

爆発溶接部諸性質に関する基礎的研究

渡辺 正紀* ・村上 善一**・河田 俊雄***
鉄 豊造****・奥野 泰生* ・奥田 憲騎***

1. 緒 言

爆発溶接とは爆薬のもつ爆発エネルギーを用いて金属同志を加速衝突させて、発生する強大な圧力によって衝突面を圧接ないしは融接する接合方法であることは言を俣たない。

この接合法によれば従来製作が困難とされて来た各種広範囲の金属の合金の製作および容器類の内張など——たとえば、チタン、タンタル、ジルコニウムなどの軟鋼板上へのクラッドその他——が可能となり、すでに工業的な利用面でその実用範囲を拡大しつつある。

しかし、爆発溶接は超高压下の高速瞬間現象であり多くの未知の現象をとまう。また実験的には爆薬のもつ諸種の特性も加わり、その方法に多くの困難と制約を伴ない、爆接に関する研究実験は内外ともに比較的少ないのは残念である。爆接現象についての説明は云わば今後の課題であると云つても過言ではない。

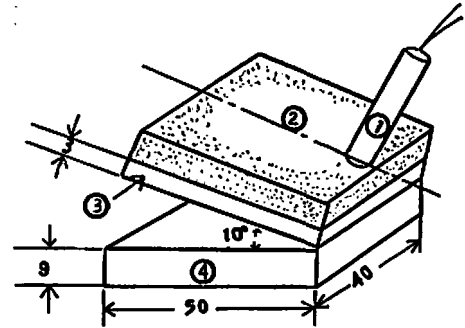
本報は一連の系統的な研究の初期段階として爆接部の基礎的諸性質をうることを目的とした実験結果の一部の報告であり、その内容は次の通りである。

- 1) 爆薬量と爆接部波形および剝離強度の相互関係
- 2) 爆接材の初期設置角度と波形および剝離強度との関係
- 3) 母材硬度と剝離強度との関係
- 4) 爆接部の顕微鏡組織および熱処理による変化
- 5) その他

2. 実験方法

2.1 爆接方法および試験片の形状寸法

爆接方法および試験片の形状寸法は Fig. 1 に示す。すなわち、本実験では初期設置角度 10° の有角法を採用し、爆薬はフライヤー・プレート (Flyer plate) 上に全面に設置し、一端より起爆する方法をとった。なお使用爆薬は HAB コード No. 128 であり、起爆雷



1: detonator 2: explosive 3: stainless steel or mild steel 4: mild steel

Fig. 1 Method of explosive welding and dimension of specimen

管は HAB キップである。

試験片の形状・寸法は図に示すとおりであるが、爆接面はフライヤー・プレートおよび母材 (base metal) ともエンドレスペーパーにて研磨し表面状態を一定に保つように心掛けた。

2.2 使用試験材料

使用した試験材は、母材はすべて同一銘柄の SS 41

Table 1 Chemical composition of material used (a) flyer plate

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
Mild steel	0.13	0.02	0.45	0.016	0.048		
Austenite stainless steel	0.07	0.56	1.37	0.016	0.008	8.79	18.58
"	0.07	0.49	1.48	0.022	0.006	9.00	19.28

(b) base metal

	C	Si	Mn	P	S
Mild steel	0.24	0.02	0.52	0.026	0.019

昭和42年11月2日受理

- * 大阪大学工学部
- ** 愛媛大学工学部
- *** 大府府立大学工学部
- **** 大阪大学工学部

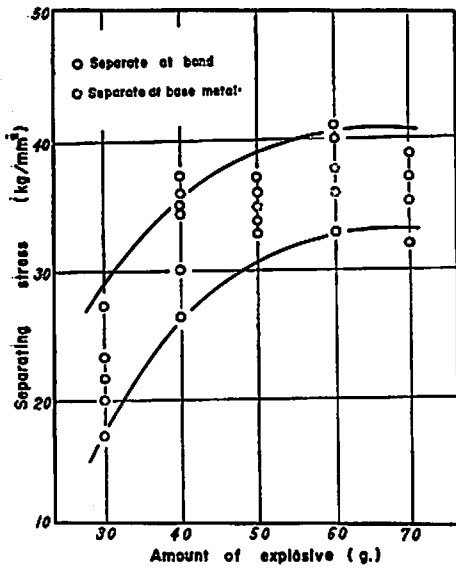


Fig. 4 Relation between separating stress and amount of explosive (mild steel-mild steel explosive welding)

