

K-0416 超硬合金の熱衝撃における WC/Co 界面における熱き裂発生 Thermal Crack Generation at WC/Co Interface in the Thermal Shock of Cemented Carbide

石原 外美 (富山大学) 五嶋 孝仁 ○岩脇 章二

Sotomi ISHIHARA, Takahito GOSHIMA, Shoji IWAWAKI

Dept. of Mechanical Engineering, Toyama University, Toyama 930-8555, Japan

In the present study, the microscopic thermal stress induced by the thermal shock at the WC-Co interface was evaluated using finite element method. The macroscopic thermal stress is also generated due to the temperature distribution in the specimen. By superimposing the macroscopic thermal stress value on the microscopic thermal stress value, the breaking strength for the WC-Co interface of the cemented carbide was evaluated.

Keywords: Thermal shock, Thermal stress, Cemented carbides, Microscopic thermal stress, WC/Co interface

1. 緒言

著者らは、試験片の一面のみを冷却媒体に接触させることによって熱衝撃を与える、一面冷却型熱衝撃実験法が熱衝撃実験法として有用であることを、これまで報告してきた。(1)(2) この方法を用いることによって、熱衝撃時の発生熱応力を精度良く評価できる。Fig.1の超硬合金の熱衝撃実験結果が示すように、試験片高さの異なる3種類の試験片の実験において、熱衝撃後の曲げ強さは、材料によって定まる一定の熱応力値において低下する。従って、熱衝撃時のき裂発生強さは、800~900MPaであり、この値に試験片寸法依存性は認められない。この時、微視的には、Fig.2に見られるように、熱衝撃によって、WCとCoの界面に多数の微視割れが発生することが確認された。

熱衝撃で発生する応力には試験片内部に生じる不均一な温度分布から発生する巨視的な熱応力と、巨視的には温度が均一であったとしても、結晶粒界をはさんで熱膨張率の異なる結晶粒が結合している場合や、結晶の異方性等により、結晶粒内部及び粒界に結晶粒レベルでの微視的応力が発生する。微視割れが発生する時の、試験片内部の不均一温度分布に起因して生じる巨視的熱応力値は、800~900MPaと評価できたが、WC-Co界面近傍に生じる微視的熱応力値については明確になっていない。本研究では、熱衝撃時にWC-Co界面近傍に生じる微視的熱応力値を、有限要素法を用いて評価し、上記巨視的熱応力値と、微視的熱応力値を重ね合わせることによって、超硬合金のWC-Co界面に対する割れ強さを評価しようとするものである。

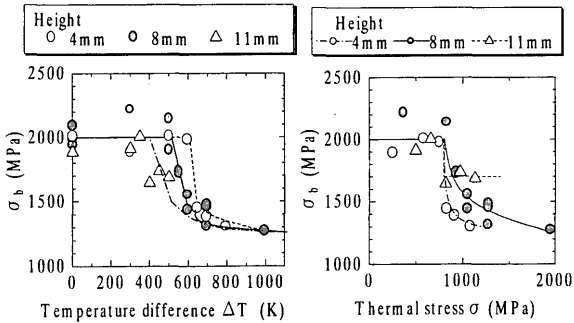


Fig.1 (a) Relationship between σ_b and ΔT .

(b) Relationship between σ_b and σ .

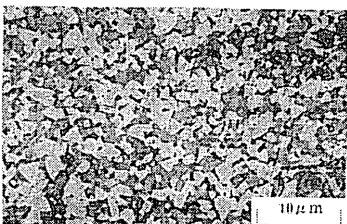


Fig.2 SEM photograph of microstructures for cemented carbides.

2 WC-Co 界面に発生する微視的熱応力の FEM 解析

汎用有限要素プログラム、MENTAT/MARC (日本マーク株式会社)を用い、任意の熱衝撃温度差を与えた場合の、結晶粒内並びに粒界に発生する微視的熱応力を求めた。

供試材として用いた超硬合金は Hard phase(WC)と Binder phase(Co)の2層で構成されている。それぞれの物性値を表1に示す。

Table 1 Mechanical properties of the hard and binder phase.

