタンクラッド鋼板についてもこの規定によつて行なっているが、われわれはチタンライニング機器としての使用上の観点から、また、製作工程中の事故などから考えて、Fig. 6に示すはく離強度試験方法で、評価するのが最も良いと考えた。この考え方は第4表に示す試験結果によるものである。

表4 はく離強度試験とせん断強度試験の結果の比較 (全面爆発圧接材の場合)

クラッド材	母材	はく離強さ		せん断強さ	
		(kg/mm ²)	破断位置	(kg/mm ²)	破断位置
チタン 3mm t	80 kg/mm ² 高張力鋼板 12mm t	45.5	圧接部	47.9以上	クラッド材

すなわち、チタンと高張力鋼板との全面クラッド鋼板の試験結果の一例であるが、はく離強度試験では圧接部よりはく離し、圧接部のはく離強さを求めることができるが、せん断強度試験では圧接部より破断せず、クラッド材より破断するので、圧接部の強さを試

験することができない。したがつてはく離強度試験で評価するのが、広範囲に圧接強さを測定できるので良い。

爆発圧接材の曲げ性質は、第5表に示すように欠陥は認められず良好である。

表 5 爆発圧接材の曲げ性質

種 別	曲げ加工	曲 げ 径	曲げ角度	曲げ状態
部 分 爆 発 圧 接 材 (チ タ ン mild steel クラッド材 1.5mm t 母材 9mm t)	表 曲 げ	2t	180°	欠陥なし
	裏 曲 げ	1t	180°	欠陥なし
全 面 爆 発 圧 接 材 (チ タ ン mild steel クラッド材 2mm t 母材 12mm t)	表 曲 げ	2t	180°	欠陥なし
	裏 曲 げ	1t	180°	欠陥なし

(注) 表曲げはクラッド材を外側にして、また裏曲げは母材を外側にして曲げる。

爆発圧接材の諸性質についてのべたが、化学装置の使用材料として、特に欠陥は認められない。

5. 爆発圧接によるチタンライニングの特徴

他のチタンライニング方法と比較すると、つぎに示すような利点がある。

① 部分爆発圧接は使用する形状に応じて圧接することができ、また構造物の状態でも圧接することができる。

② 全面爆発圧接は従来のロール法よりすぐれた圧接強度を有するチタンクラッド鋼板を製作し得る。

③ 苛酷な使用条件の化学装置にも十分適用し得る。

④ 製作時間が短縮し得る。

6. 爆発圧接によるライニングの品質管理と実施例
爆発圧接材を完全に成形加工を行なうため、また製品の品質を保証するためには、高いはく離強さを有することが必要である。

われわれは前述のごとく圧接性を評価するには、はく離強度試験が最も良いので、爆発圧接材はすべてはく離強度試験で管理している。また加工前後に超音波探傷器により加工によるはく離を認めないように検査している。今後の品質管理方法としては、超音波探傷器による判定で、その波形の良否と圧接性の関係を検討し、検査方法に適用しなければならない。

爆発圧接材は成形、溶接加工に必要な圧接強度を有するように管理している。また加工前後に、超音波探傷器によりはく離を認めないように検査している。

当社における爆発圧接は、すでに実験段階を終了し、実際の生産工程に組み入れて実施されている。実施例の代表的な化学装置を Photo. 9, 11 に示す。

本報告では当社で開発している爆発圧接方法を説明し、代表的な実施例を紹介したが、これら爆発圧接の特徴および経済性を列挙すると、

① 従来までの溶接技術では不可能であったチタンと鉄とが直接に接合できる。



Photo. 9 Titanium lining flash tower.