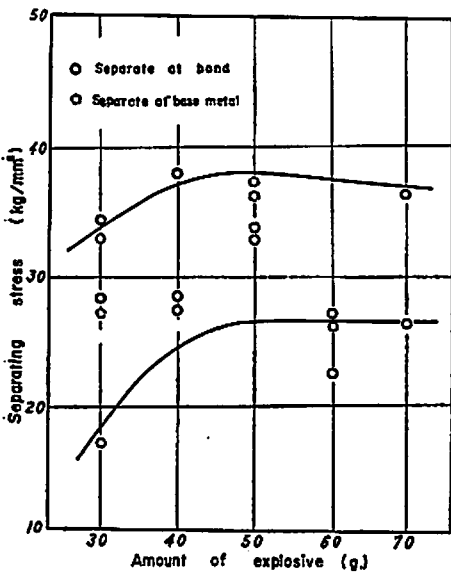


Fig. 5 Relation between separating stress and amount of explosive (stainless steel-mild steel explosive welding)

が、爆接面の波の荒さに関聯性をもつのではないかと考えられる。

すなわち、Photo. 2 および Photo. 3 はそれぞれステンレス鋼-軟鋼、軟鋼-軟鋼爆接材の剝離試験片の破断面の代表例を示したものであるが、これらの写真から分かるように同一爆薬量の場合、波の粗さの粗らい程剝離強度の減少する傾向が見られる。(たとえば Photo. 2 4B→4C→4A)。また、爆薬量の相

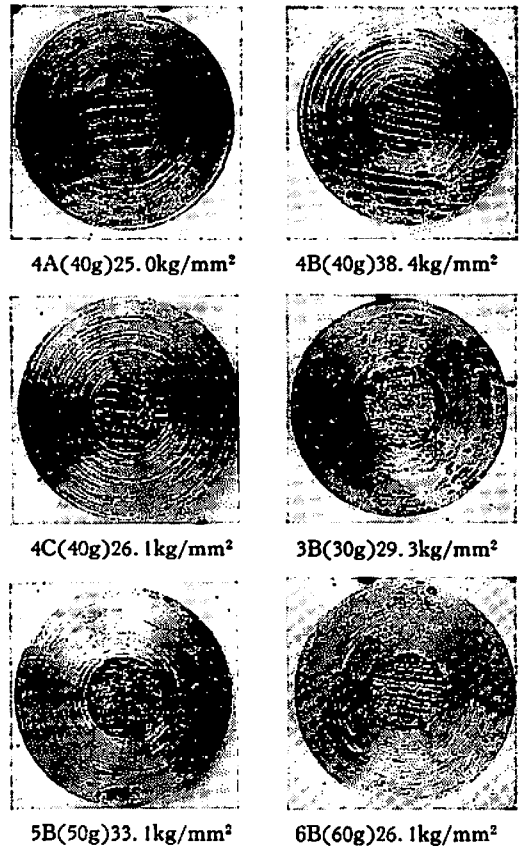


Photo. 2 Separating appearance at bonded surface (stainless steel-mild steel explosive welding)

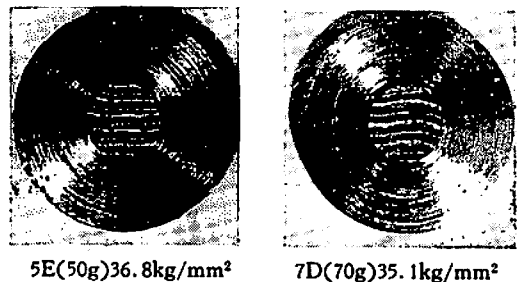


Photo. 3 Separating appearance at bonded surface (mild steel-mild steel explosive welding)

