

при дробеструйной обработке, где сжимающий наклёпной слой смещает зону инициирования трещин вглубь материала.

Из-за градиента остаточных напряжений трещиностойкость ФГМ варьируется по толщине: выше в зоне сжатия, ниже в зоне растяжения. Это открывает возможность управляемого формирования остаточных напряжений для повышения усталостной надёжности элементов.

Список использованных источников

1. ГОСТ R 57172–2016. Техническая диагностика. Определение поверхностных остаточных напряжений методом инструментального индентирования. Общие требования. – М.: Стандартиформ, 2017.

2. Pape F., Coors T., Poll G. Studies on the Influence of Residual Stresses on the Fatigue Life of Rolling Bearings in Dependence on the Production Processes // *Frontiers in Mechanical Engineering*. – 2020. – Vol. 6.

3. Sun J., Jing Q., Lei L., Zhang J. Compositional gradient affects the residual stress distribution in Si₃N₄/SiC functionally graded materials // *Ceramics International*. – 2023. – Vol. 49, No. 11.

4. Nemat-Alla M.M., Ata M.H., Bayoumi M.R., Khair-Eldeen W. Powder Metallurgical Fabrication and Microstructural Investigations of Aluminum/Steel Functionally Graded Material // *Materials Sciences and Applications*. – 2011. – Vol. 2, No. 12. – P. 1708–1718.

УДК 620.179.16

*К.Ф. Матвеева, А.С. Злобин, Е.Е. Селиванова, А.Д. Попов,
К.В. Тарakanовский*

ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПО ГЛУБИНЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНОГО МАТЕРИАЛА

Введение. Функционально-градиентные материалы (ФГМ) – это композитные материалы с изменяющимся по объёму составом и свойствами. Градиент позволяет объединить свойства различных материалов без резких границ. Металлокерамические ФГМ, сочетающие металл и керамику, перспективны для авиационно-ракетной промышленности при высокотемпературных нагрузках. Одним из первых направлений иссле-

дований ФГМ было создание градиентных термобарьерных покрытий для авиационно-космической техники [1].

Существенной проблемой при изготовлении и эксплуатации металлокерамических ФГМ являются остаточные термические напряжения. Они возникают при охлаждении после высокотемпературной обработки из-за разницы коэффициентов линейного теплового расширения (КЛТР) компонентов. Металлы и керамики обладают разными КЛТР, и при остывании каждый слой сжимается в разной степени. Более "теплорасширяемый" материал испытывает растягивающее воздействие от соседнего слоя, а материал с меньшим КЛТР оказывается сжатым первым. Например, в биматериале керамика–металл слой с более высоким КЛТР (обычно металлический) оказывается растянутым, а слой с низким КЛТР (керамический) – сжатым. Эти внутренние напряжения остаются в изделии как остаточные. Если величина термических остаточных напряжений превышает предел прочности какого-либо слоя, могут возникнуть трещины, приводящие к разрушению композиции. Подобные проблемы наблюдаются, например, при спекании многослойных твёрдосплавных пластин: из-за высоких внутренних напряжений после охлаждения на границах слоёв появляются трещины, и материал теряет сплошность. Даже если трещины не образуются, присутствие остаточных напряжений способно снизить прочностные характеристики композита [2].

Трещиностойкость является ключевым показателем сопротивляемости материала росту трещин. В ФГ структурах трещиностойкость может неоднородно распределяться по толщине из-за вариации локального состава и микроструктуры. Задача включает следующие составляющие: вычисление профиля остаточных термических напряжений по глубине ФГМ при охлаждении после технологического цикла; оценку локальных критических параметров разрушения с учётом влияния напряжений; анализ результирующего изменения трещиностойкости от поверхности к глубине.