Body : titanium 1.5mm t, mild steel 9mm t
Partial bonding
End Plate : titanium 1.5mm t, mild steel 9mm t
whole surface bonding
Inside diameter: 3003mm
Length : 16530mm



Photo. 10 Titanium lining reactor

Body : titanium 2mm t, mild steel 3mm t
whole surface explosive bonding.
End plate : titanium 2mm t, mild steel 16mm t
whole surface explosive bonding.
Inside diameter : 2200mm
Length : 5300mm

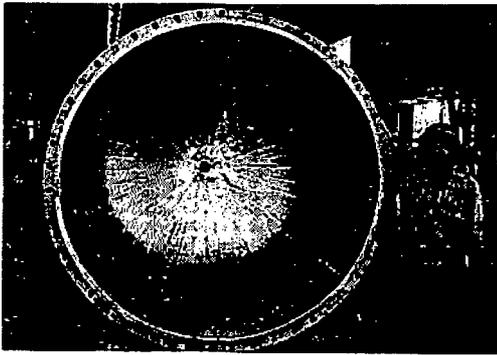


Photo. 11 Titanium lining reactor

titanium 1.5mm t, mild steel 9mm t
partial bonding
Inside diameter : 1750mm
Length : 1680mm

② 従来の爆発圧接では、若干の問題を残していた脆化層などの生成による強度の劣化を取除くことができたので、爆発圧接の本来の性能をいかに発揮することができた。

③ 他のライニング方法よりも製作費が安価である。

④ 爆発圧接後の成形加工が、一般の鋼板の場合とほとんど変わりなく容易に加工できる。

〔Ⅲ〕爆発成形によるライニングについて

化学装置が高温度や、高温度から低温度に急に下げられるようなきびしい条件のもとで、使用される場合には、従来のライニング容器は、ライナーを鋼殻に焼ばめする方法によって作られていた。爆発成形によるライニングは、この焼ばめ法に代りに利用される方法である。爆発成形によるライニングの場合、ライナーは爆発圧力を受け、そして鋼殻に対してやや強い塑性変形を受ける。そこで拡張された残存応力は、容器内の温度が変化したとき、鋼殻とライナーの間のギャップを生ずるのに抵抗となるのである。爆発によってライナーは、非常に密接に鋼殻に内張りされるが、金属学的な結合はおこらない。

Ⅲ チタンの爆発成形について

1. 爆発成形によるライニング方法

この場合、ライナーはあらかじめ通常の溶接方法で、鋼殻の内部形状に塑性加工をおこなす最小間隙で製作される。そして鋼殻に挿入され、シールの後ライナーと鋼殻のギャップ間の空気を、真空ポンプで排気する。

容器の形状に応じて形作られたライナーは Fig. 9 に示すようなものである。ライナーの溶接は良好でなければならない。鋼殻とライナーのギャップは、ライ

ナーを欠陥なしに成形し得る範囲にあるべきで、あまり大きなギャップでライナーを成形することは、不必要である。間隙はできるだけ小にした方が賢明である。一般にそれは、鋼殻の直径の数パーセントでよい。間隙が小さいとライナーおよびその溶接部の品質に何らの欠陥を生じない。ライナーと鋼殻とは、殻の口元で水密テープと粘土でシールし、その間の空気と真空ポンプで排気したのち、水をみだし、あるいは全体を池の中に沈める。色々な質、形状および量のうちから合理的に選ばれた爆薬を水中で電気雷管で爆発させて、ライナーを鋼殻にそつて成形しライニングする。

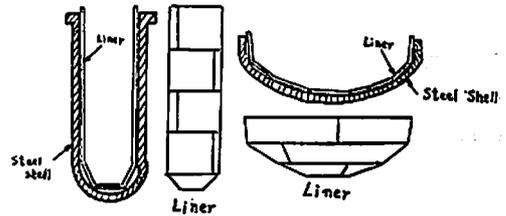


Fig. 9 Liner and steel shell

2. 爆発ライニングにおける水中圧力

爆発ライニングの媒体として、粉体やゲルが用いられることもあるが、水が効果と経済性から最も賞用される。爆薬の量 W は、ライナーの材質、板厚、ライナーの壁までの距離と同様に、結果を支配する重要な因子である。

3次元的水中圧力 PH は、次式に示すような関係がある。

$$PH = 1.7 \times 10^{-5} (W^{1/3})^{0.772} \cdot (W^{1/3}/R)^{-1.01} \quad (1)$$

ここで PH = 圧力 kg/cm^2

W = 火薬の重量

R = 火薬からライナーまでの距離 (cm)

爆発によっておこつた水中の圧力波の一例は、Photo. 12 に示す。ライナーを成形するエネルギーは、この波の全面積で示される。この動的水中圧力がかつた場合、金属の降伏圧力 P は、静的な降伏圧力よりも大である。($P = KP_0$) K をわれわれは爆成係数

