技術資料

最近の接着技術の動向と将来への展望

State of the Art and Prospects in the Future
in Adhesive Bonding

3. 接着と溶接の併用法—ウエルドボンディング—の現状と将来*

原 賀 康 介**, 児 玉 峯 一**

3. Recent Progress in Weldbonding Technology*

by Kousuke Haraga** and Minekazu Kodama**

キーワード: ウエルドボンディング, 接着, スポット溶接, 併用継手, 接着剤, 溶接条件,
機械的特性, 耐久性

1. 諸 言

ウエルドボンディング(以下 WB と示す)は, 接着とスポット溶接やプロジェクトン溶接などの抵抗点溶接を併用した接合方法であり, 接着接合と抵抗点溶接のそれぞれの利点を生かし欠点を互いに補うものである。

WB は, 1960年代初期に, ソ連で航空・宇宙関係の構造体組み立て用に開発され, その後, ヨーロッパや米国でも航空・宇宙関係をを中心に研究がなされるようになり, 1976年には, 米国で航空機の一次構造部材にも適用できる信頼性の高いアドバンスト・ウエルドボンディングが開発され, 実用化もなされている¹⁾。わが国では最近, 自動車の車体組み立てを中心に WB が適用されている²⁾が, WB に関する研究はあまりなされておらず³⁻⁹⁾, 本格的な研究開発および応用はこれからであると思われる。

以下に, WB の目的, WB 用接着剤の必要条件, WB に影響を及ぼす諸因子, WB 継手の諸特性, 適用例などについて述べる。

2 ウエルドボンディングの目的

WB には次に示すようないくつかの目的がある。

(1) 接着工程の合理化

*原稿受付 昭和62年1月29日

** 三菱電機(株)材料研究所 Materials and Electronic Devices Laboratory,
Mitsubishi Electric Corp.

接着接合のみで組み立てを行う場合には, 一般に, 被着材の前処理→接着剤塗布→貼り合わせ→治工具による位置決めと固定→接着剤硬化→治工具の取り外し→次工程という工程がとられるが, この様な工程では治工具の取り付けや取り外しに手間がかかり, また, 接着剤の硬化が完了するまで次工程に移れず, 接着の自動化, 高速化, システム化を図る場合の障害となっている。そこで, WB により, 点溶接を固定治工具の代用として用いると, 工程は, 被着材の前処理→接着剤塗布→貼り合わせ→点溶接→次工程となり, 自動化, 高速化, システム化が容易にでき, コスト低減も図られる。なお, 接着剤の硬化は, 室温硬化型の場合, 次工程以後の工程を流れている間に徐々に硬化が進行していくし, 加熱硬化型の場合は, 最後の塗装工程において塗料の焼き付けと同時に接着剤を硬化させるという方法がとられている。

この様に, 点溶接を仮固定として用いる場合は, 接着剤の硬化が完了するまで剥がれない程度の溶接強度があれば十分であるので, 溶接条件をできるだけ低くして, チリ発生による接着剤の飛散や, 表面のへこみや焼けによる意匠性の低下を防ぐのが好ましい。

(2) 接着特性の改善

接着接合の欠点である剥離強度, 衝撃強度, 高温における接着強度, 耐クリープ性, 荷重が加わった状態での耐環境性などを, 点溶接の併用により改善することができる。

(3) 点溶接特性の改善

アルミ合金や, 板厚の薄い鋼板, ステンレス板などで

は点溶接強度が低いため、接合強度の向上の目的で WB が用いられる。また、点溶接は応力集中が大きく疲労特性があまり良くないが、WB により接着接合を併用すると面接合となって応力集中が小さくなり疲労特性が向上する。

その他、点溶接は、接合部にシール性がない、点溶接後に塗装しても接合部の内部まで塗料が十分に回らず点溶接部が腐食しやすいなどの欠点があるが、WB により接着接合を併用するシール性の確保、接合部の耐腐食性の向上などが図られる。

(4) その他の目的

接着される二つの金属部品間に、アースや電着塗装などのために電氣的導通が必要な場合は、点溶接の併用により可能となる。また、接着接合部が火災や予期せぬ異常な力や環境により破壊した場合にも、構造物としての最低限の形を維持し、事故に至らないためのバックアップとして点溶接が併用されることもある。

3. ウェルドボンディング接合過程

WB は、①接合面の前処理、②接着剤の塗布、③貼り合わせ、④電極による加圧、⑤電極直下の接着剤の流動排除によるメタルタッチ、⑥通電による溶接、⑦接着剤の硬化、の過程により行なわれる。

