



Саровский
Инженерный Центр



ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ УСТОЙЧИВОГО РОСТА ТРЕЩИН МЦУ В ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЯХ АГТД ПО МЕТОДУ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Рябов А.А., Мохов К.Ю., Воронков О.В., Кудрявцев А.Ю.
ООО «Саровский инженерный центр» (СИНЦ), г. Саров, alex.ryabov@saec.ru

Мусеев А.А.
АО «ОДК-Климов», г. Санкт-Петербург, museev_aa@klimov.ru

Ссылки

- [1] Туманов Н.В., Лаврентьева М.А. Прогнозирование циклической долговечности дисков авиадвигателей на основе моделирования устойчивого роста трещин малоциклового усталости. *Авиационные двигатели*. 2019. № 1 (2). С. 37-48.
- [2] Туманов Н.В. Кинетическое уравнение устойчивого роста трещин малоциклового усталости. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (нац. исслед. универ.)*. 2014. № 5-1 (47). С. 18-26.
- [3] Туманов Н.В. Физико-механические аспекты устойчивого роста усталостных трещин. *Вестник Московского авиационного института*. 2011. Т. 18. № 2. С. 132-136.
- [4] Ножницкий Ю.А., Туманов Н.В., Черкасова С.А., Лаврентьева М.А. Фрактографические методы определения остаточного ресурса дисков авиационных газотурбинных двигателей. *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2011. Т. 15. № 4 (44). С. 39-45.
- [5] Брок Д. Основы механики разрушения. Пер. с англ. М.: Выс. шк., 1980. 368 с.
- [6] Anderson T.L. *Fracture Mechanics. Fundamentals and Applications*. 4th edn. CRC Press, USA, New York. 2017. ISBN-13 978-1-4987-2813-3
- [7] Paris P., Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws. *Journal of Basic Engineering (Trans. ASME)*, 1963. No. 12. P. 528–534.

Теоретические основы:

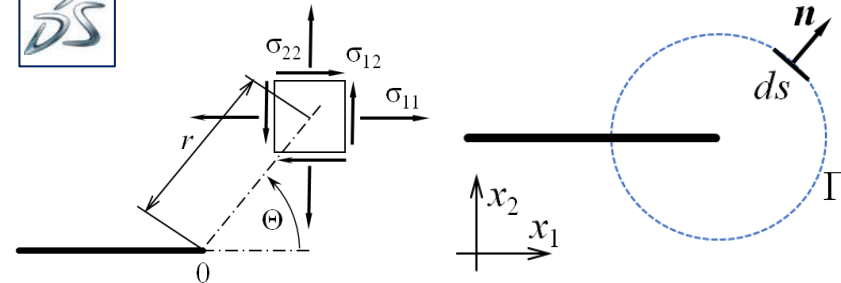
Статическое геометрически нелинейное решение о НДС детали



$$\begin{aligned} \nabla \sigma : \mathbf{I} + \mathbf{f} &= 0, \\ \sigma &= \mathbf{C} : (\varepsilon - \varepsilon_T), \\ \varepsilon &= 0.5(\mathbf{I} - \mathbf{b}^{-1}), \quad \mathbf{b} = \mathbf{F}\mathbf{F}^T, \\ \mathbf{F} &= \mathbf{I} + \nabla \mathbf{u}, \\ \varepsilon_T &= \alpha(T - T_{ref}). \end{aligned}$$

