

摩擦攪拌接合による鋼と高強度アルミニウム合金の異種金属接合材のプレス成形性

地方独立行政法人 大阪府立産業技術総合研究所 金属材料科

研究員 田中 努

(平成 21 年度一般研究開発助成 AF-2009024)

キーワード：摩擦攪拌接合、テーラードブランク、異種金属、深絞り加工

1. 研究の目的と背景

近年、輸送機器分野では、燃費の向上を目的とした車体軽量化が最も重要な課題の一つとなっている。現在、高張力鋼板の使用による使用重量の低減、アルミニウム合金・マグネシウム合金・炭素繊維複合材料などの軽量材料の適用、異厚・異材接合材による材料の適材適所化（テーラードブランク工法）などの軽量化技術が実用化されている。最近、さらなる軽量化技術として、鉄鋼とアルミニウム合金のテーラードブランク化に注目が集まっている。しかしながら、鉄鋼とアルミニウムの熔融溶接では、界面に非常に脆い金属間化合物相が形成され、健全な継手を得ることが困難であった¹⁾。その金属間化合物の形成を抑制し健全な継手を作製する接合方法として大きな期待が寄せられているのが、摩擦攪拌接合 (FSW) である。FSW は 1991 年に英国の TWI (The Welding Institute) で開発された接合技術である。図 1 に FSW の接合原理の模式図を示す。ショルダとプローブと呼ばれる部分から成る特有の形状を有するツールを高速回転させながら材料に挿入し、回転ツールと材料間に発生する摩擦熱とツールの回転による材料の攪拌を利用して接合する技術である。FSW は溶かさない接合、いわゆる固相接合の一種であり、低入熱で接合が可能のため、熔融溶接が困難な材料に対しても接合することができ、接合後のひずみも抑制され高品質な接合材を作製することができる²⁾。そのような利点から、現在までアルミニウムを中心とした低融点材料で多くの実用化がなされている。上述の鉄鋼とアルミニウムの接合時に形成する金属間化合物は接合温度に依存するため、低入熱で接合ができる FSW は、異種金属接合に適した接合方法である。実際に、FSW の接合条件を変えることによって接合温度を制御す

ると、接合温度の低下とともに接合材の強度が上昇することが明らかにされている³⁾。FSW を適用することにより、より高品質な鉄鋼とアルミニウム合金の接合材を作製することが可能であるが、実際のテーラードブランク工法では、接合材の接合強度だけではなく優れたプレス成形性も求められる。しかしながら、接合材の作製が困難であったことに起因して、鉄鋼とアルミニウムの接合材のプレス成形性についての研究はほとんど行われていない。そこで本研究では、鉄鋼とアルミニウム合金の接合材の深絞り性について調査するとともに、その挙動・特徴を明らかにし、深絞り性の改善法について検討を行った。

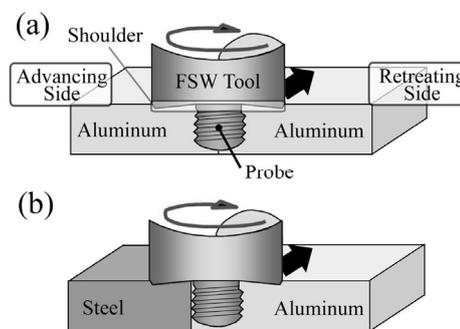


図 1 摩擦攪拌接合の原理図

2. 実験方法

本研究では、鉄鋼とアルミニウム合金の接合材の深絞り性の特徴を明らかにするために、種々の組み合わせの接合材を作製して試験を行った。接合母材は、厚さ 1mm の市販亜鉛めっき鋼板 (SGCC) と強度が異なる 3 種類のアルミニウム合金 (1100-0、5052-0、5182-0) を用いた。これら母材の機械的性質を表 1 に示す。これら 4 種類の母材を用いて、表 2 に示す 5 種類の接合材を FSW によって作製した。過去の報告⁴⁾に倣って、アルミニウム合金同

