WC-Co 系超硬合金における焼結残留応力および 単軸引張負荷による微視的応力・ひずみの解析*

大塚 昭夫^{*1}, 東郷 敬一郎^{*1}, 田川 哲哉^{*2}

Analyses of Sintering Residual Stress and Microscopic Stress/Strain under Uniaxial Tension in WC-Co Hardmetal

Akio OTSUKA, Keiichiro TOHGO, and Tetsuya TAGAWA

Analyses have been made on the sintering residual stress and the microscopic stress/strain under uniaxial tension in WC-Co hardmetal with a mechanical model of two-phase sintered materials, as proposed in a previous paper. The cooling process in sintering was simulated by introducing thermal stress into the mechanical model. The results obtained on the sintering residual stress in WC-grain and Co-binder agree well with the experimental values obtained by the X-ray diffraction method given in a reference. The analyses of the microscopic stress/strain in WC-grain and Co-binder were made under two initial conditions: one with no sintering residual stress and the other with sintering residual stress. The results of the calculation have shown that the sintering residual stress has no influence on the maximum values of microscopic stress in the WC-grain and Co-binder, but it has influence on the plastic deformation in the Co-binder. The variation of the transverse rupture strength of WC-Co hardmetal, as a function of Co volume fraction V_{Co} , is explained based on two kinds of fracture criteria, one of which is effective, depending on the value of V_{Co} : the transverse rupture strength is controlled by flaw size in the lower V_{Co} region, and by microscopic stress/strain in the higher V_{Co} region.

Key Words: Composite Materials, Two-phase Sintered Materials, WC-Co Hardmetal, Sintering Residual Stress, Microscopic Stress/Strain, Mechanical Model, Transverse Rupture Strength

1. 緒 言

WC-Co 系超硬合金は、高強度、高硬度および耐摩耗性を有していることから、切削工具あるいは強度、硬度、耐摩耗性などを要する各種機械構造部品として幅広く用いられており、その変形挙動・破壊挙動に関しても、多くの研究が行われている⁽¹⁾⁻⁽¹⁵⁾。これらの研究により、その変形・破壊挙動は、Co 体積率、WC 粒寸法、Co 結合相の mean free path、WC 粒と WC 粒の接触度 (contiguity) などの組織パラメータに依存すること、さらに、二相焼結材料であることから、WC 粒と Co 金属の熱膨張係数の違いにより発生した焼結残留応力が変形・破壊挙動にも影響を及ぼしている可能性があることなどが知られている。ところが、WC-Co 系超硬合金のような二相焼結材料は巨視的には均質材であるが、微視的には一種の複合材料であり、この複合性を考慮に入れた力学的取扱いが困難であることから、なお、多くの不明な点が残されている。変形・破壊挙動の組織パラメータ依存性の解明、焼結残留応

力の予測と変形・破壊挙動に及ぼす影響、さらには、破壊機構の解明などは、超硬合金の強度評価あるいは、用途に応じた材料設計を行ううえで、解決されねばならない問題点である。

著者らは、前報⁽¹⁶⁾において、WC-Co 系超硬合金などの二相焼結材料の構造的力学的特徴を反映し、かつ、微視的応力・ひずみを予測できる力学モデルを提案した。さらに、WC-Co 系超硬合金の弾性から弾塑性にわたる変形挙動を解析し、実験結果と比較することにより、その有効性を示した。

本報では、前報で提案された力学モデルに熱応力を導入し、WC-Co 系超硬合金の焼結残留応力の解析を行った。さらに、WC-Co 系超硬合金における単軸引張負荷による WC 粒、Co 金属の微視的応力・ひずみの解析を行い、微視的応力・ひずみと Co 体積率の関係、微視的応力・ひずみに及ぼす焼結残留応力の影響について調べた。これらの解析結果に基づいて、実際の静的破壊強度を支配する破壊条件について考察を試みた。

2. 熱応力を考慮した二相焼結材料の力学モデル

著者らは、前報⁽¹⁶⁾において WC-Co 系超硬合金の構造的力学的特徴を反映した力学モデルを提案した。本章では、その力学モデルについて簡単に説明すると

* 昭和 62 年 8 月 20 日 第 65 期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和 62 年 3 月 18 日。