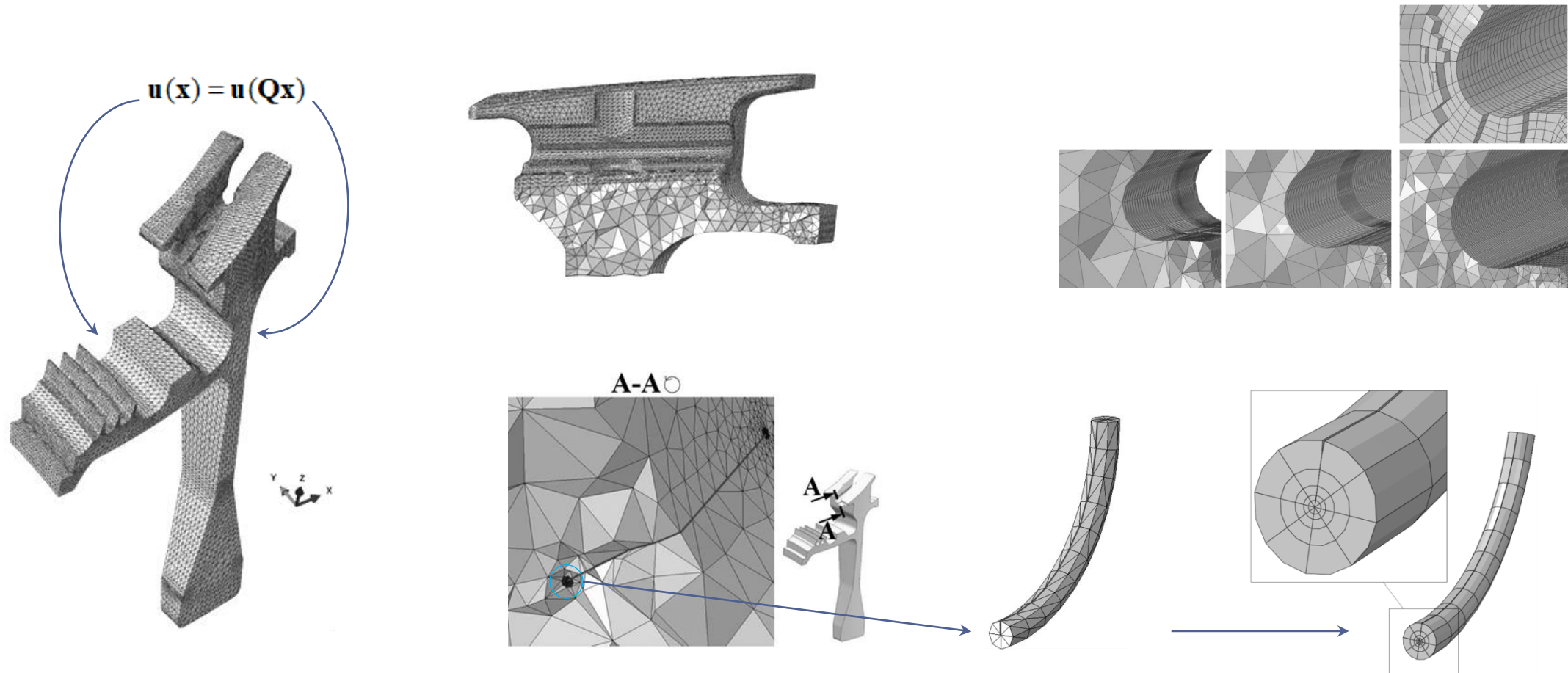
$$\begin{aligned} C_{ijkl} &= \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}), \quad i, j, k, l = 1, 2, 3, \\ \lambda &= E\nu / [(1 + \nu)(1 - 2\nu)], \quad \mu = E / [2(1 + \nu)], \\ \alpha_{ij} &= \alpha \delta_{ij}. \end{aligned}$$

НДС в окрестности фронта трещины и J -интеграл

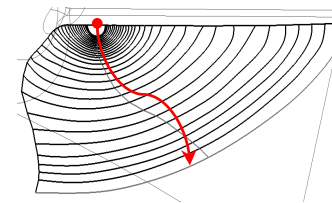
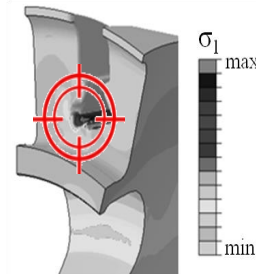
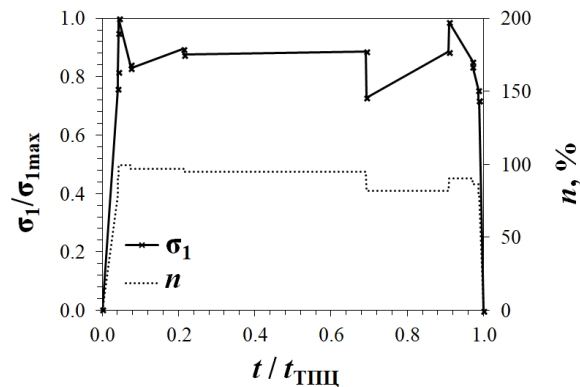


$$\begin{aligned} K_k &= G_k E / (1 - \nu^2), \quad \sigma_{ij} = \sum_k [K_k / \sqrt{2\pi r}] f_{ijk}(\Theta). \\ G_k &= J_k = \int_{\Gamma} (W dx_j - (\sigma \cdot \mathbf{n}) \cdot (\partial \mathbf{u} / \partial x_i) ds), \quad W = \int_0^{\varepsilon} \sigma : d\varepsilon. \\ \Delta l &= B \cdot (\Delta K_I / E)^2 \cdot N, \\ \theta &= -\arccos[(3K_{II}^2 + K_I \sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2}) / (K_I^2 + 9K_{II}^2)]. \end{aligned}$$

КЭ сетки:



Методика моделирования развития трещины МЦУ:

