ハブ (HABW) 爆発圧接法

佐々木 秀雄* 富安 富士男*

HABW Explosive Welding
— A Newly Developed Metal Lining Method —

Hideo SASAKI, Fujio TOMIYASU

We have succeeded in fabrication of metal lined chemical equipments using the HABW explosive welding process, instead of the conventionals such as fusion welding or using clad plates.

By means of HABW process, metal plates and sheets can be welded in spot type or in seam type. The superior features in this new method are indicated that this process enables to join not only several corrosion resistant metal to ferrous metal but also any metal to another, e. g. Al, Cu, Ni, Ti, Zr, Ta, etc.

In this paper, the properties of explosively welded metal and the manufacturing process of metal lined equipments are presented, and the merits and applications of this method are discussed.

1. 緒 言

高エネルギー速度加工法に属する新しい金属加工法が最近の数年の間で急激に注目されるようになった。高エネルギー速度加工法にはエネルギー源や伝達方法の差異によって爆発加工、放電加工、電磁成形、ダイナバックなどの種類があるが、なかでも爆発加工法は最も広く研究され、すでに一部実用の段階に達している。この爆発加工法はさらに目的や形態によって (1) 成形, (2) 圧接, (3) 圧着, (4) 拡管, (5) 圧入, (6) 切断, (7) 穿孔, (8) 打鋌, (9) 彫刻, (10) 表面硬化, (11) 粉末圧搾, (12) 高速材料試験などの多様に及び、その応用範囲は無限に拡大されつつある。しかしながら成形法、溶接法、切断法など従来からの各種金属加工技術も非常に高い水準まで進歩発達しており、またそれらに使用されている機械装置はすでに償却も終わって稼働している場合が多い。このような現状において新しい金属加工法を採用するためには前提となる必要条件として、(1) 従来技術では不可能なものを可能にする、(2) 従来より優れた品質が得られる、(3) 従来より速く安くできる、などが考慮され、これらの条件を具備する新技術の開発が切望されている。

以上のような観点に立って筆者らは爆発圧接法の研究に着手し、化学機械装置に使用される耐食耐熱ライニング機器の製作施工法として独特の「ハブ (HABW) 爆発圧接法」の開発実用化に成功した。

ハブ爆発圧接法とは爆薬が爆発する際に発生する強力

な衝撃圧力を利用する一種の冷間圧接法で、金属板を目的に応じて点状あるいは線状に部分的に接合することを中心とした画期的な施工方法であり、あらゆる組合わせの異種金属間の接合が可能であることおよび各種金属の極薄板のライニングに最適であるなど他に類のない利点を備えている。

本報告ではハブ爆接法の概要、爆接部の性能ならびにライニング施工例などについて紹介するものである。

2. ハブ爆発圧接法

2.1 一般の爆発圧接法

本研究において開発したハブ爆発圧接法について述べる前に内外の文献に見られる一般の爆発圧接について簡単に説明する。爆発圧接法は1960年ごろから米国などで基礎的な研究や応用面に関する検討がなされているがその接合原理についてはまだ本質的に解明されていない。

図1 一般の爆発圧接法

* (株) 日立製作所笠戸工場

二枚の金属板を接合させるには大別して「傾斜法」と「平行法」があり、それらの方法の概略を図1に示す。傾斜法では二枚の金属板をある一定の角度を保たせてその上に板状の爆薬を設置し、そこで左端から起爆すると爆轟時の衝撃圧によって(c)に図示するような変形をしながら互いに高速度で衝突して圧接される。平行法では金属板間に微小な間隙を設けて平行に保持し、同様に爆薬をセットして一端から爆轟させると(d)に示すようにこの場合もある傾斜角をもって二枚の金属板は衝突するようになる。

