

**ИССЛЕДОВАНИЕ И НОРМИРОВАНИЕ ДОПУСТИМЫХ ЗАБОИН НА РАБОЧИХ ЛОПАТКАХ КОМПРЕССОРА НА ПРИМЕРЕ ДВИГАТЕЛЯ НК-12**© 2009 А. В. Грицин<sup>1</sup>, Е. П. Кочеров<sup>2</sup>, А. П. Ремпель<sup>1</sup>, В. А. Самойлов<sup>1</sup><sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет<sup>2</sup>Самарское конструкторское бюро машиностроения

Приведены результаты анализа геометрии, экспериментальных и расчётных данных для рабочих лопаток компрессора двигателя НК-12, сравнительных усталостных испытаний. Предложена уточнённая относительно требований ОСТов методология проведения расчётно-экспериментальных работ по прогнозированию и проверке надёжности лопаток с повреждениями.

*Надёжность, забоины, рабочие лопатки, прочность, предел выносливости, метод конечных элементов*

Статистика эксплуатации двигателей НК-12МП и других модификаций двигателя НК-12 показывает, что появление забоин на рабочих лопатках компрессора, связанных как с попаданием посторонних предметов на вход двигателя, так и с попаданием в тракт фрагментов не критических разрушений трактовых конструкций, конструкций системы перепуска воздуха, явление достаточно частое [1, 2].

Действующий отраслевой стандарт ОСТ 1 00304 – 79 «Лопатки газотурбинных двигателей. Нормирование повреждения лопаток компрессоров от попадания посторонних предметов» [3] регламентирует допустимые без подтверждения лабораторными и стендовыми испытаниями забоины и порядок назначения осмотров на наличие повреждений, нормирования повреждений и назначения испытаний по проверке надёжности лопаток с повреждениями в случае превышения допустимых размеров.

Работа выполняется в два этапа, первый из которых заключается в разработке методологии решения проблемы и получении необходимого объёма информации, позволяющего в соответствии с ОСТ 1 00304 – 79 [3] регламентировать допустимые забоины. Второй этап работы заключается в проведении специальных испытаний двигателя в подтверждение установленных норм допустимых забоин и оформление соответствующих решений и бюллетеней, вводящих нормы допустимых забоин в эксплуатационную техническую документацию [4].

В данной работе приводятся результаты анализа геометрии, имеющихся экспериментальных и расчётных данных для рабочих лопаток компрессора двигателя НК-12МП, а также анализ проведенных сравни-

тельных лабораторных усталостных испытаний рабочих лопаток четырёх ступеней, выбранных типовыми. Показана возможность получения достоверных оценок усталостной прочности лопаток с использованием современных средств твердотельного моделирования и анализа в сочетании с результатами испытаний лопаток с забоинами. Показана также возможность регламентирования на базе такого анализа зон допустимости забоин различной геометрии на профильной части лопаток. Предложена также несколько уточнённая относительно требований ОСТ 1 00304 – 79 [3] методология проведения расчётно-экспериментальных работ по прогнозированию и проверке надёжности лопаток с повреждениями, ориентированная на регламентирование различных забоин в различных зонах профильной части лопатки.

В соответствии с разделом 2 ОСТ 1 00304 – 79 допускаются к эксплуатации лопатки из нержавеющей стали с толщиной кромок не менее 0,8мм и радиусом закругления не менее 0,4мм, имеющие точечные забоины по всей профильной части глубиной не более 0,3мм без проверки надёжности лабораторными и стендовыми испытаниями (п. 2.2) [3].

При толщине кромок не более 0,8мм лопатки из нержавеющей стали допускаются к эксплуатации без проверки надёжности лабораторными и стендовыми испытаниями при отношении глубины забоины к толщине кромки не более 0,25 (п. 2.3) [3].

Ни одна лопатка компрессора НК-12 не отвечает полностью условиям ОСТ 1 00304-79 по допустимым без лабораторных и стендовых испытаний забоинам. Причиной этого является выделенная формулировка «не более» в п. 2.3. Вообще говоря, совокупность

формулировок п.п. 2.2 и 2.3 практически исключает допуск лопаток двигателя НК-12МП с забоинами к эксплуатации без специальных испытаний [3].

В табл. 1 приведены среднестатистические результаты экспериментального определения наиболее характерных собственных форм и частот колебаний рабочих лопаток компрессора двигателя НК-12МП полученных при лабораторных и технологических испытаниях в соответствии с утверждённой методикой [5].

