

## 511 サーメットと超硬合金の熱衝撃による微小き裂の発生

## Thermal Shock Induced Microcracking of Cermets and Cemented Carbides

正 石原 外美 (富山大)      正 ○柴田 博司 (富山商船高専)  
正 五嶋 孝仁 (富山大)

Sotomi ISHIHARA, Faculty of Engineering, Toyama University, Toyama 930, Japan  
Hiroshi SHIBATA, Toyama National College of Maritime Technology, Toyama 933, Japan  
Takahito GOSHIMA, Faculty of Engineering, Toyama University, Toyama 930, Japan

**Key Words** : Thermal Shock, Simulation, Thermal stresses, Microcracking, Cutting tool

## 1. 緒言

熱衝撃が硬脆材料に加わるとき、不安定破壊に先立ち、材料の内部に微小き裂が発生することが知られている。これらの微小き裂の発生は、材料の最終破壊挙動に大きく影響することが予測される。著者らは、繰返し熱衝撃実験を超硬合金とサーメットに対して行い、微小き裂の発生が主き裂の成長挙動に大きく影響することを見出した。

本報告では、熱衝撃における微小き裂の発生挙動に関して、材料の微視組織の影響を検証する。そのために、材料の2次元微視組織構造を考慮した熱衝撃シミュレーションを行い、超硬合金とサーメットにおける挙動の違いについて検討する。

## 2. 熱衝撃シミュレーション

2.1 2次元多相多結晶微視組織力学モデル 多相多結晶材料の熱衝撃において、熱収縮あるいは熱膨張により各結晶粒に発生する微視的熱ひずみエネルギーは、巨視的き裂の発生に大きく影響することが予測される。Sridharらは、Fig.1 に示すような弾性バネからなる三角格子モデルを用いて、各結晶粒が線膨張係数の異方性を持つ場合の単相多結晶セラミックスにおける熱衝撃負荷時の微視的き裂の発生過程を検討している。

本報告では、Sridhar らの方法を単相多結晶材料から多相多結晶材料を取り扱えるように拡張することにより、超硬合金とサーメットのモデルに対して熱衝撃シミュレーションを行った。そして、熱衝撃下における微小き裂の発生過程に対する、各結晶粒の形状、寸法および熱的特性の影響について検討した。ただし、シミュレーションにおいて、線膨張係数は等方的であると仮定した。

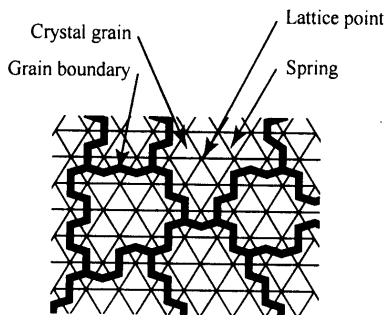


Fig.1 Microstructure mapped onto a triangular lattice of brittle, linear elastic springs.

2.2 バネ-格子エネルギー Fig.2 に示すような、格子点  $i, j, k$  からなる結晶粒の三角形格子を考える。熱衝撃の負荷として、格子点を連結しているバネに熱膨張あるいは熱収縮を与えた。格子バネに蓄えられる弾性エネルギーは、引張りりと曲げエネルギーの和  $E_{ij}$  として、以下の式で

与えられる。

$$E_{ij} = \phi_{ij}(R_{ij}) + \frac{1}{2} \sum_k \Psi_{ijk}(\bar{R}_{ij}, \bar{R}_{ik}) \quad (1)$$

$$\phi_{ij} = \frac{1}{2} k_{ij} (R_{ij} - a_0)^2 \quad (2)$$

$$\Psi_{ijk} = \frac{1}{2} c_{ijk} \left( \frac{\bar{R}_{ij} \cdot \bar{R}_{ik}}{|\bar{R}_{ij}| \cdot |\bar{R}_{ik}|} - b_0 \right)^2 \quad (3)$$

