

深絞り加工による異種金属積層板からの クラッド容器成形法の開発

兵庫県立大学大学院 工学研究科
助教授 原田泰典
(平成 16 年度研究開発助成 AF-2004001)

キーワード：深絞り，クラッド，異種金属，接合，塑性変形，チタン，焼付き

1. はじめに

自動車，船舶及び航空機といった搬送用車体に関連する工業製品は数多くある．これらの工業製品は，表面処理を含めて材料自体の開発が中心として多く行われているが，一方で材料の複合化技術の研究も同時に行われている．その一つの手段としてクラッド法があり，異種金属材料を組み合わせたクラッド材は，幅広い分野で利用範囲が広がっている．近年においても，さまざまなクラッド加工法が開発され，多くの研究が行われている¹⁻⁵⁾．通常，クラッド材の作製は，2種類以上の金属あるいは合金材料を圧延，押し出し及び爆発圧接などの塑性加工によって一体化して行われている⁶⁾．したがって，それぞれの金属材料の組み合わせやその厚みを変化させることで，全く新しい機能性を付加させることができることが特徴である．例えば，銅合金 - ステンレス鋼クラッド材は，耐食性に優れていることから海洋機器や化学プラントの構造材として使用されている．現在，塑性加工によるクラッド材の作製とその製品加工が盛んに行われており，工業製品を中心としての利用範囲が急速に広がっている．しかしながら，クラッド材の作製では，成形を行う前に冷間圧延，拡散接合及び爆発圧接などの方法でクラッド材を作製しなければならない．クラッド材の作製及び製品への成形の2工程が必要となり，工程時間とコストの問題がある．また，難接合材のクラッド材作製の場合には接合する材質に制約が加わることやクラッド材作製方法によっては接合界面での金属間化合物などの脆性材が生成することなどの問題がある^{7,8)}．さらに，良好に作製されたクラッド材において，深絞り製品の加工を行う場合，クラッド材自体に良好な絞り成形性が要求される．例えば，アルミニウム板やチタン板などの化学的に活性な金属材料を用いた深絞り加工の場合，工具との焼付きが生じる問題も発生する^{9,10)}．

深絞り加工はパンチ工具によって素材金属板をダイス工具に絞っていく加工であり，加工の進行につれてダイス工具に絞られた素材の板厚が増加する．もし，異種金属材料を重ね合わせた状態で深絞り加工すると，異種金属どうしの接触面では活性度の高い新生面を露呈する．そこで，素材の板厚増加が生じやすい加工を積極的に行

えば，新生面どうしが密着し，かつ材質の違いによるすべり作用も生じる．それゆえ，異種金属材料の間で凝着が活発に進行し，絞り加工と同時に異種金属材料が接合できることになる．従来の研究においても積層した金属板の絞り成形¹¹⁾やしごき加工による積層した金属板の絞り成形¹²⁾が提案されている．本研究における予備実験においても各種金属の積層板における深絞り加工に対して，良好な成形性が得られることを報告している¹³⁾．

本研究では，製品までの製造工程を簡略化するとともに，加工可能な材質に関する制約を緩和するため，異種金属材料の接合と深絞り加工を同時進行させることによって，各種金属薄板を用いた細径クラッド容器の作製を試みた．とくに，焼付きが激しく多段深絞り加工が困難とされているチタン材料を用いたチタンクラッド容器の作製を試みた．

2. 深絞り加工によるクラッド方法

2.1 クラッド方法

図1に，金属積層板のクラッド化深絞り加工法の概略を示す．まず，材質の異なるブランクAとブランクBを重ねてダイスに載せた後，しわ押さえによって積層したブランクを固定する．つぎに，パンチで積層したブランクの深絞り加工を行う．変形中のブランクは，ダイス肩部において，ブランクどうしの接触面での凝着が生じて接合する．これは，各ブランクの変形抵抗差によるすべりやブランクの肉厚増加に伴うしごきなどが生じるため

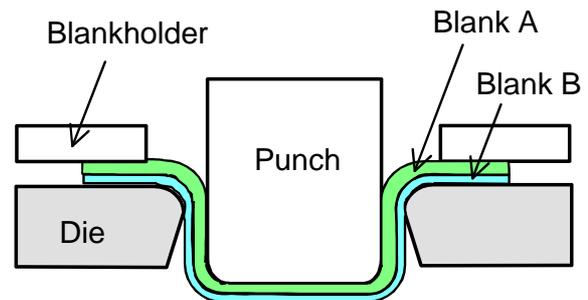


図1 金属積層板のクラッド化深絞り加工法

である。パンチとダイスのクリアランスは積層板の厚さとはほぼ同じ 0.5mm とし、市販の油性潤滑剤を用いた。また、多段深絞り加工は、段数の変化とともにパンチとダイスを交換することによって 絞り比 1.1~1.6 で行った。