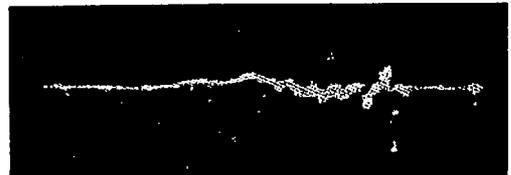


Photo. 12 Pressure wave in water

$W = 0.02kg$ $R = 20cm$

$PH = 230kg/cm^2$

Piezo gauge was used

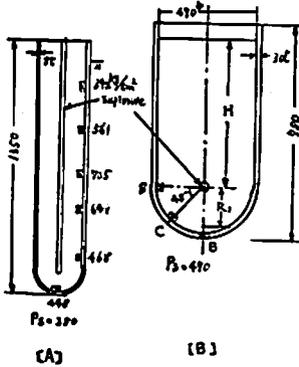


Fig. 10 Distribution of pressure in two vessels.

と呼んでいる。この値は薬量、ライナーの直径、板厚によつて変化するが、2~20の間にあつて、多くの実験データから予測することができる。しかし、シ

リンダーなどの空間的に制限された容器内においては、波の反射、衝突などのため現象はきわめて複雑である。そして Fig. 10 に示すように、長さが異なれば圧力分布も異なる。

例えば、Fig. 12 は円筒状容器内の圧力分布を示す。これらの不規則な効果は Fig. 11 によつて容易に理解される。Fig. 10 (B) 容器で薬量、装薬位置、水深を変えたときの底部の圧力を求めると、第6表のごとくである。

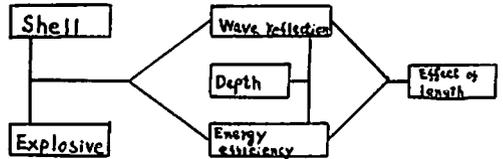


Fig. 11 Effect of length.

表6 容器底部の圧力

No.	薬量 (kg)	装薬位置 (R cm)	水深 (H cm)	圧力 (kc/cm ²)		
				B	S	C
1	0.025	25	23	847/(3.4)	969/(2.8)	1378/(4.1)
2	0.025	42	36	776/(5.7)	900/(2.6)	827/(2.4)
3	0.025	65	13	816/(12.1)	817/(2.4)	612/(1.8)
4	0.010*	30	48	299/(2.1)	600/(2.0)	258/(0.9)
5	0.015*	20	18	520/(1.9)	650/(2.5)	440/(1.7)
6	0.025*	20	18	620/(2.0)	724/(2.1)	860/(2.5)
7	0.025*	20	55	755/(3.5)	765/(2.3)	890/(2.6)
8	0.030*	40	34	940/(7.8)	620/(1.8)	—

注1) * : チタン板厚 5 mm ライナーを挿入。
 注2) () : 容器内の圧力と (1) 式で求めた圧力との比。

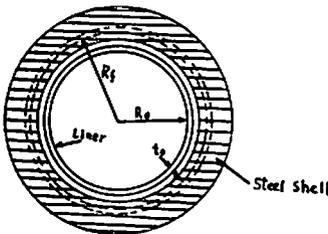


Fig. 12 Cross-section of liner and shell before operation

したがつて、爆発ライニングを行なうときは、この複雑な水中圧力分布の様相を正しく把握し、適切な爆薬を設置することによつて、これらをコントロールすることが大切である。もしも鋼殻の強度が小さすぎる場合は、これを補強しなければならない、このとき、

ライナーを使用する爆薬で、自由成形したときのライナーの内径 R_f は、鋼殻の内径よりも Fig. 12 に示すように少し大きく設定する。そしてこの R_f に相当する成形エネルギー E_f は、例えば、容器がシリンダーの場合、すでに知られている次式の公式によつて求められる。

$$E_f = 2\pi R_f \cdot l \cdot t_0 \left(\frac{K}{n+1} \right)^{-0.9} E_A (E_A^{n+1})$$

$$E_A = \frac{R_f}{R_0} - 1$$

E_A : 平均歪 t_0 : シリンダーのものと肉厚

K : 塑性係数 n : 指数 l : シリンダー長さ

したがつて、爆薬の全エネルギーを E_0 、鋼殻の破壊エネルギーを E_s とすれば、 $E_0 - E_f \leq E_s$ であることが必要であつて、それは Photo. 13 のごとく鋼殻