違つる場合は、同程度の波の粗さでは爆薬量が大なる程剝離強度が増大する傾向を示す。(たとえば3Bと5B)

なお、また Photo. 3 では、7Dと5Eを比べてわかるように、爆薬量が増大しても波が粗が粗らくなると、剝離強度は増大しないことがわかる。

以上のような傾向から、Fig. 4 および Fig. 5 に示

される爆薬量の増大による剝離強度の飽和現象は、同程度の波の粒らさでは爆薬量の増大とともに剝離強度が増大するという現象と、一方爆薬量の増大により波の粗らさが大になると剝離強度が低下するという両者の現象の重畳効果によるのではないかと考えられる。

3. 2 初期設置角度と波形および剝離強度

ステンレス鋼板と軟鋼板との爆接において、爆薬量を一定 (50g) にして初期設置角度を変化させた場合の爆接面 (ステンレス側) の波形変化状態は Photo. 4 に示す。

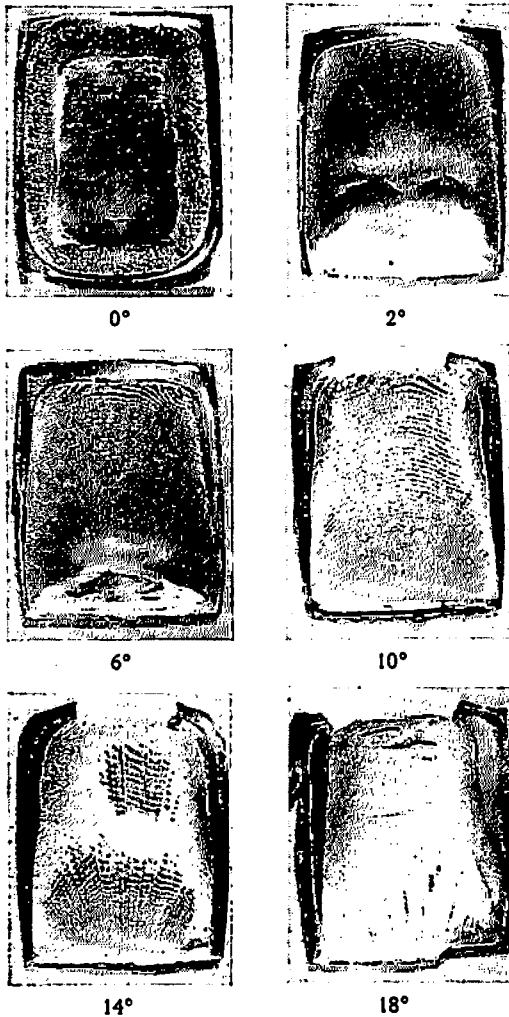


Photo. 4 Relation between set angle and wave appearance

写真からあきらかなように、有角法において初期設置角度の増大する程、爆接面の波は振巾、波長とも増大を示し、本実験の場合、初期設置角度 10° において爆接面全面にわたり、乱れのない波状結合状態が観察せられる。しかし、それ以上角度が増大すると波状結

合様式は崩ずれ、18° においては波のない直接接合型態を示すに至る。なお 0° の場合 (フライヤー・プレートと母材間の間隙は 4 mm) は一般の線爆ないしは点爆と同様の接合型態を示し、板中央部では圧接されず周辺部で波状統合を示した。これは変形拘束の大なる試片中央部では有効な接合角度に達せず、拘束の少ない板周辺近傍においてようやくその角度に達することによるものと考えられる。

さて、以上の実験結果から初期設置角度の増大による波の振巾、波長の増大は一つにはフライヤー・プレートの加速が角度の増加する程増大し、したがって衝突圧力が増大することに起因するものと考えられ、一定角度の場合において爆薬量の増大した場合に見られる現象と同一傾向を示すものと考えられる。勿論このほかに衝突点へのフライヤー・プレートの流入速度が角度の増大とともに減少し¹¹⁾²³⁾、それが衝突点前方への衝撃波ないしは塑性波の移行状態、あるいは Jet の発生状態に影響し、したがって又それが波の形態に与える影響も重畳するものと考えられるが、現時点では明確にしえない。