2.2 ブランク材料と深絞り加工装置

ブランク材料として用いた金属薄板 ($t=0.1-0.3\text{mm}$, $d=32\text{mm}$) は、市販の極低炭素鋼、純チタン JIS 1 種、ステンレス鋼 SUS304、純アルミニウム、純ニッケル及び純銅の 6 種類である。これらの金属薄板を 2 種類以上組み合わせた積層板を深絞り加工に用いた。ただし、積層した薄板の合計の厚みは 0.5mm 一定となるようにした。また、積層薄板どうしの接触面、すなわち接合面はエメリー紙 #80 相当による研磨とアセトン脱脂による処理を行った。

深絞り加工は、実験用油圧プレス機 (2.5t 容量) を用いて行った。図 2 に、多段深絞り加工における実験装置を示す。ダイスの中心に固定したブランクをしわ発生防止用治具で固定し、パンチの押込みによって行った。パンチスピードは、40mm/s の一定速度である。絞り段数は 6 回であり、絞り比は 1 段で 1.6、2~6 段で約 1.2 である。1 段は平ダイス、2 段から 6 段は、ダイス半角 60° のテーパダイスを用いた。ダイスとパンチのクリアランスは、0.5mm とした。ダイスは冷間工具鋼 SKD11 であり、パンチは冷間工具鋼 SKD61 である。ただし、1 段において、ダイスは超硬合金を、パンチは SKD11 を用いた。潤滑剤は硫黄系液体潤滑剤と二硫化モリブデン系粉末潤滑剤である。表 2 に加工条件を示す。

2.3 純チタン薄板の大気酸化皮膜処理

純チタンは非常に活性な金属であるため、他の金属と親和性が高い。そのため、純チタンの深絞り加工においては工具との焼付きが激しいことが問題となっている。これまでの純チタンの深絞り加工に関する研究で、焼付き防止方法が行われている¹⁴⁻¹⁷⁾。その一つに、純チタン板に皮膜処理を施す方法が提案されており、著者も工具との焼付きを防止できることを報告している¹⁸⁻²³⁾。チタンは、大気雰囲気中で加熱すると厚い酸化皮膜を生成する性質を持っている。チタン薄板では、皮膜処理の中で簡便な方法である大気酸化皮膜処理を用いた²⁴⁾。酸化皮膜は加熱炉中で大気酸化を行い、加熱温度と時間を変化させて皮膜厚さを制御した。大気酸化皮膜処理工程は、ブランク研磨処理、脱脂洗浄処理、酸化皮膜処理、深絞り加工の順である。ではブランクに対して同心円状を描くようにブランク中心から外側へエメリー研磨 (#800) を行った。これは表面を清浄化することにより、酸化皮膜をより強固に形成するためである。ではアセトンによる洗浄を行い、では管状電気炉を用いて所定の温度と時間で大気酸化皮膜処理を行った。加熱条件は $600 \sim 3.6\text{ks}$ で、皮膜厚さは $0.125\mu\text{m}$ である。なお、皮膜処理後の材料表面における酸化皮膜厚さは、オージェ電子分光装置 (日本電子社製 JUMP-7800) を用いて測定した。試料表面に電子線を照射したときに発生

