

Вестник Череповецкого государственного университета, 2026, № 1 (130), с. 66–74.
Cherepovets State University Bulletin, 2026, no. 1 (130), pp. 66–74.

Научная статья
УДК539.3
<https://doi.org/10.23859/1994-0637-2026-1-130-5>
<https://elibrary.ru/mgrxfn>

Анализ термоциклической долговечности моделей жаровых труб

Иван Сергеевич Тарасов

Волжский государственный университет водного транспорта,
Нижний Новгород, Россия
ivanptm@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-9813-0286>

Аннотация. С помощью усовершенствованных уравнений механики поврежденной среды был проведен анализ влияния угла наклона охлаждающих каналов на термоциклическую долговечность жаровых труб, которые используются в газотурбинных двигателях. Основное внимание в исследовании уделено особенностям сложных процессов, возникающих при многократном тепловом нагружении – в частности, термомеханическим деформациям и постепенному накоплению усталостных повреждений.

Ключевые слова: механика поврежденной среды, прочность, термоциклическая долговечность, макроскопическая трещина, жаровая труба, разрушение

Для цитирования: Тарасов И. С. Анализ термоциклической долговечности моделей жаровых труб. *Вестник Череповецкого государственного университета*, 2026, № 1 (130), с. 66–74. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2026-1-130-5>; EDN: MGRXFN

Analysis of the thermocyclic durability of fire tube models

Ivan S. Tarasov

Volga State University of Water Transport,
Nizhny Novgorod, Russia
ivanptm@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-9813-0286>

Abstract. Using improved equations of damaged medium mechanics, an analysis was carried out to evaluate the influence of the cooling channel inclination angle on the thermocyclic durability of flame tubes used in gas turbine engines. The study focuses primarily on the complex processes that occur under repeated thermal loading – particularly thermomechanical deformations and the gradual accumulation of fatigue damage.

Keywords: damaged medium mechanics, strength, thermocyclic durability, macroscopic crack, flame tube, damage

For citation: Tarasov I. S. Analysis of the thermocyclic durability of fire tube models. *Cherepovets State University Bulletin*, 2026, no. 1 (130), pp. 66–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2026-1-130-5>; EDN: MGRXFN

© Тарасов И. С., 2026

Введение

В последние годы развитие конструкций и инженерных систем в таких отраслях, как энергомашиностроение, авиастроение, и других высокотехнологичных направлениях сопровождается стремлением повысить рабочие характеристики при одновременном снижении металлоемкости. Это достигается за счет более продуманного проектирования и внедрения инновационных материалов. Дополнительно существенно увеличивается доля эксплуатации в переменных термонагрузочных режимах, а также расширяется температурный диапазон функционирования оборудования.

Современные требования диктуют необходимость минимизации расхода материалов, что неизбежно приводит к увеличению напряженного состояния в элементах конструкции – как в локальных зонах, так и в целом по объекту. Это, в свою очередь, снижает величину запаса прочности. При этом ожидания по надежности и длительности безаварийной работы, наоборот, возрастают – причем как в отношении конструкции в целом, так и отдельных ее узлов.

Сложившаяся инженерная ситуация требует не просто надежных технических решений, но и применения методов точного прогнозирования ресурса новых и уже работающих технических систем. Особая актуальность таких подходов проявляется в случаях, когда речь идет об оборудовании с длительным сроком службы – например, о газотурбинных установках нового поколения, авиационных двигателях, атомных энергоблоках, а также агрегатах нефтехимической промышленности.

С учетом современных научных подходов в области механики поврежденных сред разработана модель, отражающая особенности циклического деформирования материалов при неоднородных термомеханических нагрузках. Особенностью предложенной модели является ее способность описывать процессы накопления повреждений в металлах и сплавах при действии многосоставных, непропорциональных и нестационарных нагрузок, что позволяет более точно учитывать условия реальной эксплуатации¹.