^{*1} 正員、名古屋大学工学部 (〒464 名古屋市千種区不老町)。

^{*2} 学生員、名古屋大学大学院。

図1 二相焼結材料のモデル

もに熱応力の導入を行う。

WC-Co系超硬合金の微視的組織は、角ばったWC粒をCo金属を結合相として焼結した組織となっており、近似的には、図1に示すような、同一の大きさの立方体のWC粒が3主応力方向に三次元的に配列してCo金属により焼結された複合材料とみなすことができる。このモデル化された二相材料の変形挙動は、形状、変形の対称性により、図2(a)に示すようなWC粒(WC-grain, 粒寸法: D) およびその回りをCo金属(Co-binder, Binder厚さ: $\lambda/2$) で包んだ粒単位の変形挙動により表される。図2中の破線部がWC-grainで、細線と破線の間がCo-binderである。図2(a)に示す粒単位に巨視的応力($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$), 巨視的ひずみ($\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$)が作用するとき、GrainおよびBinderには微視的応力・ひずみが生ずる。図2(b)は図2(a)の太い実線で示す粒単位の1/8領域(図2中のハッチ部はWC-grainの1/8領域を示す)をGrain, X-binder, Y-binderおよびZ-binderとし、これらに生ずる平均的な微視的応力、ひずみを示したものである。例えば、Grainに生ずる微視的応力・ひずみは($\sigma_x^g, \sigma_y^g, \sigma_z^g$), ($\epsilon_x^g, \epsilon_y^g, \epsilon_z^g$)で、X-binderに生ずる微視的応力・ひずみは($\sigma_x^x, \sigma_y^x, \sigma_z^x$), ($\epsilon_x^x, \epsilon_y^x, \epsilon_z^x$)である。X-binderの応力・ひずみ6成分の内3成分 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ は粒単位の巨視的応力・ひずみ成分に等しくおくことができる。

ここでは、Grain, Binderの弾性変形のほかに、Binderの塑性変形、およびGrain, Binderの熱変形を考慮して、図2に示す微視的応力・ひずみ成分の増分に対して成立する関係式について考える。なお応力増分、ひずみ増分は(・)を付して示す。Binderの塑性変形はMisesの降伏条件に基づくPrandtl-Reussの式により記述されるとすると、塑性ひずみ増分 $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ は次式で与えられる。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \frac{9}{4H'} \bar{\sigma}^2 S_{ij} \dot{\sigma}_{kl} \dot{\sigma}_{kl} \quad (1)$$

(a)

(b)

図2 二相焼結材料の力学モデル

ここで、

$$\bar{\sigma} = \sqrt{(3/2) S_{ij} S_{ij}}$$

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_{kk} / 3$$

$H' (= d\bar{\sigma} / d\bar{\epsilon}_p)$ は加工硬化率である。また、Grain, Binderの温度変化 $\dot{T}$ により生ずるひずみ増分 $\dot{\epsilon}_{ij}^t$ は次式で与えられる。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^t = \beta_g \dot{T}, \quad \dot{\epsilon}_{ij}^t = \beta_b \dot{T} \quad (2)$$

ここで、 β_g, β_b はそれぞれGrain, Binderの熱膨張係数である。

Grainにおける全ひずみ増分は、弾性ひずみ増分と温度変化によるひずみ増分との和として与えられることより、

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_x^g = \frac{1}{E_g} \{ \dot{\sigma}_x^g - \nu_g (\dot{\sigma}_y^g + \dot{\sigma}_z^g) \} + \beta_g \dot{T} \\ \dot{\epsilon}_y^g = \frac{1}{E_g} \{ \dot{\sigma}_y^g - \nu_g (\dot{\sigma}_x^g + \dot{\sigma}_z^g) \} + \beta_g \dot{T} \\ \dot{\epsilon}_z^g = \frac{1}{E_g} \{ \dot{\sigma}_z^g - \nu_g (\dot{\sigma}_x^g + \dot{\sigma}_y^g) \} + \beta_g \dot{T} \end{cases} \quad (3)$$