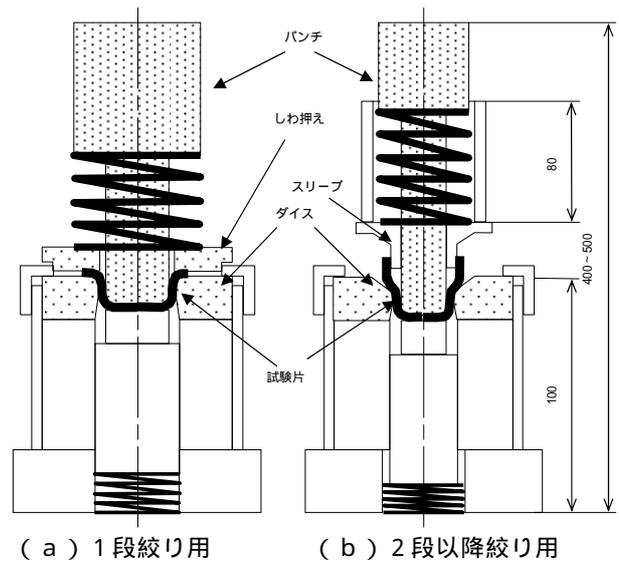


図 2 多段深絞り加工装置

表 1 多段深絞り加工条件

段数	絞り比	ダイス	パンチ	潤滑剤
1	1.6	超硬合金	SKD11	硫黄系油性液、二硫化モリブデン粉
2	1.3	SKD11	SKD61	
3-6	1.2			

するオージェ電子を利用して、試料表面の元素分析を行った。深さ方向の分析は、チタンピークの電子および酸素エネルギーの範囲における強度を、エッチング時に抽出することによって行った。深さと強度の関係は、エッチング速度とエッチング時間の関係から変換して求めた。酸化皮膜処理したブランクの表面近傍では、チタンの強度が酸素より低く、材料内部に向かい酸素の強度がチタンのそれより低くなる。これは、表面近傍ではチタンを覆うほどの酸化膜がついているが、徐々に膜厚が減少していくことを示している。本研究では、酸素とチタンの強度が同じになる深さを皮膜厚さと定義した。

3. 金属積層板の深絞り加工

3.1 Ti 内側の二層積層板

図 3 に、Ti 板が内側となるように Fe, Ni, Cu 板をそれぞれ組み合わせた積層板を 4 段まで絞り加工した二層クラッド容器の外観を示す。容器の外及び内表面において割れやしわなどの欠陥の発生は見られず、成形性は良好であった。また、容器開口部を見ると、容器外側の金属板は内側の金属板に比べて変形が大きい。これは、容器内側の Ti 板の変形抵抗が高いため、ダイス R 部でのしごきに伴い生じたものと考えられる。

3.2 Al 内側の二層積層板

図4に、Al板が内側となるようにFe, Ti, Cu板をそれぞれ組み合わせた積層板を3段あるいは4段まで絞り加工した二層クラッド容器の外観を示す。容器表面において割れなどの欠陥もなく、成形性は良好であった。また、容器開口部では、容器内側のAl板の変形が大きいことが分かる。

Al板やTi板以外の金属板が内側になる場合の成形性を調べた。図5に、Fe, Al, Ni, Cu, Ti板の中から組み合わせた二層積層板に対して6段絞りしたクラッド容器の外観を示す。容器の外及び内表面において、しわなどの欠陥の発生は見られず、成形性は良好であった。

3.3 Ti 外側の二層積層板

深絞り容器の外表面がチタン材料である場合、耐食性の富んだ製品として利用できる。しかしながら、前述したように化学的に活性な金属であるチタン材料は、他

の金属材料との親和性が高く、深絞り加工における工具との焼付きが激しいことが知られている。そこで、工具との焼付きを防ぐため、ブランクの表面に酸化皮膜処理を施した。

図6に、Ti板が外側となるように組み合わせた二層積層板を4～6段まで絞り加工した二層クラッド容器を示す。ダイスと接触するTi板表面は大気酸化皮膜処理が施してあるため、工具との焼付きの発生はなく良好なクラッド容器の成形が見られた。



