金属被着体の構造検討による局所加熱での 接着剤高速硬化の実現

平光 則仁,小森 威和

近年、環境問題に対する気運の高まりから、小型化・軽量化による商品のエネルギー効率の向上を目的とした異 種材接合(金属と樹脂材など)が増えており、接合部には接合信頼性確保のために熱硬化接着剤が多く用いられて いる。

熱硬化接着剤の硬化工法は、接着される部品(以下:被着材)全体を熱硬化炉に投入、加熱するバッチ処理方式 が主流である。この工法では硬化時間が長く生産効率が低い、加熱不要な被着材全体に熱エネルギーを付与するた めエネルギー効率が低いという問題点がある。

そこでわれわれは、接着剤周辺の被着材にレーザで局所的に熱エネルギーを付与して接着剤を高速硬化させる省 エネルギーかつ生産性の高い工法の開発に取り組んでいる。

本稿では、熱伝導率が大きく局所加熱が難しい金属材における局所加熱での高速接着の実現を目指し、電子機器 の筐体フレーム等で多く用いられるアルミ部材に対して熱伝導の通過面積を制御する被着材構造を検討した。その 結果、熱硬化炉で数十分かかる接着剤の硬化時間が、本工法では 30 秒程度と大幅な硬化時間の短縮を実現した。こ れにより被着材の適用材質範囲の拡大と生産工程の制約が減り、接着剤工法の汎用性拡大が期待できる。

Realization of High-speed Adhesive Curing by Spot Heating and Structure Consideration of Metal Adhesive Parts

HIRAMITSU Norihito, KOMORI Takekazu

In recent years, due to growing concerns about environmental issues, the bonding of dissimilar materials (metal and resin, etc.) has been increasing for the purpose of improving the energy efficiency of products by miniaturization and weight reduction, and heat curing adhesives are also often used for the bonding to secure joint reliability. The mainstream of the hardening method of the heat curing adhesives is a batch processing method in which the entire part to be bonded (hereinafter, adherend) is put into a thermal cure furnace and heated. However, this method has problems that the curing time is long, the production efficiency is low, and the energy efficiency is low since heat energy is applied to the entire adherend that does not require heating.

Therefore, we are working on the development of an energy-saving and high-productivity method of applying spot heating with a laser to the adherend around the adhesive to achieve high-speed curing.

In this paper, we considered the adherend's structure which controls the heat transfer area for aluminum material that is often used in the case body of electronic devices to achieve high-speed bonding by spot heating on metal materials that have high thermal conductivity. As a result, the curing time of the adhesive, which takes several tens of minutes in a thermal cure furnace was significantly reduced to about 30 seconds by this method. In addition, the versatility of the adhesive method can be expected because the range of applicable materials for the adherend was expanded and the restrictions of the production process were reduced.

Contact : HIRAMITSU Norihito norihito.hiramitsu@omron.com

1. まえがき

近年の環境問題に対する気運の高まりから、溶接・接合 工法においても、必要な部分にのみ溶融・反応エネルギー を付与する「局所加熱」の開発が各社で取り組まれてい る。例えば、レーザを使用したはんだ付け、抵抗溶接を使 用したろう付けなどである。

接着接合においては、小型化・軽量化による商品のエネ ルギー効率の向上を目的とした異種材接合での使用が増加 している。異種材(金属-樹脂・ガラスなど)は抵抗溶 接、アーク溶接などの溶接工法での接合が困難であり、リ ベットやボルト締結などの機械的接合工法や接着剤を用い た接合方式が採用されている。

接着接合は、面接着での応力集中の防止、気密性の確 保、絶縁性、断熱性などの長所¹⁾があり様々な産業分野で 多く用いられている。接着剤の硬化形態には、熱硬化・ UV 硬化があり、電子部品用途では要求特性に合わせて使 い分けられている。UV 硬化接着剤では局所エネルギー付 与による高速硬化が可能であるが、耐熱性などの接着信頼 性の制約や接着剤コストが高いなどの問題点があり使用用 途は限定される。これに対して熱硬化接着剤は、耐熱、耐 薬品性に優れ、厚膜硬化が可能である、UV に比べ接着剤 コストが安価である等の長所があり広く使われている。

