

УДК 004.65

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЗАМКА ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА ГТД

В. С. ЖЕРНАКОВ<sup>1</sup>, А. Н. ЕРМОЛЕНКО<sup>2</sup>, А. И. ДУБИН<sup>3</sup>

<sup>1</sup>zhvs@ugatu.su, <sup>2</sup>tolja@inbox.ru, <sup>3</sup>alexey.dubin@rambler.ru

<sup>1-3</sup> ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

<sup>3</sup> ПАО ОДК «Уфимское моторостроительное производственное объединение» (ОДК-УМПО)

*Поступила в редакцию 18.06.2020*

**Аннотация.** Рассмотрено влияние технологической наследственности на прочность замка лопатки в условиях циклического нагружения. Выполнен анализ распределения поверхностных остаточных напряжений в образцах при упрочнении поверхности с помощью стеклянных и стальных микрошариков. Проведен анализ напряженно-деформированного состояния приповерхностного слоя замка лопатки в исходном состоянии и после поверхностного упрочнения. Экспериментально установлено влияние поверхностного упрочнения на усталостную прочность замка лопатки компрессора ГТД.

**Ключевые слова:** технологическая наследственность; остаточные напряжения; замок лопатки; усталостная прочность; концентрация напряжений; поверхностное упрочнение; прочность.

### ВВЕДЕНИЕ

Современные требования по повышению долговечности деталей авиационных газотурбинных двигателей ставят вопросы ко всему технологическому циклу их изготовления. Способы и параметры механической обработки заготовок и в дальнейшем деталей оказывают влияние на величину и характер действия поверхностных остаточных напряжений. И несмотря на то, что в большинстве случаев основной вклад в формирование показателей остаточных напряжений в поверхностном слое вносят финишные, заключительные операции технологического процесса, часть свойств может быть уже сформирована на промежуточных операциях.

В работах [1–5] рассматриваются методики определения и прогнозирования остаточных напряжений в компрессорных лопатках газотурбинных двигателей (ГТД). Однако в данных методиках учет технологической наследственности не производит-

ся. Оценка величины и характера распределения поверхностных остаточных напряжений производится лишь после финишной операции по нанесению покрытий либо после проведения упрочняющей обработки.

В настоящей работе проводится анализ распределения напряжений в поверхностном слое и в объеме замка компрессорной лопатки, возникших в результате базовой механической обработки, а также с помощью поверхностного упрочнения стеклянными и стальными микрошариками.

Выполнен анализ влияния поверхностного упрочнения на распределение поверхностных остаточных напряжений в образцах, имитирующих реальные лопатки.

Проведены исследования усталостной прочности ножки и замка лопатки в условиях, имитирующих эксплуатацию изделия. Установлена взаимосвязь повышения усталостной прочности замка от распределения поверхностных остаточных напряжений, полученных в результате различных спо-

собов упрочнения его поверхности. Прогнозирование разрушения позволит существенно продлить срок эксплуатации изделий ГТД. Исследование характера разрушения замков лопаток и распределения в них напряжений в ходе циклического нагружения позволяет прогнозировать место и характер разрушения деталей, создавать в дальнейшем цифровые двойники изделий.

### ФОРМИРОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ЗАМКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Конструктивное исполнение замка компрессорной лопатки трапецевидного типа «ласточкин хвост» показано на рис. 1. Усталостное разрушение в замковой части наблюдалось в наиболее тонком сечении в зоне ножи.

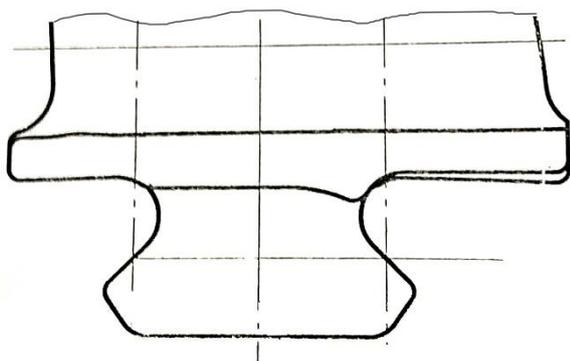


Рис. 1. Хвостовик компрессорной лопатки

Для создания условий, в которых наиболее нагруженным сечением однозначно будет являться зона перехода от замка к полке хвостовика, и исключения возможности разрушения пера лопатки были предложены различные конфигурации имитатора компрессорной лопатки, в которой финишная механическая обработка проводилась бы только в зоне замка. Внешний вид такого имитатора лопатки показан на рис. 2.

