

УДК 539.4

Н.Г. БЫЧКОВ, А.Р. ЛЕПЕШКИН, А.В. ПЕРШИН, А.Д. РЕКИН, В.П. ЛУКАШ

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ С РАЗЛИЧНЫМИ УГЛАМИ НАКЛОНА ОХЛАЖДАЕМЫХ КАНАЛОВ

Приведен анализ экспериментальных исследований влияния угла наклона охлаждающих каналов на термоциклическую долговечность модельных образцов жаровых труб из сплава ВЖ 159. При изменении угла наклона каналов к поверхности образца от 90 до 35° циклическая долговечность понизилась в 5 раз. Исследовано влияние диаметра охлаждающих каналов на термоциклическую долговечность перфорированных образцов. При изменении диаметра отверстий от 1 до 2 мм долговечность увеличилась в 1,25 раза. Выявлено значительное изменение температуры по длине наклонного охлаждающего канала.

**Ключевые слова:** термоциклическая долговечность, угол наклона, охлаждающий канал, изменение температуры, модельные образцы жаровых труб.

### Введение

В современных ГТД широко применяется защита стенок жаровых труб камер сгорания с помощью заградительной пелены охлаждающего воздуха и покрытий [1]. Хорошо организованное пленочное охлаждение позволяет понизить температуру последних секций жаровых труб, примерно 300 °С, тем самым обеспечивая увеличение их термоциклической долговечности в 5...8 раз. Поток охлаждающего воздуха, предотвращающего прямой контакт стенки с продуктами сгорания топлива должен двигаться со скоростью газового потока вдоль стенки жаровой трубы.

Такое направление воздушному потоку конструкторы обеспечивают расположением охлаждающих каналов под углом к поверхности примерно в 30°.

При расстоянии между поясами охлаждающих каналов примерно 15 мм между разогреваемой поверхностью и газовым потоком образуется непрерывная защитная воздушная пленка, снижающая тепловой поток в стенку и уменьшающая термонапряженность жаровых труб.

Однако возникающие большие термические градиенты вблизи самих охлаждающих каналов. Кроме того, сами охлаждающие каналы являющиеся мощными концентраторами напряжений. Коэффициент концентрации напряжений “К<sub>σ</sub>” сильно зависит от угла наклона оси канала к поверхности [2, 3].

### 1. Результаты исследований

В данной работе впервые проведены исследования по влиянию углов наклона охлаждающих от-

верстий (каналов) деталей на их термоциклическую долговечность. Изложены результаты экспериментального определения термоциклической долговечности моделей жаровых труб при варьировании угла наклона охлаждающего каналов и их диаметров.

Испытывались полые образцы коробчатой формы размером 30×10×60 мм из сплава ВЖ-159 (рис. 1).

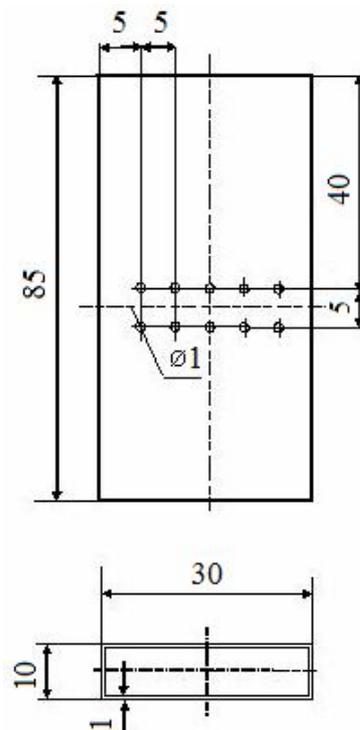


Рис. 1. Схема образца

Толщина стенки 1 мм. Вдоль оси образца изготавливались ряды отверстий диаметром 1 мм, 1,5 мм

и 2 мм и шагом 5 мм. На одной половине образцов отверстия располагались под углом к поверхности 90°, а на другой – под углом 35°.