	Hard phase (WC)	Binder phase (Co)
Coefficient of linear expansion (K^{-1})	4.0×10^{-6}	12.3×10^{-6}
Young's modulus (GPa)	696	206
Poisson's modulus	0.222	0.222
Tensile strength (MPa)	392	256

超硬合金は、Fig.2に示すように、種々の形状、寸法の硬質相 WC が結合相 Co 内に3次的に不均一に分布している。本研究では、簡単のため、Fig.3に示すように、同一直径の円形状 WC が一定間隔で分布しているものと近似する。WC 結晶粒の直径は $1.5 \mu m$ 、粒間隔は $0.4 \mu m$ である。なお、対称性を考慮して図3(b)の1/4モデルを用い解析を行った。全節点数は709、全要素数は660であり、WCとCoの面積比は、試験片表面のSEM写真と同一の面積比、1対1.1になるように設定した。WC結晶粒に関しては弾性平面要素、Coに関しては弾塑性平面要素を採用した。Fig.4に、解析に用いたメッシュ分割図を示す。図に示すように、X軸及びY軸上の各節点はそれぞれY方向及びX方向に変位が拘束されている。解析にあたって、X及びY軸上以外の、境界の変位 U_x, U_y に対して、2つの境界状態を想定した。1つは、材料全体としての平均熱膨張率を与えるものである。この境界条件の採用によって、最もゆるやかに熱衝撃が負荷される場合を模擬できるものと考えられる。他のもう1つは、境界変位を完全拘束するものであり、最も厳しく熱衝撃が負荷される場合に対する計算を行った。

U_x および U_y の変位量は式(1)に示してあり、 $L, \nu, \alpha_{eff}, \Delta T$ はそれぞれ、モデルの1辺の長さ、ポアソン比、モデル全体の線膨張係数、熱衝撃温度差である。

$$U_x = U_y = L(1-\nu)\alpha_{eff}\Delta T \quad \dots (1)$$

熱衝撃時の弾塑性解析を行なうにあたって、 $\Delta T=1^\circ C$ づつ細かく変化させて解析の正確性を高くできるように工夫した。

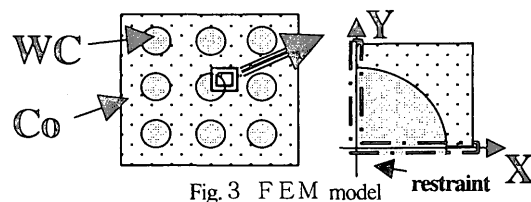


Fig.3 FEM model

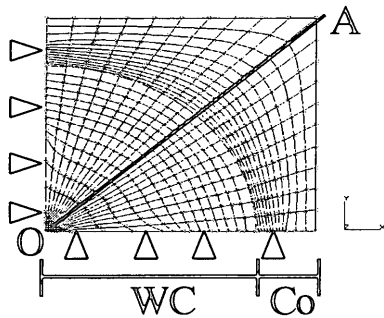


Fig. 4 FEM mesh

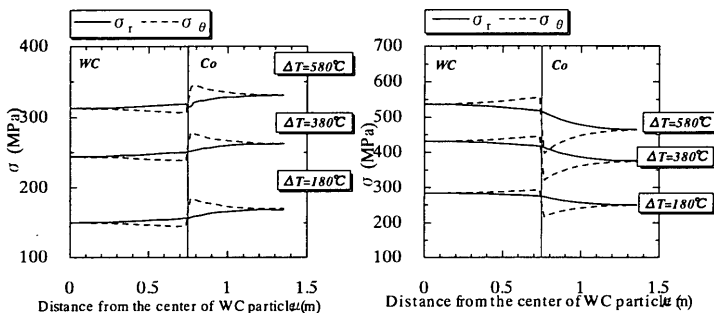
3. 計算結果および考察

3. 1 FEM モデルによる結晶内部の応力変化

Fig. 5 (a) (b)は、一例として $\Delta T=180\text{K}$, 380K , 580K の温度差で熱衝撃を荷した場合の、対角線 OA 上の、半径方向応力 σ_r 、並びに接線方向への σ_θ の応力変化を示したものである。図(a)は境界変位を許したもの、図(b)は境界変位を全面拘束したものである。

図より、いずれの場合も熱衝撃温度差 ΔT が大きくなるに従って発生熱応力が増加しているのが分かる。また、同じ ΔT 値において、図 (a)と(b)を比較すると、予測できることであるが、変位を拘束した図(b)の方が発生応力は高くなっている。

σ_θ に注目すると、図 (a), (b)ともに WC/Co 粒界を境にして大きく応力値が異なっている。しかしながら図(a)では、Co 側で大きくなっているのに対して、図(b)では、WC 側で大きくなっている。 σ_r に注目すると、図(a)では Co 側に近づくに従って、増加し続けるが、図(b)では逆に減少している。



(a) Displacement is allowed. (b) Displacement is restricted
Fig. 5 Stress distribution along the line AD.