図3 Ti 板内側の二層クラッド容器



図4 Al 板内側の二層クラッド容器



図5 6段絞りした二層クラッド容器

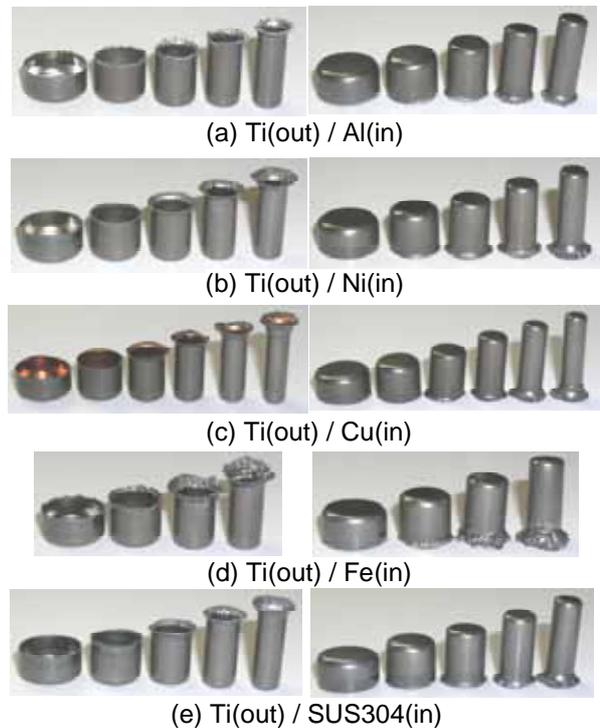


図6 Ti 板外側の二層クラッド容器

3.4 三層積層板

図7に、Fe板が外側となるように組み合わせたFe/Al/Cu三層積層板において4段絞り加工した三層クラッド容器の断面を示す。Fe、Al及びCu板の初期板厚は、0.2、0.2及び0.1mmである。断面の観察から破断などの欠陥はなく、また積層板間の界面において密着しているのが見られる。この結果から、三層の積層板においても良好な多段深絞り成型が可能であることが分かる。



(a) Sidewall



(b) Bottom-corner

図7 Fe(out)/Al/Cu(in)三層クラッド容器の断面
(観察部：絞り方向と平行)

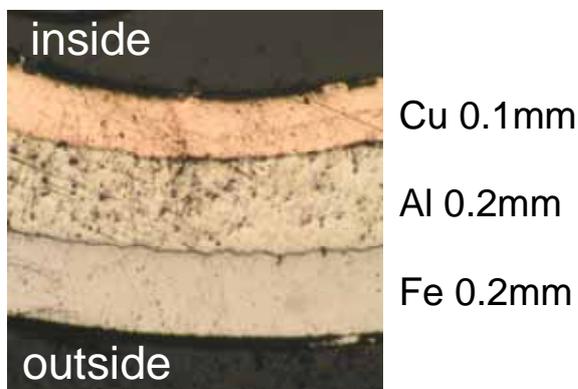


図8 加熱処理した三層クラッド容器の断面
(観察部：側壁中央部，絞り方向と垂直)

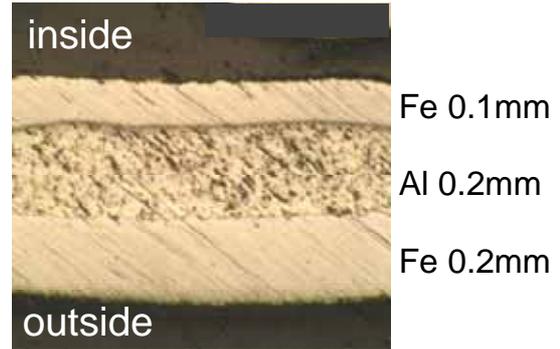


図9 アルミニウム薄板をインサート材として用いた三層クラッド容器の断面
(観察部：側壁中央部，絞り方向と垂直)

4. 積層板における接合性の改善

4.1 容器成形後の加熱処理

クラッド材料の作製を行う場合、接合材料の接合強度を高めるために加熱処理が有効であることが知られている。接合面での相互拡散を促すことによって、接合面での接合強度が高まるためである。とくに、深絞り加工によって容器自体が加工硬化しているため、拡散が容易に生じやすい。しかしながら、脆性を示す金属間化合物の生成を生じやすい金属の組み合わせ、例えばアルミニウムと鉄鋼材料への加熱処理は接合強度を逆に低下させることもよく知られている⁶⁾。そこで、接合部への加熱処理の影響について調べた。

図8に、真空中で500-7.2ksの焼鈍処理を施した4段絞り加工後の三層クラッド容器 Fe/Al/Cu の断面を示す。断面は容器の側壁中央部であり、Fe、Al及びCu板の初期板厚は、0.2、0.2及び0.1mmである。加熱温度はアルミニウムの再結晶温度以上の加熱であったが、各金属薄板の接合部においては拡散による合金層はほとんど見られなかった。

4.2 インサート材の利用

各種金属薄板の組み合わせで深絞り加工したクラッド容器において、アルミニウム板を用いたクラッド容器ではアルミニウム板の変形が大きいことが得られた(図4)。深絞り加工中における接合面での相対すべりが発生していると考えられ、接合面におけるすべりは接合強度を高めるのに有効であると考えられる。アルミニウム板を軟鋼板でサンドイッチした状態のまま4段まで深絞り加工を行った結果、アルミニウム板との二層クラッド容器で見られたような容器開口部でのアルミニウム板の大きな変形(突出部)が見られた。三層クラッドにおいても接合部での相対すべりが発生していると考えられる。したがって、純アルミニウムをインサート材として用いることは接合強度を高めるのに有効であることが分かる。