Основная часть

В отечественной литературе² опубликованы результаты экспериментальных исследований, в которых исследовано влияние диаметра и углов наклона охлаждающих отверстий (каналов) в жаровых трубах на их термоциклическую долговечность и изложены экспериментальные результаты оценки термоциклической долговечности.

Испытания проводились на полых образцах, имеющих коробчатую форму. Образцы изготовлены из жаропрочного сплава ВЖ-159 (см. рис. 1). Толщина стенки 1

¹ Волков И. А., Коротких Ю. Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. Москва: Физматлит, 2008. 424 с. Волков И. А., Коротких Ю. Г., Тарасов И. С. Моделирование сложного пластического деформирования и разрушения металлов при многоосном непропорциональном нагружении // ПМТФ. 2009. Т. 50, № 5. С. 193–205.

² Бычков Н. Г., Лепёшкин А. Р., Першин А. В., Рекин А. Д., Лукаш В. П. Исследование термоциклической долговечности деталей с различными углами наклона охлаждаемых каналов // Авиационно-космическая техника и технология. 2009. № 10 (67). С. 113–117.

мм. Поперек образца сверлились отверстия диаметрами 1 мм, 1,5 мм, и 2 мм и шагом 5 мм (см. рис. 1). На одной половине образцов отверстия располагались под углом к поверхности 90° , а на другой – под углом 35° .

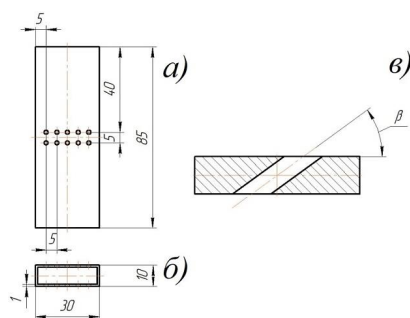


Рис. 1. Полый образец коробчатой формы

Термоциклическое нагружение проводилось в трапецидальном режиме $T_{\min} = 350 \text{ }^\circ\text{C} \leftrightarrow T_{\max} = 900 \text{ }^\circ\text{C}$. Временной интервал на разогрев составлял 5 секунд, после чего образец находился при максимальной температуре на протяжении 7 секунд. Охлаждение осуществлялось путем подачи воздушного потока внутрь образца через захват испытательной машины; массовый расход воздуха поддерживался на постоянном уровне – 12 г / с.

Анализ распределения температуры, выполненный с применением тепловизионного контроля, показал, что вблизи вертикальных (нормальных) каналов температурный градиент оказывается менее выраженным по сравнению с наклонными каналами. Для поверхности образцов с наклонной конфигурацией каналов температурный перепад оказался значительно выше – $250 \text{ }^\circ\text{C}$.

Данные по термоусталостным испытаниям модельных фрагментов жаровых труб, изготовленных из жаропрочного сплава ВЖ-159 и оснащенных охлаждающими каналами диаметром 1 мм с разным углом наклона, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Термоциклическая долговечность модельных образцов до образования макроскопической трещины при испытаниях по режиму $T_{\min} \leftrightarrow T_{\max} = 350 \leftrightarrow 900 \text{ }^\circ\text{C}$

Угол наклона оси каналов к поверхности	Диаметр, мм	Число циклов до разрушения (термоциклическая долговечность) N (эксперимент)						Среднее значение числа циклов до разрушения N_{cp} (эксперимент)	Число циклов до разрушения N (расчет)
		983	576	851	950	765	1431		
а) $\beta = 90^\circ$	1	983	576	851	950	765	1431	926	972
б) $\beta = 35^\circ$	1	200	117	174	194	156	292	189	170

Результаты проведенного эксперимента продемонстрировали значительное снижение термоциклической прочности у моделей жаровых труб, имеющих охлаждающие каналы, расположенные под наклоном к поверхности. По сравнению с образцами, где каналы ориентированы перпендикулярно поверхности, долговечность при циклическом нагружении оказалась ниже примерно в пять раз. Это подчеркивает критическое влияние конфигурации каналов на интенсивность термоусталостного разрушения.