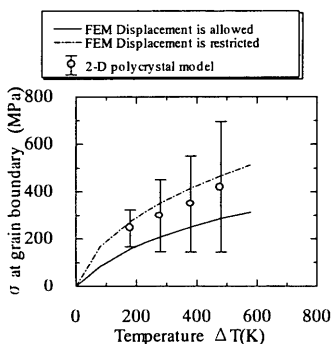


Fig. 6 Microscopic thermal stress as a function of ΔT .

Fig.6 は微視的熱応力 σ_{micro} を熱衝撃温度差の関数として表したものである。 ΔT の増加に伴い、微視的熱応力は単調に増加している。図中の黒丸は著者らが二次元多結晶モデルにより求めた

微視的熱応力結果を示したものである。これらの結果は、本有限要素法における上限解と下限解のほぼ中央に位置していることから、実際の熱衝撃実験においては、変位拘束と変位を与えた場合の中間の状態が生じているものと推察される。

3. 2 微小割れ発生時の WC/Co 界面強度

Fig.7(a), (b)は、試験片高さ方向への温度勾配から求められる巨視的熱応力 σ_{macro} と今回のシミュレーションで求めた結晶粒界に発生する微視的熱応力 σ_{micro} の2つの発生熱応力を重ね合わせた合応力 ($\sigma_{\text{micro}} + \sigma_{\text{macro}}$) を熱衝撃温度差の関数として示したものであり、3種類の試験片高さについて示している。図は境界変位を与えた場合の結果を示したものである。図より、臨界冷却温度差 ΔT_c における合応力は、試験片高さによらずほぼ一定値 1100MPa を取っている。一方、図は省略するが、境界変位を拘束した場合には、 1300MPa の値を取る。この材料の曲げ強さは約 2000MPa であるから、上記の粒界の微視割れ発生強さ、 $1100\sim 1300\text{MPa}$ は妥当と考えられる。本解析では、線膨張係数の異方性を考慮していないが、異方性を考慮した場合には、さらに大きな応力の発生が予想される。このような合応力が、強度の弱い結晶粒界に働いた場合、結晶粒界に大きな微視割れを発生させることが考えられる。この微視割れの個数、総面積、総長さ等がその材料の持っている臨界値に達すると曲げ強度の大きな低下を招くものと推察される。

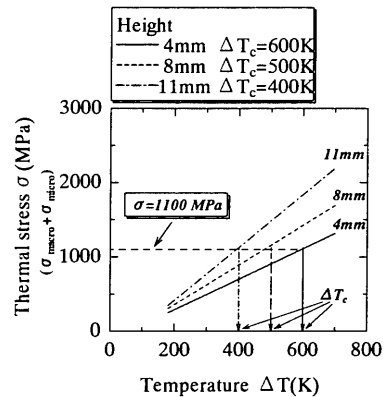


Fig.7 Change of total stress, $\sigma_{\text{micro}} + \sigma_{\text{macro}}$ as a function of ΔT .

4. 結言

熱衝撃時に結晶粒内部に発生する微視的熱応力や微視割れについて、有限要素法および多相多結晶材の熱種劇微視割れ発生シミュレーションについて調査した。以下に得られた結論を要約する。

- (1) $\Delta T=80\sim 580\text{K}$ の範囲で、結晶粒界に発生する応力は $100\text{MPa}\sim 400\text{MPa}$ の範囲で変化した。この結果は多相多結晶モデルによる結果とほぼ一致する。
- (2) FEM 解と多相多結晶モデルによる計算の結果臨界冷却温度差 ΔT_c において WC-Co 界面には約 $1300\sim 1500\text{MPa}$ 程度の応力が発生し、これは微視割れの発生を引き起こすのに十分な値と推察される。

References

- (1) S.Ishihara, ほか 3 名, Proc.1st.Int.Symp.Thermal Stresses'95, Hamamatsu, (1995), 47-150.
- (2) S.Ishihara, ほか 3 名, Proc.6th Int.Fatigue Congress, Fatigue'96, Berlin, (1996), 1633-1638.
- (3) 石原外美, ほか 3 名, 機論, 62-598, A(1996-6), 1327-1332.
- (4) J.S.Lin, Y.Miyamoto, K.Tanihata, J.Mater.Sci., 33(1998), 869-876.
- (5) N.Sridhar, W.Yang and D.J.Srolovitz, J.Am.Ceram.Soc., 77-5, (1994), 1123-1138.
- (6) 洲之内治男, 数値計算, (1978), 86-88, (株)サイエンス社.