Разогрев образцов осуществлялся индукционным способом от генератора ВЧГ4-25/0,44. Режим термоциклирования трапецидальный  $T_{\min} \leftrightarrow T_{\max} = 350 \leftrightarrow 900$  °С. При  $T_{\max}=900$  °С образец выдерживался в течении 7 с. Время разогрева 5 с. Охлаждающий воздух внутрь образца подавался с постоянным расходом 12 г/с через захват машины. Контроль за расходом воздуха осуществляется расходомером. На верхний торец образца устанавливается заглушка. Температурное состояние технологического образцов контролировалось между отверстиями на перфорированной стороне модели. Одна термopара (управляющая) приваривалась с противоположной стороны модели на “сплошной” стенке. Дополнительный контроль температурного состояния перфорированной стенки модели производился с помощью тепловизора “Agema 782 SW”, работающего в спектральном диапазоне 3...5,6 мкм. Небольшие размеры отверстий привели к необходимости увеличения в несколько раз изображения. Для достижения этой цели был использован зеркальный объектив типа «Cassegrain».

Перед измерениями выполнялась калибровка тепловизионной системы на модели абсолютно черного тела фирмы «Barnes» (США) в диапазоне температур 200-800 °С. Оптическая доступность к объекту была осуществлена за счет того, что в индукторе напротив охлаждающего канала изготавливалось отверстие  $\varnothing$  6 мм. Для увеличения температурного контраста на поверхность модели вокруг охлаждающего канала наносился тонкий слой термостойкого чернящего покрытия (степень черноты  $\sim 0,95$ ), а на видимую часть внутренней поверхности наклонного канала наносился тонкий слой алюминиевой пудры (степень черноты  $\sim 0,2$ ).

Запись термоизображения производилось на ПК Pentium 3 с частотой 3-5 кадров в секунду. Для оцифровки аналогового сигнала тепловизора использовалась АЦМ фирмы Л-Кард модели L783.

Контроль за образованием трещины осуществлялся непрерывно визуально во время испытаний и периодически с помощью бинокулярного микроско-

па МБМ-2.

Исследование температурного поля объектов с помощью тепловизора показало, что температурный градиент вблизи нормальных каналов меньше, чем у наклонных (рис. 2). На поверхности наклонных каналов, просматриваемой тепловизором, перепад температуры составлял более 250 °С, вместо ожидаемого 70 °С (рис. 2).

Тонкая кромка наружной разогретой поверхности наклонного охлаждающего канала заневоливается более жесткой холодной частью стенки. Размах термической деформации на острых кромках наклонных каналов больше, чем на кромках вертикальных каналов. Результаты испытаний на термоусталость модельных образцов из сплава ВЖ159 с различным наклоном охлаждающих каналов  $\varnothing$  1 мм представлены в табл. 1.

Фотографии трещины показаны на рис. 3.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о существенном снижении термоциклической долговечности моделей жаровых труб с каналами, расположенными к поверхности под углом 35°, (примерно в 5 раз). Для количественной оценки влияния угла наклона охлаждающих каналов на величину концентрации напряжений у острых кромок отверстий можно использовать результаты работы [2].

На рис. 4 представлена кривая изменения концентрации напряжений в пластине с отверстиями при изменении их наклона.

Для каналов с углом наклона 35°,  $K_{\sigma} = 7$ . По всей длине камеры сгорания изготавливается большое количество отверстий разного диаметра. Каждое отверстие является концентратором напряжений. В какой мере диаметр отверстий для подвода охлаждающего воздуха влияет на сопротивление сплава ВЖ159 термоциклической усталости.

