

*К.Ф. Матвеева, Е.Е. Селиванова,
Ю.Н. Петрова, Ю.А. Катанева*

УСТАЛОСТНОЕ ПОВЕДЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ОСТАТОЧНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ

Введение. ФГМ – материалы с плавным изменением свойств по толщине, что снижает концентрацию напряжений на границах, например, между алюминием и сталью. Остаточные напряжения, возникающие при охлаждении после спекания, существенно влияют на усталостные характеристики. Цель – количественно оценить их влияние на трещиностойкость и усталостное разрушение [1-4].

Рассматривается слой толщиной H с линейным градиентом от алюминия ($z=0$) до стали ($z=H$). Модуль Юнга определяется интерполяцией:

$$E(z) = E_{Al} + (E_{ст} - E_{Al}) \frac{z}{H}. \quad (1)$$

При $z=0$ получаем $E(0) = E_{Al}$, а при $z=H$ – $E(0) = E_{ст}$. Градиент модуля упругости в ФГМ может быть описан степенной функцией или экспоненциальным законом [4]. В работе используется линейная модель (рис. 1а). В табл. 1 приведены свойства компонентов.

Табл. 1. Основные свойства материалов, используемых в модели ФГМ

Свойство	Сталь 45	Алюминий сплав АМг6
модуль Юнга, ГПа	210	70
коэффициент Пуассона	0,3	0,33
предел текучести, МПа	350	150
предел выносливости, МПа (при 10^7 циклов)	240 (в воздухе)	~70 (условно)
коэф. терм. расширения, 1/К	$1,2 \times 10^{-5}$	$2,3 \times 10^{-5}$
трещиностойкость, МПа·м ^{0.5}	50	30

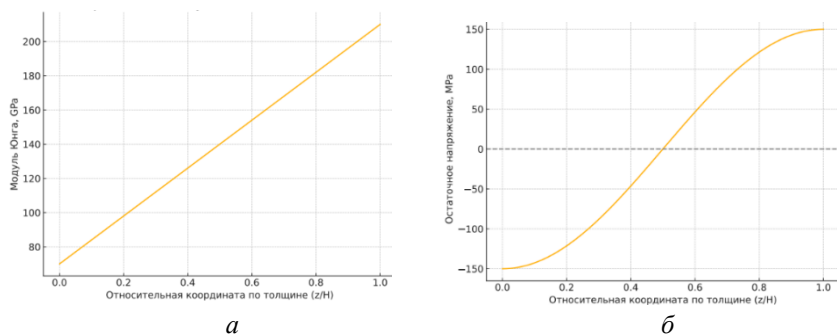


Рис. 1: *a* – распределение модуля Юнга по толщине слоя, *б* – распределение остаточных напряжений по толщине слоя

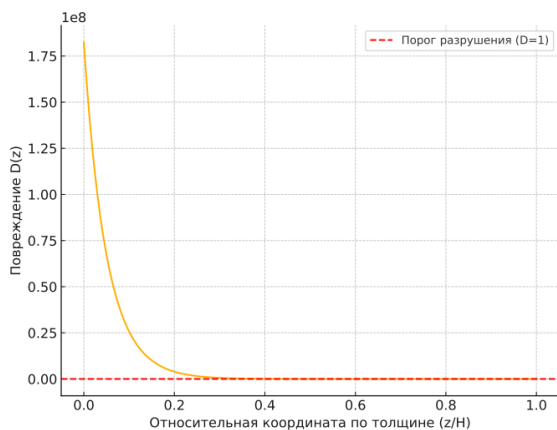


Рис. 2. Распределение накопленного усталостного повреждения $D(z)$

Различие в коэффициентах термического расширения вызывает термонапряжения (у стали он около $12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, у алюминия $23 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Распределение остаточных напряжений $\sigma_{res}(z)$ по толщине удовлетворяет условию равновесия – суммарная продольная сила должна быть нулевой, что требует, чтобы интеграл от $\sigma_{res}(z)$ по толщине был равен нулю. Распределение остаточных напряжений аппроксимировано косинусом:

$$\sigma_{res}(z) = \sigma_0 \cos\left(\pi \frac{H - z}{H}\right), \quad (2)$$

где σ_0 – амплитуда остаточного напряжения. Для заданного σ_0 данная зависимость даёт $\sigma_{res}(0) = \sigma_0 \cos\left(\pi \frac{H-0}{H}\right) = \sigma_0 \cos(\pi) = -\sigma_0$ (растяжение в алюминиевом основании) и $\sigma_{res}(H) = \sigma_0 \cos(0) = \sigma_0$ (сжатие на стальной поверхности). На рис. 1б приведено распределение остаточных напряжений при $\sigma_0 = 150$ МПа: на стальном ($z=H$) сжатие около -150 МПа, которое уменьшается к нулю ($z \approx H/2$) и переходит в +150 МПа у алюминиевого края ($z=0$). Такой переход от сжимающих к растягивающим напряжениям – типичная особенность термонапряжений в ФГМ [4]. Амплитуда напряжений зависит от профиля свойств и условий охлаждения [4]. В примере величина σ_0 выбрана в пределах упругой прочности (для стали – ниже предела текучести).