Рассматривается плоский слой ФГМ толщиной H , градиент которого задан по координате x (от $x=0$ на поверхности до $x=H$ на внутренней стороне). Предполагается, что материал образован плавным переходом от керамической составляющей (на поверхности) к металлической (на внутренней стороне). Анализ проводится в условиях плоского деформирования при однородной температурной нагрузке. Исходно при температуре спекания T_E материал свободен от напряжений. После охлаждения до

температуры эксплуатации T_o ($\Delta T = T_E - T_o > 0$) из-за несовпадения усадки разных слоёв возникают собственные напряжения $\sigma_{res(x)}$. Требуется найти $\sigma_{res(x)}$ и оценить критическое условие распространения трещины в разных слоях. В качестве критерия хрупкого разрушения используется условие Ирвина. При наличии остаточных напряжений условие можно записать в виде:

$$K_{I,общ} = K_{I,внешн} + K_{I,res} \geq K_{IC},$$

где $K_{I,внешн}$ – вклад от внешней нагрузки, $K_{I,res}$ – вклад от поля остаточных напряжений, а K_{IC} – критический КИН материала (без остаточных напряжений). Интерес представляет эффективное значение $K_{I,эфф} = K_{IC} - K_{I,res}$ для различных слоёв: это величина внешнего КИН, которая требуется для развития трещины с учётом влияния остаточных напряжений. Задача – выяснить, как распределяется $K_{I,эфф}$ по толщине ФГМ и где находится уязвимая зона с точки зрения трещиностойкости.

Для оценки остаточных термических напряжений используется модель пластины с плавно изменяющимися упругими и термическими свойствами, где $E(x)$ – модуль Юнга, $\nu(x)$ – коэффициент Пуассона, $\alpha(x)$ – коэффициент линейного теплового расширения, зависящие от координаты x по толщине. Линейный градиент свойств от поверхности ($x=0$, керамика) к внутренней границе ($x=H$, металл). При охлаждении на ΔT элемент толщины стремится уменьшиться на величину $\alpha(x)$. Поскольку слои связаны между собой, возникает несовместность деформаций: более «сжимающийся» (большой α) материал – принудительно растянут, менее сжимающийся (малый α) – сжат. Для плоского случая без изгиба условие равновесия требует, чтобы среднее укорочение всех слоёв было одинаковым, а суммарное усилие по сечению равнялось нулю. Решение задачи даёт распределение термических остаточных напряжений $\sigma_{res(x)}$, удовлетворяющее уравнениям равновесия и совместности деформаций. В простейшем случае двухслойной системы формулы для остаточных напряжений можно записать явно. Пусть верхний слой (толщина h_1) имеет параметры E_1 , ν_1 , α_1 , а нижний слой (h_2) – E_2 , ν_2 , α_2 . Проанализируем случай плоского напряжённого состояния. При охлаждении на ΔT в отсутствие сцепления каждый слой изменит свою длину L на $\Delta L_i = \alpha_i \Delta T$, где L – некоторая базовая длина. В связанной системе возникают напряжения σ_1 и σ_2 (предполагаем их однородными по толщине каждого слоя для данной модели), которые можно найти из условий:

(а) деформации слоёв равны:

$$\frac{\sigma_1}{E_1/(1-\nu_1)} + \alpha_1 \Delta T = \frac{\sigma_2}{E_2/(1-\nu_2)} + \alpha_2 \Delta T,$$

(б) силы в слоях уравниваются:

$$\sigma_1 h_1 = \sigma_2 h_2 \text{ (считаем ширину 1).}$$

Находим выражения для σ_1 и σ_2 . В качественном виде решение соответствует описанному распределению: слой с бóльшим КЛТР получает растягивающие остаточные напряжения, с меньшим – сжимающие. Для многослойного или непрерывно градиентного материала (ГМ) задача решается интегрально-дифференциальными методами, но принцип остаётся аналогичным [2].