表1 供試材の引張特性

Materials	Angle to RD	Proof Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	n-value	r-value	\bar{r}	Δr
A1100-O	0	31.8	102.2	33.8	0.318	0.589	0.794	-0.323
	45	31.3	97.7	38.4	0.318	0.955		
	90	32.0	99.7	40.3	0.328	0.676		
A5052-O	0	91.9	206.5	28.7	0.327	0.908	0.665	0.286
	45	93.1	202.4	27.6	0.338	0.522		
	90	91.3	199.4	27.1	0.328	0.708		
A5182-O	0	136.9	283.1	26.9	0.394	0.636	0.766	-0.142
	45	135.3	287.3	30.3	0.387	0.837		
	90	138.2	288.9	28.0	0.386	0.754		
Zinc-coated steel	0	293.0	355.2	41.2	0.260	1.069	1.052	0.505
	45	304.4	366.8	38.2	0.246	0.799		
	90	302.7	356.5	43.0	0.253	1.539		

表2 接合材の引張特性と深絞り性

Mater. 1	Mater. 2	Joint Strength (MPa)	Joint Efficiency (%)	Mater. 1 LDR	Mater. 2 LDR	TWB LDR	LDR Efficiency (%)
Zn-coated steel	A1100-O	99.5	100.2	2.175	2.075	1.700	81.9
Zn-coated steel	A5052-O	198.5	97.9	2.175	2.100	1.850	88.1
Zn-coated steel	A5182-O	244.9	85.4	2.175	2.150	1.925	89.5
A5182-O	A5052-O	205.7	101.5	2.150	2.100	2.050	97.6
A5052-O	A5052-O	199.5	98.4	2.100	2.100	2.125	101.2

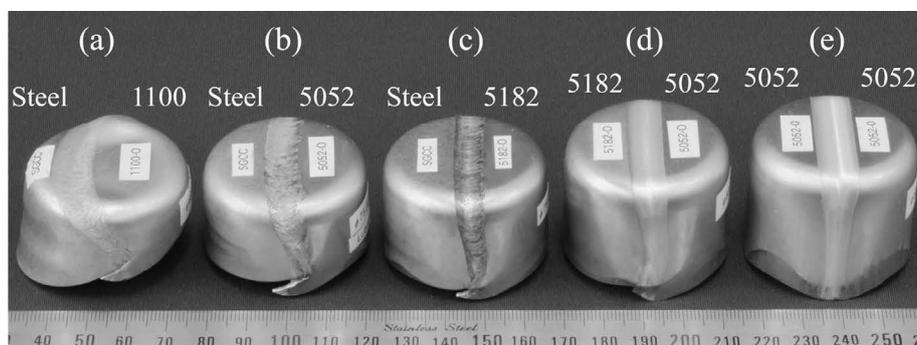


図2 各接合材のLDRにおける深絞り後の外観

士を接合する際は、ツール回転軸を突合せ面直上で接合し、SGCCとアルミニウムを接合する場合には、アルミニウムを Retreating side (ツールの回転方向と接合方向が逆になる側。その逆を Advancing side という) に配置し、さらにプローブが鋼板にわずかに接触するようにツール回転軸を移動させて接合を行った(図1参照)。接合にはショルダ部の直径10mm、プローブ部は直径3mm、長さ0.9mmの逆ねじを切ったツールを使用した。接合条件は、予備試験より得られた適正条件のツール回転数1500rpm、接合速度300mm/minを採用した。深絞り試験で

は、パンチ直径40mm、パンチ肩半径4mm、ダイ内径42.5mm、ダイ肩半径8mmを使用し、パンチスピードは60mm/min、しわ押さえ力3kN、潤滑材は豊国石油㈱のプレスオイルS-3を両面に塗布して行った。

3. 実験結果および考察

3. 1. 接合材の深絞り性

表2に、5種類の接合材の引張試験および深絞り試験結果を示す。接合材の引張試験は、突合せ面に対して垂直方向に行った。すべての組み合わせにおいて、継手効

率が 85%以上となり、良好な接合材が作製できていることがわかった。深絞り試験における限界絞り比(Limiting Drawing Ratio:LDR)については、5052 合金同士の接合材を除いて母材よりも接合材のほうが低くなった。1100 と SGCC の接合材の LDR は 1.7 と最も低い値を示したが、そのほかの接合材については 1.8 以上の絞りが可能であることがわかった。図 2 に各接合材の LDR における絞り後の試料外観を示す。(a)から(d)の異種金属接合材では、突合せ面の側壁端部における軟質材側の材料の突出や底部における接合ビードの硬質材側への張出しなどの成形の不均一性が観察された。この変形の不均一性は、LDR が低い接合材ほど顕著であった。図 3 には、接合材の LDR と両母材単体 LDR の平均値との比と、母材の強度比との関係を示す。母材の強度比が上昇するにつれて、接合材の LDR が低下している。つまり接合材の深絞り性は、接合母材の強度の差に強く依存していることがわかった。