また、本実験において 2° の初期設置角度で、起爆点直下に大きな平坦不圧接部を残して、小さな波の発生を見ているが、この結果と 0° の場合の結果とを考えあわせ、この角度近傍が恐らく波発生の臨界角——Allen の実験結果⁹⁾によると Jet 発生の臨界角に等しい——であることが推察される。

また、10° を境にして結合状態が波状結合から直接結合様式に移行することがみられ、この角度近傍に爆接結合様式の遷移角が存在するものと考えられる。

この遷移角度²³⁾ は、少しその性格を異にするがその数値において、殆んど同一時期に行なわれたと考えられる Crossland & Bahrami の結果⁶⁾ と非常によく一致している。

試験片の初期設置角度と剝離強度との関係は、Fig. 6 に示す。これらの剝離試験は Fig. 2 および

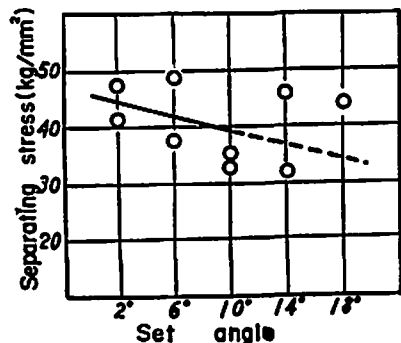


Fig. 6 Relation between set angle and separating stress

Fig. 3 に示す方法によつたものである。

この結果からわかる様に余り顕著ではないが、剝離強度は初期設置角度の増大とともに減少する傾向を示す。この傾向は爆薬量と剝離強度との関係について考察した結果と同様の結果を示すものであり、少くとも 10° までは初期角度の増大による波の粗さの増大に起因するものであると考えられる。なお波状結合から直接接合に移行する。 10° 波状以上の角度での剝離強度との関係は、今後なお検討を要する。

3. 3 母材の硬さと剝離強度

軟鋼母材の硬さを水焼入れ熱処理により変化させ、ステンレス鋼板をその上に爆接した時の母材

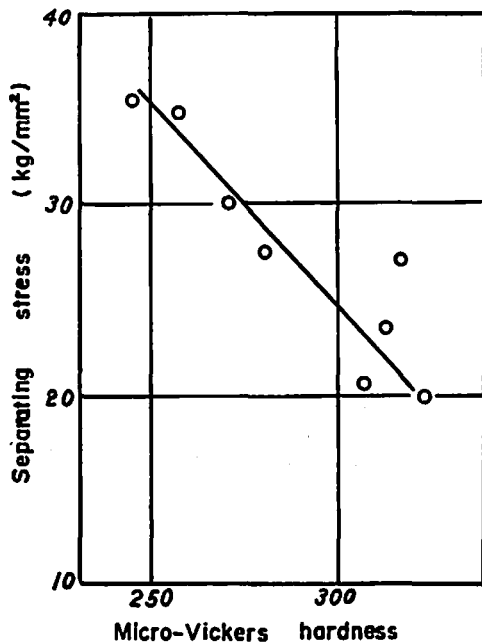


Fig. 7 Relation between separating stress and hardness of base metal

硬さと剝離強度との関係について実験結果は Fig. 7 に示す。この場合の爆接条件は爆薬量 40g, 初期設置角度は 10° である。

図から明らかなように母材硬度の増大により剝離強度は減少を示す。

この結果から爆接のような超高压圧接においても材料の塑性変形能が剝離強度に影響をおよぼすことが考えられる。

3. 4 焼鈍温度と剝離強度

Fig. 8 は軟鋼+軟鋼爆接材の熱処理による剝離強度の変化を示したものである。爆接条件は初期設置角度 10° , 爆薬量 40g である。熱処理は爆接試験片から