また、Binderの全ひずみ増分は、弾性ひずみ増分、塑性ひずみ増分および温度変化によるひずみ増分の和として与えられることから、X-binderに対して、

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_x^X = \left(P_X S_x^X S_x^X + \frac{1}{E_b} \right) \dot{\sigma}_x + \left(P_X S_x^X S_y^X - \frac{\nu_b}{E_b} \right) \dot{\sigma}_y + \left(P_X S_x^X S_z^X - \frac{\nu_b}{E_b} \right) \dot{\sigma}_z + \beta_b \dot{T} \\ \dot{\epsilon}_y^X = \left(P_X S_y^X S_x^X - \frac{\nu_b}{E_b} \right) \dot{\sigma}_x + \left(P_X S_y^X S_y^X + \frac{1}{E_b} \right) \dot{\sigma}_y + \left(P_X S_y^X S_z^X - \frac{\nu_b}{E_b} \right) \dot{\sigma}_z + \beta_b \dot{T} \\ \dot{\epsilon}_z^X = \left(P_X S_z^X S_x^X - \frac{\nu_b}{E_b} \right) \dot{\sigma}_x + \left(P_X S_z^X S_y^X - \frac{\nu_b}{E_b} \right) \dot{\sigma}_y + \left(P_X S_z^X S_z^X + \frac{1}{E_b} \right) \dot{\sigma}_z + \beta_b \dot{T} \end{cases} \quad (4)$$

$$P_X = \alpha_X \frac{9}{4H_X \bar{\sigma}_X}$$

ここで S_x^X, S_y^X, S_z^X は X-binder の x, y, z 方向応力 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ の偏差成分, $H_X, \bar{\sigma}_X$ は X-binder の加工硬化率, 相当応力である。また, α_X は X-binder の応力ベクトルが降伏曲面上にあり, かつ負荷のとき 1, 応力ベクトルが降伏曲面の内部, あるいは降伏曲面上でも除荷のとき 0 である。以降 Y-binder, Z-binder についても同様である。Y-binder に対して,

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_x^Y = \left(P_Y S_x^Y S_x^Y + \frac{1}{E_b} \right) \dot{\sigma}_x + \left(P_Y S_x^Y S_y^Y - \frac{\nu_b}{E_b} \right) \dot{\sigma}_y + \left(P_Y S_x^Y S_z^Y - \frac{\nu_b}{E_b} \right) \dot{\sigma}_z + \beta_b \dot{T} \\ \dot{\epsilon}_y^Y = \left(P_Y S_y^Y S_x^Y - \frac{\nu_b}{E_b} \right) \dot{\sigma}_x + \left(P_Y S_y^Y S_y^Y + \frac{1}{E_b} \right) \dot{\sigma}_y + \left(P_Y S_y^Y S_z^Y - \frac{\nu_b}{E_b} \right) \dot{\sigma}_z + \beta_b \dot{T} \\ \dot{\epsilon}_z^Y = \left(P_Y S_z^Y S_x^Y - \frac{\nu_b}{E_b} \right) \dot{\sigma}_x + \left(P_Y S_z^Y S_y^Y - \frac{\nu_b}{E_b} \right) \dot{\sigma}_y + \left(P_Y S_z^Y S_z^Y + \frac{1}{E_b} \right) \dot{\sigma}_z + \beta_b \dot{T} \end{cases} \quad (5)$$

$$P_Y = \alpha_Y \frac{9}{4H_Y \bar{\sigma}_Y}$$

Z-binder に対して,

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_x^Z = \left(P_Z S_x^Z S_x^Z + \frac{1}{E_b} \right) \dot{\sigma}_x + \left(P_Z S_x^Z S_y^Z - \frac{\nu_b}{E_b} \right) \dot{\sigma}_y + \left(P_Z S_x^Z S_z^Z - \frac{\nu_b}{E_b} \right) \dot{\sigma}_z + \beta_b \dot{T} \\ \dot{\epsilon}_y^Z = \left(P_Z S_y^Z S_x^Z - \frac{\nu_b}{E_b} \right) \dot{\sigma}_x + \left(P_Z S_y^Z S_y^Z + \frac{1}{E_b} \right) \dot{\sigma}_y + \left(P_Z S_y^Z S_z^Z - \frac{\nu_b}{E_b} \right) \dot{\sigma}_z + \beta_b \dot{T} \\ \dot{\epsilon}_z^Z = \left(P_Z S_z^Z S_x^Z - \frac{\nu_b}{E_b} \right) \dot{\sigma}_x + \left(P_Z S_z^Z S_y^Z - \frac{\nu_b}{E_b} \right) \dot{\sigma}_y + \left(P_Z S_z^Z S_z^Z + \frac{1}{E_b} \right) \dot{\sigma}_z + \beta_b \dot{T} \end{cases} \quad (6)$$