Сопротивление росту трещин характеризуется критическим коэффициентом интенсивности напряжений K_{IC} . Для плоской модели с трещиной, перпендикулярной приложенному напряжению, коэффициент можно оценить по формуле линейной механики разрушения:

$$K_I = Y \sigma_{nom} \sqrt{\pi a}, \quad (3)$$

где σ_{nom} – номинальное напряжение (например от внешней нагрузки без учёта остаточного), Y – безразмерный коэффициент формы, зависящий от геометрии (для глубокой трещины в пластине $Y \approx 1$). Трещина начинает устойчиво расти при $K_I = K_{IC}$. Хрупкое разрушение предотвращается, если условие $K_I < K_{IC}$ при всех режимах нагружения. Остаточные напряжения смещают уровень фактического напряжения в зоне трещины: растягивающие увеличивают K_I , приближая к критическому значению, а сжимающие – уменьшают, препятствуя раскрытию трещины и повышая порог ΔK_{th} для её циклического роста. Следовательно, градиент остаточных напряжений влияет на трещиностойкость ФГМ: в зонах сжимающих напряжений трещина распространяется труднее, с растягивающими – легче.

Для оценки усталостной долговечности применён критерий Палгрена–Минера:

$$D = \frac{N}{N_f}. \quad (4)$$

Разрушение наступает при $D = 1$. Для цикла постоянной амплитуды N_f определяется по диаграмме Велера. В ФГМ N_f зависит от координаты

наты z , так как прочность изменяется по толщине. Корректировка амплитуды по формуле Гудмана:

$$\sigma_{a, \text{экв}} = \sigma_a \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_B}\right),$$

где σ_a – амплитуда цикла, а σ_B – предел прочности. Растягивающее $\sigma_m > 0$ снижает долговечность, сжимающее $\sigma_m < 0$ – повышает. В ФГМ остаточные напряжения создают переменный средний уровень по сечению: при симметричном внешнем цикле ($R = -1$) на стальной стороне $\sigma_m \approx \sigma_{res}(H)$ (сжатие), на алюминиевой – $\sigma_m \approx \sigma_{res}(0)$ (растяжение). В результате N_f в слоях различается: сжимающее напряжение повышает ресурс, растягивающее – снижает. Повреждение можно оценивать по толщине, отслеживая слой, где $D=1$ наступает первым. Обычно трещина зарождается в наименее прочной зоне с неблагоприятным напряжённым состоянием.

Результаты и обсуждение. Для количественной оценки рассмотрен ФГМ из стали 45 и АМг6. Градиент модуля упругости рассчитывается по формуле (1) и варьируется от 210 до 70 ГПа (рис. 1а). Распределение остаточных напряжений по формуле (2) показано на рис. 1б: у стального края $z/H=1$ – сжатие до -150 МПа, в центре – нейтральная зона, у алюминиевого края – растяжение до $+150$ МПа. Распределение характерно для термонапряжений в ФГМ и не превышает предел текучести алюминия. Возможная релаксация остаточных напряжений в модели не учитывается.

Оценка усталостной долговечности проведена для симметричного цикла с амплитудой $\sigma_a=100$ МПа. У стального края остаточное сжатие снижает эффективное напряжение в цикле, у алюминиевого края растяжение – увеличивает. По поправке Гудмана: верхний слой (сталь) – $\sigma_{a, \text{экв.верх}} \approx 125$ МПа при $\sigma_m = -150$ МПа; нижний слой (алюминий) – $\sigma_{a, \text{экв.низ}} \approx 50$ МПа при $\sigma_m = +150$ МПа.

Повреждение $D(z)$ после $N=10^5$ циклов рассчитано по уравнению (4) и представлено на рис. 2. Минимум повреждений – у поверхности стали ($z/H \approx 1$), максимум – в алюминиевой части ($z/H \approx 0$), где $D \rightarrow 1$. Пик повреждения – на глубине $0,2H$ от алюминиевого края – в зоне растяжения и низкой выносливости. Трещина зарождается не на поверхности, а в глубине, в ослабленной зоне. Это согласуется с эффектами, например,

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-