このように金属板同士がその間にある一定の角度をもって高速度高圧力で衝突する場合、接合面側の表面層は粘性流体的な挙動をして著しい塑性流動を起こし、これが後述する爆発圧接独特のさざ波状の変形となってジッパーのような強固なかみ合いを形成する。この現象は「金属ジェット」と呼ばれており、その作用により接合面の酸化皮膜や汚染異物は除去されて新鮮な金属面が露出し、さらにジェットの運動エネルギーおよび境界面や材料内部の摩擦、介在空気の圧縮などによる温度上昇に助長されて再結晶、相互拡散あるいは熔融などの現象が起こり、接合境界面に完全な金属結合が得られるものと考えられる。爆発圧接の接合機構については十分な確証が得られていないが、いずれにしても冷間圧接、超音波溶接、摩擦溶接などの方法と部分的に共通あるいは類似した点もあり、この理論的な解明は今後の興味ある研究課題である。

以上に述べた爆発圧接法は金属板の全面を接合しようとするもので、すでに米国や日本の特定の会社では実用の段階に達している模様であるが、大寸法のクラッド板を製造するには多量の爆薬を消費し、施工場所や価格などの面で制約が多い。そこで作業が簡便でしかも爆薬使用量を少なくして市街地の工場でも安全かつ短時間に施工できるとすれば、金属ライニング施工法として有効であることに着眼し、金属板を部分的に点状あるいは線状に接合する方法を研究することにした。

2.2 点爆接法

ハブ爆発圧接法には前述のように点爆接と線爆接の二種類の方法がある。すなわち一般の爆発圧接法がクラッド鋼板の製造に適用されるように「面」を対象としているのに対して、ハブ爆接法は「点」と「線」で部分的に接合するところが最大の特徴である。

まず点爆接では図2に示すような特殊電気雷管を使用し、これを「ハブキャップ」と呼んでいる。ハブキャップの構造はプラスチック製の薬筒内に適量の爆薬を圧入したもので、頭部に付属している導線を発破器に結線し

図2 点爆接法

図3 点爆接の接合面

て通電すると起爆するような仕掛けになっている。

施工方法はあらかじめ接合しようとする部分を研磨した金属板を二枚重ねにしてその上にハブキャップを立てる。多点を一斉に行なう場合は点爆用の導線を直列に結線して発破器へ連結すればよい。爆発音は単発で猟銃の発射音程度であり、多点を斉発する場合はかなり大きな衝撃音を発するが、10m以上離れた位置では飛散物もなくきわめて安全である。爆発後は表面に球面状の圧痕を生じ、その直下の部分で二枚の金属板は接合している。接合部をはく離して観察すると図3の写真に示すように周辺部のみが環状に接合して円の中央部は密着するのみで接合していない。環状の接合部には爆発圧接独特のさざ波状の変形が同心円を描いて多数形成されているのが認められる。

2.3 線爆接法

線爆接には図4に示す特殊導爆線「ハブコード」を使用する。ハブコードの爆薬はひも状に細長く圧伸したもので自由な形状に屈曲できるように柔軟性を持たせてあり、接合しようとする金属板の材質や板厚に応じて爆薬量を調整してある。さらに爆薬の底部には金属板の損傷を防ぐため塩化ビニールの帯板を緩衝材として接着してある。

図4 線爆接法

図5 線爆接の接合面

線爆接の準備は接合しようとする金属板を重ね合わせ、その上に目的に応じてハブコードを曲げたり継ぎ合わせたり分岐させたりして設置する。ハブコードは取扱いを安全にするため熱や衝撃に対して安定な爆薬を使っているが、それ自体に点爆装置を備えていないので起爆には電気雷管をその一端に装置して行なう必要がある。爆発は毎秒 4000mm 程度の高速で伝播し、二枚の金属板はコードの直下の部分が帯状に瞬時にして圧接される。表面に圧痕を生じることは点爆接と同様であるが、接合面はほぼ爆薬と等しい幅で帯状に接合し、そのはく離面は図5に示すように爆接線に直角方向にさざ波状の変形が認められる。