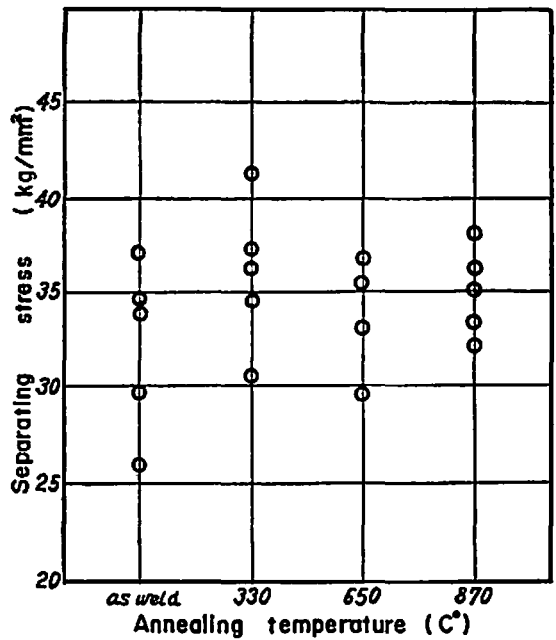


Fig. 8 Effect of annealing on separating stress

剝離試験片を切削加工後、それぞれ 330°C , 650°C , 870°C , 1 hr の真空焼鈍を行なう方法をとつた。

この結果からわかるように上記熱処理によつて剝離強度には目立つた改善は認められないが、 870°C , 1hr の焼鈍および 650°C , 1 hr の応力除去熱処理は剝離強度のばらつきを少なくする点において多少の改善役立つものと考えられる。

3. 5 爆薬量と接合部硬度の関係

Table 2 は、軟鋼-軟鋼爆接材の爆薬量の変化による接合部硬度の変化を検討した結果を示したものである。

この結果から爆接接合部の硬度は爆薬量の変化(40g ~ 70g)には殆んど無関係ではほぼ同程度の硬度値(マイクロビッカース硬度 260 前後)を示すことがわかる。

これは次に示す顕微鏡組織の検討結果からわかるように、爆接接合部は細かい再結晶組織状態を示し、爆接部の近傍のような塑性流動組織を示さない。したがつて、爆接による塑性歪の影響を受けないためであると考えられる。

爆接部近傍の塑性流動組織部の爆薬量の変化による硬度変化は母材について Fig. 9 に示す。なお、この図の硬度は爆接接合面から 1.6mm までの各測定線 (A. M. B.) にそつた平均硬度 (接合面硬度は除く) を爆薬量に対しプロットしたものである。

爆薬量の増大とともに爆接部近傍の硬度は上昇する傾向のあることが見られる。

Table 2 Result of hardness test

Distance from bond		Amount of explosive and micro-vickers hardness (100g)											
		40g			50g			60g			70g		
		A*	M*	B*	A*	M*	B*	A*	M*	B*	A*	M*	B*
Flyer plate	2.0	240	245	253	281	281	225	262	262	264	254	245	235
	1.6	251	309	256	306	262	256	274	232	232	297	251	270
	1.2	245	245	238	297	264	309	283	253	236	304	319	262
	0.8	228	249	272	319	302	297	272	279	336	247	210	272
	0.4	266	247	233	330	287	339	272	254	289	268	206	285
Bond	0	222	212	281	312	253	245	268	266	227	270	160	245
Base metal	0.4	202	194	181	206	185	193	266	258	227	215	199	207
	0.8	185	163	199	182	188	227	292	230	202	243	183	180
	1.2	177	173	178	236	176	213	276	196	207	207	181	178
	1.6	182	183	172	177	170	185	233	193	215	233	186	170
	2.0	181	180	194	188	—	—	297	199	194	176	193	168