図 4 に SGCC と 1100 の接合材において深絞り中に破断した試料の外観を示す。深絞り加工ではパンチ肩部で破断するのが一般的であるが、異種金属接合材ではパンチ肩部ではなく、接合界面から数 mm 離れた軟質側底部において接合線に沿って破断することがわかる。そこで、深絞り後のカップ底部のひずみを 2mm ピッチの格子状のけがき線の変位から算出した。図 5 に、SGCC と 5052 の接合材の接合線に対して垂直方向(ϵ_x)と平行方向(ϵ_y)のひずみ分布を示す。接合線から約 5mm 離れた 5052 側に、20% を超す垂直方向の高いひずみが観察された。一方、平行方向には顕著なひずみは観察されなかった。つまり、この高ひずみ領域のひずみ状態は平面引張ひずみモードになっていることが示唆される。小原らの報告⁵⁾によると、5052 合金の平面引張ひずみモードでは、主ひずみが約 20% で破断するため、局所的に破断限界に達していると考えられる。以上の実験結果より、異種金属接合材では、母材の強度差により成形中の材料変形が局在化し、さらにその領域が平面引張ひずみモードになるため、深絞り性が著しく低下することがわかった。

3. 2. シミュレーション解析

前節のように、異種金属接合材の成形は材料挙動が複雑であり成形性を予測することは容易ではない。それゆ

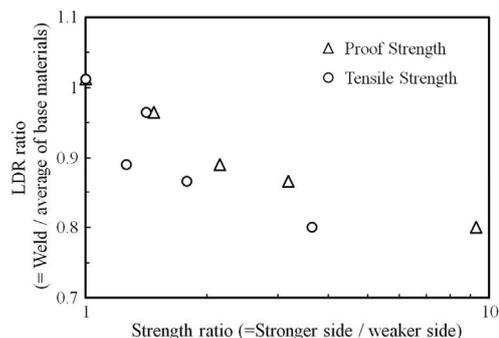


図 3 接合材の LDR と接合材を構成する両母材の平均 LDR との比と母材の強度比との関係

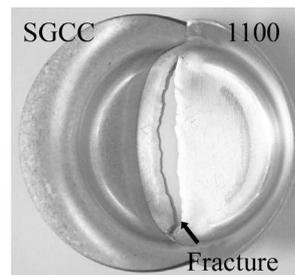


図 4 深絞り中に破断した試料外観

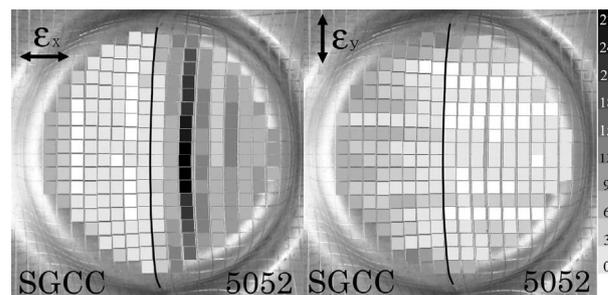


図 5 SGCC と 5052 の接合材における深絞り途中のカップ底部のひずみ分布

え、テーラードブランク工法における金型設計や研究開発には成形中の材料状態を予測するためのシミュレーション技術を確立することが重要かつ効果的である。そこで、汎用の構造解析ソフト (LS-DYNA) を用いて、実験結果との比較を行い、解析結果の妥当性を評価した。降伏関数は、SGCC については Hi11' 48 を、アルミニウム合金については Y1d2000-2d を用いた。材料の異方性も考慮するために、表 1 に示した各母材の r 値も計算に組み込んだ。摩擦係数は、実際の深絞り試験で計測した絞り荷重とシミュレーションにおける絞り荷重が一致する摩擦係数を採用し、SGCC は 0.12、アルミニウムは 0.17 である。図 6 に、各接合材の深絞り後の実験とシミュレーションにおける上面図を示す。シミュレーションで予測された外観は、フランジ部における耳の形状や接合線の湾曲な