オムロンにおける接着接合においても、熱硬化エポキシ 接着剤の耐熱、耐水、耐候性、耐薬品性に優れる、隙間充 填性がある等の長所²⁾により、接着固定・封止・充填とい う機能が要求される用途に使用されている。熱硬化接着剤 の硬化方法は、熱硬化炉を用いて被着材と接着剤を同時に 長時間加熱して接着剤全体を硬化させるのが一般的であ る。しかし、熱硬化炉によるバッチ方式は、本来は加熱不 要な被着材全体に熱エネルギーを付与するため、製品全体 加熱による商品性能への影響や、エネルギー効率が低いた め環境負荷が大きく、硬化時間も長いなどの問題点があ る。

そこでわれわれは、上記の問題点を解決するために被着 材の接着周辺部に局所的に熱エネルギーを付与して加熱 し、接着剤を高速硬化させる工法に着目した。この方法で は、従来の熱硬化炉方式より少ない時間、少ないエネル ギーで接着剤硬化が実現でき、生産効率の向上や省エネル ギー化が図れる。さらに、熱硬化炉による一括バッチ処理 から局所加熱による個別硬化処理へ移行することにより、 生産工程のインライン化や個別品質保証が可能となり、多 品種少量生産に適した生産ラインの構築、接着剤硬化工程 におけるエネルギー効率や生産効率の観点で効果が大き い。

そこでわれわれは、FA 部品・FA 機器(リレー、セン サー、スマートカメラなど)における異種材部品(金属– 樹脂)の接着剤固定・封止を想定して、「高速硬化」、「熱 硬化炉レス」を目指した局所加熱硬化による技術開発に取 り組んでいる。

本稿では、金属被着体に対する接着剤の高速硬化を目的 として、金属被着体に対する局所加熱、局所熱滞留の効果 を最大化させられる金属構造について述べる。

2. 局所加熱による接着剤高速硬化工法の取組み

2.1 レーザ局所加熱による接着剤の高速硬化技術

熱硬化炉レスを実現するためには、局所的に熱エネル ギーを付加可能で制御容易な加熱方法が必要である。そこ でわれわれは、上記要求を満足できるレーザによる局所加 熱に着目した。レーザ光源も安価な半導体レーザを使用す ることで実用的に使えるものを目指した。レーザの指向性 を利用して高密度のエネルギーを接着剤に付加することに より接着剤の硬化速度を加速させる。図1にレーザによる 接着剤硬化の原理図を示す。接着剤にレーザ吸収成分を添 加し、レーザ吸収成分によってレーザの光エネルギーを熱 エネルギーに変換し発熱させ、接着剤の硬化反応を促進す る³⁾。本工法は他社でも検討されており⁴⁾、オムロンにお いてもリレーの端子部に、この原理を利用した接着剤と工 法を使用して実用化している。



図1 レーザ吸収式硬化方法

このレーザ吸収式硬化方法では、レーザ照射によって接 着剤表面から硬化が始まるため、接着剤が厚くなると被着 材との界面の硬化が非常に難しいという問題がある。

この問題を解決するため、図2に示すレーザ透過型硬化 方法⁵⁾を考案した。接着剤にレーザ吸収成分を添加せず、 接着剤を透過したレーザによって被着材を発熱させ、接着 剤を被着材界面から硬化させる方法である。



図2 レーザ透過式硬化方法

このレーザ透過式硬化方法により、被着材との界面から 硬化が進行するため接着剤厚さが数ミリの厚膜硬化や接着 強度の確保が実現できた。この方法は熱伝導が小さい被着 材には有効であるが、金属のように熱伝導が大きい被着材 の場合、レーザによる入熱が金属内部へ伝熱してしまい接 着剤に伝わり難く、接着剤が硬化しない問題がある。

オムロン商品においても金属-樹脂の接着接合が多く使 われており、局所加熱による接着接合技術の展開を考慮す ると、金属部品への高速接着が可能な技術が必要である。

2.2 金属部品への局所加熱接着工法⁶⁾の適用

そこで、われわれは被着材が金属でもレーザ局所加熱に よる接着剤高速硬化が可能な技術を検討した。加熱原理を 図3に示す。レーザを接着剤に直接照射せず、被着材の発 熱を接着剤に伝熱することで、金属と接着剤の界面から接 着剤を硬化させることができる。またレーザが直接接着剤 に照射されないため、接着剤成分や色など接着剤の制約が 少ない接着剤選定が可能となる。