図9に、アルミニウム板を軟鋼板でサンドイッチした状態のまま4段まで深絞り加工した三層クラッド容器Fe/Al/Feの断面を示す。断面は容器の側壁中央部であり、Fe(容器内側)、Al及びFe板(容器外側)の初期板厚は、0.1、0.2及び0.2mmである。

5. おわりに

本研究では、製品までの製造工程を簡略化するとともに、加工可能な材質に関する制約を緩和するため、異種金属材料の接合と深絞り加工を同時進行させることによって、各種金属薄板を用いた細径クラッド容器の作製を試みた。各種異種金属板を用い、二層以上に重ね合わせた状態で6段までの多段深絞り加工を行った結果、絞り加工と同時に異種金属どうしの接合が可能であることが分かった。ダイス入口付近では、積層板の板厚増加が生じやすいので、新生面どうしが密着かつ材質の違いによるすべり作用も生じるため、界面での凝着及び焼付きが活発に進行するためと考えられる。また、工具との焼付きが激しい純チタンの深絞り成形においても、酸化皮膜処理による前処理によって多段による細径チタンクラッド容器の成形が可能であることが分かった。また、成形後の積層板間の接合強度を高めるため、成形後の熱処理や成型前の界面へのインサート材の挿入は有効であることが分かった。

謝辞

本研究を行うにあたり、財団法人天田金属加工機械技術振興財団より奨励研究助成金を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 諏訪稔一・木村秀途・山田義和・平尾克之・江原隆一郎：材料と環境，**54**-11(2005)，538-543.
- 2) 西尾一政・加藤光昭・山口富子：軽金属溶接，**42**-2(2004)，72-78.
- 3) 茅野林造・五味均・桜庭正広・斎藤康信：配管技術，**47**-8(2005)，11-16.
- 4) 外本和幸・柿本悦二：塑性と加工，**44**-512(2003)，906-910.
- 5) 福田隆：配管技術，**34**-7(1992)，96-101.
- 6) 日本塑性加工学会：接合，コロナ社，(1990)，252-257.
- 7) 鈴木良剛・吉田広明：電気製鋼，**73**-3(2002)，195-202.
- 8) 森園靖浩・西田稔・千葉昂・今村喜八郎：鉄と鋼，**85**-4(1999)，52-57.
- 9) 高橋一浩・井上剛・内田秀：新日鉄技報 No.375(2001)，38-42.
- 10) 系井高士・土肥康人・南紀夫・高塚弘幸：日立金属技報，**15**(1999)，91-96.
- 11) 谷口彰・河村善考・堀井貞夫：特開昭 63-194824 号公報，(1988).
- 12) 渡部豈臣・坂井修，特開平 6-297050 号公報，(1994).
- 13) 原田泰典，日本金属学会秋期大会概要集，(2002)，504.
- 14) 村田裕滋：プレス技術，**42**-2(2004)，22-29.
- 15) 深井英明：同上，**42**-2(2004)，35-38.
- 16) 木村茂樹：同上，**42**-2(2004)，69-72.
- 17) 片岡征二・木原諄二・相澤瀧彦：塑性と加工，**34**-385(1993)，210-215.
- 18) 村尾卓児・森謙一郎・原田泰典・加藤幸司・大久保不二男：同上，**43**-496(2002)，427-431.
- 19) 村尾卓児・森謙一郎・原田泰典・加藤幸司・大久保不二男：同上，**43**-495(2002)，336-340.
- 20) 村尾卓児・森謙一郎・原田泰典・大久保不二男：同上，**44**-504(2003)，55-59.
- 21) 原田泰典・森謙一郎・村尾卓児・今井雅浩・古川陽介・大久保不二男：同上，**45**-520(2004)，326-330.
- 22) 原田泰典・漆畑直人・村尾卓児・森謙一郎：同上，**45**-531(2005)，337-341.
- 23) 原田泰典・古川陽介・村尾卓児・森謙一郎・土田紀之深浦健三：同上，(2006)，印刷中.
- 24) 原田泰典・森謙一郎・加藤幸司・村尾卓児・大久保不二男：日本塑性加工学会春季講演論文集，(2001)，61-62.