117302

セラミック/金属接合界面端近傍の残留応力に及ぼす金属側界面端形状の影響

Effects of Interface Edge Shape on Metal Side on Residual Stress in Ceramic to Metal Joint

○ 学 横井栄一郎 (工学院大院) 学 森川裕樹 (工学院大院)
正 立野昌義 (工学院大) 正 小久保邦雄 (工学院大)

Eiichirou YOKOI, Graduate school Kogakuin University, 2665-1, Nakano, Hachioji, Tokyo

Hiroki MORIKAWA, Masayoshi TATENO, and Kunio KOKUBO, Kogakuin University

Abstract The focus of this study is to clarify effects of interface wedge condition in Metal side on the bonding strength of ceramic to metal joint. Geometrical interface shape at the edge of the interface is characterized by wedge angle in both sides of the ceramic and metal defined as a configuration angle between free surface of each material and the interface. As the wedge angle of Si_3N_4 is right angle, the wedge angle of Ni is set over $30^\circ \leq \varphi_2 \leq 180^\circ$. Experimental Results showed that maximum tensile bonding strength was observed at the wedge angles of $\varphi_2 = 75^\circ$. It seems that this geometrical condition is critical conditions of the bonding strength and fracture pattern. Setting φ_2 near 75° improves the bonding strength since it decreases the residual stress near edge of the interface on ceramic side. This paper provides a useful geometrical interface shape to improve tensile bonding strength of ceramic to metal joint.

Key Words: Stress Relaxation, Residual Stress, Interface, Ceramic to Metal joint, Finite element method, thermal elastoplastic analysis

1. はじめに

異種材料接合体は、界面端近傍に残留応力が発生し、接合体強度が著しく低下する事が問題視されている。異種材料接合界面端近傍は理論上、応力が無限大(応力特異性)となることが明らかにされている⁽¹⁾。そのため界面端近傍の残留応力を緩和するためには、応力特異性を消失あるいは緩和するように界面端形状を適切に設定することが有効であると理論弾性解析結果から指摘されている。しかしながら、最適界面形状に関する実験的報告は少ないのが現状である。

本研究では、平板状窒化珪素 - ニッケル接合体(Si_3N_4 - Ni)を対象として、接合体強度に及ぼす界面端形状の影響を実験的に明らかにする。この結果と汎用有限要素法を用いた熱弾塑性解析結果との比較を行い、界面端の残留応力低減効果について考察する。

2. 実験方法および有限要素法解析方法

2.1 供試材料および試験片形状

本実験に使用したセラミック及び金属はそれぞれ日本タングステン(株)製 導電性窒化珪素 Si_3N_4 およびニラコ(株)製 ニッケル 99.9wt% Ni である。

Fig.1 は、実験に用いた異種材料接合体の試験片形状を示す。試験片を正面から見据えた際の各材料の自由表面と接合界面とのなす角度を界面端角度と定義して、 Si_3N_4 側界面端角度を φ_1 、Ni 側界面端角度を φ_2 とする。界面端角度 $\varphi_1 = \varphi_2 = 90^\circ$ とした接合体試験片を基本形状として、Ni 側界面端角度 $\varphi_2 < 90^\circ$ 、 $\varphi_2 > 90^\circ$ の際の界面端部形状を Fig.1(b), (c) に示す。実験に用いた界面端幾何条件は、 Si_3N_4 側界面端角度を $\varphi_1 = 90^\circ$ で一定としたまま、Ni 側界面端角度を $30^\circ \leq \varphi_2 \leq 180^\circ$ に設定した。

試験片の加工にはワイヤーカット放電加工機を用いた。

Fig.1 Configuration of Si_3N_4 -Ni joint specimens

2.2 接合処理と強度評価方法

接合方法は活性金属ろう付け法を用いる。ろう材には 63%Ag-35.25%Cu-1.75%Ti 合金を使用し、真空雰囲気中にて接合処理温度を $T=980^\circ\text{C}$ (1253 K) と設定した。接合体強度評価は引張試験により行い、クロスヘッドスピードを 1mm/min と一定条件とした。この試験にて得た最大荷重を接合面積で除した値を接合体強度と定義した。引張試験後の接合体界面(破断面)を CCD マイクロスコープを用いて観察を行った。

2.3 有限要素法解析方法

本報では、 $\varphi_1 = 90^\circ$ と設定したまま $30^\circ \leq \varphi_2 \leq 135^\circ$ と設定した界面幾何条件を有する平面ひずみセラミック-金属接合体について考える。接合体は実験における接合処理温度において、無応力、無ひずみ状態から一様に室温まで冷却する過程で発生するセラミック側接合界面端近傍の残留応力分布を汎用有限要素解析プログラム MSC.Marc Mentat2005r3 による熱弾塑