図3 金属伝熱式硬化方法

3. レーザ局所加熱による伝熱要因の特定

3.1 レーザ加熱の課題

レーザ照射による金属被着材の局所加熱での接着剤硬化 が困難である原因として、被着材が高熱容量・高熱伝導体 であることによる入熱エネルギーの局所滞留が難しいこと が挙げられる。

このため、レーザ照射による入熱で接着剤高速硬化を実 現するには、入熱エネルギーの周辺部への伝熱を抑制し て、被着材内部で熱エネルギーを局所滞留させることが重 要となる。そこで、被着材周辺部への伝熱要因である部材 内への熱伝導、他部材への接触熱伝達、大気中への対流・ 放射熱伝達の各要因の影響度を確認し、レーザ照射による 入熱エネルギーの局所滞留を確保する必要がある。

3.2 実験方法

実験に使用したアルミ部材形状を図4に示す。レーザ照 射での被着材加熱において、被着材の局所滞留への影響が 大きい伝熱形態(被着材の熱伝導、接触治具への熱伝達、 大気中への対流・放射熱伝達)について、被着材の温度変 化に対する各要因の影響度を確認した。これにより、レー ザ局所加熱により被着材の局所加熱を効率良く行うための 対策方向性を明確にする。

実験サンプル(以下:アルミ部材)として、同一板厚で 体積が異なるアルミ部材、同一体積で形状が異なるアルミ 部材を用いた。



図4アルミ部材形状(上段:同一板厚、下段:同一体積)

アルミ部材形状、設定条件を表1に示す。アルミ部材形 状による熱伝導、接触治具による熱伝達、表面黒化処理に よる対流・放射熱伝達による温度上昇への影響を確認でき るように条件を設定した。具体的には、アルミ部材形状6 種類に対して、3種類の熱伝達条件(条件①~③)を組み 合わせた18条件で実験した。アルミ部材間の比較により 熱容量・熱伝導の影響、条件①と②の比較により対流・放 射熱伝達の影響、条件②と③の比較により治具熱伝達の影 響を明確に示せるように設定した。これらの実験パターン でレーザ照射による入熱後のアルミ部材の最高温度の比較 によって温度上昇に関わる各伝熱形態の影響を確認する。 レーザ照射条件を表2に示す。

表1 実験条件

伝熱形態	比較方法	実験パターン			
		1		3	
熱伝導·熱容量	部材形状(同一板厚)	□11×11 mm	□20×20 mm	30×30 mm	
熱伝導	部材形状(同一体積)	\Box 11×t41.3 mm	□20×t12.5 mm	\Box 30×t5.56 mm	
治具熱伝達	治具接触	あり	なし		
対流・放射熱伝達	表面黒化処理	あり	なし		

治具熱伝達、対流・放射熱伝達条件の組み合わせ

条件	治具熱伝達	対流・放射熱伝達
1	あり	なし
2	あり	あり
3	なし	あり

表2 レーザ照射条件

項目	設定値		
レーザ種類	半導体(波長:808 nm)		
照射径	φ2 mm		
照射出力	27 W		
照射時間	30 sec		

実験方法を図5に示す。レーザ照射時のアルミ部材表面 温度をサーモグラフィーで測定して、アルミ部材、実験条 件に対するレーザ照射30 sec後の最高温度の違いを確認し た。



図5 実験状態

3.3 実験結果

アルミ部材の各条件でレーザ照射による入熱後の最高温 度を比較したグラフを図6に示す。図6では、アルミ部材 体積(熱容量)、アルミ部材形状(熱伝導形状)により、 レーザ照射による入熱後の最高温度に大きな違いがあるこ とがわかる。設置治具接触による熱伝達、対流・放射熱伝 達の影響については、同一アルミ形状での条件変化による 温度差となり、熱容量、熱伝導に比べると最高温度に与え る影響は小さいことがわかる。