3. 爆接部の諸性質

3.1 爆接の諸因子

ハブ爆発圧接法において爆接結果に影響を及ぼす因子としては、使用する爆薬の種類、性質、量、形状ならびに緩衝材の材質、寸法などがあり、一方接合される金属板については材質、板厚、形状、板の間隙、表面仕上、支持方法などが考えられ、さらにこれら以外にも多くの要因が存在すると思われる。しかしここでは一例としてステンレス板 (SUS-27) 板厚 1mm と軟鋼板 (SS-41) 板厚 9mm とを線爆接した場合の実験結果について述べる。

SUS-27, 1 mm 厚 + SS-41, 9 mm 厚

図6 線爆接における諸要因の主効果

図6(a)~(e)はそれぞれ爆薬量、緩衝材の厚み、板間隙、ステンレス板の表面処理、軟鋼板のグラインダ研摩の5要因をとり上げ、それらが線爆接部の単位長さ当りのはく離強度に及ぼす影響を表わしたものである。この実験の範囲では爆薬量や板間隙が増すほどならびに緩衝材が薄くなるほどはく離強度は増加しているが、しかし他面では圧痕が過大になったり外観が悪くなったりするので一概に強度のみから適正条件を判定することは困難である。一方表面仕上に関しては綿密に行なうほど良好な結果が得られる傾向にあるが、軟鋼に対しては普通のあらさのグラインダ研摩で、耐食ライニング板については油や汚れを洗浄する程度で十分であると考えられる。

以上のような実験を各種の材質や板厚に対して数多く実施して、爆接部の強度、組織、外観およびその他の性質から総括的に判断して適正な爆接条件を選定しているが、一般的な傾向として爆薬量はライニング板の板厚および強度にほぼ比例して多くなり、板間隙はライニング板の板厚の 1/2 程度が最適のようである。緩衝材はゴムまたは塩化ビニールを使用した場合 1~2mm の厚さが標準となるが、特にアルミニウムのような柔かい材料に対しては厚いものを使用した方がよい。

なお点爆接についても上に述べた線爆接とほぼ類似した傾向を示す。

3.2 接合強度

表1は各種材料と軟鋼とを組合わせて点爆接した試料に対して、接合面に平行および直角に引張荷重を負荷した点爆接部のせん断試験およびはく離試験の結果を表わす。せん断試験ではいずれの材質板厚についても抵抗溶接に用いられる規格値をはるかに上回る良好な強度を有することが認められ、また変動率も 10~15% 程度で再現性が優れていることを示している。

一方、はく離試験ではせん断の 1/4 程度に相当する値

表 1 点爆接部の接合強度

上 板		下 板		せん断荷重 (kg/点)	はく離荷重 (kg/点)
材 質	板 厚 (mm)	材 質	板 厚 (mm)		
ス テ ン レ ス (SUS-27)	0.3	軟 鋼 (SS-41)	6.0	763	123
	0.5		〃	1215	210
	1.0		9.0	2016	351
	2.0		〃	2205	353
チ タ ン (ST-40)	1.0		〃	1370	—
アルミニウム (AlP 3-0)	〃		〃	487	—
銅 (CuP 2-0)	〃		〃	1096	—
アームスブロンズ (ABP 1-0)	〃		〃	1047	—