$$P_Z = \alpha_Z \frac{9}{4H_Z \bar{\sigma}_Z}$$

さらに, 巨視的応力増分・ひずみ増分と Grain, Binder の微視的応力増分・ひずみ増分の間には, 以下の関係が成立する。

ひずみ増分に対して

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_x = A \dot{\epsilon}_x^G + B \dot{\epsilon}_x^B \\ \dot{\epsilon}_y = A \dot{\epsilon}_y^G + B \dot{\epsilon}_y^B \\ \dot{\epsilon}_z = A \dot{\epsilon}_z^G + B \dot{\epsilon}_z^B \end{cases} \quad (7)$$

$$A = \frac{D}{D+\lambda} \quad B = \frac{\lambda}{D+\lambda}$$

応力増分に対して

$$\begin{cases} \dot{\sigma}_x = F \dot{\sigma}_x^G + G (\dot{\sigma}_x^B + \dot{\sigma}_x^Y) \\ \dot{\sigma}_y = F \dot{\sigma}_y^G + G (\dot{\sigma}_y^B + \dot{\sigma}_y^Y) \\ \dot{\sigma}_z = F \dot{\sigma}_z^G + G (\dot{\sigma}_z^B + \dot{\sigma}_z^Y) \end{cases} \quad (8)$$

$$F = \frac{D^2}{(D+\lambda)^2} \quad G = \frac{(D+\lambda)^2 - D^2}{2(D+\lambda)^2}$$

以上の式(3)~(8)の18個の式を解くことにより, 温度変化を考慮した巨視的応力増分-ひずみ増分関係, および Grain, Binder の微視的応力増分・ひずみ増分が得られる。以上の増分計算を繰返すと, 任意の温度条件下の弾塑性変形挙動を解析することができる。

3. WC-Co 系超硬合金の焼結残留応力の解析

2章で示した力学モデルに基づいて, WC-Co 系超硬合金の焼結時の冷却過程に生ずる焼結残留応力の解析を試みた。解析は, 力学モデルにおいて巨視的応力増分 $(\dot{\sigma}_x, \dot{\sigma}_y, \dot{\sigma}_z)$ を $(0, 0, 0)$ とし, 温度変化 $\dot{T}$ のみを与え, 冷却過程の温度範囲に対して繰返し計算を行った。

表1に, 解析に用いた WC-grain, Co-binder のヤング率, ポアソン比, 熱膨張係数を示す。また Co-binder の降伏応力 $\sigma_0 = 55.2$ MPa で相当応力-相当塑性ひずみ関係は次式により与えた。

$$\bar{\sigma} = 3089 \times (1.0659 \times 10^{-4} + \bar{\epsilon}_p)^{0.44} \quad (9)$$

これらの材料定数は, Nishimatsu-Gurland⁽⁵⁾, Gur-

表1 解析に用いた WC, Co の材料定数

	Poisson's Ratio ν	Young's Modulus E (GPa)	Coefficient of Linear Thermal Expansion β
WC	0.22	703	5.5×10^{-6}
Co	0.30	207	12.5×10^{-6}

land⁽⁷⁾の実験結果より決定した。WC-Co系超硬合金の焼結温度は、一般に1400°Cから1500°C程度と言われているが、Gurlandは⁽⁷⁾、焼結時の冷却過程で熱応力が発生しはじめるのは約800°Cからであると指摘している。したがって、本解析でも800°Cから室温20°Cまでを冷却過程の温度範囲とした。また、この温度範囲で、表1に示したヤング率、ポアソン比、熱膨張係数およびCo-binderの降伏応力、相当応力-相当塑性ひずみ関係は変化するものと思われるが、詳細なデータが得られていないので、ここでは一定として解析を行った。