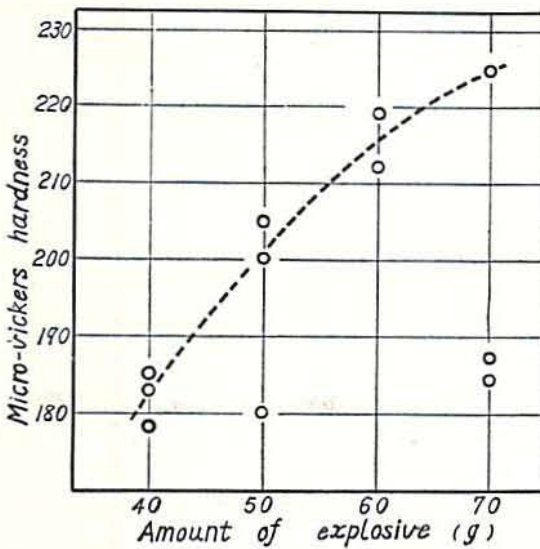
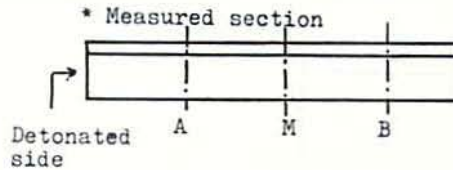


Fig. 9 Effect of amount of explosive on hardness of base metal (mild steel-mild steel explosive welding)

3. 6 爆接部の顕微鏡組織

3. 6. 1 軟鋼-軟鋼爆接材

Photo. 5 は、軟鋼-軟鋼爆接材の波状結合部の顕微鏡写真の代表例を示したものであり、Photo. 6 はその一部の高倍率写真である。

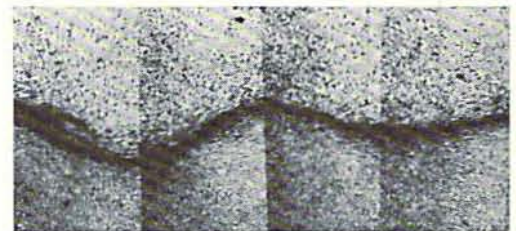


Photo. 5 Microstructure of wavy interface ($\times 60$, mild steel-mild steel explosive welding)

これらの写真からわかるように、爆接境界部は上下両板が冶金的に一体となつた微細な再結晶粒の帯として観察される。このことは爆接が非常に局所的な融合現象であることを示すものと考えられる。

Photo. 7 および Photo. 8 は Photo. 5 の試料を 860°C 1 hr, 焼鈍した場合の爆接部の組織変化を示したものである。

一般に、爆接境界部は、硝酸アルコール溶液の腐食による低倍率の検鏡では、Photo. 5 のような黒い帯として観察せられるが、 860°C , 1 hr の焼鈍により、境界部の微細結晶粒は成長して、母材ないしはフライヤー・プレートとほぼ均一な組織状態となり、接合部波形は殆んど消失することがわかる。

なお、波の消失後、Photo. 8 に見られるような、



Photo. 6 Magnified photograph of photo 5 ($\times 400$)

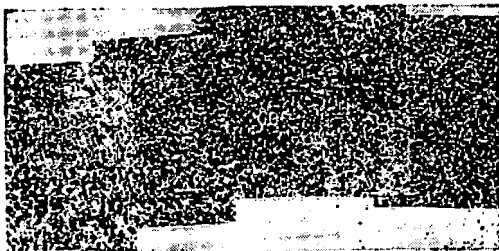


Photo. 7 Wavy interface shown in photo. 5 disappears with 860°C , 1 hr., annealing ($\times 60$)



Photo. 8 Microstructure of wavy interface after 860°C , 1 hr., annealing ($\times 400$)

もとの境界部にそつて点在する黒い物質については、検討を要するが、これは爆接時、接合材表面の不純物



Photo. 9 Cast structure shown in wavy interface of mild steel-mild steel explosion welding ($\times 400$)

がとらえられたものと考えられる。

Photo. 9 は波状結合部の波頭部分に見られた柱状晶様の組織を示したものである。このような組織は鋼の爆接時によく観察されているが、軟鋼-軟鋼の爆接においても発生することがわかる。