ここで、接合面の前処理は接着および抵抗点溶接のいずれにも適したものでなければならず、アルミ合金ではアドバンスト WB で開発された低電位リン酸・重クロム酸ナトリウム・アノダイズ処理 (PSD 処理)^{10, 11)} が適用されている。また、鋼板は通常油が付着したまま溶接されるが、WB においても一般に油面接着性を有する接着剤が使用されており油の除去は不要である。

なお、WB は接着剤を塗布した部分に溶接されるが、接着剤は電極での加圧により溶接部から排除され、溶接部がメタルタッチすることが必要である。また、接着剤の硬化は溶接による発熱のみでは不可能であり、接着剤のみでの接合の場合と同様の硬化条件で行なわれる。

4. ウェルドボンディング用接着剤

WB に使用される接着剤には次の様な点が要求される。

- (1) 油面接着性を有すること。
- (2) 室温硬化型接着剤では溶接作業に支障のない十分な可使時間を有すること。
- (3) 電極による加圧で容易に流動排除できること。
- (4) 溶接条件のパラッキに対応できること。
- (5) チリにより引火しないこと。
- (6) はみ出した接着剤が溶接の熱により粘度低下し、垂

れ落ちたり電極を汚したりしないこと。

- (7) 溶接の熱により、有毒ガスや悪臭を発生しない。また、腐食性ガスを発生しないこと。

WB には一液加熱硬化型のアルミ粉入りペースト状エポキシ系接着剤が多用されているが、上記の要求条件を満足するものであれば特に制限はなく、各種の接着剤が使用できる。なお、フィルム状やホットメルト接着剤のように室温で流動性がない場合には、分流板を用いて通電し金属板を加熱し接着剤に流動性を与えたり¹²⁾、接着剤中に導電性ファイバーを混入しておき通電初期の発熱により接着剤に流動性を与えたりしてメタルタッチさせる方法がある¹³⁾。

5. ウェルドボンディングの溶接条件

5.1 溶 接 電 流

図 1 は、軟鋼板 (1.6 t) の変性アクリル系接着剤による WB とスポット溶接における溶接電流と生成ナゲット径および接合状態の関わり⁷⁾を示したものである。この図より、WB においては、中チリが発生すると接着剤に焦げが発生していることがわかり、また、中チリが発生すると接着剤の飛散もおこり接着部に欠陥が生じる。この点から、WB においては中チリが発生する電流値以下が適正電流範囲ということになる。図 1 においては、WB の場合はスポット溶接の場合と同じ径のナゲットが得られる電流値は全体に低くなっており、チリが発生する電流値も低下している。なお、WB における溶接電流のシフト方向およびシフト量は接着剤により異なるので溶接電流値の設定には注意が必要である。

表 1 は、5 種類の市販接着剤を用いて軟鋼板 (1.6 t) を一定の溶接条件により WB を行い、接着剤を硬化させずに溶接部の強度を測定した結果⁹⁾である。この結果では、金属充填材を含む接着剤ではスポット溶接単独の

図 1 溶接電流と生成ナゲット径および接合状態の関わり

表1 各種接着剤のウエルドボンディングにおける溶接部の強度比較

接 着 剤	第2破断点強度	充填材
変性アクリル系	637±25	none
2液エポキシ	609±15	none
2液エポキシ	240±20	Fe
1液エポキシ	282±25	AL
1液エポキシ	463±20	AL
スポット溶接のみ	543±20	—

(電極径5 mm, 加圧力= 360 kg,
通電時間=16サイクル, 電流値=6000 A)

場合より溶接部の強度は低下しているが, 充填材を含まない接着剤では強度が向上しており, 接着剤中の充填材が溶接部の強度に影響を及ぼすものと思われる。図2は, エポキシ樹脂に金属アルミニウム粉末を添加した接着剤を用いて, 軟鋼板(1.6 t)を一定の溶接条件でWBを行ない, 接着剤を硬化させずに溶接部の強度およびナゲット径を測定した結果⁹⁾であるが, 金属アルミニウム粉末の添加量が増加するほど生成ナゲット径は小さくなり, 溶接強度が低下している。