3.1 焼結残留応力 図3は、Co-binderの体積率 V_{Co} が30%の場合のWC-Co系超硬合金における、冷却過程に生じる熱応力、Binderの相当塑性ひずみの変化を示したものである。なお、 V_{Co} はBinderの厚さ λ と Grainの大きさ D の比 λ/D により次式で表される。

$$V_{Co} = 1 - \frac{1}{(1 + \lambda/D)^2} \quad (10)$$

図3に示すように、冷却により発生する熱応力は、WC-grainに生ずる等方的な圧縮応力 σ_R^b と Co-binderに生ずる層に沿った引張応力 σ_R^b である。また、冷却開始後すぐにBinderが降伏するため、Binderに相当塑性ひずみ ϵ_{PR}^b が生ずる。図3よりわかるように、熱応力は、冷却初期では弾性状態にあるため温度変化に対して急こう配で発生するが、Binder降伏後はなだらかに増加している。このことは、冷却終了時(20°C)すなわち焼結終了後の熱応力は、弾性として計算した場合と、塑性変形を考慮した場合とで得られる結果は大きく異なることを示している。Gurland⁽⁷⁾も同様な焼結残留応力の解析を弾性論に基づいて行い、

その場合、残留応力が非現実的に大きな値になることから、Binderの塑性変形を考慮することの重要性を指摘している。

図3における20°Cでの熱応力、すなわち焼結終了後の熱応力を焼結残留応力とし、この焼結残留応力を種々のCo-binderの体積率のWC-Co系超硬合金に対して解析した結果を図4に示す。また、図4にはBockら⁽⁹⁾により得られたX線回折法による残留応力の測定結果もプロットで示している。図4より、本解析で得られたWC-grainおよびCo-binderに生ずる焼結残留応力の解析結果とBockらの測定結果はよく一致していることがわかる。

3.2 焼結終了後の降伏曲面 前報⁽¹⁶⁾において、焼結残留応力を考慮しない場合のWC-Co系超硬合金の降伏曲面を力学モデルに基づいて求めた。その結果、WC-Co系超硬合金の降伏曲面は巨視的応力空間で、 Π 平面に傾斜した3つの楕円柱面により構成され、 Π 平面上での降伏曲線および σ_R^b を含む Π 平面に垂直な面上での降伏曲線は図5(a)、(b)のようになることを示した。図5はCo体積率 V_{Co} が30%の場合に対するもので、WC-Co系超硬合金の降伏曲線は図中の実線で示されるものとなる。

ここでは、3.1節で得られた焼結終了後の微視的応力状態を考慮に入れて、焼結終了後のWC-Co系超硬合金に対する降伏曲面について考える。焼結終了後のX-binderの微視的応力の成分は $(0, \sigma_R^b, \sigma_R^b)$ で、降伏応力は初期降伏応力 σ_0 から σ_R^b に上昇している。従って、巨視的応力 $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$ が負荷されたときのX-binderの微視的応力は $(\sigma_x, \sigma_y^b + \sigma_R^b, \sigma_z^b + \sigma_R^b)$ となり、X-binderの降伏条件は次式となる。

$$(\sigma_x - \sigma_y^b - \sigma_R^b)^2 + (\sigma_y^b - \sigma_z^b)^2 + (\sigma_z^b + \sigma_R^b - \sigma_x)^2 = 2\sigma_R^b{}^2 \quad (11)$$

図3 焼結時の冷却過程における熱応力およびCo-binderの相当塑性ひずみの変化

図4 焼結残留応力とCo体積率の関係

力学モデルに基づいて上式の σ_x^I, σ_y^I を、巨視的応力で表わすと、X-binderの降伏条件を巨視的応力空間上に示すことができる。図6(a), (b)は、以上のようにして得られたX-binder, Y-binderおよびZ-binderの降伏曲面を Π 平面上での曲線および σ_x^I 軸を含む Π 平面に垂直な面上での曲線で、 $V_{Co}=30\%$ に対して、示したものである。なお、図5, 図6とも降伏曲線は $\sigma_x^I, \sigma_y^I, \sigma_z^I$ を100%Coのときの Π 平面上での降伏曲線の半径 $\sqrt{2/3}\sigma_0$ で無次元化した値 $\sigma_x^{II}, \sigma_y^{II}, \sigma_z^{II}$ で示されている。図5, 図6からわかるように、WC-Co系超硬合金の降伏曲面は、焼結残留応力を考慮するか否かにより、かなり異なるようである。焼結残留応力を考慮しない場合は、図5の実線で示すように、 Π 平面を中心に弾性部分が存在するが、焼結残留応力を考慮した場合は、弾性部分は Π 平面の前方すなわち静水圧応力が正の方向に移動しており、負荷条件によっては、応力-ひずみ関係に弾性部分を生じないことを示している。なお、図5, 図6の破線部分は、3つのBinderの内1つあるいは2つのBinderが降伏しているため、塑性変形を考慮して増分計算により求められるべきであるが、ここでは、簡単のため、全Binderが弾性状態にあるものとして求められている。