図6 アルミ部材形状(同一板厚)と最高温度

さらに、熱伝導による温度差を確認するため、図7でア ルミ部材同一体積でのアルミ部材形状の違いによる最高温 度を比較した。その結果、同一形状での各条件間の温度差 に比べ、アルミ部材形状の違いによる温度差の方が大きい ことがわかる。





Р

アルミ形状・体積、治具との接触、表面黒化処理の条件 による最高温度の違いから、伝熱に影響の大きい3因子 (アルミ部材内の熱伝導、接触治具への熱伝達、大気中へ の対流・放射熱伝達)の最高温度に対する各要因の影響度 を算出すると図8、図9に示すようになる。

影響度の算出方法は、表2の条件①~③の比較により発 生する温度差と理論温度上昇の計算値を用いた。例えば (条件①-②の温度差)÷(理論温度上昇)により対流・放 射熱伝達の影響割合が計算できる。理論温度上昇計算には 以下の計算式を用いた。

$$\Delta T = P/(C \cdot \rho \cdot V)$$
(1)
: 熱量、比熱: C、密度: ρ 、体積: V

同一板厚・体積違いのアルミ形状の比較を図8に示す。 治具への熱伝達は、表面積・体積、板厚が小さい□11× t8 mm アルミ部材で接触面積比率が大きくなり影響度が大 きくなる。対流・放射熱伝達は、表面積・体積が小さい □11×t8 mm アルミ部材では最高温度が大きくなり、以下 の放射熱量の計算式からも放射量が大きくなることがわか る。

$$Q = A \cdot h \cdot (T_f - T_a)$$
(2)

A:面積、h:放射熱伝達率、T_f:表面温度、T_a:雰囲気温度

これに対し表面積・体積が大きい□30×t8 mm アルミ部 材では最高温度が小さく、大気中への対流・放射熱伝達の 影響度は小さくなる傾向がある。熱容量・熱伝導は、体積 が大きい□30×t8 mm アルミ部材では最高温度が小さくな

る。このため治具熱伝達、対流・放射熱伝達の影響度につ いても周辺部との温度差が小さく、影響度は小さくなって いる。



図8 アルミ部材形状(同一板厚)の伝熱形態と影響度

同一体積・板厚違いのアルミ形状の比較を図9に示す。 治具への熱伝達は、接触面積が大きい□30 mmの部材で 最も影響度が大きくなっている。対流・放射熱伝達は、ア ルミ部材間の表面積、体積の違いが少なく最高温度がほぼ 同じであることから影響度にもあまり差が出ていない。熱 容量・熱伝導については、アルミ部材間は同一体積で熱容 量差が無いため、アルミ部材内の熱伝導の影響度とみるこ とができる。これについては、治具への熱伝達面積が小さ く、アルミ部材内の熱伝導面積も小さい□11×t41.3 mm アルミ部材で熱伝導の影響度が大きくなっている。

以上のことから、本実験のアルミ部材形状による各要因 の影響度は、大きい順に①アルミ部材内での熱伝導 ②治 具接触部への熱伝達、③大気中への対流・放射熱伝達 で あることがわかった。特に、アルミ部材内での熱伝導は全 てのアルミ部材形状において、温度変化に対する影響度 50~80%程度と大きいことがわかる。



4. レーザ局所加熱による熱伝導の制御

4.1 熱伝導の理論と考え方

3.3 項の実験結果からレーザ照射による入熱で被着材を 局所加熱する場合では、アルミ部材形状による熱伝導の影 響が大きいことがわかる。つまり、レーザ照射による入熱 部から被着材周辺部への伝熱を抑制する被着材形状や被着 材構造により、レーザ照射による局所加熱の効果が大きく なる。被着材内部の熱伝導に関しては、フーリエの法則に より以下の式で表せる。

$$dQ = -\lambda \cdot d\theta/dx \cdot dA$$
 (3)
 $dQ:通過熱量、\lambda:熱伝導率、d\theta/dx:温度勾配、A:通過面積$

この式から、ある面の通過熱量は、被着材の熱伝導率、 温度勾配、通過面積に比例する。つまり、被着材構造によ り通過面積を小さくしてレーザ入熱部から周辺部への通過 熱量を抑制すれば、レーザ照射部付近の温度上昇を最大化 することができる。