Таблица 1 - Собственные частоты колебаний рабочих лопаток (Гц)

№ ступ.	1 изгиб	1 круг.	2 изгиб	2 круг.
1	132	861	554	2140
2	216	1084	705	2137
3	234	1174	843	2565
4	246	1136	862	1916
5	400	1530	1150	2500
6	420	2000	1580	4250
7	808	2017	2704	4346
8	1202	3080	4000	6000
9	1333	2930	4885	6122
10	1526	3100	5300	6700
11	1261	2850	6000	8000
12	1270	2900	5800	8450
13	1605	3300	7150	9200
14	1386	3220	6600	8900

Для расчётного анализа собственных частот, форм и распределения напряжений в среде UG в соответствии с чертежами сформированы 3D твёрдотельные модели рабочих лопаток 1, 5, 9 ступеней, которые выбраны как базовые для усталостных испытаний с забоинами.

3D UG модель в нейтральном формате parasolid импортировалась в среду ANSYS, где средствами ANSYS модифицировалась разбиением на отдельные объёмы под оптимальное формирование конечно-элементной сети и формирование забоин на входной и выходной кромках. Конечно-элементная модель формировалась средствами ANSYS с учётом необходимой точности как модального, так и структурного анализа с обеспечением необходимого сгущения сети КЭ в зоне моделирования забоин.

Результаты модального анализа приведены в табл. 2 собственных частот колебаний (в сравнении с экспериментально определёнными) [6].

Таблица 2 - Собственные частоты рабочих лопаток 1, 5, 9 ступеней компрессора (Гц)

№ ступ.	Форма колеб.	1-1	1-2	2-1	2-2
1	Расчёт	131	838	563	2153
	Эксп.	132	861	564	2140
5	Расчёт	381	1533	1157	2670
	Эксп.	400	1530	1150	2500
9	Расчёт	1341	4671	2942	5965
	Эксп.	1333	4885	2930	6122

Как видно из сравнения результатов анализа и испытаний, модальный анализ на 3D конечно-элементных моделях даёт результаты, совпадающие с экспериментально полученными: по частоте в пределах разброса частот в экспериментах, по распределению напряжений в пределах возможных отклонений при измерениях, связанных с конечным размером базы датчика, ширины решётки и положением датчиков.

Забоины на первой, пятой, девятой и тринадцатой рабочих лопатках наносились методом прорезания на токарном станке в собранном рабочем колесе с предварительным выставлением лопаток по прорезаемой кромке. Угол и радиус забоины обеспечивались заточкой резца, глубина – продольной подачей резца на заданный размер (в направлении оси рабочего колеса). Забоины на рабочей лопатке 5 ст. наносились методом прорезания на отдельных лопатках, закрепленных в цанговом зажиме. Угол и радиус забоины обеспечивались заточкой резца, глубина – продольной подачей в направлении оси рабочего колеса [7].

Всего было испытано более 100 лопаток. Кратко результаты испытаний и их анализ изложены ниже. В табл. 3 показаны полученные значения пределов выносливости лопаток с забоинами и без забоин по контрольному датчику, положение которого определено в соответствии с «Нормами прочности» по результатам исследования распределения напряжений в профильной части лопатки.

Полученные результаты показали принципиально различное влияние забоин на выносливость лопаток испытанных на основном тоне и высших (крутильных) формах колебаний, а также на входной и выходной кромках.

Таблица 3 - Результаты усталостных испытаний

№ ступени	1	5	9	13	Размерн.
Предел выносливости без забоины	48	40	44	36 (32)	кгс/мм <sup>2</sup>
Предел выносливости с забоиной	14	30	12	32	кгс/мм <sup>2</sup>
Собственная форма	2 круг.	1 изг.	1 круг.	1 изг.	-
Частота испытаний	2200-2257	380 - 394	2970-3126	1517-1680	Гц
База испытаний	$2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$	циклов

Такие результаты трудно объяснить, исходя из представлений стержневой теории, использовавшейся в исходном анализе, поэтому потребовалось подробное исследование особенностей распределения напряжений на 3D моделях лопаток с забоинами.

Для исследования НДС в зоне забоин на 3D моделях рабочих лопаток первой, пятой и девятой ступени компрессора по входной и выходной кромкам были сформированы забоины, соответствующие по геометрии эталонным, выбранным для усталостных испытаний и расположенные по всей входной и выходной кромке с определённым шагом. Одна из забоин на каждой из лопаток по месту расположения соответствовала нанесённой для усталостных испытаний.

Анализ проведен средствами модуля модального анализа ANSYS.

Результаты анализа НДС в забоинах (распределение напряжений в критической забоине и максимальные напряжения в остальных) показаны на рис. 1 - 9.