表 2 線爆接部の接合強度

上 板		下 板		せん断荷重 (kg/mm)	はく離荷重 (kg/mm)
材 質	板 厚 (mm)	材 質	板 厚 (mm)		
SUS-27	0.3	SUS-27	0.3	20.5	13.5
		SS-41	9.0	21.2	15.6
	0.5	SS-41	9.0	35.4	—
		SUS-27	1.0	68.0	35.6
	1.0	SS-41	9.0	71.1	39.8
	1.5	SS-41	9.0	—	42.8
ST-40	2.0	SUS-27	2.0	—	38.5
		SS-41	9.0	—	37.7
	0.5	SS-41	9.0	19.8	—
		ST-40	1.0	40.2	16.2
	1.0	SS-41	9.0	42.1	18.6
	1.5	SS-41	1.0	—	20.1
AlP 3-0	2.0	SS-41	1.0	—	28.1
		AlP 3-0	1.0	12.3	7.3
	0.5	SS-41	9.0	11.9	7.5
		AlP 3-0	1.5	—	8.5
	1.5	AlP 3-0	2.0	—	16.2
		SS-41	9.0	—	20.2
CuP 2-0	1.0	CuP 2-0	1.0	25.2	15.1
		SS-41	9.0	23.5	29.3
ABP 1-0	1.0	ABP 1-0	1.0	49.0	19.3
		SS-41	9.0	50.3	24.4

しか得られないが、接合末端部のノッチに応力集中を生ずるためである。

つぎに線爆接についてはステンレス、チタン、銅、アームスブロンズ、アルミニウムの各種板厚に対するせん断およびはく離試験の結果を表 2 に示す。強度値はいずれも爆接線の単位長さ当りの破断荷重すなわち kg/mm の単位で表わしてあるが、ほとんど大部分の試料が接合部から離れた母材部分で破断するので真の接合強度はさらにこれを上回る信頼度の高いものである。

これらの結果から材質的に多少難易の差はあるが、圧延材料であればあらゆる種類の金属板を接合できると言っても過言ではないと考えられる。

異種金属間の接合部では温度の影響を考慮せねばならないが、そこで代表的にステンレスと軟鋼との線爆接継手について常温から 900°C までの範囲で引張せん断試験を行なった。その結果は図 7 に示すようにいずれも接合部から離れたステンレス側の母材部分で破断してステンレス素材の試験結果と同等の値を示している。

さらに熱膨張差のある異種金属接合部が加熱冷却の繰返しを受ける場合について検討したが、ステンレスと軟鋼の線爆接部を常温から 500°C までならびにチタンと軟鋼を常温から 400°C まで最高 5000 回繰返した後

SUS-27, 1 mm 厚 + SS-41, 9 mm 厚

図7 線爆接継手の高温引張試験結果

SUS+27, 1mm 厚 + SS-41, 9mm 厚

図8 線爆接継手の疲労試験結果

のせん断およびはく離試験では接合強度の劣化は認められなかった。

図8は線爆接継手の疲れ強さをステンレスと軟鋼の継手について検討したもので、応力比0.2で繰返し引張荷重を負荷してせん断ならびにはく離した場合のSN曲線である。破断は爆接部の末端から起こり、せん断の場合は板厚方向に、はく離の場合は接合面に沿って伝播するが、図から明らかなようにステンレス素材の結果と比較するとかなり低い値になっている。しかしこの種の重ね継手では接合末端部に応力集中を生じるため、材質的な劣化に起因するとは考えられない。

3.3 爆接部の組織

図9は爆接部の代表的な顕微鏡写真で、ステンレスおよびチタンを軟鋼に線爆接した試料の接合断面を観察したものである。他の金属についても共通して境界面は特徴あるさざ波状の塑性変形を生じてジッパーのように強固にかみ合っており、またその波形の頂部あるいは底部には断続して溶融した合金層が介在している場合がある。この合金層は十分な延性が期待できるような金属の組み合わせでは問題にしくなくてもよいが、たとえばチタン

(a) ステンレス+軟鋼

(b) チタン+軟鋼

図9 爆接部の顕微鏡組織

図10 線爆接部の板厚方向のかたさ分布

と鉄などその合金がぜい弱になる場合は多量に合金層を生じないように爆接の条件を選定しなければならない。

合金を介在せずに直接両金属が接触している部分も顕微鏡では確認できないが完全な金属結合を形成している模様で、特に同種の金属を爆接した場合結晶的に一体化して元の境界が残存しない部分も認められる。