В представленной модели перо и полка выполнены в утолщенном виде. По толщине они превосходят фактические размеры лопатки приблизительно в 3–5 раз. Выбранная форма обеспечивает преемственность результатов численных и усталостных испытаний образцов имитатора лопаток.

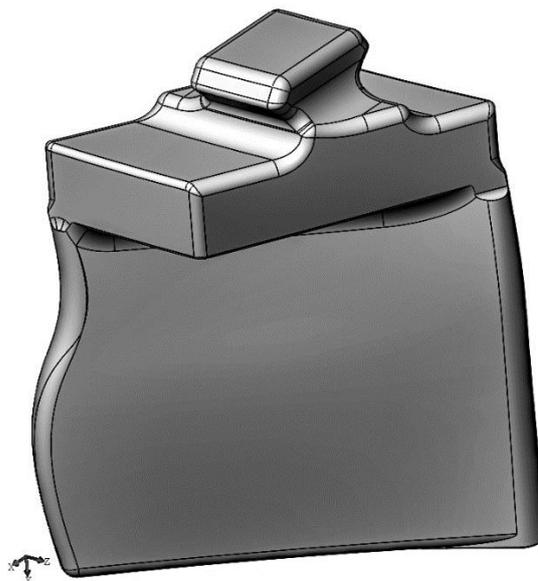


Рис. 2. Имитатор компрессорной лопатки

**Материал образцов.** В качестве материала для изготовления образцов имитаторов лопаток была выбрана сталь ЭП718-ИД, физические и механические характеристики которой приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Физические и механические характеристики стали ЭП718-ИД

Плотность, кг/мм <sup>3</sup>	8,54 · 10 <sup>-6</sup>
Коэффициент линейного теплового расширения $\alpha$ , $\times 10^5 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (при температуре, $^\circ\text{C}$ )	1,062...1,6038 (-195...760)
Модуль упругости $E$ , ГПа (при температуре, $^\circ\text{C}$ )	215,81...98,59 (-188...1093)
Модуль упругости $E$ , ГПа (при температуре, 20 $^\circ\text{C}$ )	199,95
Коэффициент Пуассона (при температуре, $^\circ\text{C}$ )	0,25...0,402 (-188...1093)
Коэффициент Пуассона (при температуре, 20 $^\circ\text{C}$ )	0,294
Предел текучести $\sigma_T$ , МПа (при температуре, 20 $^\circ\text{C}$ )	1034,2
Предел прочности $\sigma_{пч}$ , МПа (при температуре, 20 $^\circ\text{C}$ )	1275,5
Относительное остаточное удлинение $\delta$ , %	> 12

**Конечно-элементная модель образца.** Все расчеты были выполнены в статической постановке в пакете ANSYS/Workbench [2, 3]. Один из вариантов сетки конечных элементов для образца имитатора компрессорной лопатки приведен на рис. 3.

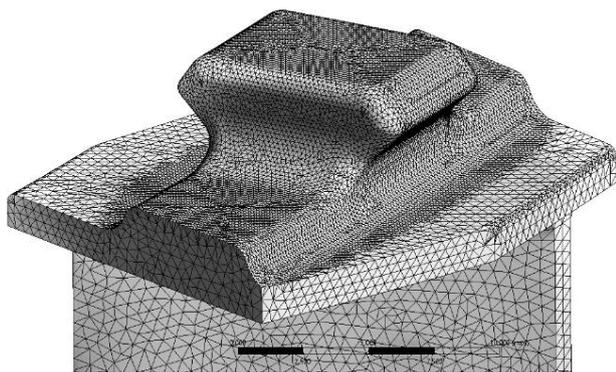


Рис. 3. Конечно-элементная модель имитатора компрессорной лопатки

В среднем конечно-элементная сетка насчитывала около 600 тыс. объемных элементов типа тетраэдр и порядка 40 тыс. элементов в зоне контакта. Давление на имитатор лопатки при численном моделировании в области пера и полки подбиралось таким образом, чтобы величина нормальных напряжений в направлении пера лопатки в определенных контрольных точках соответствовала измеренным с помощью тензодатчиков в них показаниям на натурном образце имитатора.