性解析で求めた。

解析ではセラミックは弾性体、金属は弾性係数、降伏応力、熱膨張係数に温度依存性を有する弾塑性体とし、4 節点ひずみ要素を用いた。接合体界面長さ W に対する解析モデルの最小要素寸法 r の比率は、 $r/W=3.4 \times 10^{-4}$ とした。本解析に用いた接合体モデルの一例(界面端幾何条件： $\varphi_1=90^\circ$ ， $\varphi_2=126^\circ$)を Fig.2 に示す。異種材料接合体モデルの界面長さはセラミックと金属側の自由表面長さと等しい長さ $W=W_c=W_m$ と設定した。界面端の要素数を増大させるため、隣り合う要素寸法の比率を 1 : 0.7 に要素分割した。周方向の要素を 9° 毎に分割した。

Fig.2 FEM model of bonded ceramic to metal joint

3. 接合体強度に及ぼす界面端形状の影響

Fig.3 に Si_3N_4 - Ni 接合体の接合体強度 σ に及ぼす金属側界面端角度 φ_2 の影響を示す。

実験結果から $75^\circ \leq \varphi_2 \leq 180^\circ$ における破壊様式はセラミック側界面端から破壊し $\varphi_2=105^\circ$ 付近にて最小接合体強度を示した。ただし、 $\varphi_2=105^\circ$ の接合体強度の平均値は $\varphi_2=180^\circ$ のそれとほぼ同程度である。 $\varphi_2=105^\circ$ から φ_2 を減少させるに伴い接合体強度は増大し、 $\varphi_2=75^\circ$ で最大強度を示した。 $30^\circ \leq \varphi_2 \leq 75^\circ$ では $\varphi_2=75^\circ$ から φ_2 減少させると接合体強度は減少する。この領域における破壊様式は端部付近にてセラミックとろう材界面から剥離が確認された。

破壊様式がセラミックとろう材界面からセラミック側界面端へと遷移する界面形状($\varphi_2=75^\circ$)付近と最大強度接合体を得る界面形状とが一致していることが確認できる。

Fig.3 Effects of interface wedge angle on bonding strength

4. 接合界面端近傍残留応力に及ぼす界面端形状の影響

$30^\circ \leq \varphi_2 \leq 135^\circ$ における異種材料接合体モデルを対象として、セラミック側自由表面上の σ_r (自由表面に沿った応力分布) を金属側界面端角度毎に求めた。この結果いずれのモデルにおいても応力に特異性が確認できた。さらに、界面端角度 φ_2 とセラミック側界面端近傍の σ_r 分布との関連を確認するため、各 FEM モデルの界面端近傍の節点 ($r/W=0.0003$, 0.0015 , 0.0130) から導出される σ_r と φ_2 との関係を Fig.4 に示す。

この結果 $30^\circ \leq \varphi_2 \leq 135^\circ$ において $\varphi_2=99^\circ$ 付近を境にして φ_2 を減少及び増大することにより、同一節点から出力されるセラミック側界面端の残留応力は減少する。上記と実験結果を比較することにより、 $75^\circ \leq \varphi_2 \leq 105^\circ$ にて φ_2 の減少に伴う接合体強度の増大理由は界面端残留応力の低減であると推察できる。

さらに $\varphi_2 < 75^\circ$ の接合体試験片でセラミックとろう材との界面で破壊した理由は、セラミック側界面端の破壊に対する抵抗が増大したためである。

接合体強度の最大値は破壊様式が遷移する界面形状で発生するため、接合温度条件および材料の組合せに依存する可能性がある。これらの検証は今後の課題となる。

5. まとめ

平板状 Si_3N_4 - Ni 接合体を対象として、接合体強度および界面端残留応力に及ぼす金属側界面端形状の影響を実験的および数値的に明らかにした。得られた結果を以下にまとめた。

- (1) $\varphi_2=105^\circ$ から φ_2 の減少に伴い接合体強度が上昇し、 $\varphi_2=75^\circ$ で最大接合体強度を示す。 $\varphi_2=75^\circ$ 近傍で破壊様式および接合体強度が遷移する。
- (2) 接合体強度の最大値は破壊様式が遷移する界面形状で発生するため、接合温度条件および材料の組合せに依存する可能性がある。

参考文献

- (1) 井上忠信, 久保司郎, 異材界面端の熱応力場, 材料 Vol.48, No.4, pp.365-375.(1999)
- (2) 古口日出男・ほか3名, 日本機械学会論文集A編, 1114, 59-560(1993)

Fig.4 Effects of interface wedge angle on thermal stress