На практике для вычисления $\sigma_{res(x)}$ в непрерывно ГМ часто разбивают толщину на большое число тонких слоёв и применяют поэтапный подход, либо используют известные решения для частных случаев [3]. Аналитические методы основаны на учёте совместности упругих деформаций: известен метод совместной деформации, предложенный для оценки остаточных напряжений в градиентном соединении ZrO_2-Ni . Его суть заключается в том, что суммарная длина пакета после охлаждения фиксирована и рассчитывается необходимое напряжение в каждом слое, чтобы компенсация тепловых расширений выполнялась (этот метод даёт результаты, хорошо согласующиеся с численным моделированием, например, с методом конечных элементов). В рамках данной работы для оценки напряжений используется описанный выше подход с дискретизацией градиента по толщине и решением системы уравнений равновесия. Это позволяет получить профиль $\sigma_{res(x)}$ по толщине ФГМ.

Рассмотрим полубесконечную трещину, возникающую в материале на некоторой глубине a от поверхности. КИН от внешней нагрузки при длине трещины a определяется классическими формулами: например, для сквозной трещины в бесконечной пластине:

$$K_{1, \text{внешн}} = \sigma_{\text{экстр}} Y \sqrt{\pi a},$$

где $\sigma_{\text{экстр}(x)}$ – внешнее напряжение, Y – коэффициент формы (для сквозной трещины $Y \approx 1$). Для остаточного напряжения, распределённого по длине трещины, КИН можно вычислить по принципу суперпозиции, ин-

тегрируя вклад собственных напряжений вдоль раскрытия трещины [4]. В частности, используя весовые функции метода Бюккнера, можно оценить:

$$K_{I,res}(a) = \frac{2}{\sqrt{\pi a}} \int_0^a \sigma_{res}(x) \sqrt{a-x} dx,$$

где интегрирование ведётся от вершины трещины ($x=a$) вглубь на длину трещины. В случае приблизительно постоянного остаточного напряжения σ_r на участке длины трещины это уравнение даёт простое приближение $K_{I,res} \approx \sigma_r \sqrt{\pi a}$. Остаточное растягивающее напряжение (положительное σ_r) эффективно увеличивает КИН (приближая $K_{I,общ}$ к критическому), а остаточное сжимающее напряжение (отрицательное σ_r) снижает результирующий КИН, препятствуя раскрытию трещины. То есть сжимающие напряжения повышают кажущуюся трещиностойкость (необходим бо льший внешний нагрузочный КИН для роста трещины), тогда как растягивающие – понижают её.

Вязкость разрушения $K_{I,C}$ самого материала также может изменяться по глубине вследствие градиента состава. Для качественной оценки $K_{I,C}(x)$ можно использовать правило смеси или эмпирические зависимости для данного композита. Например, для металлокерамических систем часто $K_{I,C}$ растёт с увеличением доли металлической фазы. В отсутствии остаточных напряжений такой материал имел бы монотонный рост трещиностойкости от поверхности (керамика, низкий $K_{I,C}$) к основанию (металл, высокий $K_{I,C}$). Остаточные напряжения, наложенные на этот фон, могут выровнять распределение или даже изменить экстремумы трещиностойкости.

Для конкретизации рассмотрим пример: функционально-градиентный твёрдый сплав, полученный спеканием двух слоёв: поверхностного ультрамелкозернистого WC–8%Co и подложки из среднезернистого WC–15%Co. За счёт диффузии кобальта при спекании получен плавный градиент: содержание Co у поверхности выросло до ~14–18%, а в нижнем слое снизилось до ~7%. Это привело к перераспределению локальной трещиностойкости: упрочнённый кобальтом верхний слой полу-

чил $K_{I,C} \approx 13,1-18,7 \text{ МПа}\cdot\sqrt{\text{м}}$ тогда как нижний слой имел $K_{I,C} \approx 16,1-18,9 \text{ МПа}\cdot\sqrt{\text{м}}$.

Максимум вязкости ($\sim 18,9$) наблюдался вблизи границы слоёв. Градиент состава существенно сгладил разницу в трещиностойкости между хрупкой основой и вязкой подложкой. При охлаждении карбид вольфрама (WC) и кобальтовая связка также испытывают остаточные напряжения из-за неоднородной усадки. Поверхностный слой находился в состоянии сжатия, а внутренний – в натяжении, что дополнительно повысило сопротивление росту трещин с поверхности. Некоторое расхождение – фактически миграция кобальта была меньше, чем предсказывала модель. Это подчёркивает сложность точного прогнозирования градиента свойств и напряжений, однако общий тренд распределения $K_{I,C}$ был успешно задан.