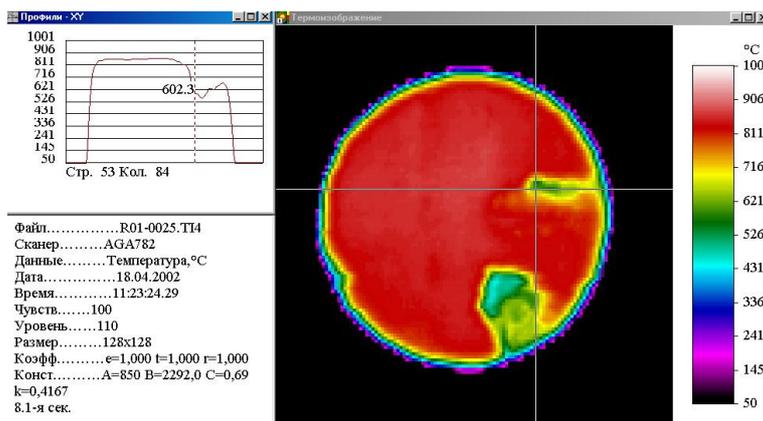
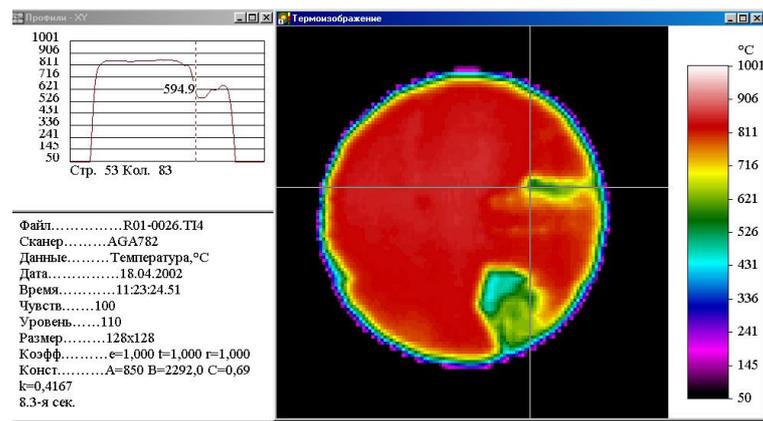
Результаты испытаний моделей жаровых труб с разными диаметрами отверстий для подвода охлаждающего воздуха сведены в табл. 2. Отверстия диаметром 1; 1,5 и 2 мм изготавливались перпендикулярно к поверхности.

Режим испытаний этих партий модельных образцов аналогичен предыдущему  $T_{\min} \leftrightarrow T_{\max} = 350 \leftrightarrow 900$  °С.

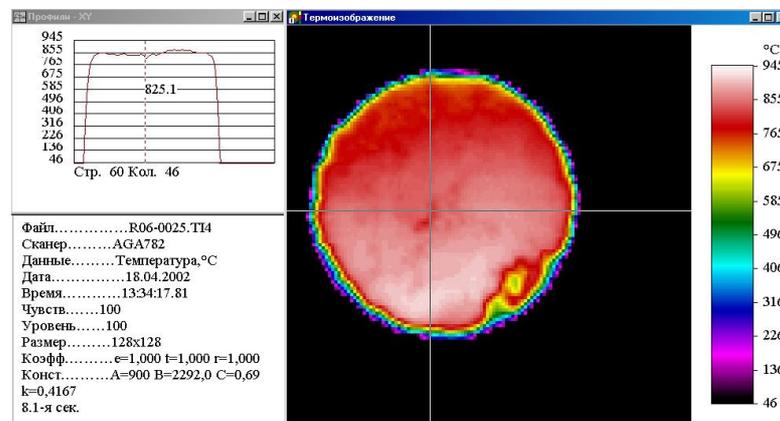
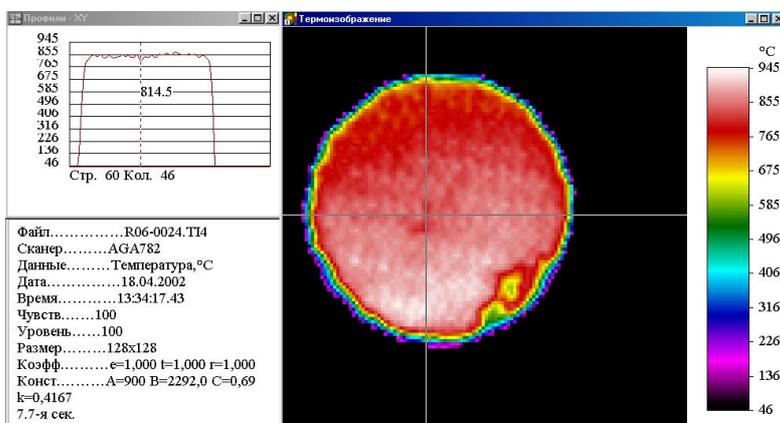
Таблица 1