4. WC-Co系超硬合金の単軸引張負荷における微視的応力・ひずみ

本章では、二相焼結材料の力学モデルに基づいて、

図5 焼結残留応力を考慮しない場合の降伏曲面

図6 焼結残留応力を考慮した場合の降伏曲面

種々のCo体積率をもつWC-Co系超硬合金が単軸引張負荷を受ける場合について解析した結果を示す。解析は初期状態として、焼結残留応力を考慮しない場合と焼結残留応力を考慮した場合について、 x 軸方向の単軸引張負荷に対して行った。なお、焼結残留応力を考慮した場合の解析においては、残留応力のほかに、Binderの残留塑性ひずみ、降伏応力の上昇も考慮している。

図7に、本解析により得られた単軸引張負荷における巨視的応力 σ_x と巨視的ひずみ ϵ_x の関係を示す。破線は焼結残留応力を考慮しない場合で、実線は考慮した場合である。図7より、焼結残留応力を考慮した場合が考慮しない場合より若干高い応力値を与えるようであるが、その差は小さく、単軸引張負荷の応力-ひずみ関係に及ぼす焼結残留応力の影響は小さいようである。また、焼結残留応力を考慮した場合に、高い応力値を与えているのは、焼結時の冷却過程でCo-binderが塑性変形、加工硬化し、降伏応力が上昇しているため、引張負荷過程ですべてのBinderが降伏するのに必要な応力が高くなったためである。

本力学モデルではGrainおよび全Binderの微視的応力・ひずみを得ることができるが、単軸引張負荷においてはGrainおよびX-binderにおける微視的応力・ひずみが大きな値となり、破壊挙動を論じる際に重要となるので、これらの応力・ひずみについて示す。また、焼結残留応力を考慮した場合としない場合では、Y-binderの応力 σ_y^I において大きな差異が現れるものと考えられるので、 σ_y^I についても示す。図8(a)

図7 焼結残留応力を考慮しない場合と考慮した場合の単軸引張特性

～(d)は、焼結残留応力を考慮しない場合の Grain の応力 σ_x^g , X-binder の相当応力 $\bar{\sigma}_x$, 相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_p^x$ および Y-binder の x 方向応力 σ_x^y の変化を示したものである。これらの図は、縦軸に巨視的応力 σ_x , 横軸に Co 体積率 V_{Co} をとり、微視的応力・ひずみの値をパラメータとした曲線群により表示してある。なお、図 2 よりわかるように、X-binder の x 方向応力 σ_x^x は巨視的応力 σ_x に等しく、これらの図と同様に表示すれば、 V_{Co} に依存しない水平な直線群になる。これらの図より、Grain では巨視的応力 σ_x より大きな値を示す微視的応力 σ_x^g が生じ、X-binder では微視的応力 σ_x^x は巨視的応力 σ_x に等しいものの、塑性変形が集中していることがわかる。また、これらの微視的応力・ひずみは巨視的応力 σ_x が同一の場合、Co 体積率が増加するほど大きな値となり、より厳しい応力・ひずみ状態になっていることが注目できる。

焼結残留応力および残留塑性ひずみを考慮した場合の単軸引張負荷における Grain の応力 σ_x^g , X-binder の相当応力 $\bar{\sigma}_x$, 相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_p^x$ および Y-binder の x 方向応力 σ_x^y の変化を図 9 (a)～(d) に示す。図 9 (a)～(d) 中の太い実線は、図 8 (a)～(d) 中の太い実線で示す微視的応力・ひずみと同一の値に対応するものである。焼結残留応力を考慮しない場合の結果(図 8)と焼結残留応力を考慮した場合の結果(図 9)の比較より、Grain の応力 σ_x^g は焼結残留応力の影響をさほど受けないが、X-binder の相当応力 $\bar{\sigma}_x$, 相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_p^x$ は焼結残留応力および残留塑性ひずみの影響を大きく受け、その影響は V_{Co} が小さいほど顕著になることがわかる。また、図 8 (d) と図 9 (d) の比較からわかるように、Y-binder の x 方向応力 σ_x^y に及ぼす焼結残留応力の影響は極めて大きい、応力値そのものが、X-binder の応力 σ_x^x (巨視的応力 σ_x に