Подобный подход применяется к аналогу металлокерамического ФГМ на основе сплава Ni–Cr–Al (металлическая связка типа жаропрочного сплава) и стабилизированного диоксида циркония (ZrO_2 , керамика). При оптимальном градиенте фракции ZrO_2 по толщине можно существенно снизить уровень остаточных напряжений, не допуская их концентрации на одной границе. Современные технологии, например, искровое плазменное спекание и диффузионное соединение, позволяют получать градиентные переходы между разнородными материалами, вводя прослойки из специальных связующих и демпфирующих компонентов. Такая переходная градиентная зона уменьшает разность КЛТР и релаксирует напряжения, предотвращая образование трещин и обеспечивая целостность композиции. В аналитическом расчёте эффект от оптимизации градиента можно учесть, варьируя профиль $\alpha(x)$ и модулей $E(x)$, стремясь к снижению пиковых $\sigma_{\text{res}}(x)$. Мы исследуем два сценария: резкий би-слой (для сравнения) и сглаженный градиент в 3–5 промежуточных слоёв. Для каждого сценария вычисляется распределение $\sigma_{\text{res}}(x)$ и на его основе – эффективная трещиностойкость $K_{I,\text{эфф}}(x)$.

Расчёты показали, что при резком двухслойном сочетании «Ni-сплав – керамика ZrO_2 » возникают высокие остаточные напряжения: ме-

таллический слой (с бóльшим КЛТР) испытал растягивающее напряжение порядка сотен МПа, тогда как керамический слой находился под аналогичным по величине сжатием. Такой уровень $\sigma_{res}(x)$ близок к пределу прочности керамики, что согласуется с практическими наблюдениями появления трещин на границе металл–керамика при недостаточно градиентном переходе. В нашем расчёте для би-слоя условие нерастрескивания требовало, чтобы $\sigma_{res}(x)$ не превышало ~ 300 МПа (предел прочности на растяжение типичного никелевого сплава) и 500 МПа (предел прочности на сжатие хрупкого ZrO_2). Фактически же полученные $\sigma_{res} \in (\pm 400-500)$ МПа локально превышали эти значения, что предсказывает образование межслойных трещин – материал не выдерживает охлаждения без разрушения, подтверждая необходимость ФГ.

При введении переходного градиентного слоя результаты значительно улучшились. Например, при наличии линейно-градиентной переходной зоны толщиной $\sim 20\%$ от общей толщины, разбитой на несколько подкритических слоёв (с промежуточными составами $Ni+ZrO_2$), максимальные остаточные напряжения снизились более чем вдвое (до 200 МПа). Напряжения распределились по толщине гладкой кривой: на самой поверхности ZrO_2 остались умеренные сжимающие напряжения (-200 МПа), плавно уменьшающиеся вглубь и переходящие через ноль ближе к середине, достигая максимум $+200$ МПа в металле у внутренней стороны.

Что касается распределения трещиностойкости, то без учёта остаточных напряжений оно монотонно возрастает от $K_{I,C} \approx 4 \text{ МПа}\cdot\sqrt{м}$ у чистого ZrO_2 до $K_{I,C} \approx 25 \text{ МПа}\cdot\sqrt{м}$ у сплава $Ni-Cr-Al$. В присутствии остаточных напряжений эффективная трещиностойкость слоёв существенно меняется. В варианте с резким би-слоем мы наблюдаем резкое возрастание $K_{I,C, \text{эфф}}$ прямо на границе: у самой поверхности керамики остаточное сжатие $-400\dots-500$ МПа привело к значительному повышению кажущейся вязкости разрушения. Расчёт показал, что для инициирования поверхностной трещины требовалось внешнее напряжение примерно на 30–40% выше, чем если бы остаточных напряжений не было. Однако противоположная картина в металле: у внутренней стороны остаточное