被着材が高熱伝導材のアルミ部材においても、部材表面 に溝を設けてレーザ照射による入熱部から周辺への伝熱量 を抑制することにより、入熱エネルギーの局所滞留を確保 することが可能と考えられる。

4.2 実験方法

dO

レーザ局所加熱時の伝熱状態を変化させるため、アルミ 部材表面に溝加工形状を設ける。図10に示すようなレー ザ局所加熱点から同心円状の溝加工を、表3に示す条件で アルミ部材表面への溝幅、溝間隔、溝深さを変化させて、 溝加工形状による熱伝導断面積、熱伝導距離の違いによる アルミ部材の温度上昇の変化を確認した。



サンプル No	外形 (mm)	板厚 (mm)	溝幅 (mm)	溝深さ (mm)	溝間隔 (mm)
1	50 × 50	4	1.0	3.0	1.0
2			1.0	2.0	1.0
3			1.0	1.5	1.0
(4)			0.5	1.0	0.5

表3 アルミ部材の溝加工形状

実験方法を図11に示す。レーザ照射時のアルミ部材表 面温度をサーモグラフィーで測定して、アルミ部材の溝加 工形状による温度上昇の違いを確認した。



図11 実験状態

温度評価方法を図 12 に示す。レーザ照射部付近での局 所加熱効果、周辺部での温度変化を確認するため、P1~ P3の3点でサーモグラフィー温度を測定した。測定点間隔 は、溝幅・溝間隔1mmでは8mm、溝幅・溝間隔0.5mm では4mmとした。



図 12 温度測定点

4.3 実験結果

図13にアルミ部材の溝加工形状による温度上昇の違い を示す。アルミ部材の溝加工が有る形状①~④では、溝加 工のないアルミ板形状と比べて、P1 温度が上昇しており、 最大約1.8 倍(約55℃⇒約100℃)の温度上昇となってい る。これはP2・P3 点温度の約1.4 倍に比べて、明らかに P1 点での温度上昇割合が大きく、溝加工形状によりアル ミ部材のレーザ照射部付近を局所的に効率良く加熱できて いることがわかる。溝加工形状因子による違いは、アルミ 形状③・④を比較することで溝幅、溝間隔に比べて、溝深 さの影響が大きいことがわかる。



図13 アルミ部材の溝加工形状と最高温度

5. 商品展開に向けたレーザ局所加熱の効果検証

5.1 商品相当形状のアルミ部材での効果検証

4章では熱伝導に寄与する通過面積の制御による、熱エ ネルギーの局所滞留への影響を確認した。本技術を商品へ 展開するためには、商品形状に適した溝形状にしなければ ならない。本章では、商品を想定した溝加工形状でのレー ザ照射熱エネルギーの局所滞留効果を確認した。

5.2 実験方法

図14に示す商品形状を模したアルミ部材形状で局所加 熱の熱通過面積の制御による効果を確認した。アルミ部材 は、材質:A5052、最大外形:130×60 mm、板厚2~4 mm (レーザ照射部:4 mm)、表面処理:黒色アルマイト とした。溝加工は図15に示す溝本数表面:1本、裏面:2 本、溝幅:1 mm、溝間隔:1 mm、溝深さ:2 mm とした。



図14 アルミ部材形状



図15 アルミ部材への溝加工形状

レーザ照射条件は、照射面:裏面、レーザ径: ¢4 mm、 出力:27 W、照射時間:30 sec、穴①~③に対し1点ずつ 照射した。

温度測定点、レーザ照射状態を図16に示す。温度測定は サーモグラフィーで表面から穴底面の最高温度を測定した。



図16 温度測定点、レーザ照射状態

5.3 実験結果

実験の結果、図 17 に示すように穴①〜穴③の温度上昇 は80~100℃となっており、溝形状のない□50 mm、板厚 4 mm のアルミ板に比べて、アルミ体積は約2倍にも関わ らず 1.5~1.8 倍の温度上昇をしている。穴①〜穴③の温 度比較においては、穴①の温度上昇が穴②、穴③に比べて 小さい。これは穴①が穴②、穴③に比べて、周辺部への熱 が逃げる面積が大きいためと考えられる。