境界面を中心として両側約0.1mmの範囲では圧延素材の層状組織が乱れて著しい塑性流動を生じているが、その他の部分では熱影響はもちろん受けておらず素材のままの状態が保たれ、組織的变化や亀裂空洞などの欠陥の発生も皆無である。

これらの周期的なさざ波状変形の生成過程や溶融ジェットの発生機構については Abrahamson や Cowan などの詳細な報告もなされているが、まだ定量的に説明される段階には達しておらず今後の興味ある研究課題であると考えられる。

つぎに各種金属を軟鋼に線爆接した場合の接合部断面の板厚方向のかたさ分布を調査した。図10にその結果を示すが、いずれも上板表面では素材と同程度かあるいはわずかに高いかたさを示し、接合境界に近づくにしたがってしだいかたさを増して境界面で最高となる。特に加工硬化性が著しいステンレスでは素材に比べ約150HV硬化しているが、他の金属では硬化の度合はわずかである。これらのかたさの上昇は普通の冷間加工を受けた場合と同様に取扱うことができるとすれば、上板表面の加工度は5%程度と推定される。

3.4 爆接部の耐食性

表3は代表的な耐食材料としてステンレス、チタン、銅、アームスブロンズに対する腐食試験の結果を示したものである。試験方法はそれぞれ素材および線爆接部より採取した試料を沸騰液中に6h浸漬して腐食重量減を測定した。この結果から明らかとなるように爆接部の表面は熱影響や合金層の生成による劣化がないので素材とまったく同等の良好な性能を有することが認められる。

またステンレスを耐食の用途に使用する場合応力腐食に対する特性が問題とされる。爆接部の応力腐食割れ感度に関する検討結果を図11に示す。すなわち塩化マグネシウム ($MgCl_2$) 沸騰液 ($153^\circ C$) 中に線爆接試料を浸漬して微少な割れの発生時間を測定し、それを素材に外力を付与した場合の結果と比較した。割れ発生時間から推定するとハブ爆接部は2~5kg/mm²程度の引張応力を負荷されている素材に等しい割れ感度を示しており、この応力値は通常の溶接で問題にする値よりかなり低いところから、特別に応力除去のための処理を必要としないものと判定される。

以上述べた実験結果を総合してハブ爆接部は強度、組織、耐食性ともに非常に優れた性能を有していることが

明白となり、これを化学機械の耐食金属ライニング施工法として適用する場合、温度、圧力、雰囲気などの設計使用条件に対してかなり広範囲な用途の実用に十分供しうるものと考えられる。

4. ハブ法による金属ライニング

4.1 基本的な施工方法

ハブ爆接法による化学機械耐食機器の金属ライニング施工は、ライニング板の材質と板厚および構造物の寸法形状や使用条件に応じて変化し、最も適正な方法を採用しなければならないが、ハブ爆発圧接に必要な作業の内容は基本的に

- (1) 母板の表面仕上 (爆接される部分のみグラインダーで表面のスケールを除去して清浄に保つ)
- (2) ライニング板の表面処理 (研磨紙で簡単にスケールや汚れを除去して脱脂する)
- (3) 母板とライニング板の組合わせ (爆発圧によって生ずるライニング板のひずみを少なくするため厳密に重ね合わせる)
- (4) 爆薬設置および発破 (ライニング板上にハブキャップあるいはハブコードを設置して発破器に結線し爆発させる)
- (5) 洗浄 (爆薬その他の燃焼残渣が付着しているので適当な溶剤で清掃する。ひずみ取りや熱処理などは不必要)