図 8 焼結残留応力を考慮しない場合の単軸引張負荷による微視的応力・ひずみと Co 体積率の関係

図 9 焼結残留応力を考慮した場合の単軸引張負荷による微視的応力・ひずみと Co 体積率の関係

等しい)に比べて小さいので、変形挙動・破壊挙動を論じる際には、さほど重要でないと思われる。

以上のことより、焼結残留応力は、WC-grain および Co-binder の最大微視的応力にはあまり大きな影響を及ぼさないが、Co-binder の塑性変形に対しては、残留塑性ひずみおよび降伏応力の上昇を介して、大きな影響を及ぼすことがわかる。

5. 微視的応力・ひずみと静的破壊強度との関係

4章で示した単軸引張負荷における微視的応力・ひずみの変化(図8, 9)は、ある値の微視的応力・ひずみを実現するのに必要な巨視的応力と Co 体積率 V_{Co} の関係として表示されている。したがって、もしこれらの微視的応力・ひずみにより破壊条件が与えられるとするならば、その限界値に対応する1本の曲線は、単軸引張負荷における破壊応力と Co 体積率の関係を与えていることになる。すなわち、焼結残留応力を考慮しない解析結果に基づく、破壊条件として Grain の限界応力あるいは Binder の限界塑性ひずみをとった場合、Co 体積率が小さいほど高い破壊強度を示すことが予想される。ところが、実際の WC-Co 系超合金の破壊強度特性は、上述のように簡単には説明できないようである。

図10は、これまでに報告されている WC-Co 系超合金の曲げ破壊強度を、Co 体積率により整理したものである⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。図10に示されているように曲げ

破壊強度は、研究者、WC 粒寸法などの微視的組織および焼結方法などにより異なる値となり大きくばらついている。しかし、それぞれのデータについてみると、ある Co 体積率の組成で最大強度を示す傾向にある。つまり、WC 粒の寸法などの組織パラメータを一定とした場合、 V_{Co} に対する破壊強度特性は、図11に示すように、 V_{Co} の減少とともに破壊強度は徐々に増加し、ある V_{Co} 値で最大強度を示した後、急激に減少するようである。図11は、Chermant-Osterstock⁽¹¹⁾の曲げ破壊強度および破壊靱性値の実験結果を用いて破壊強度特性を説明したもので、横軸には V_{Co} とそれに対応する K_{Ic} 値を示し、図中には K_{Ic} と欠陥寸法(内在円形き裂を仮定)より得られる強度曲線を示している。このような WC-Co 系超合金の破壊強度特性は2種類の破壊条件により説明されるものと考えられる。すなわち、最大強度を示す V_{Co} より高 V_{Co} 側では微視的応力・ひずみ一定の曲線と傾向が同じであり、これらの微視的応力・ひずみに基づく破壊条件に支配されているものと思われる。一方、WC-Co 系超合金は V_{Co} が小さくなると低靱性となり欠陥強度が低下することから、最大強度を示す V_{Co} より低 V_{Co} 側では、欠陥を起点とした破壊条件に支配されているものと思われる。このような破壊強度特性の考え方に基くと、欠陥寸法を小さくすることにより、最大破壊強度を微視的応力・ひずみに基づく破壊条件に沿って、 V_{Co} の小さい所まで上げることができるとと思われる。実際、図10の Fujiwara⁽⁹⁾らの熱間静水圧プレス(HIP)処理に