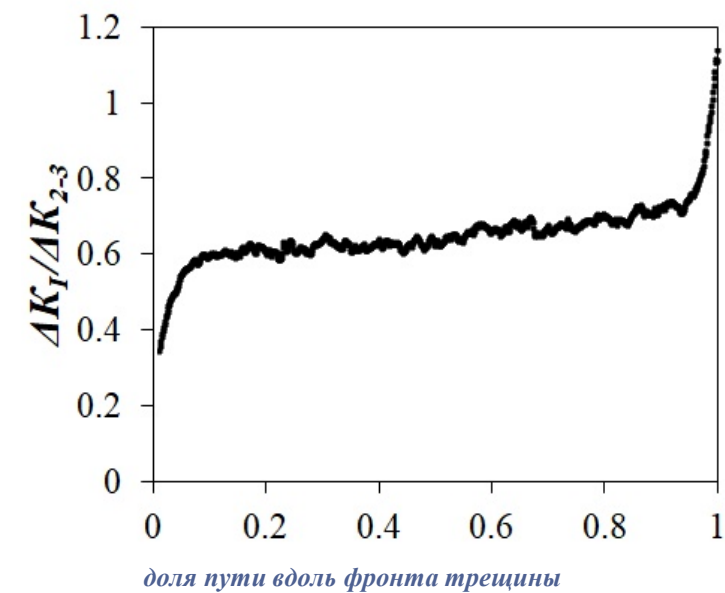
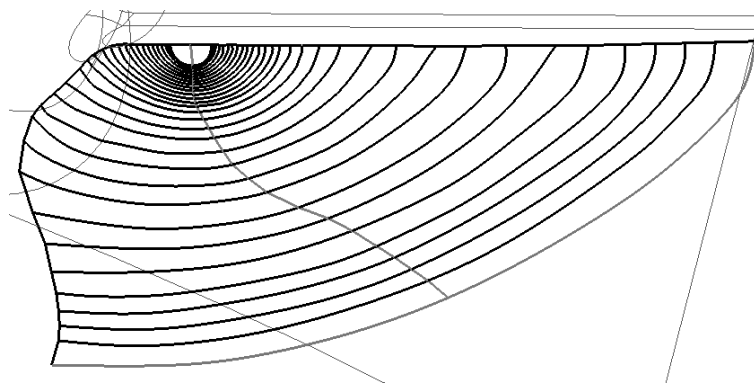
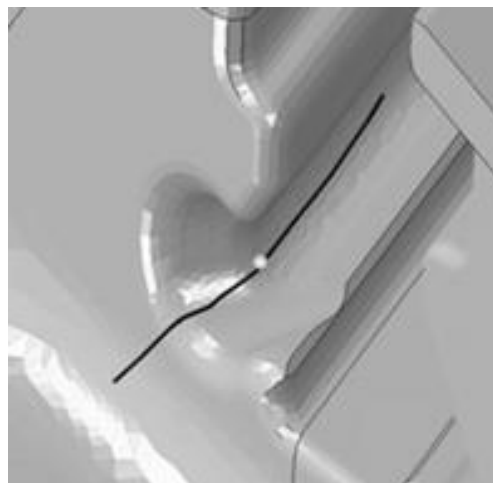
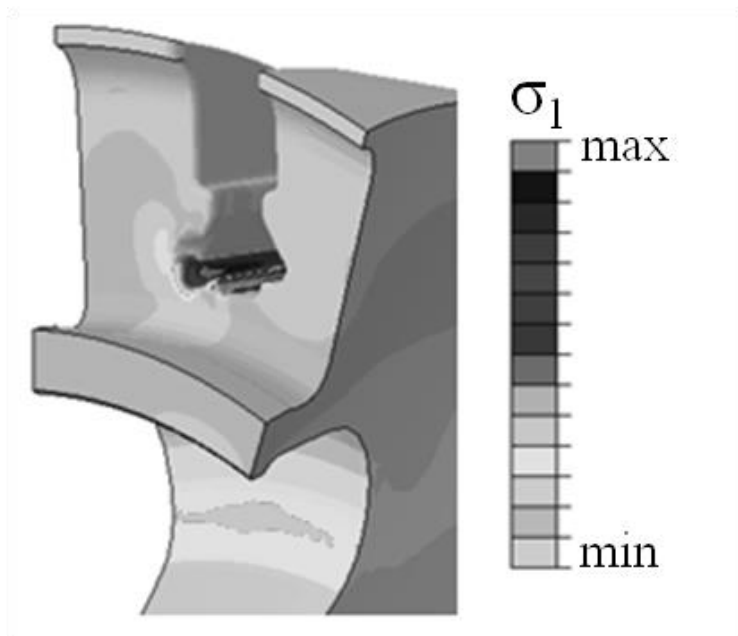


$$\Delta K_{2-3} = E \sqrt{\Delta l_{2-3} / B}, \quad \Delta l_{2-3} = 2 \mu\text{m}.$$