などによって構成され、非常に簡便かつ安全に特別な熟練を必要とせず実施できる。

また本法によって各種の構造物を製作する方法を大別すると

- (1) 平板の状態ではライニング板と母板とを爆接して合わせ板を作り、その後種々の形状に成形して組立てる

表3 ハブ爆接部の耐食性

材 質 (板厚: 1 mm)	腐 食 液 (沸騰状態)	腐 食 度 (mm/y)	
		素 材	線爆接部
ス テ ン レ ス (SUS-27)	5% H_2SO_4	0.085	0.095
	65% HNO_3	0.63	0.56
チ タ ン (ST-40)	5% H_2SO_4	0.092	0.097
	65% HNO_3	0.31	0.28
銅 (CuP2-0)	1% H_2SO_4	0.99	0.81
	1% HCl	1.27	1.33
アームスブロンズ (ABP1-0)	1% H_2SO_4	0.105	0.150
	1% HCl	0.65	0.63

図11 線爆接部の応力腐食割れ感度

方法

(2) 母板のみ立体構造物に成形組立てを完了した後、ライニング板を組合わせて爆接する方法

の二種類に別けられ、またこれらを併用する場合もある。

前者の方法では爆接作業を平板の状態で行なうので作業が容易であり、その後の成形組立は従来のクラッド鋼を使用する場合とまったく同様であるが、合わせ板は一般に熱間加工を適用しがたいので爆接後の成形は冷間加工に限定される。したがってたとえば鏡板のプレス作業では大きなプレス能力を必要とする。また成形加工中にライニング板にしわを生じないようにするため爆接のピッチを小さくしなければならない。一般にライニング板が薄いほどしわが生じやすいため、この方法は板厚 1mm 以上のライニングに限られる。

一方後者の方法は全面爆接法では実施できないハブ法の大きな特色の一つであって、ライニング板が非常に薄い場合や大径の円筒内面の場合などではライニング板をあらかじめ成形しなくても平板のまま母板の形状に合致させることができるので、母板のみ単独で成形組立が可能となり、また既成の構造物にも適用できるので非常に簡便で有利となる。

ライニング板と母板との接合は点ならびに線爆接のいずれでも施工可能で、一般に点爆接の場合は格子状に、

図12 継手部の施工方法

線爆接の場合は平行に適当なピッチを定めて接合する。この間隔は機器の形状或使用条件によって異なるが、通常 100~300mm 程度である。

つぎにライニング板および母板の継手部の基本的な施工方法を図12に示す。図のように継手部分は線爆接で行なうことになるが、本法では重ね継ぎのみに制約されるので、末端部の微少な段違いや間隙の存在が問題にされる場合には、TIG（ヘリアー）溶接法を併用して隅内部を溶接して内面を平滑にするとともに、漏洩に対する完全を期している。

そのほかフランジ面、ノズル・マンホールおよび各種内部装置の取付部

ST-40, 1mm 厚
図13 チタンライニング容器

SUS-27, 0.5mm 厚

図14 ステンレスライニング貯槽

SUS-27, 0.5mm 厚

図16 ステンレスライニングタンク車内部

CuP 2-0, 1mm 厚

図15 銅ライニング熱交換器

爆発の瞬間

図17 タンク車ハブ施工状況

分など複雑な構造部分や機械加工面ではクラッド板の使用や肉盛溶接の採用など従来からの方法を適材適所に併用して、ハブ法の適用しがたい部分を補うようにしている。

4.2 ライニング実施例

図13は板厚 1mm のチタンをライニングした压力容器で、成形組立を完了した軟鋼母板に点爆接および線爆接を併用している。従来チタンライニングにはビス止め後 TIG 溶接する方法が採用されていたが、それに比べると作業がスピード化され、また性能の高いものが得られる。

図14は板厚 0.5mm のステンレス板によってライニングした貯槽で、ここでは線爆接のみで施工している。溶融溶接法による場合、母板による合金成分の稀釈があるので最低 2mm 以上の板厚を必要としていたが、ハブ法はこのような極薄板に適するところから材料費が大幅に節減できる。

つぎに図15は板厚 1mm の銅板をライニングした熱交換器の胴体を示す。内容液の残留を避けるため約 500mm 幅のコイル材を長手軸方向に使用して円筒方向の継手が皆無であることが一つの特色である。