に貼られたストレインゲージでチェックされている。歪率は0.1%以内で、鋼殻は全く弾性限内に終止している。爆薬量の設定に当つては、エネルギーの収支と爆発圧力分布の両者を考慮して假定されなければならない。もしも、鋼殻の強度が小さすぎる場合は、それを補強しなければならない。Fig. 13 は鋼殻がシリンダーのときの補強の限界を、示すものである。

しかし、われわれは降伏圧力が 200kg/cm^2 以上ならば補強なしに行なうことができる。Photo. 14 は補強が行なわれた状況を示すものである。Photo. 14 の補強に用いられた物質は、鉄筋コンクリートである。

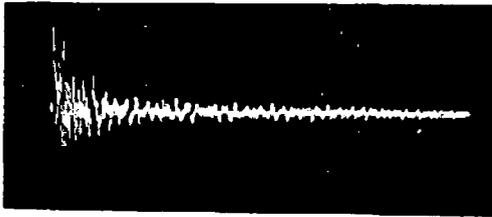


Photo. 13 Result of testing with strain gauge, which was done at a middle side of the vessel B in Fig. 8.

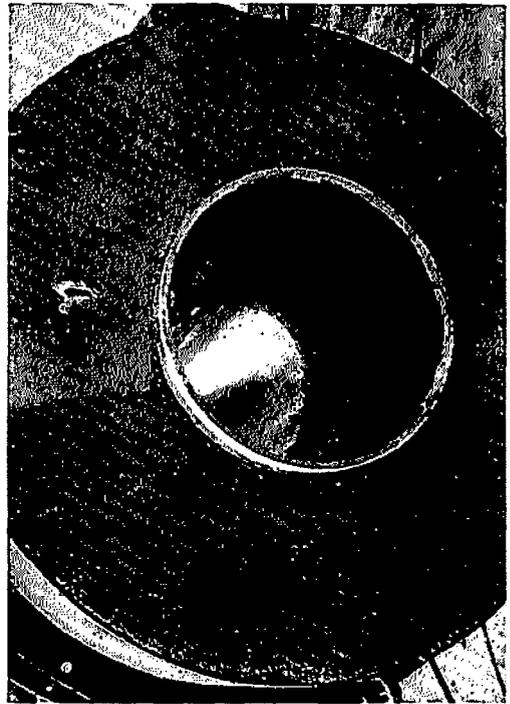


Photo. 14 Aspect of reinforcement. Steel shell is cylinder with 7mm thick, 400mm inside diameter and 400 mm inside diameter and 1,000 mm length.

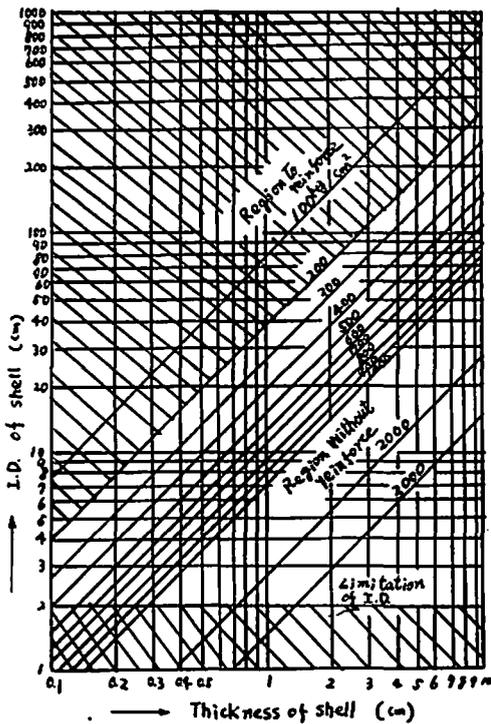


Fig. 13 Limitation of reinforcement.