В свою очередь, испытания моделей с перпендикулярными отверстиями для охлаждения диаметром 1, 1,5 и 2 мм показали, что изменение диаметра оказывает сравнительно слабое влияние на термоциклическую стойкость: наблюдаемый разброс результатов не превышает 20 %, что позволяет рассматривать этот параметр как второстепенный в сравнении с геометрией расположения каналов.

Для уточнения закономерностей разрушения была выполнена численная оценка усталостной долговечности образцов жаровых труб из сплава ВЖ-159. Расчет проводился в три последовательных этапа:

- проводилось решение электромагнитной задачи, основанной на уравнении Максвелла¹;
- решение нестационарной теплопроводной задачи;
- расчет остаточного ресурса, в рамках которого выполнено моделирование поведения материала в условиях блочного термоциклического нагружения и неоднородного напряженного состояния, характерного для реальной эксплуатации жаровой трубы².

На первом этапе были получены значения удельной мощности нагрева, варьирующиеся по времени, что делает задачу нестационарной. На каждом временном шаге температурные значения, полученные из теплового расчета, передавались в электромагнитную модель для уточнения электрофизических характеристик материала.

На втором этапе проведено исследование нестационарной теплопроводности, на этом этапе были заданы граничные условия: температура окружающей среды – $T_o = 20$ °С, коэффициент теплоотдачи воздуха снаружи – $\alpha_T^{(o)} = 25$ Вт/(м²К), изнутри – $\alpha_T^{(i)} = 1900$ Вт/(м²К), а также удельная мощность нагрева $q = 9 \cdot 10^5$ Вт/м², рассчитанная на первом этапе. Температурные пределы в термоцикле варьировались от $T_{\min} = 350$ °С до $T_{\max} = 900$ °С.

Тепловизионный анализ подтвердил: температурное поле внутри материала распределяется неравномерно. При перфорированной структуре поверхности и установленном режиме нагрева температурный градиент в области вертикальных (нормальных) каналов оказался значительно ниже, чем в зонах, прилегающих к наклонным каналам. Так, как показано на рис. 2, вблизи нормальных каналов температур-

¹ Лепёшкин А. Р., Бычков Н. Г., Першин А. В. Теплофизические измерения при термоциклировании лопаток газотурбинных двигателей с керамическими покрытиями // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48, № 5. С. 734–740.

² Volkov I. A., Igumnov L., Tarasov I. S., Shishulin D. N., Kapitanov D.V. Modeling fatigue life of structural alloys under block asymmetric loading // Advanced Structured Materials. 2021. Т. 137. С. 1–16.

ный перепад составил 164,5 °С, а у наклонных достигал 264,3 °С. Наблюдается хорошая согласованность данных результатов с экспериментальными наблюдениями.

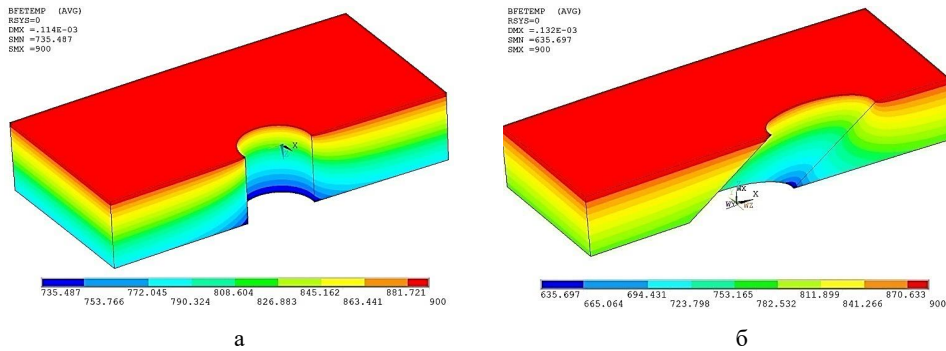


Рис. 2. Распределение температурного поля по толщине

На завершающем, третьем этапе исследования, на основе предварительно рассчитанных температурных полей объекта, была проведена численная оценка термоциклической долговечности модели жаровой трубы. Для анализа применялись усовершенствованные определяющие соотношения механики поврежденной среды, что позволило учитывать влияние комплексного напряженно-деформированного состояния при многократных циклах теплового нагружения.