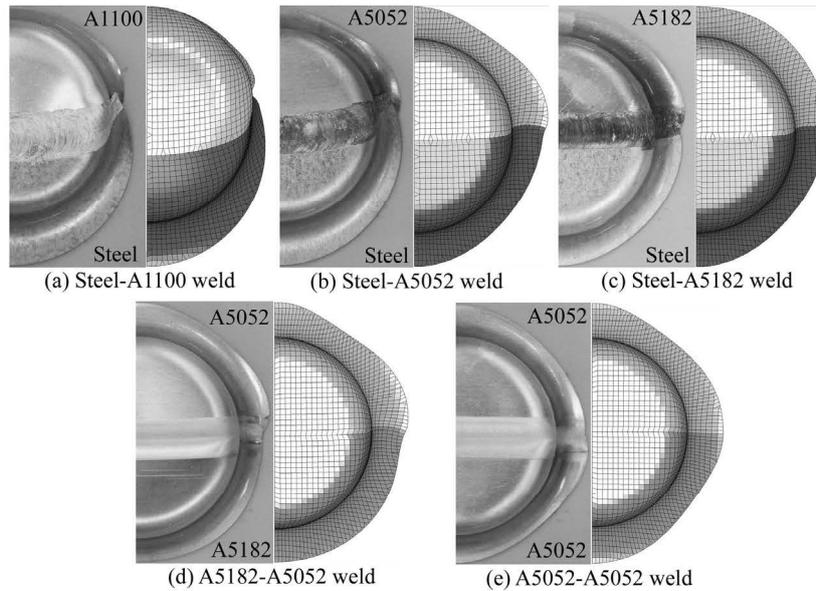


図6 各種接合材の実験とシミュレーションによる深絞り後の外観

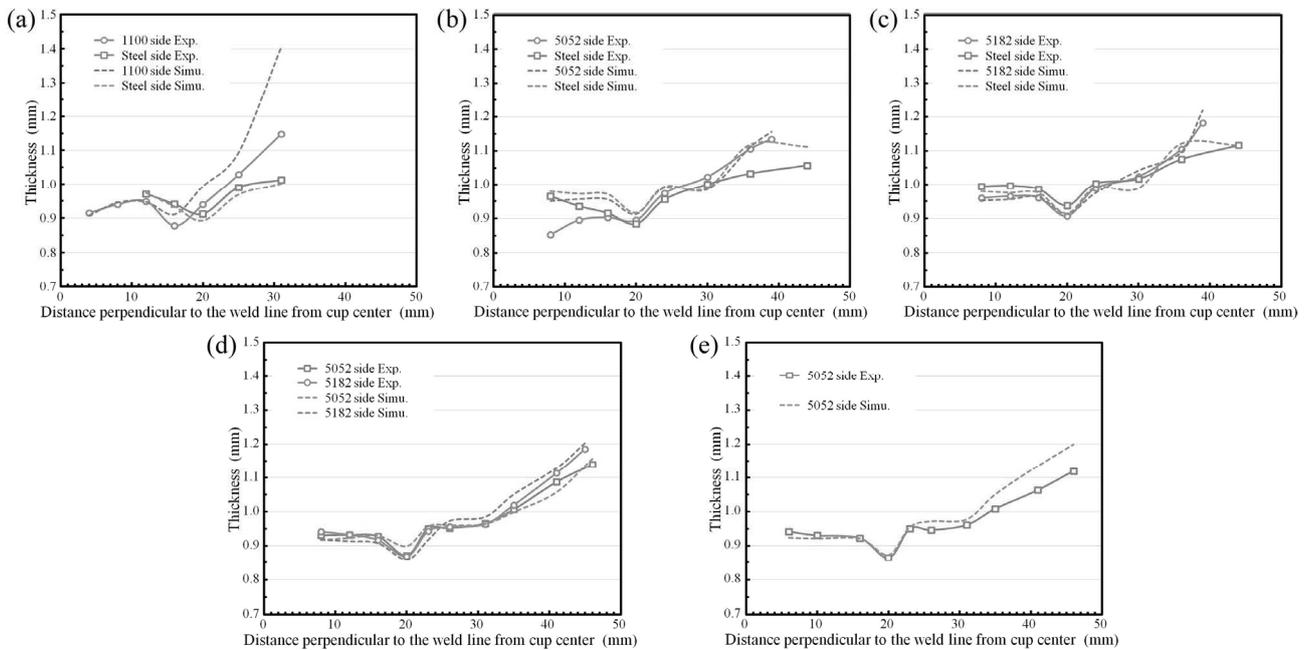


図7 各種接合材の深絞り後のカップ中心から接合線に垂直方向の距離と実測およびシミュレーションで予測された板厚の関係

ど実験結果とよく一致していることがわかる。また、図7に、深絞り後のカップ中心から接合線に垂直方向の距離と板厚の関係を実測値とシミュレーション値で表す。SGCCと1100の接合材と、SGCCと5052の接合材において、実測値とシミュレーション値との差が大きくなっている箇所が存在するが、それ以外における誤差は数%以内であり、異種金属接合材でも適切に深絞り中の材料状態を予測できることがわかった。

3. 3. 深絞り性改善法の考察

3.1.で、異種金属接合材の深絞り性が劣化するのは、成形過程で軟質材側に変形が局所化するためであることを示した。深絞り性の改善のためにはこの局所変形を抑制することが重要である。これまでに、底部におけるカウンターパンチの適用⁶⁾や、しわ押さえ力の制御⁷⁾等によって、テーラードブランクの成形性の改善を試みる報告がある。しかし、これらの方法は成形装置の複雑化につながるため、本研究ではより簡潔に摩擦の影響につ

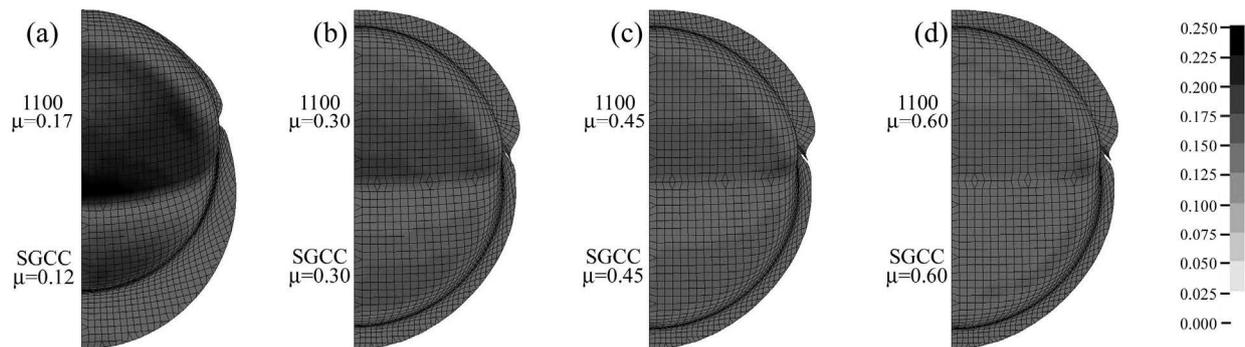


図8 SGCC と 1100 の接合材において摩擦係数が変化したときの第一主ひずみのシミュレーション結果