В ходе моделирования были рассмотрены варианты «жесткого» закрепления в замке, без учета сил трения; вариант с закреплением в цанговых захватах с трением на поверхности контакта, без ограничений по «вытаскиванию» лопатки из замка; вариант с закреплением в цанговых захватах со скользящей посадкой в замке.

Применение таких расчетных схем позволило учитывать и варьировать величину напряжений, вызванных зазорами и натягами в зоне замка.

### Параметры поверхностной упрочняющей обработки.

*Вариант 1.* Исходное состояние – без упрочнения.

*Вариант 2.* Упрочнение стеклянными шариками  $\varnothing 0,5 \pm 0,1$  мм на пневмогидродробеструйной установке (давление –  $1,2 \text{ кгс/см}^2$ ; время экспозиции – 2 мин).

*Вариант 3.* Упрочнение стальными микрошариками  $\varnothing 0,1 \dots 0,3$  мм на дробеметной установке.

**Поверхностные остаточные напряжения.** Для каждого варианта поверхностного упрочнения, а также варианта без упрочняющей обработки были проведены экспериментальные исследования величины и глубины залегания поверхностных остаточных напряжений.

*Вариант 1.* Без упрочнения – остаточные поверхностные напряжения сжатия величиной  $-10$  МПа, которые по мере удаления от поверхности уменьшаются и на глубине  $30$  мкм переходят в напряжения растяжения  $\sigma_{\text{раст}} = 10 \dots 20$  МПа при  $200$  мкм. Степень наклепа составляет  $N = 6 \%$ .

*Вариант 2.* С упрочнением стеклянными шариками – остаточные поверхностные напряжения сжатия величиной  $-240$  МПа, которые по мере удаления от поверхности постепенно увеличиваются на глубине  $60$  мкм до  $-350$  МПа, а затем постепенно уменьшаются до  $-150$  МПа при  $200$  мкм. Напряжения растяжения отсутствуют. Степень наклепа составляет  $N = 14 \%$ .

*Вариант 3.* С упрочнением стальными микрошариками – остаточные поверхностные напряжения сжатия величиной  $-460$  МПа, которые по мере удаления от поверхности постепенно увеличиваются на глубине  $30$  мкм до  $-500$  МПа, а затем постепенно уменьшаются до  $-140$  МПа при  $200$  мкм. Напряжения растяжения отсутствуют. Степень наклепа составляет  $N = 16 \%$ .

Распределение напряжений в поверхностном слое при различных вариантах показано на рис. 4.

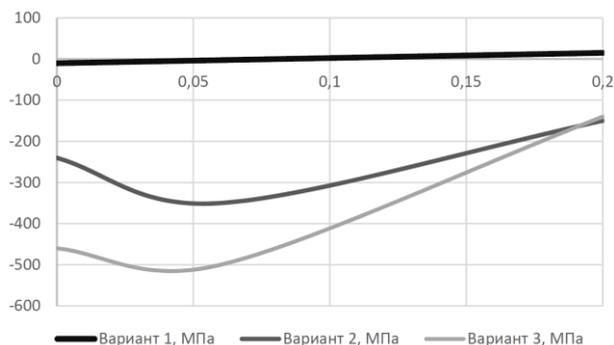
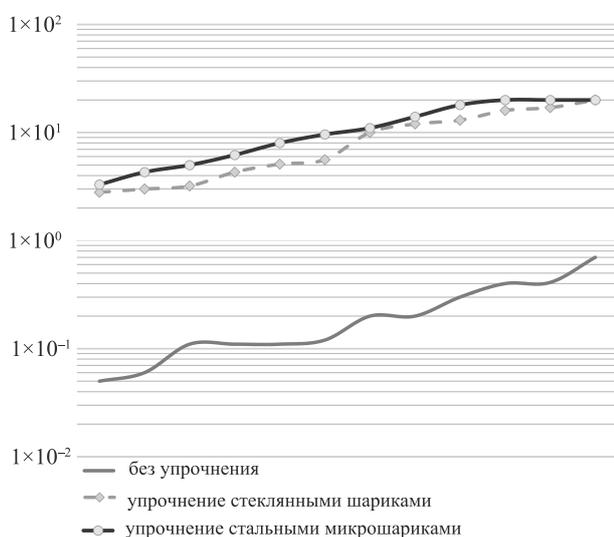