3. 6. 2 ステンレス鋼-軟鋼爆接材

Photo. 10 は Fig. 1 の方法により爆接 (爆薬量 40g) した接合部の軟鋼波頭の崩ずれ状態を示したものである。

これらの写真からわかるように軟鋼波頭は溶滴状の細かい粒子となつてステンレス鋼中を移行し、ステンレス鋼中に軟鋼の離れ小島を形成すること、また軟鋼の波頭がステンレス鋼を巻きこみ軟鋼にかこまれたステンレス池を生成すること、しかもそのステンレス池は高速で攪拌されたような筈目状の跡をのこしていることなどが観察せられ、また、軟鋼の爆接境界表面および波頭部の組織が明らかに他の部分と相違しいつたん半溶融ないしは溶融した後、凝固したような組織状態を示しているのは興味あることである。

4. 総括

以上は爆発溶接に関する基礎研究の一部として爆接部の剝離強度の検度の主眼を置き、その他爆接部の顕微鏡的検討を加えた初期実験結果であるが、これを総括すると次のごとくである。

剝離強度については、

- (1) 剝離強度は爆薬量の増加に伴い増大するが、ある爆薬量に達すると増大はとまり飽和する傾向を示す。
- (2) 波状結合様式においては、剝離強度は、同一爆薬量の場合は波形が細かい程高く、同一程度の

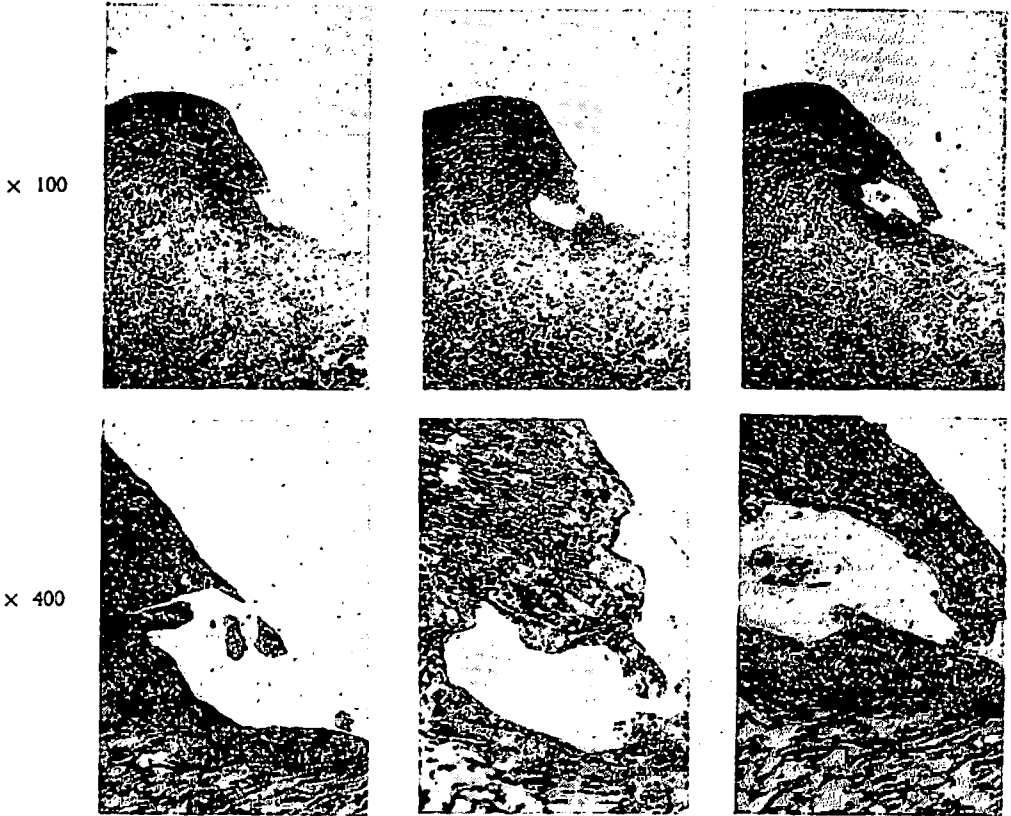


Photo. 10 Appearance of wave head of mild steel (18-8 stainless steel-mild steel explosive welding)