Физико-механические характеристики жаропрочного сплава ВЖ-159 и материальные параметры модели МПС приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2

Параметры модели термопластичности жаропрочного сплава ВЖ-159

Температура, °С	Модули кинематического упрочнения		Модуль изотропного упрочнения, q_1 , МПа	Начальный радиус поверхности текучести, C_p^o , МПа
	g_1^p , МПа	g_2^p		
20	115000	780	2430	510
350	107000	750	2380	480
650	80000	600	2200	370
800	72000	700	1600	250
850	51800	890	1360	80
900	19700	1000	300	25
1000	16900	1200	250	20

Материальные параметры эволюционного уравнения накопления повреждений жаропрочного сплава ВЖ-159¹

Температура, °С	Значение энергии повреждения, соответствующее образованию макротрещины W_p^f , МДж / м ³	Параметры уравнения накопления повреждений при МЦУ	
		α_p	r_p
20	50	1	0,3
350	49	1	0,3
800	40	1	0,3
850	5	1	0,3
900	0,5	1	0,3

На рис. 3 представлено распределение интенсивности напряжений, а на рис. 4 – распределение интенсивности пластических деформаций для участка модели жаропрочной трубы, имеющей перфорированные отверстия. Анализ проводился для второго цикла термоциклического нагружения, при сравнении конфигураций охлаждающих каналов: с вертикальным (нормальным) и наклонным расположением отверстий ($\beta = 35^\circ$).

Из представленных данных видно, что максимальные значения напряжений сосредоточены в толще стенки жаровой трубы. В то же время пиковые значения пластических деформаций локализуются у наружной поверхности канала – в зоне, наиболее подверженной нагреву. Именно в этих участках, согласно экспериментальным наблюдениям, чаще всего фиксировались очаги формирования макроскопических трещин², что указывает на активное накопление усталостных повреждений.

Различие в расположении зон максимальной напряженности и пластической деформации, вероятно, связано с температурной зависимостью физико-механических характеристик жаропрочного сплава. Дополнительно этому способствует эффект «заневоливания» – когда тонкая наружная оболочка, разогреваемая в процессе работы, оказывается жестко ограничена холодными внутренними слоями конструкции, что усиливает деформационные процессы на границе материалов.

¹ Малинин В. Г., Малинина Н. А., Малинин В. В. Влияние фактора неоднородности напряженно-деформированного состояния на структуру и механические свойства материалов. Орел, 2017. С. 10–12.

² Малинин В. Г., Малинина Н. А., Малинин В. В. Влияние фактора неоднородности напряженно-деформированного состояния на структуру и механические свойства материалов. Орел: Орловский государственный аграрный университет имени Н. В. Парахина, 2017. 79 с.

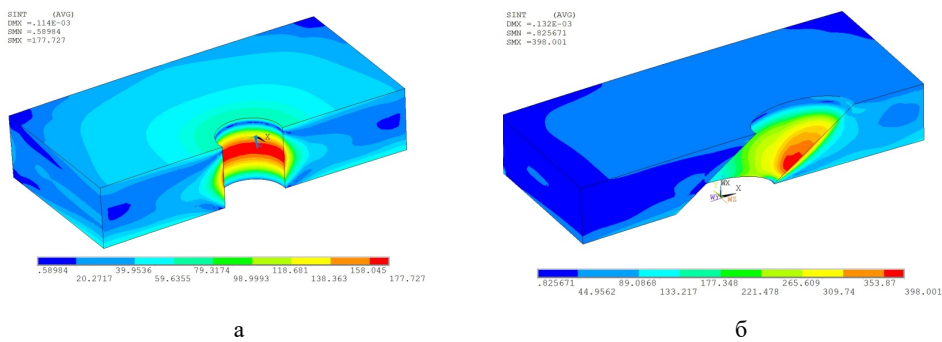


Рис. 3. Распределение интенсивности напряжений в зависимости от угла наклона каналов