Рис. 4. Распределение поверхностных остаточных напряжений в образцах

### УСТАЛОСТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ИМИТАТОРОВ КОМПРЕССОРНОЙ ЛОПАТКИ

Сравнительные испытания на усталость проводились при одинаковой амплитуде напряжений  $\sigma = 200$  МПа по первой изгибной форме колебаний на электродинамическом вибростенде при комнатной температуре. Все образцы замковой части лопаток испытывались в одинаковых условиях закрепления по консольной схеме до разрушения или до выработки базы 20 млн циклов нагружения.

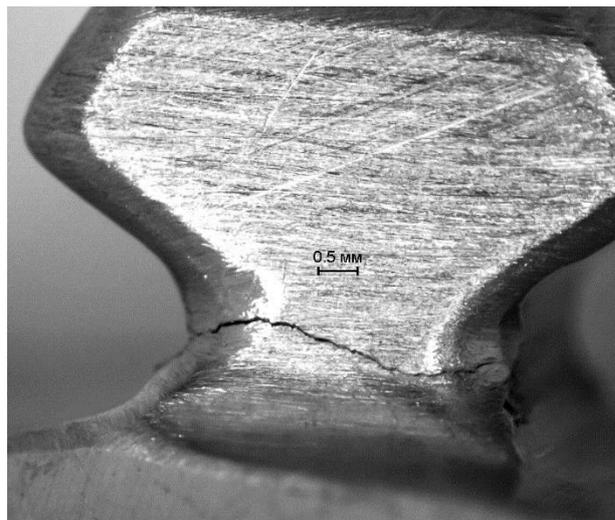
Результаты усталостных испытаний показаны на рис. 5.



**Рис. 5.** Результаты усталостных испытаний замков лопаток с различными видами упрочняющей обработки

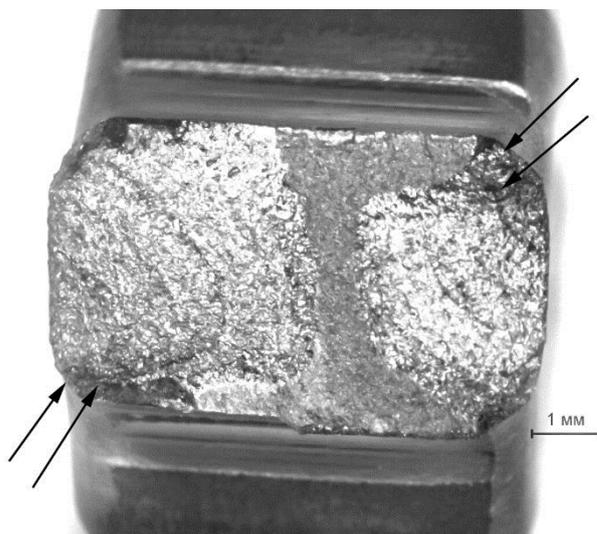
После испытаний по результатам контроля ЛЮМ1-ОВ на всех образцах обнаружены трещины. По результатам металлографического исследования трещины (рис. 6), образовавшиеся в процессе усталостных испытаний, носят усталостный характер.

Фрактографический анализ показал, что поверхность изломов притертая, с видимыми линиями отдыха, характерными для усталостного разрушения. Усталостное разрушение многоочаговое с началом развития от радиуса в зоне ножки с двух диагонально противоположных сторон. Зона усталостного разрушения занимает  $\sim 90\%$  от всей площади излома.