3. 爆発成形によるライニングの品質と実際

ライナーの溶接部分は、欠陥がないことが必要である。それ故、不活性ガスと特殊な治具を用いて、特に空気中の酸素と親和性が強いチタンでの場合に、脆化などの欠陥を防止する上に好結果を得ている。さらに溶接部分に局部応力が発生しないように、注意を払う必要がある。この理由のために、Fig. 9 に示すようにライナーは、多角形円錐状に成形され、溶接線は多角円錐の稜線に位置することを避ける。溶接後はX線透過試験および染色探傷試験を行なつて焼鈍される。爆薬の量は、爆発に当つて弾性限界内に終止するように注意深く決定され、鋼殻の外側面に貼られたストレインゲージでチェックされる。

現在われわれは、この新しい技術で多くの実際製品を製作し、そしてこれらの製品は、すべて何らの事故も発生せず稼動している。鋼殻の形としては、筒板、底なしシリンダー、底つきシリンダー、半球などが一般に供せられる。しかし大型であるほど有効である。高速変形速度で行なわれる爆発成形ライニングは、ライナーを鋼殻に対して少ないスプリングバックで成形する。

われわれはチタンライナーの厚み 10mm 直径および長さ 3m 以上の大きな実施例を有している。代表的な実施例を Photo. 15~18 写真に示す。

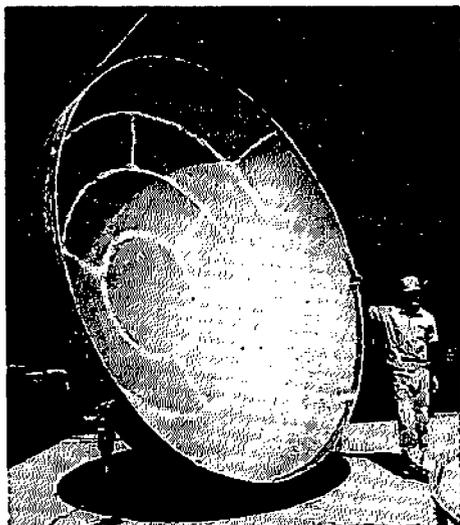


Photo. 15 Explosive lined end plate. Liner is titanium 2mm thick. shell is steel 12mm thick.

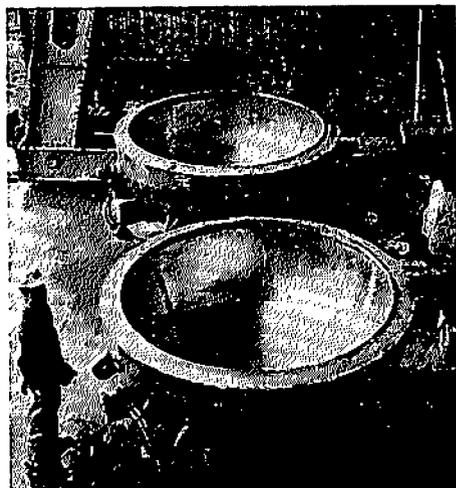


Photo. 17 Explosive lined hemisphere. Shell is steel 110mm thick and 1.9m in diameter.



← Photo. 16 Explosive lined cylinder. Liner is titanium 4mm thick. Shell is steel 100mm thick.



Photo. 18 Titanium liner of phot. 17
5mm thick

講演ずみ International Conference on titanium (London) 21~24 May 1968.

On the Explosive Bonding and Forming of Titanium

by S. Inomata, A. Goto, K. Yano, M. Tsuchimoto,
S. Shibata, T. Fujii, T. Sakurai and M. Kanamoto

The theory of the explosive working, a process in which working is achieved by means of powerful pressure developed by the detonation of the explosive, is commercially applied to three metallurgical fields—hardening, forming, and bonding. At Kobe Steel the explosive bonding and explosive forming methods are applied in titanium linings for chemical equipments. Explosive bonding is divided into partial explosive bonding and whole-surface explosive bonding. The partial explosive bonding was introduced to us by Asahi Chemical Industry Co. Ltd.

Kobe Steel developed a new technique of partial explosive bonding and also introduced whole surface-explosive bonding. Kobe Steel and Nippon Oils and Fats Co. Ltd. jointly developed a technique of explosive form lining replacing the conventional press working in the forming of titanium lined end plates.

(Kobe Steel Ltd. Okubo Factory, Akashi City)