Термоциклическая долговечность модельных образцов до образования трещины длиной 0,5мм при испытаниях по режиму  $T_{\min} \leftrightarrow T_{\max} = 350 \leftrightarrow 900$  °С

Угол наклона « $\beta$ » оси каналов к поверхности	Диаметр [мм]	Термоциклическая долговечность						N <sub>ср</sub>
		N циклов						
90°	1	983	576	851	950	765	1431	926
35°	1	200	117	174	194	156	292	189



б



а

Рис. 2. Термограмма перфорированной поверхности модели на режиме  $T_{max} = 900$  °C:  
а - наклонные под углом 35 °; б - перпендикулярные к поверхности каналы

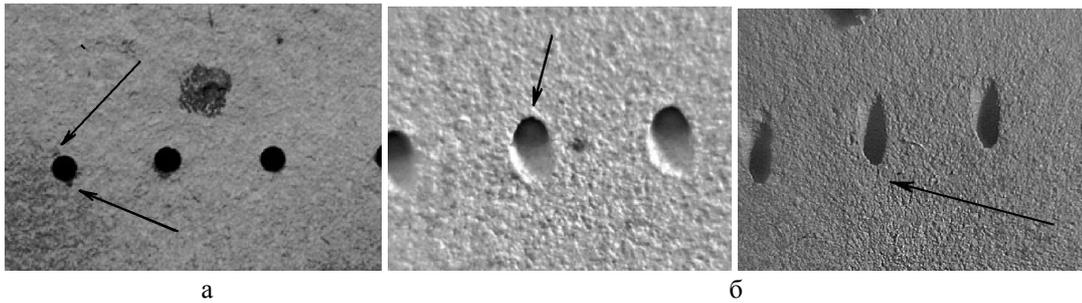


Рис. 3. Пример термоусталостных трещин на модельных образцах:  
а –  $\beta=90^\circ$ ; б –  $\beta=35^\circ$

Таблица 2

Термоциклическая долговечность перфорированных модельных образцов с перпендикулярным расположением оси охлаждающих отверстий к поверхности

Диаметр отверстия [мм]	Термоциклическая долговечность до образования трещины $L \geq 0,5\text{мм}$ [N циклов]						Ncp				
	1	1,5	2	2,5	3	3,5					
1	983	1618	1222	576	1341	1051	851	951	765	1431	926
1,5	1618	1341	1051	685	890	644					1035
2	1222	1051	851	1272	1254	1395	725				1153

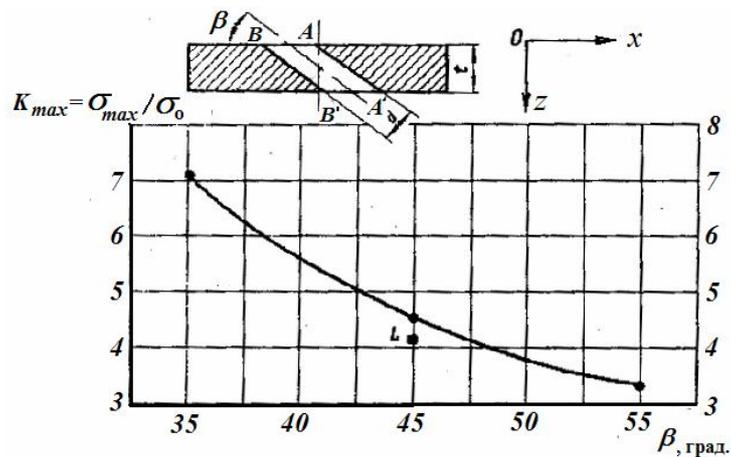


Рис. 4. Изменение максимальной величины коэффициента концентрации напряжений  $K_{\sigma}$  в зависимости от угла наклона  $\beta$  оси отверстия к плоскости пластины [2]

Результаты испытаний свидетельствуют о незначительном изменении термоциклической долговечности модельных образцов при изменении диаметра перфорации, используемой в последних сечениях жаровых труб.