**Рис. 6.** Внешний вид разрушения

Микроанализ шлифов после травления показал, что трещины распространяются по телу зерен, тем самым подтверждается усталостный характер их образования (рис. 7).



**Рис. 7.** Внешний вид излома (стрелками показаны очаги начала разрушения)

Дефекты металлургического характера в изломах и около них отсутствуют.

Микроструктура материала образцов в зоне разрушения и вдали от нее удовлетворительная и соответствует термобработанному состоянию сплава ХН45МВТЮБР-ИД (ЭП718-ИД) (рис. 8).

Результаты испытаний на усталость образцов имитаторов компрессорных лопаток, обработанных по нескольким технологичес-

ким вариантам, представлены в табл. 2 (суммарная и средняя наработка по 12 образцам для каждого варианта обработки).

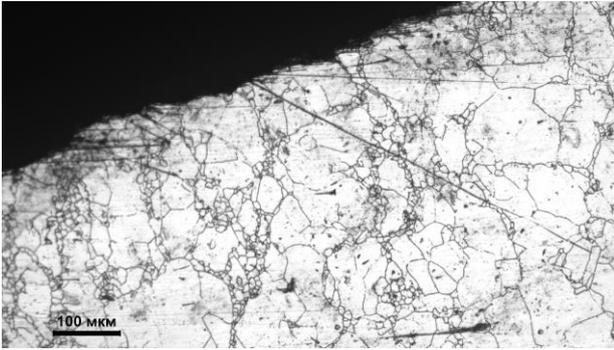


Рис. 8. Микроструктура материала с выходом на излом

Таблица 2

Количество циклов до разрушения

Вариант	$N_{\text{сумм}} \times 10^6$ , циклов	$N_{\text{сред}} \times 10^6$ , циклов
Вариант 1	2,77	0,23
Вариант 2	112	9,33
Вариант 3	139	11,62

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис. 9, 10 показано распределение эквивалентных напряжений в замковой части имитатора лопатки, позволяющее производить оценку прочности конструкции на основании критериев прочности. Наибольший уровень эквивалентных напряжений наблюдается в основании ножки хвостовика и имеет два выраженных максимума на одной диагонали поперечного сечения ножки.

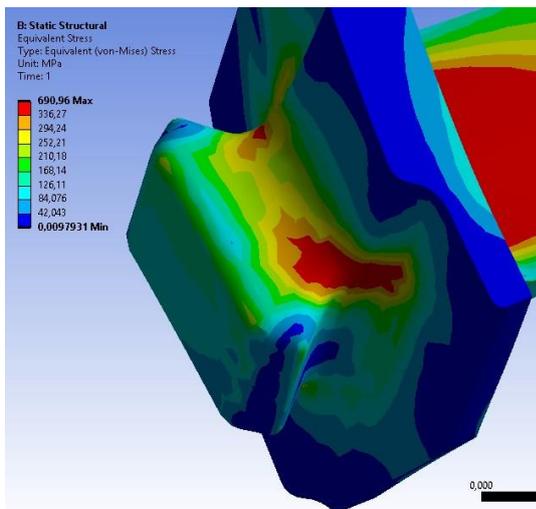
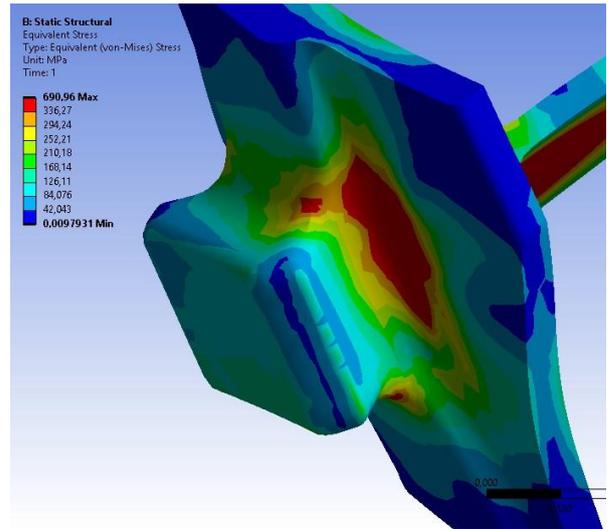
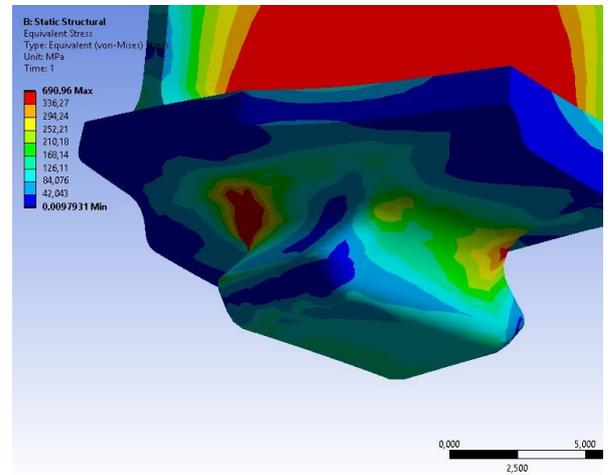