Проведя анализ результатов расчета кинетики НДС, можно сделать вывод, что в наиболее нагруженной зоне (точка А на рис. 4) возникает напряженное состояние, которое близко к плоскому напряженному состоянию.

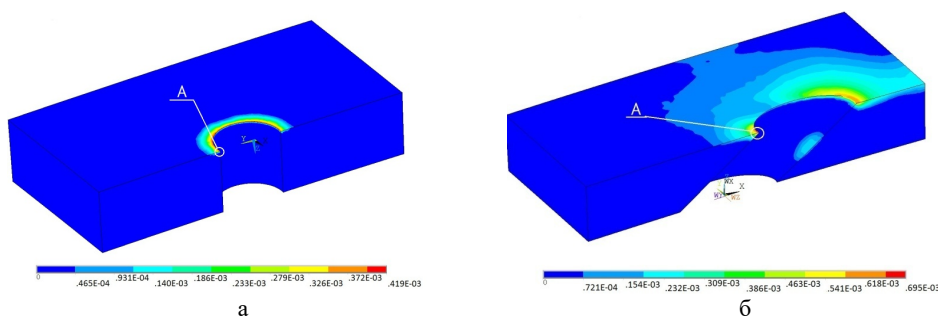


Рис. 4. Распределение интенсивности пластических деформаций в зависимости от угла наклона каналов

Интегрирование эволюционных уравнений, описывающих накопление усталостных повреждений в опасной точке А материала, дает возможность всесторонне оценить, как угол наклона охлаждающих каналов влияет на термическую усталость модели жаровой трубы камеры сгорания. Полученные численные данные были тщательно сопоставлены с результатами экспериментальных испытаний, что позволило подтвердить корректность проведенного моделирования.

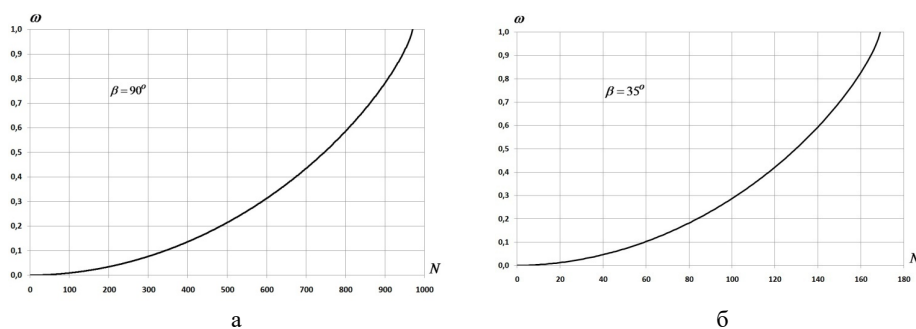


Рис. 4. Зависимость величины поврежденности от числа циклов нагружения

Результаты проведенных расчетов и их сопоставление с экспериментальными данными представлены на рис. 4 и в табл. 1. На рис. 4 показана зависимость степени поврежденности материала от количества циклов термического нагружения для двух различных углов наклона перфорированных охлаждающих отверстий.

В таблице 1 приведены значения числа циклов до разрушения, полученные как в ходе экспериментов, так и численным моделированием для двух рассмотренных вариантов углов наклона каналов. Отмечается как качественное, так и количественное совпадение результатов, что важно для практического применения в инженерных расчетах.