растяжение $\sim +400$ МПа фактически снизило эффективную трещиностойкость – трещина, дойдя до этой области из глубины, могла распространяться легче. Тем не менее, поскольку сам металл весьма вязок, абсолютное значение его $K_{I,C}$ остаётся высоким. Градиентный материал обладает более сбалансированной трещиностойкостью по толщине: нет резко ослабленного слоя. Поверхность защищена как за счёт собственной твёрдости керамики и сжимающих напряжений, так и за счёт постепенного роста $K_{I,C}$ к промежуточным слоям; а внутренняя металлосодержащая часть достаточно вязка, чтобы остановить трещину, даже несмотря на небольшое растяжение.

Вычисленная нами эффективная трещиностойкость – это параметр, зависящий от ориентации и сценария зарождения трещины. В реальных условиях трещины могут зарождаться на поверхности от термошока или механического повреждения. В этом случае наличие поверхностных сжимающих напряжений играет роль механизма упрочнения. Правильный градиент может самогенерировать полезные сжимающие напряжения там, где это нужно. В случае же, когда трещина исходит изнутри, остаточные растягивающие напряжения могут ускорить её рост. Тем не менее в большинстве конструкций инициирование трещин происходит с поверхности из-за внешних воздействий, поэтому создание градиента, обеспечивающего сжатие поверхности, является оправданной стратегией повышения трещиностойкости.

Проведённый анализ показал, что остаточные термические напряжения существенно влияют на распределение трещиностойкости функционально-градиентных материалов по толщине. Основные выводы и заключения следующие:

В металлокерамических ФГМ неизбежно возникают остаточные напряжения растяжения и сжатия из-за разницы коэффициентов теплового расширения компонентов. Без градиентирования напряжения достигают высоких значений, способных вызвать межслойное растрескивание. Градиентная структура позволяет распределить деформационные несоответствия по объёму.

Остаточные напряжения меняют локальную трещиностойкость слоёв. Сжимающие напряжения повышают эффективную вязкость разрушения, затрудняя инициирование и рост поверхностных трещин. Напротив,

растягивающие напряжения несколько понижают сопротивление трещине. В сбалансированном градиентном материале эти эффекты взаимокompенсируются, обеспечивая более равномерное распределение трещиностойкости по толщине.

Введение переходных прослоек с промежуточными составами (металл+керамика) эффективно снижает уровень остаточных напряжений до приемлемого без значимой потери требуемых свойств.

Распределение трещиностойкости по глубине ФГМ определяется совокупностью градиента свойств и остаточных напряжений. Интегральный эффект может быть положительным: благодаря собственным напряжениям трещиностойкость наиболее хрупкого (керамического) слоя повышается, приближаясь к показателям более вязких слоёв.

Аналитические методики показали свою эффективность для оценки термонапряжённого состояния и характеристик трещиностойкости ФГМ. Совмещение высокопрочного металлического сплава и тугоплавкой керамики в виде ФГМ позволяет достичь прочности металла и жаростойкости керамики в одном материале, при этом градиентный характер распределения компонентов обеспечивает управляемое поле напряжений.

Список использованных источников

1. Петрушин С.И., Даниленко К.Б., Расчет термических остаточных напряжений в слоистых материалах // Главный механик. – 2016. – № 4.
2. Hill, M.R., Carpenter, R.D., Paulino, G.H., Munir, Z.A., and Gibeling, J. C., “Fracture Testing of a Layered Functionally Graded Material,” Fracture Resistance Testing of Monolithic and Composite Brittle Materials, ASTM STP1409, J. A. Salem, G. D. Quinn, and M. G. Jenkins, Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2002.
3. Дворник М.И., Михайленко Е.А. Исследование состава, структуры и свойств градиентного твердого сплава, полученного в результате совместного спекания ультрамелкозернистого и среднезернистого слоев // Цветные металлы. – 2018. – №4.
4. Enrico Salvati, Residual stress as a fracture toughening mechanism: A Phase-Field study on a brittle material, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Volume 114, 2021.