Рис. 9. Эквивалентные напряжения в замковой части лопатки



а



б

Рис. 10. Эквивалентные напряжения в замковой части лопатки:

а – на диагонально противоположной рис. 9 стороне ножки; б – на диагонали наименьших напряжений в зоне ножки

На рис. 11 показано поперечное сечение хвостовика в зоне действия наибольших эквивалентных напряжений. Видно, что в зоне радиуса ножки, в приповерхностном слое, напряжения превышают среднее значение напряжений более чем в 5 раз.

Детализация напряженного состояния путем анализа распределения главных  $\sigma_1$  и эквивалентных напряжений показывает схожую картину в распределении их максимальных значений. Линии ориентации главных напряжений криволинейно проходят по профилю замка так, ориентируясь по нормальям к кромке.

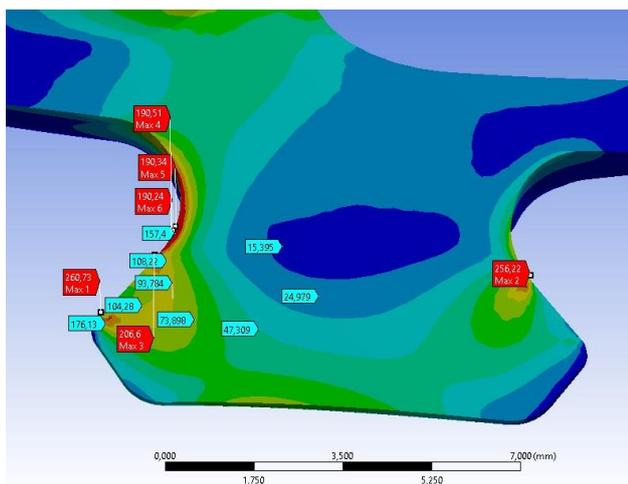


Рис. 11. Поперечное сечение хвостовика лопатки

По результатам численного моделирования был вычислен коэффициент концентрации напряжений в деталях при различных видах поверхностного упрочнения. В зависимости от величины наведенных поверхностных остаточных напряжений значения наибольших эквивалентных напряжений в наиболее опасных точках замка, из которых происходит его усталостное разрушение, существенно изменяются (рис. 12).

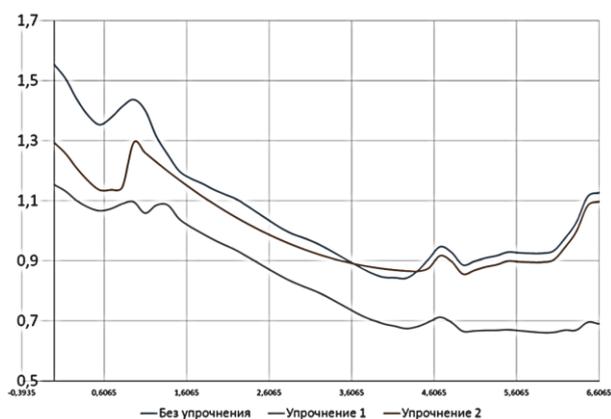


Рис. 12. Коэффициент концентрации напряжений по диагонали действия наибольших напряжений

Видно, что в сравнении с исходным вариантом наибольшие эквивалентные напряжения в приповерхностных слоях в образце с упрочнением стальными микрошариками становятся примерно на 40 % меньше, а в образце с упрочнением стеклянными шариками – меньше примерно на 30 %.