この様に, 充填材の有無や量により, 溶接特性が変化するの, 通電面積が変化することにより電流密度が変化し, 発熱量が変化するためと考えられる^{6,7)}。WBの場合は, 電極直下の加圧力の高い部分では接着剤が押し出されメタルタッチするが, 電極周囲の加圧力の低い部分では接着剤が完全に押し出されず薄い層として残り, メタルタッチ面積はスポット溶接単独の場合にくらべ狭くなると考えられる。このため, 接着剤が充填材を含まない場合には, 一定の電流を流した場合の電流密度は, 図3のように, スポット溶接単独より高くなるものと思

図2 アルミニウム粉末含有量と溶接部の強度および生成ナゲット径の関係

図3 スポット溶接とウエルドボンディングの通電路の比較

われる。一方, 接着剤が金属粉末を含む場合には, 電極周囲の薄い接着剤層の部分では金属粉末がはさまれて金属板同士が導通した状態になっており, 金属粉末含有量が多いほどこの状態は密で面積も広くなると考えられる。また, 金属粉末は電極直下でも完全に押し出されずわずかに残っており, アルミニウム粉末の場合には, 通電初期の発熱により融点の低いアルミが溶融し, 加圧力により周囲に押し出され⁴⁾, 図3のように通電面積が増加し, 電流密度が低くなると考えられる。

5.2 通 電 時 間

図4は, 軟鋼板(1.6 t)を変性アクリル系接着剤によりWBを行った場合の通電時間と電流値の関係⁷⁾である。通電時間が長くなると, ナゲットが生成し始める電流値(N), 中チリが発生し始める電流値(E), 5φのナゲットが生成する電流値(5φ)は, 全体に低電流値側にシフトしている。これは, スポット溶接単独の場合と同じ傾向であるが, 通電時間が長くなると接着剤が変色し始める電流値(B)は中チリが発生し始める電流値(E)よりかなり低くなり, WBが可能な電流範囲(NからBまで)は狭くなっている。これは, 通電時間が長くなると金属板を伝わって逃げる熱量が増加するため, 接着剤の温度上昇が大きくなり劣化したためである。WBにお

図4 ウエルドボンディングにおける通電時間の影響

いては通電時間はできるだけ短い方がよいといえる。

5.3 加圧力の影響

一般のスポット溶接では 加圧力が高くなると同じ大きさのナゲットを生成するに要する電流は高くなるが、WB においても、筆者らの実験⁷⁾ではスポット溶接の場合と同様の傾向であり、WB が可能な電流範囲も変化しておらず、加圧力が少し変化しても WB に悪影響はないものと思われる。

6. ウェルドボンディングの接合特性

6.1 セン断強度

図 5 は、WB 継手と接着継手の引張りせん断試験における荷重一歪み曲線⁸⁾であるが、WB 継手では 2 つの破断点が現われている。この最初の破断点は、ラップ

図 5 引張りせん断試験における荷重一歪み曲線

端部の接着部の破壊によるものであり、第 2 の破断点はスポット溶接部とその側面の接着剤の破壊によるものである。また、図より、WB 継手では接着継手より荷重一歪み曲線の傾きが急であり、継手の剛性が高くなっていることがわかる。

表 2 は、各種の接着剤による WB 継手の静的せん断強度を接着継手、スポット溶接継手と比較したもの¹⁴⁾である。いずれの接着剤においても WB 継手は、スポット溶接継手の強度を上回っているが、接着継手と比べると、ポリサルファイドエポキシ、ポリアミドエポキシおよびビニルプラスチゾル系などの柔らかい接着剤では WB 継手の方が高い強度を示しており、硬い一液熱硬化型エポキシ系接着剤ではほぼ同等かまたは WB 継手の方が低くなっている。図 6 は、軟鋼板 (1.6 t) の変性アクリル系接着剤による WB 継手のせん断強度の温度依存性⁷⁾を示したものであるが、約 40°C を境にして、高温側すなわち接着剤が柔らかくなると WB 継手の第 1 破断点強度は接着継手より高くなり、低温側すなわち接着剤が硬くなると低くなっている。

6.2 剥離強度

図 7 は、軟鋼板の変性アクリル系接着剤による WB、接着、スポット溶接の T 型剥離強度の被着材厚さ依存性⁷⁾である。剥離強度の板厚依存性は、スポット溶接が接着より大きく、板厚が薄いと接着が溶接より高い強度を示すが、WB では全板厚において接着またはスポット溶接のいずれか高い方の強度を示しており、薄板では接着併用によるスポット溶接特性の改善効果が見られ、厚板ではスポット溶接併用による接着特性の改善効果が見られる。