$$\Delta l = B \cdot (\Delta K_I / E)^2 \cdot N,$$

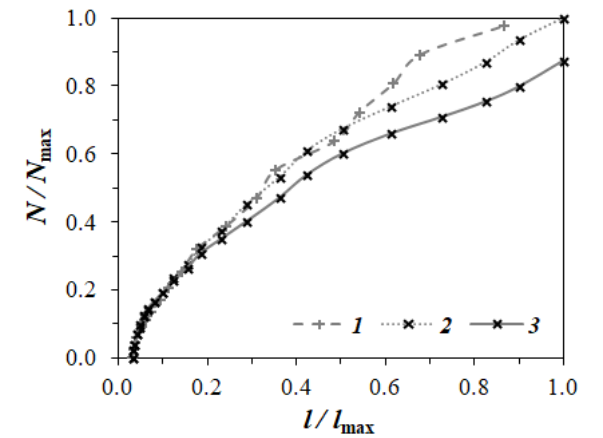
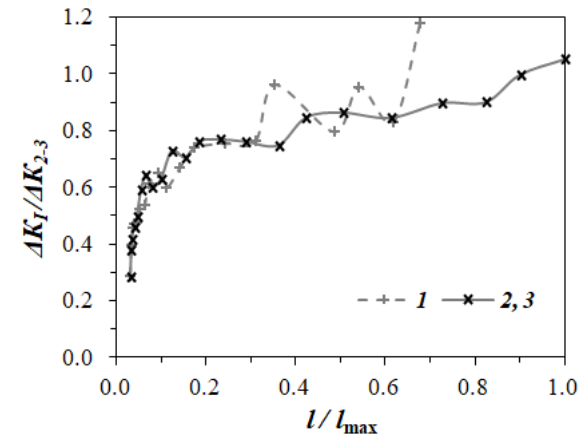
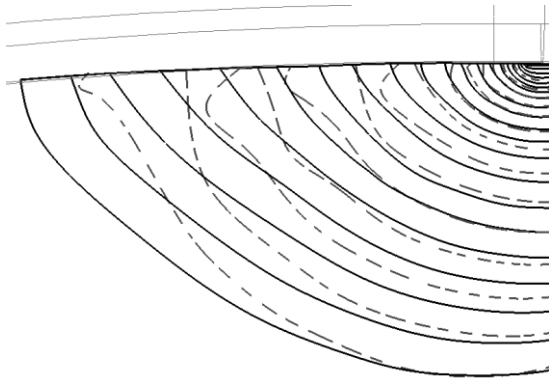
$$\theta = -\arccos[(3K_{II}^2 + K_I \sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2}) / (K_I^2 + 9K_{II}^2)].$$

Некоторые результаты расчетов:



Подрелаксация при моделировании роста трещины:

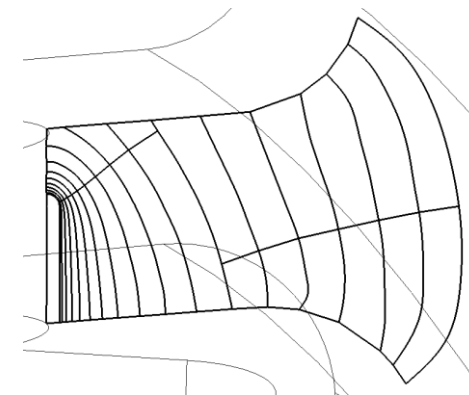
$$K^{[i]} = K^{[i]} \cdot URF + K^{[i-1]} \cdot (1 - URF).$$



$$d(\Delta K_k) / dN = (d(\Delta K_k) / dl)(dl / dN), \quad k = I, II,$$

$$dl / dN \neq 0 \rightarrow d(\Delta K_I) / dN = 0 \text{ только, если } d(\Delta K_I) / dl = 0,$$

$$K_{II} \approx 0 = const \rightarrow dK_{II} / dl = 0.$$



Основные результаты и выводы:

1. Приведены некоторые результаты моделирования стабильного роста трещин МЦУ в основных деталях АГТД по применяемой в отрасли методике.
2. К важным аспектам практического моделирования устойчивого роста трещин МЦУ, примененным в данной работе, позволяющим повысить точность и сократить трудозатраты, относятся следующие:
 - построение КЭ-сеток деталей, основанное на правилах;
 - высокое разрешение модели вдоль фронта трещины и определение вектора прироста трещины в каждой точке фронта;
 - автоматизированное построение нового фронта трещины и перестроение сеточной модели на расчетных шагах.
3. Предложено нововведение к рассматриваемой методике, а именно: нижняя релаксация решения.
4. Использование подрелаксации позволяет повысить точность моделирования и снизить трудозатраты при расчетах длинных трещин до 50%.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



Нижегородская обл., Дивеевский район, п. Сатис,
ул. Парковая 1, стр.3, Технопарк "Саров"



saec.ru



info@saec.ru



+7 (831) 469-03-41



Саровский
Инженерный Центр