Модальный анализ продемонстрировал тенденцию воспринимать изгибающую дефор-

мацию в зоне хвостовика вдоль диагонали с наибольшими нормальными напряжениями (рис. 13).

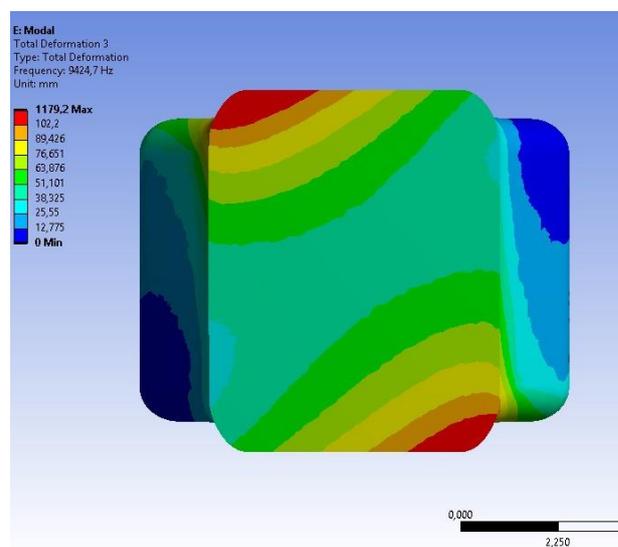


Рис. 13. Деформации в наиболее нагруженном сечении хвостовика

Характер деформированного состояния хорошо согласуется с процессом усталостных испытаний замка лопатки на вибростенде.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье выполнены исследования усталостной прочности особо ответственных зон хвостовика лопатки – ножки и замка – в условиях, имитирующих эксплуатацию изделия.

Выявлены условия повышения усталостной прочности замка в зависимости от распределения поверхностных остаточных напряжений, полученных в результате упрочнения его поверхности с помощью стеклянных шариков и стальных микрошариков.

Установлено, что средняя наработка до разрушения в зоне ножки хвостовика увеличилась на 9,1 млн циклов при обработке стеклянными шариками и на 11,4 млн циклов – при обработке стальными микрошариками в сравнении с исходным состоянием без упрочнения.

Выявлены зоны действия наибольших напряжений в зоне хвостовика и характер распределения в них остаточных напряжений. Установлено, что наибольшие рабочие

напряжения в поверхностном слое в детали без упрочнения на 40 % больше рабочих напряжений в деталях с упрочненным поверхностным слоем.

Полученные результаты позволяют рекомендовать упрочнение поверхности замковой части стальными микрошариками в качестве способа поверхностного упрочнения, обеспечивающего наибольший уровень наведенных поверхностных остаточных напряжений, а также наибольшую усталостную прочность замка лопатки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жернаков В. С., Мардимасова Т. Н., Конева К. В.** Исследование напряженно-деформированного состояния в элементах конструкции ГТД с выточками при нормальной и повышенной температурах // Вестник УГАТУ. 2020. Т. 24, № 1 (87). С. 3–9. [ V. S. Zhernakov, T. N. Mardimasova, K. V. Koneva, "Study of the stress-strain state in the structural elements of GTE with stress concentrators at normal and elevated temperatures", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 24, no. 1 (87), pp. 3-9, 2020. ]

2. **Жернаков В. С., Будилов И. Н., Ермоленко А. Н.** Расчет напряженно-деформированного состояния центростремительного колеса компрессора из титанового сплава // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19, № 3 (69). С. 97–102. [ V. S. Zhernakov, I. N. Budilov, A. N. Ermolenko, "Calculation of the stress-strain state of the center wheel of a titanium alloy compressor", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 19, no. 3 (69), pp. 97-102, 2015. ]

3. **ANSYS Release 15.0.** Documentation. Canonsburg: ANSYS Inc. 2013.