表 2 各種接着剤のウェルドボンディング強度

被着材	接 着 剤	硬化条件	引張りせん断強度 (Lbs.)		
			スポット溶接	接 着	ウェルドボンド
2036-T4 1.26 t	なし	—	770		
	ポリサルファイド・エポキシ	室温		700	1175
	高剥離エポキシ	室温		1385	1090
	ポリアミド・エポキシ	室温		735	875
	ビニルプラスチゾル	未硬化	690		
	同上	350° F 2 hr		910	1450
軟鋼板 0.8 t	一液型エポキシ	未硬化	750		
	同上	350° F 2 hr		1610	1270
	なし		1440		
	ビニルプラスチゾル	未硬化	1380		
	同上	350° F 2 hr		900	1800
	一液型エポキシ	未硬化	1430		
	同上	350° F 2 hr		2000 (材破)	1930

図6 引張りせん断強度の温度依存性の比較

図7 T型剥離強度の被着材厚さ依存性の比較

6.3 衝撃強度

図8に、3種類のエポキシ系接着剤によるWB, 接着, スポット溶接の衝撃強度の比較¹⁵⁾を示した。WBの衝撃強度は、接着に比べると大きく向上しているが、スポット溶接に比べると改善効果は見られない。

6.4 クリープ特性

図9は、軟鋼板(1.6t)の変性アクリル系接着剤による接着, WB, リベットボンディングの各継手の60°C 90% RH 雰囲気におけるクリープ破断特性⁸⁾である。接着継手にくらべ WB 継手やリベットボンディング継手では破断時間が大幅に向上している。

6.5 疲労特性

WBはスポット溶接の疲労特性を改善する効果があると言われており、アルミニウムについては既に多くの

図8 衝撃強度の比較

図9 クリープ破断特性の比較

図10 チタン合金・ポリイミド系接着剤によるウェルドボンディング継手の疲労特性

報告がなされている^{14, 16)}。また、最近では航空機の耐熱構造材料としてチタン合金が使用されるようになり、ポリイミド系接着剤によるWBの研究がなされており、図10¹⁷⁾のようにスポット溶接にくらべ疲労特性が改善されることが示されている。また、鋼板やステンレス板は、構造部材として広く用いられているが、これらの材料においても図11⁷⁾に示すように、WBによるスポット溶接の疲労特性の改善効果が認められている。なお、表3に示すように、軟鋼板(0.7t)継手における歪みの測定も行なわれており⁴⁾、WB継手におけるスポット溶接周辺での歪みは、スポット継手に比べてかなり小さい

図11 ステンレス・変性アクリル系接着剤によるウェルドボンディング継手の疲労特性

表3 疲労試験における歪みの比較

荷重振幅 (kg)	スポット溶接単独 の歪 (μ)		ウェルドボンディング の歪 (μ)	
	スポット 溶接周辺	母 材	スポット 溶接周辺	母 材
80	437	143	133	307
100	500	179	133	370
140	860	250	233	462
180	1050	250	333	730
200	—	—	367	846
250	—	—	533	1385
300	—	—	600	2692

図12 荷重・湿度耐湿性試験における錆発生距離の経時変化

ことが示されている。

6.6 荷重が負荷された状態での耐環境性

図12は、軟鋼板(1.6t)の変性アクリル系接着剤による接着、WB、リベットボンディングの各継手にせん断荷重Pを負荷した状態で60°C 90% RH 雰囲気暴露した時の、ラップ端から接着部の中心に向かって発生した錆の発生距離の経時変化⁸⁾である。この結果より、接着