ここで、 $k_{ij}$  と  $c_{ijk}$  は、それぞれ引張りりと曲げのバネ剛性であり、 $a_0$  と  $b_0$  はそれぞれバネの初期長さや角度である。バネが結晶粒界に位置するとき、 $c$  と  $k$  の値を決定するのは困難であるので、近傍の結晶粒の平均値として定義した。さらに、シミュレーションでは粒界に位置するバネは、熱衝撃の瞬間には膨張あるいは収縮しないものと仮定した。バネが熱的に変形するとき、各バネの変形は互いに拘束される。熱衝撃後の最終的な格子点の平衡位置は、システムの弾性エネルギーの総和が最小となるように、各格子点を移動させることにより決定した。計算時の収束の判定は、繰返し毎の弾性エネルギーの総和の差が 0.5% 以下となる時点とした。

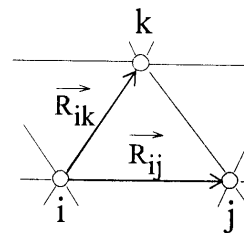


Fig.2 Microstructure mapped onto a triangular lattice of brittle, linear elastic springs.

2.3 熱衝撃によるき裂生成 粒内のバネ破壊に対する臨界エネルギー  $E_b^c$  は次式により求めた。

$$E_b^c = \beta \sigma_{st}^2 / 2E \quad (4)$$

ここで、 $E$  と  $\sigma_{st}$  はヤング率とバネが位置する結晶の引張強度であり、 $\beta$  は臨界破壊エネルギーに対する補正係数である。一方、粒界に相当するバネの破壊に対して、その臨界エネルギー  $E_{rb}^c$  が不明確のため、以下のパラメータを用いた。

$$R_{Ei} = E_{gb}^c / E_b^c \quad (5)$$

微小き裂の発生は、材料の弾性エネルギーの総和が最小

となる平衡位置を計算後に、各バネの最大弾性エネルギーの中で臨界エネルギーを越えるようなバネを抜き取ることにより評価した。微小き裂に相当するバネを除去した後に、再び弾性エネルギーの総和が最小となるように格子点を再配置し、除去するバネがなくなるまで計算を繰り返した。

繰返し熱衝撃シミュレーションに際しては、各格子バネにおいて、前回の熱衝撃により蓄えられた弾性エネルギーの50%が残留するものと仮定して行った。この仮定は、実験結果と良く一致するように行った。

### 3. シミュレーションと実験との比較

**3.1 超硬合金とサーメットの微視組織** 熱衝撃による微小き裂の発生挙動を超硬合金とサーメットに対して検討した。超硬合金の微視組織は硬質相 (WC) と結合相 (Co) から構成される。一方、サーメットは硬質相 (TiCN) が周辺組織 (Ti, W, Ta, Mo) で囲まれているような有芯構造を示す。周辺組織は硬質相と結合相の間の傾斜材料の役割を果たす。シミュレーションにおいて使用する上記2種の材料の多相多結晶の微視構造モデルは、これらの SEM 写真に適合するように作成した。

**3.2 結果と考察** Fig.3 は  $\Delta T=180\text{K}$  において5回の繰返し熱衝撃を加えた後の、超硬合金の表面状態のシミュレーション結果を示している。Fig.4 は  $\Delta T=180\text{K}$  における超硬合金の微小き裂密度の変化を、熱衝撃回数に対して示したものである。図より、シミュレーション結果と実験結果に良い一致が見られる。ここで、シミュレーションにおける粒界の臨界破壊エネルギーパラメータ  $R_E$  を 1.0, 0.8, 0.5 の3種類と仮定した。また、補正係数  $\beta$  は 3.5 とした。また、き裂密度は増加するが、数回の熱衝撃により飽和することが図よりわかる。もし、粒界での破壊エネルギーが粒内よりも約 20~50% 低いならば、実験とシミュレーションの結果は互いに良く一致することがわかる。