波の粗らさのときは爆薬量が増大する程高くなる傾向がある。

- (3) 剝離強度は母材の硬度の増大とともに減少する。
- (4) 剝離強度は初期設置角度の増大とともに減少する傾向がある。
- (5) 軟鋼—軟鋼爆接材の場合、剝離強度は熟処理によって目立つた改善はないが、試験値のバラツキは少なくなる。

爆接部の波形に関しては、

- (6) 爆薬量が増大する程、接合部の波は振り巾、波長とも増大する。
- (7) 初期設置角度の増大とともに接合部の波は振り巾、波長とも増大する。
- (8) 波発生臨界角は本実験の場合 2° 前後と考えられ、また、波状結合から直接結合様式への移行臨界角が存在することが考えられる。本実験の場合その角度は $10^\circ \sim 14^\circ$ 間と考えられる。

顕微鏡組織については、

- (9) 軟鋼—軟鋼爆接材の接合部は微細な再結晶粒組織から構成されている。
- (10) ステンレス鋼—軟鋼爆接材の波状結合部の軟鋼

側波頭からは、溶滴状の軟鋼細片がステンレス鋼中を移行飛散する現象が見られる。

- (11) 上記接合部軟鋼表面および波頭部の組織はあきらかに他の部分とことなり、溶融ないしは半溶融後凝固したような組織を示す。したがってこの部分にはその近傍に見られるような一般の塑性流動組織はみられない。

5. あとがき

以上の研究のほかに著者達は爆接材の変形および残留応力特性、溶接性その他について種々の実験結果を得ている。本報にこれらを総括掲載するつもりであったが紙数のこともあり次の機会にゆずることにする。

本研究の実施にあたり多大の御助力を承つた旭化成工業 K. K.、東島直氏はじめ同社の方々また何かと御協力をいただいた大阪府立大小川六氏に深甚の謝意を表します。

文 献

- 1) G. Birkhoff, *et. al.*, J. Appl. Phys. 19, 563 (1948)

- | | |
|---|---|
| 2) J. M. Walsh, <i>et al.</i> , J. Appl. Phys. 24-3, 349
(1953) | (1954) |
| 3) G. R. Cowan and A. H. Holtzman. J. Appl.
Phys. 34-4, 928 (1963) | 5) 渡辺, 村上, 他 溶接学会誌, 35 卷 2 号 p.19
(1966) |
| 4) W. A. Allen, <i>et al.</i> , J. Appl. Phys. 25, 675 | 6) A. S. Bahrani and B. Crossland, Proc. Instn.
Mech. Engrs. 179~1 264 (1964~1965) |

Fundamental Study on Explosive Welded Joint

by M. Watanabe and Z. Murakami

A series of fundamental studies on the explosive welding has been carried out by authors since a few years ago.

In this paper, the experimental results are reported on mild steel - mild steel and stainless steel-mild steel oblique impact explosive welding.

The experiments are aimed at establishing the effect of weight of charge, impact set angle, hardness of base metal and heat treatment on the separating strength and the shape of wave of welded joint.

Obtained results are as follows:

- (1) As the weight of charge increases, the amplitude, wave length and the separating strength of welded joint are increased.
- (2) However there is a saturation point at which the separating strength is not increased by further increase of weight of charge. In this experiment, it is found at a weight of charge of about 50 gr.
- (3) It is observed that in the case of the same weight of charge, the larger amplitude and wave length, the smaller separating and also in the case of the similar amplitude and wave length, the larger weight of charge, the larger separating strength of the welded joint.
- (4) As the impact set angle increases from 0° to 10°, the amplitude and wave length increase gradually. But, at about 10°, there is a distinct change in the mode of bonding. It is considered that the mode of bonding will be transformed from the wavy joint to the direct joint at a angle between 10° and 15°.
- (5) The separating strength tends to decrease slightly with the increase of impact set angle.
- (6) As the hardness of base metal increases, the separating strength decreases.
- (7) The hardness at the welded joint does not show a variation with the change of weight of charge, but the hardness at the region subjected a large plastic flow increases with the increase of weight of charge.
- (8) The explosive welded joint of mild steel with mild steel shows a fine recrystalliation structure.