4. **Жернаков В. С., Ермоленко А. Н., Сабиров Р. М.** Влияние напряженно-деформированного состояния на циклическую трещиностойкость заклепочных соединений // Вестник УГАТУ. 2011. Т. 15, № 4 (44). С. 67–72. [ V. S. Zhernakov, A. N. Ermolenko, R. M. Sabirov, "Influence of the stress-strain state on the cyclic crack resistance of rivet joints", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 15, no. 4 (44), pp. 67-72, 2011. ]

5. **Жернаков В. С., Будилов И. Н.** Термонапряженное состояние центростремительного колеса компрессора при наличии трещины // Вестник УГАТУ. 2016. Т. 20, № 4 (74). С. 3–8. [ V. S. Zhernakov, I. N. Budilov, "Thermal stress state of the compressor centrifugal wheel in the presence of a crack", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 20, no. 4 (74), pp. 3-8, 2016. ]

#### ОБ АВТОРАХ

**ЖЕРНАКОВ Владимир Сергеевич**, зав. каф. сопротивления материалов. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1967). Д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УГАТУ, 1992). Проф., засл. деят. науки РФ, акад. АН РБ. Иссл. в обл. механики деформируемого твердого тела.

**ЕРМОЛЕНКО Анатолий Николаевич**, доц. каф. сопротивления материалов. Дипл. инженер по технологии и оборудованию сварочн. произв-ва (УГАТУ, 2003). Канд. техн. наук по динамике, прочности машин, приборов и аппаратуры

(УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. механики деформируемого твердого тела.

**ДУБИН Алексей Иванович**, доц. каф. технологии машиностроения. Дипл. инж.-технол. (УГАТУ, 2000). Канд. техн. наук по динамике и прочности машин (СГАУ, 2015). Иссл. в обл. сопротивл. усталости, релакс. стойкости и остат. поверхн. напряжений.

#### METADATA

**Title:** Influence of technological inheritance on the durability of a GTE-compressor blade-lock.

**Authors:** V. S. Zhernakov<sup>1</sup>, A. N. Ermolenko<sup>2</sup>, A. I. Dubin<sup>3</sup>

**Affiliation:**

<sup>1-3</sup> Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

<sup>3</sup> Ufa Engine Industrial Association (UMPO), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>zhvs@ugatu.su, <sup>2</sup>tolja@inbox.ru,

<sup>3</sup>alexey.dubin@rambler.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 24, no. 2 (88), pp. 13-19, 2020. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The influence of technological heredity on the strength of a paddle lock under cyclic loading is considered. An analysis is made of the distribution of surface residual stresses in the samples during surface hardening using glass and steel microspheres. The analysis of the stress-strain state of the surface layer of the padlock of the blade in the initial state and after surface hardening is carried out. The effect of surface hardening on the fatigue strength of the lock of the blades of a GTE compressor has been experimentally established.

**Key words:** technological heredity; residual stresses; paddle lock; fatigue strength; stress concentration; surface hardening; strength.

**About authors:**

**ZHERNAKOV, Vladimir Sergeevich**, Prof., Head of a Chair of Dept. of Strength of Materials, Dipl. Engineer (UAI, 1967). Dr. of Tech. Sci. (USATU, 1992). Academician of Science Academy of Bashkortostan Republic. Researches in area of deformable body mechanics.

**ERMOLENKO, Anatoly Nikolaevich**, Docent of the department of strength of materials. Dipl. engineering technology and welding equipment production (USATU, 2003). Tech.D. Sciences on the dynamics, strength of machines, devices and equipment (USATU, 2009). Studies of solid mechanics.

**ДУБИН, Aleksey Ivanovich**, Docent, Dept. of Mechanical Engineering Technology. Dipl. engineer-technol. (USATU, 2000). Cand. of Tech. Sci. in dynamics and strength of machines (SGAU, 2015). Investigation of fatigue strength, relaxational resistance and surface residual stresses.