### Заключение

Экспериментально установлено, что уменьшение угла наклона перфорационных отверстий в моделях жаровых труб из сплава ВЖ159 с  $90^\circ$  до  $35^\circ$  сопровождается снижением их термоциклической долговечности в 5 раз.

Увеличение диаметра отверстий от 1 до 2мм сопровождается в 1,25 раза увеличением термоциклической долговечности.

Предложенную методику исследований можно использовать при разработке конструкций охлаждаемых деталей авиационных двигателей для выбора параметров охлаждающих каналов.

### Литература

1. Бычков Н.Г. Методика испытаний и оценка термоциклической долговечности моделей жаровых труб камер сгорания ГТД с защитными покрытиями

ми с использованием высокочастотного индукционного нагрева / Н.Г. Бычков, А.Р. Лепешкин, А.В. Першин, А.Д. Рекин, В.П. Лукаш. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – X., 2004. – № 8(16). – С. 158-162.

2. Сухинин В.П. Концентрация напряжений в толстой пластине с косым отверстием / В.П. Су-

хинин, И.В. Волькович, Э.В. Лукина // *Проблемы прочности*. – 1976. – № 9. – С. 59-61.

3. Волков И.В. Измерение поля перемещений и деформаций натурального образца вблизи концентратора напряжений с помощью «Speckle» голографии / И.В. Волков // *Проблемы прочности*. – 1975. – № 9. – С. 89-91.

Поступила в редакцию 1.06.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., заместитель Генерального директора Ю.А. Ножницкий, ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва, Россия.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОЦИКЛІЧНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ З РІЗНИМИ КУТАМИ НАХИЛУ ОХОЛОДЖУВАНИХ КАНАЛІВ

*М.Г. Бичков, О.Р. Лепешкін, О.В. Першин, А.Д. Рекин, В.П. Лукаш*

Проведений аналіз експериментальних досліджень впливу кута нахилу охолоджуючих каналів на термоциклічну довговічність модельних зразків жарових труб із сплаву ВЖ 159. При зміні кута нахилу каналів до поверхні зразка від 90 до 35° циклічна довговічність знизилася в 5 разів. Досліджений вплив діаметру охолоджуючих каналів на термоциклічну довговічність перфорованих зразків. При зміні діаметру отворів від 1 до 2 мм довговічність збільшилася в 1,25 разу. Виявлена значна зміна температури по довжині похилого охолоджуючого каналу.

**Ключові слова:** термоциклічна довговічність, кут нахилу, що охолоджує канал, зміну температури, модельні зразки жарових труб.

## INVESTIGATION OF THERMOCYCLE DURABILITY OF DETAILS WITH VARIOUS CORNERS OF INCLINATION OF COOLED CHANNELS

*N.G. Bychkov, A.R. Lepeshkin, A.V. Pershin, A.D. Rekin, V.P. Lukash*

The analysis of experimental investigations of influence of a corner of an inclination of cooling channels on thermocycle of durability of modelling samples heat pipes from alloy VG 159 is resulted. At change of a corner of an inclination of channels for a surface of the sample from 90 up to 35° the cyclic durability has gone down in 5 times. Influence of diameter of cooling channels on thermocycle of durability of the punched samples is investigated. At change of diameter of apertures from 1 up to 2 mm the durability has increased in 1,25 times. Significant change of temperature on length of the inclined cooling channel is revealed.

**Keywords:** thermocycle of durability, the corner of an inclination cooling the channel, change of temperature, modelling samples heat pipes.

**Бычков Николай Григорьевич** канд. техн. наук, начальник сектора ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва, Россия, e-mail: lepehkin@rtc.ciam.ru.

**Лепешкин Александр Роальдович** – д-р техн. наук, снс, начальник сектора ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва, Россия, e-mail: lepehkin@rtc.ciam.ru.

**Першин Алексей Викторович** – научный сотрудник ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва, Россия, e-mail: lepehkin@rtc.ciam.ru.

**Рекин Анатолий Донатович** – канд. техн. наук, начальник сектора ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва, Россия, e-mail: lepehkin@rtc.ciam.ru.

**Лукаш Владимир Петрович** – канд. техн. наук, начальник сектора ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва, Россия, e-mail: lepehkin@rtc.ciam.ru.