温度上昇時間では、図18に示すようにレーザ照射開始3 sec後で86℃まで温度上昇しており、接着剤の高速加熱の 観点からもレーザ局所加熱の効果が大きいことがわかる。



図 17 穴①~穴③での最高温度



図18 穴③での温度変化

5.4 レーザ局所加熱によるエポキシ接着剤硬化

商品相当構造においても熱の局所滞留が確認できたた め、次にレーザ照射による熱硬化接着剤の硬化の実現性を 確認した。

図 16 に示す温度測定点の穴内にエポキシ接着剤を注入 し、穴内に樹脂棒を差し込んだ状態で、裏面からレーザ照 射しエポキシ樹脂を硬化させた。評価指標として引張り接 着強度を測定し、オーブンで加熱硬化したものと比較し た。図 19 にレーザ照射時のサーモグラフィー温度測定状 態を示す。図 20 にそれぞれの加熱条件(レーザ照射 27 W・15 sec、レーザ照射 27 W・30 sec、オーブン加熱 120°C・1 hour)での接着強度を示す。レーザ硬化 27 W・ 30 sec ではオーブン硬化 1 hour とほぼ同じ接着強度が得ら れた。これに対し、レーザ照射 15 sec では接着強度がオー ブン硬化の 15%程度まで低下しており、オーブン加熱と 同等の接着剤硬化状態および接着強度が得られていないこ とがわかる。

このように、商品相当形状においても設計の工夫によっ て、レーザによる局所加熱で短時間で必要な接着強度を確 保できることが実証できた。



図19 サーモグラフィー温度測定状態(穴③加熱時)



図20 硬化条件と接着強度

6. むすび

被着材形状、構造を工夫してレーザ照射による入熱エネ ルギーを効率良く被着材の局所加熱に活用した結果、アル ミ被着材における局所的な温度上昇を1.5~1.8 倍程度ま で高められた。これにより熱硬化接着剤の硬化の実現と オーブン加熱と同等の接着強度が得られることがわかっ た。

接着接合工法においてアルミ部材のような高熱伝導材で の局所加熱が可能になったことで、省エネルギーで環境負 荷が少なく、多品種少量生産に適したコンパクトな生産ラ インが可能という局所加熱のメリットを保持しながら、被 着材材質の適用範囲、接着剤工法の適用範囲を拡げられ る。

さらに被着材の局所加熱により、これまで耐熱温度が低い部品があり、熱硬化炉が使用できなかった商品への熱硬 化接着剤の適用が可能となる。

本工法の商品展開に向けた課題として、レーザ照射によ る局所加熱に適した接着材形状、被着材構造の最適化が挙 げられる。これには商品設計段階からの被着材形状、接着 剤塗布に適した構造設計検討が重要であり、構造設計を効 率化するためには、被着材材質、形状、局所加熱条件を変 更しながら温度状態を可視化できる CAE 環境の構築が重 要となる。

今後は熱CAEを活用した局所加熱構造のシミュレー ションにも取組み、商品開発段階での最適な接着構造や工 法の提案を行えるように取り組んでいく。

参考文献

- 原賀康介.高信頼性接着の実務.日刊工業新聞社、2013, p. 3.
- 日本接着学会.初心者のための接着技術読本.日刊工業新聞 社、2004, p.38.
- 3) オムロン. 樹脂組成物の硬化方法. 特許 6331525. 2018-05-11.

- 杉浦昭夫,鈴木克彦,伊奈治,加藤和生.新硬化技術の開発. デンソーテクニカルレビュー. 2009, Vol.14, p.81-87.
- 5) オムロン. 接着剤組成物の硬化方法および接着構造体の製造 方法. 特開 2019-001936. 2019-01-10.
- 6) オムロン. 接合品の製造方法および接合品. 特願 2019-126225. 2019-07-05.

執筆者紹介



平光 則仁 HIRAMITSU Norihito グローバルものづくり革新本部 生産技術革新センタ 要素技術部 専門:機械工学



小森 威和 KOMORI Takekazu グローバルものづくり革新本部 生産技術革新センタ 要素技術部 専門:機械工学

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。