図10 WC-Co系超合金の曲げ破壊強度とCo体積率の関係

図11 WC-Co系超合金の破壊強度特性の説明図

より欠陥を除去したもの(□), 通常の熱間焼結しただけのもの(■)に注目すると, HIP 処理したものが高い強度を示すとともに最大強度を示す V_{Co} は低 V_{Co} 側に移動している。しかし, 仮に高 V_{Co} 側での破壊条件が Binder の塑性ひずみ一定の条件により与えられるとすると, 図 9(c) に示されているように, 焼結残留応力の影響により, 相当塑性ひずみ一定の曲線はある値の V_{Co} で最大引張応力を与えていることから, HIP 処理により欠陥を除去しても, 最大強度の大きな増加を期待できないことが予想される。

本論文では, 力学的特性を支配する最も重要な因子と考えられる Co 体積率の影響を WC-grain, Co-binder の微視的応力・ひずみに着目して検討したが, WC-Co 系超硬合金は極めて複雑な組織であり, 変形・破壊挙動は, Co 体積率だけでなく WC 粒径⁽⁴⁾⁽¹²⁾, Co-binder の厚さ (mean free path)⁽⁶⁾, WC 粒と WC 粒の接触度 (contiguity) などの組織パラメータにも大きく依存することが知られている。したがって, さらに精度の良い予測を行うためには, これらのパラメータも考慮に入れたモデルを考えることが必要であると思われる。

6. 結 言

本論文で得られた主要な結論を以下に示す。

(1) 前報で提案された二相焼結材料の力学モデルに熱応力を導入し, WC-Co 系超硬合金における焼結時の冷却過程の解析を行った。その結果, 力学モデルにより得られた WC-grain および Co-binder に生ずる焼結残留応力は実験結果とよく一致しており, 力学モデルは, 二相焼結材料の焼結残留応力の予測に対して有効であることがわかった。

(2) WC-Co 系超硬合金の単軸引張負荷による微視的応力・ひずみの解析を, 焼結残留応力を考慮しない場合と考慮した場合について行い, Grain および

Binder の微視的応力・ひずみと Co 体積率 V_{Co} の関係, 微視的応力・ひずみに及ぼす焼結残留応力の影響を明らかにした。

(3) WC-Co 系超硬合金の曲げ破壊強度と Co 体積率 V_{Co} の関係は 2 種類の破壊条件により説明できることを示した。すなわち, 最大強度を示す V_{Co} より高 Co 側では, 微視的応力・ひずみに基づく破壊条件により支配され, 低 Co 側では, 欠陥を起点とした破壊条件により支配されている。

なお, 本研究は, 文部省 昭和 61 年度科学研究費, 一般研究 C の補助により行われたものである。ここに記して, 感謝の意を表する次第である。

文 献

- (1) Exner, H. E. and Gurland, J., *Powder Metall.*, 13-25 (1970), 13.
- (2) Almond, E. A. (Viswanadham, R. K., ほか 2 名, ed.), *Science of Hard Materials*, (1983), Plenum Press, 517.
- (3) 鈴木, 超硬合金と焼結硬質材料, (昭 61), 丸善.
- (4) Gurland, J. and Bardzil, P., *Trans. AIME, J. Met.*, (1955), 311.
- (5) Nishimastu, C. and Gurland, J., *Trans. Am. Soc. Met.*, 52 (1960), 469.
- (6) Gurland, J., *Trans. AIME*, 227 (1963), 1146.
- (7) Gurland, J., *Trans. Am. Soc. Met.*, 50 (1958), 1063.
- (8) Schultrich, B. (Kaldis, E. ed.), *Current Topics in Materials Science*, 12 (1985), 392, North-Holland.
- (9) 富士原・ほか 2 名, 粉体および粉末冶金, 25-8 (昭 53), 283.
- (10) Bouaouadja, N., ほか 4 名 (Odier, P., ほか 2 名, ed.), *Sci. Ceramics*, 13 (1985), C1-739.
- (11) Chermant, J. L. and Osterstock, F., *J. Mater. Sci.*, 11 (1976), 1939.
- (12) Fischmeister, H. and Exner, H. E., *Arch. Eisenhüttenwes.*, 37 (1966), 499.
- (13) 大塚・ほか 3 名, 材料, 36-401 (昭 62), 135.
- (14) 大塚・ほか 3 名, 材料, 36-404 (昭 62), 462.
- (15) 大塚・ほか 4 名, 第 18 回疲労シンポジウム前編集, (昭 61-11), 186, 材料投稿中.
- (16) 東郷・ほか 2 名, 機論, 53-494, A (昭 62), 1870.