て着目し、シミュレーションでその効果を予測した後、実際の試験で確認を行った。図8に、SGCC と 1100 の接合材において、両母材の摩擦係数を 0.30、0.45、0.60 と変化させたときに予測される第一主ひずみ分布を示す。なお、図8(a)は3.2.で行ったシミュレーション結果、つまりプレスオイル S-3 を用いたときの結果である。両母材の摩擦係数をあげることによってカップ底部のひずみの不均一さが緩和されていることがわかる。また、図8(a)から(b)にかけて、軟質側の局所ひずみがほぼ消滅していること、およびフランジ部の絞り込み量がほぼ同じになっていることから、摩擦係数は 0.60 などのように劇的に上げる必要はなく、少しの増摩でも大きな効果があることが示唆された。実際の増摩方法として、無潤滑と粉末の松脂を水でペースト状にしたものを用いた。3.2.と同様に、シミュレーションで摩擦係数を予測したところ、無潤滑では SGCC は 0.42、アルミニウムは 0.22 であり、松脂ペーストでは SGCC は 0.25、アルミニウムは 0.24 であった。これまでの結果より、深絞り中底部は変形し難くし、フランジ部は絞り込みやすくすることが重要であると予測されるため、増摩はパンチと素板間だけに施し、残りの接触面はプレスオイル S-3 を塗布して深絞りを行った。図9に、SGCC と 5052 の接合材の各摩擦条件における LDR とカップ外観を示す。パンチと素板間を無潤滑もしくは松脂ペーストにすることによって深絞り性が改善されていることがわかった。また、深絞り性の改善効果は無潤滑よりも松脂ペーストのほうが高かった。これは、無潤滑ではアルミニウム側よりも SGCC 側の摩擦力が極端に高くなることから、アルミニウム側における変形の局所化が解消しなかったためだと考えられる。つ