最後に図16および図17は板厚 0.5mm のステンレス板をライニングした 30 ㏩ 積荷性ソーダタンク車の内部およびハブ爆接施工における爆発の瞬間の状況を示したものである。ハブ法では板継ぎをできるだけ少なくして広い面積を同時に施工する方が能率的であり、この場合幅 1 m、長さ 7 m の面積を一度に実施したが、かなり多量の爆薬を消費するので、写真に示すような防音壁によって衝撃音による障害を防止する必要を生ずる。

以上二三の実施例を紹介したが、ハブ爆接法は開発されてまだ日が浅いためライニング機器としても限られた分野でしか実用に供されていない。さらに今後の技術改善や能率向上により本法の適用範囲は拡大するであろうが、現在すでに日立製作所では十数基の製品を納入して、それぞれの運転条件においてハブ法の優れた性能を十分に発揮している。

5. 結 言

以上本報では「ハブ爆発圧接法」の概要を紹介し、爆接部の性能やライニング施工法について述べたが、ハブ法は従来の溶融溶接法には見られない優れた特色を多くもっていることが認められる。ここでその特色を要約して列挙すると

- 1) 接合部の強度、耐食性などの性能が良好である。
- 2) チタン、ジルコニウム、タンタル、アルミニウム、銅、ニッケルなどの非鉄金属やその合金と軟鋼、

高張力鋼などの構造材との直接接合ができる。

3) あらゆる金属の極薄板間および極薄板対厚板の接合に適す。

4) 熱影響や合金層の生成による劣化がなく、ひずみ取りや熱処理などの後処理が不要である。

5) 複雑な形状の構造物にも施工でき、簡便で作業性が優れている。

6) 火薬消費量が少ないので場所的制約を受けず、また特別な装置や設備を必要としない。

7) 材料費の節減や能率の向上など経済的な効果も大きい。

などである。しかしハブ爆発圧接法は従来から行なわれているあらゆる溶接作業に代わるべきものではなく、これらの特色を生かした用途に適用して初めてその効果を発揮する。このような観点から本法は化学機械における金属ライニングに最も適すると考えられて開発が進められた。

したがって石油化学、ガス化学、化学繊維、合成樹脂、ソーダ、肥料、薬品などの化学工業で使われる各種耐食機器のライニング法として、また薬品、食品、発酵、醸造など容器類の防錆用薄板ライニング法として性能の向上、価格の低減に大きな効果を有する。

さらにライニングの用途以外にも車両、航空機、船舶、電子工業、原子力、建築などの諸工業の広い分野にわたってその応用面が予想され、将来の発展が期待される。

(1965, 3月20日受付)

参 考 文 献

- 1) W. W. Wood : High Energy Forming Methods, Tool & Mfg. engr., June (1960) 93.
- 2) J. Pearson : Metal Working with Explosive, J. Inst. Metal, Sep. (1960) 673.
- 3) J. Pearson : Explosive Welding, ASTM Technical Paper, SP 60-159 (1960).
- 4) D. E. Davenport et al. : Explosive Welding, ASTM Technical Paper, SP 60-161 (1960).
- 5) D. E. Davenport : Explosive Welding, ASTM Technical Paper, SP 62-77 (1962).
- 6) G. A. Hayes et al. : Metallurgical Properties of some Explosively Welded Metals, Nav. Weps. Report, 7925, June (1962).
- 7) G. R. Abrahamson : Permanent Periodic Surface Deformations due to a Traveling Jet, J. Appl. Mech., Dec. (1961) 519.
- 8) G. R. Cowan, A. H. Holtzman : Flow Configurations in Colliding Plates, J. Appl. Phys., Apr. (1963) 928.

9) 亀石, 富安: 新しい金属ライニング法ハブ爆発圧
接について, ケミカルエンジニアリング, (昭39-

2) 26.

10) 東島: 爆発溶接, 高圧力, (昭39-6) 37.