Fig.5 は  $\Delta T=180\text{K}$  において5回の熱衝撃後のサーメットの表面状態のシミュレーション結果を示している。また、Fig.6 は  $\Delta T=180\text{K}$  におけるサーメットの熱衝撃の繰返し数に対する微小き裂密度の変化を示している。図からサーメットの場合もシミュレーションと実験との良い一致が見られる。Fig.4 と Fig.6 を比較すると、同温度差では、サーメットには微小き裂は発生しにくくなっていることがわかる。この傾向は実験結果とも良く一致している。

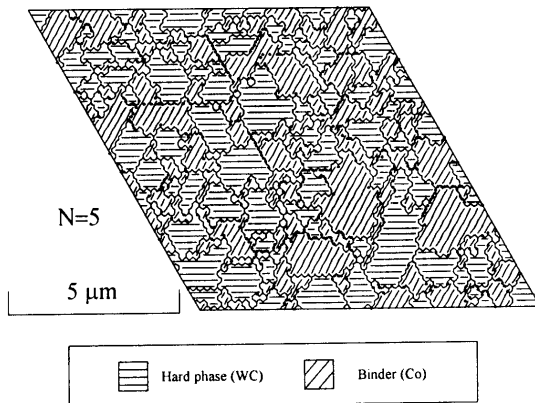


Fig.3. Simulation result showing a surface of cemented carbides after 5 times thermal shocks at  $\Delta T=180\text{(K)}$ .

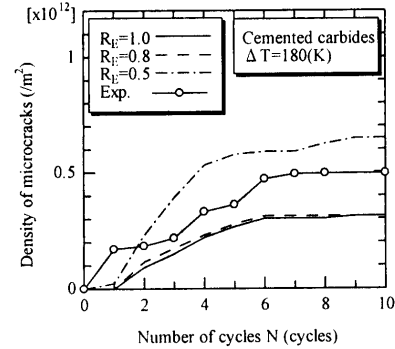


Fig.4. A change of crack-density as a function of number of thermal shock for cemented carbide at  $\Delta T=180\text{(K)}$ .

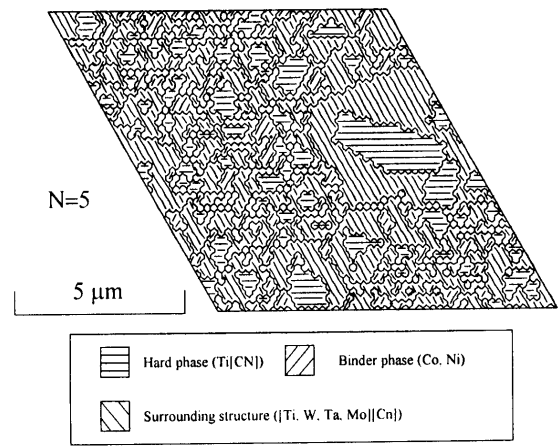


Fig.5. Simulation result showing a surface of cermets after 5 times thermal shocks at  $\Delta T=180\text{(K)}$ .

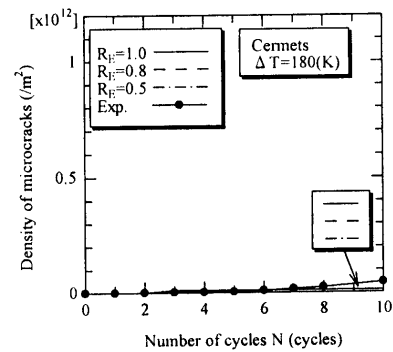


Fig.6. A change of crack-density as a function of number of thermal shock for cermets at  $\Delta T=180\text{(K)}$ .

### 4. 結言

(1) サーメットと超硬合金の両方に対して、熱衝撃下における微小き裂の発生に関するシミュレーションを行った。得られた結果は実験結果と良く一致した。

(2) 同一の熱衝撃条件下では、サーメットにおけるよりも超硬合金において、より多くの微小き裂が発生した。この違いは、両材料における硬質相と結合相の間の線膨張係数の違いによる。

参考文献略