まり、摩擦係数は両母材で同程度にすることが TWB の深絞り性改善のために肝要であることを示唆している。また、外観写真より LDR の上昇にともなって、カップ底部の接合線の曲率が緩和していることがわかる。特に、松脂ペーストを用いた場合には、LDR が高いにも関わらず接合線はほぼ直線を維持しており、図8における予測のとおりアルミニウム側のひずみの局所化が緩和されていることがわかる。

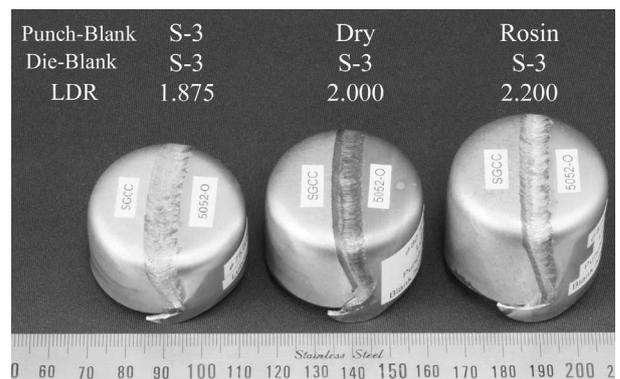


図9 SGCC と 5052 の接合材において増摩剤を用いたときの LDR と深絞り後の外観

4. 結論

本研究で、実験結果と数値計算技術を用いて、摩擦攪拌接合によって作製された異種金属接合材の深絞り挙動を明らかにした。さらに、その結果を基に、深絞り性の改善法の検討も行った。異種金属接合材の深絞り性は、接合材を構成する二つの母材単体よりもかなり低くなることがわかった。また、カップ底部の接合線が硬質材側に移動する現象や、軟質材側の接合線付近に成形性が乏しい平面引張りひずみモードの局所的塑性ひずみ領域が観察された。これらは、両母材の強度差に強く依存していることがわかった。この局所ひずみ領域を解消し深絞り

性を改善するために、深絞り中の摩擦力に着目して数値計算による材料挙動の予測と確認実験を行った。その結果、パンチ素板間の摩擦係数を両材料とも等しく上昇させることによって、局所ひずみおよび接合線の移動が緩和され、松脂ペーストで両母材の摩擦係数を約 0.25 程度にすることで、通常のプレスオイルを用いた場合よりも LDR が約 17% 上昇することを明らかにした。

謝辞

本研究は、天田金属加工機械技術振興財団平成 21 年度一般研究開発助成 (AF-2009024) により実施したものであり、ここに感謝の意を表します。また、摩擦攪拌接合や深絞り試験、シミュレーションの実施にあたり多大なご協力をいただいた、関西大学化学生命工学部森重大樹助教、地方独立行政法人大阪府立産業技術総合研究所の白川信彦氏、平田智丈氏、四宮徳章氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 森田泰、藤田幾雄、溶接技術 11 (1974) 20-26.
- 2) R. S. Mishra, Z. Y. Ma, Mater. Sci. Eng. R, 50 (2005) 1-78.
- 3) 田中努、森重大樹、平田智丈、溶接学会論文集 29, 2 (2011) 101-106.
- 4) 福本昌宏、椿正己、下田陽一郎、安井利明、溶接学会論文集 22, 2 (2004) 309-314.
- 5) 小原嗣朗、勝田基嗣、青木顕一郎、軽金属 35, 12 (1985) 700-704.
- 6) S. K. Panda, D. R. Kumar, J. Mater. Process. Technol., 204 (2008) 70-79.
- 7) C. Leitão, B. Emilio, B. M. Chaparro, D. M. Rodrigues, Mater. Design, 30 (2009) 3235-3242.