図13 アドバンスト・ウェルドボンディングの適用例

図14 リヤルーフレール部の構造

継手にくらべ WB 継手では負荷荷重の影響がかなり少なくなっており、耐環境性も改善されることがわかる。

7. ウェルドボンディングの適用例

WB は航空・宇宙関係で最初に実用化され、航空機の胴体パネルの組み立て^{18,19)}、ヘリコプターの組み立て²⁰⁾、大型推進タンクのドーム組み立て^{18,21)}、火星軟着陸船のコルゲートパネルの補強材とスキンの接合¹⁸⁾などに適用された。その後1976年に、Northrop 社により航空機の一次構造部材にも適用できる信頼性の高いアドバンスト WB が開発され、図13に示した Fairchild 社の A 10 攻撃機の胴体パネル、エンジンカバー、水平尾翼、フラップなどの組み立てに適用されている²²⁾。航空・宇宙関係での WB はアルミ合金が主対象であり、自動車でも軽量化の目的でアルミ合金の検討もなされているが^{5,14)}、実用化されているのは鋼板が主対象である。自動車での適用箇所としては、ドアのヘミングフランジ部、ルーフレール部(図14²⁾)、センターピラーの上下結合部(図15²⁾)などがある。センターピラーの上下結合部では、従来のスポット溶接のみに比べ、WB では結合剛性が30%向上し、耐久寿命は10倍以上に延びるという結果が報告されている²⁾。なお、自動車における鋼板の WB では、主として油面接着性の一液型ペースト状エポキシ系接着剤が使用されており、接着剤の硬化は

図15 センターピラーの上下結合部への適用例

塗装乾燥炉の熱を利用して行なわれている。電気機器組み立てにおいても、最近、空調機器組み立てやモーター組み立てなどに適用されているが、まだ適用例は少なく本格的な適用はこれからである。その他、最近制振鋼板が実用化されるようになったが、制振鋼板は二枚の鋼板が樹脂により接合されており、制振鋼板同志あるいは制振鋼板と鋼板のスポット溶接は WB と同様の考え方で行なわれている¹³⁾。

8. ウエルドボンディングの今後の課題

以上のように、WB はこれまでの接着や点溶接にはない種々の特徴を有する接合法であり、今後の展開が期待されるが、WB の特徴を生かし効果的な適用を行なうためには、今後次のような課題を解決していくことが必要である。

- (1) 溶接部の性能・信頼性に及ぼす接着剤の影響の明確化
- (2) 接着部の性能・信頼性に及ぼす溶接の影響の明確化
- (3) 最適溶接条件の決定
- (4) 最適な WB 用接着剤の開発
- (5) 継手の設計基準の確立
- (6) 効果的な施行法の確立
- (7) 接合部の非破壊検査方法の開発

これらの課題を解決していくためには、溶接技術者と接着技術者の密接な協力が必要であろう。

参 考 文 献

- 1) 航空宇宙技術動向, No.40 (1981).
- 2) 三浦純一, 小野裕行, 城井幸保, 畑 英幸, 自動車技術, 38 (4) (1984) 446.
- 3) 八木 肇, 高橋良典, 高津正治, 森 稠秀, 第13回接着研究発表会要旨集 (1975) 13.
- 4) 森 明彦, 安斎正明, タウラ技報, 16 (1), 9.
- 5) 杉田慎彦, 梅田典孝, 軽金属溶接, 17 (6) (1979) 251.
- 6) 山田 祥, 原賀康介, 西川哲也, 第21回接着研究発表会要旨集, (1983) 55.
- 7) 山田 祥, 原賀康介, 斉藤 貴, 日本接着協会誌, 19 (11) (1983) 491.
- 8) 原賀康介, 児玉肇一, 日本接着協会誌, 21 (1) (1985) 4.
- 9) 山田 祥, 原賀康介, 第23回接着研究発表会要旨集 (1985) 27.
- 10) G. Beckwith, T. Croucher, Spec. Clean Finish Coat. Process, (1981) 171.
- 11) R. G. Hocker, AFML, No.AFML-TR-79-4081, (1979).
- 12) 浜崎正信, 軽金属溶接, 132 (12) (1973) 21.
- 13) 日経メカニカル, No.227 (1986) 65.
- 14) J. D. Minford, F. R. Hoch, E. M. Vader, SME Tech. Pap. Ser., No.SAE-750462, (1975).
- 15) T. B. Jones, Welding and Metal Fabrication, No.7/8 (1987) 416.
- 16) G. V. Scarich, G. R. Chanani, J. Aircr., 19 (9) (1982) 773.
- 17) R. W. Vaughn, C. H. Sheppard, R. Baucum, Adh. Age, 20 (7) (1977) 19.
- 18) K. Forsberg, F. R. Sullivan, SME Tech. Pap., No.AD-72-710, (1972).
- 19) R. Waterbury, Assembly Eng., (8) (1980) 24.
- 20) T. H. Malim, Iron Age, March '4, (1971) 60.
- 21) F. R. Sullivan, G. E. Faulkner, F. J. Clauss, Mater. Eng., (1) (1971) 14.
- 22) A. Shame, R. Rupp, J. Clarke, Congr. Int. Counc. Aeronaut Sci., 12th (1980) 596.