Выводы

Таким образом, анализ сопоставления численных и экспериментальных данных по термоциклической долговечности моделей жаровых труб камер сгорания газотурбинных двигателей, имеющих различные углы наклона охлаждающих каналов, в условиях сложного многоосного напряженного состояния и блочных режимов нагружения показывает достаточную для инженерных расчетов надежность и точность разработанных определяющих соотношений механики поврежденной среды (МПС).

Это дает основание считать, что предложенная модель МПС является эффективным инструментом для оценки термоциклической усталости как материалов, так и конструкций в целом.

Список литературы / References

Волков И. А., Коротких Ю. Г. *Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с поврежденностями*. Москва: Физматлит, 2008. 424 с.

Volkov I. A., Korotkikh Yu. G. *State equations for viscoelastoplastic media with damage*. Moscow: Fizmatlit, 2008. 424 p. (In Russ.)

Волков И. А., Коротких Ю. Г., Тарасов И. С. Моделирование сложного пластического деформирования и разрушения металлов при многоосном непропорциональном нагружении. *ПМТФ*, 2009, т. 50, № 5, с. 193–205.

Volkov I. A., Korotkikh Iu. G., Tarasov I. S. Modeling complex plastic deformation and fracture of metals under disproportionate loading. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2009, vol. 50, no. 5, pp. 193–205. (In Russ.)

Бычков Н. Г., Лепёшкин А. Р., Першин А. В., Рекин А. Д., Лукаш В. П. Исследование термоциклической долговечности деталей с различными углами наклона охлаждаемых каналов. *Авиационно-космическая техника и технология*, 2009, № 10 (67), с. 113–117.

Bychkov N. G., Lepyoshkin A. R., Pershin A. V., Rekin A. D., Lukash V. P. Investigation of thermocyclic durability of parts with different cooling channel inclination angles. *Aerospace Engineering and Technology*, 2009, no. 10 (67), pp. 113–117. (In Russ.)

Лепёшкин А. Р., Бычков Н. Г., Першин А. В. Теплофизические измерения при термоциклировании лопаток газотурбинных двигателей с керамическими покрытиями. *Теплофизика высоких температур*, 2010, т. 48, № 5, с. 734–740.

Lepyoshkin A. R., Bychkov N. G., Pershin A. V. Thermophysical measurements during thermal cycling of gas turbine engine blades with ceramic coatings. *High Temperature*, 2010, vol. 48, no. 5, pp. 734–740. (In Russ.)

Малинин В. Г., Малинина Н. А., Малинин В. В. Влияние фактора неоднородности напряженно-деформированного состояния на структуру и механические свойства материалов. Орел: Орловский государственный аграрный университет имени Н. В. Парахина, 2017. 79 с.

Malinin V. G., Malinina N. A., Malinin V. V. *Influence of the stress-strain heterogeneity factor on the structure and mechanical properties of materials*. Orel: Orlovskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet imeni N. V. Parakhina, 2017. 79 p. (In Russ.)

Volkov I. A., Igumnov L., Tarasov I. S., Shishulin D. N., Kapitanov D. V. Modeling fatigue life of structural alloys under block asymmetric loading. *Advanced Structured Materials*, 2021, vol. 137, pp. 1–16.

Сведения об авторах

Иван Сергеевич Тарасов – кандидат технических наук, доцент; <https://orcid.org/0009-0002-9813-0286>, ivanptm@yandex.ru, Волжский государственный университет водного транспорта (д. 5, ул. Нестерова, 603950 Нижний Новгород, Россия); **Ivan S. Tarasov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0009-0002-9813-0286>, ivanptm@yandex.ru, Volga State University of Water Transport (5, ul. Nesterov, 603950 Nizhny Novgorod, Russia).

Статья поступила в редакцию 26.06.2025; одобрена после рецензирования 08.12.2025; принята к публикации 14.01.2026.

The article was submitted 26.06.2025; Approved after reviewing 08.12.2025; Accepted for publication 14.01.2026.