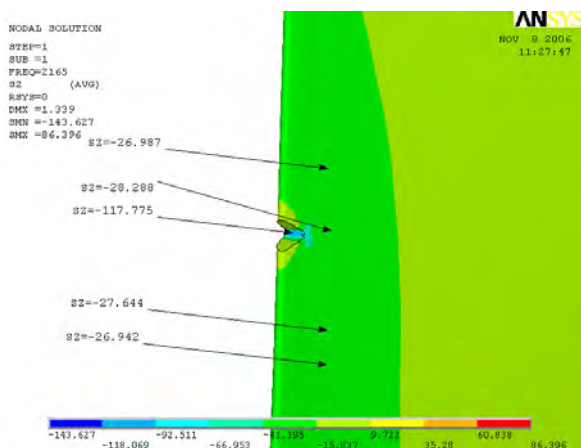


Рис. 1. Распределение радиальных напряжений в зоне критической забоины рабочей лопатки первой ступени компрессора

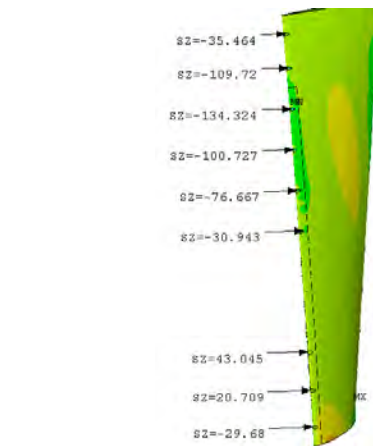


Рис. 2. Максимальные напряжения в забоинах на входной кромке первой ступени компрессора

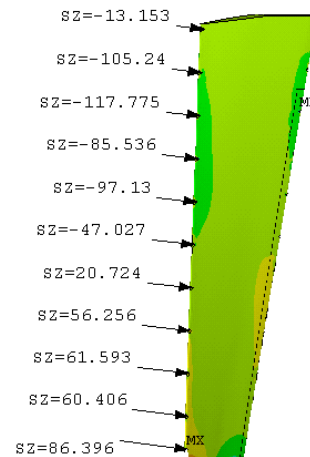


Рис. 3. Максимальные напряжения в забоинах на выходной кромке первой ступени компрессора

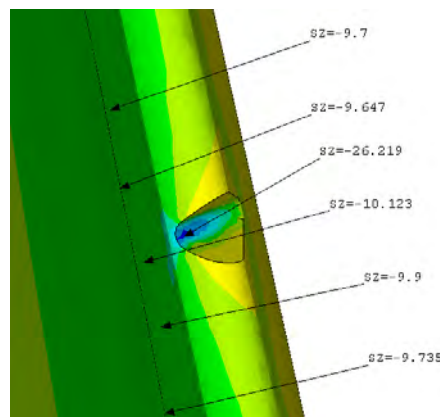


Рис. 4. Распределение радиальных напряжений в зоне критической забоины рабочей лопатки пятой ступени компрессора

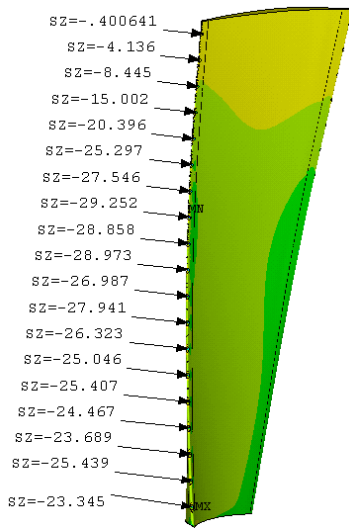


Рис. 5. Максимальные напряжения в забоинах на входной кромке пятой ступени компрессора

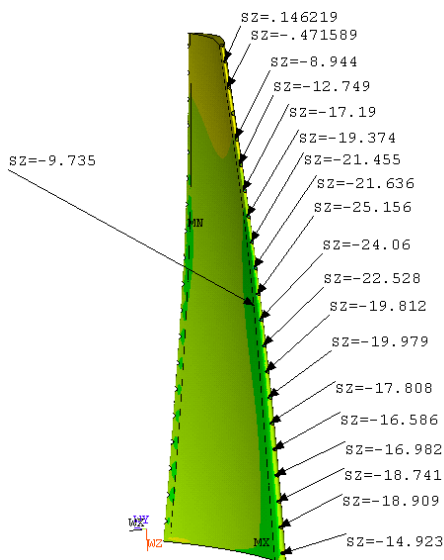


Рис. 6. Максимальные напряжения в забоинах на выходной кромке пятой ступени компрессора

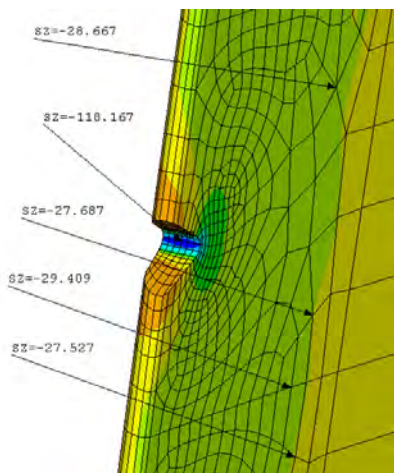


Рис.7. Распределение радиальных напряжений в зоне критической забоины рабочей лопатки девятой ступени компрессора

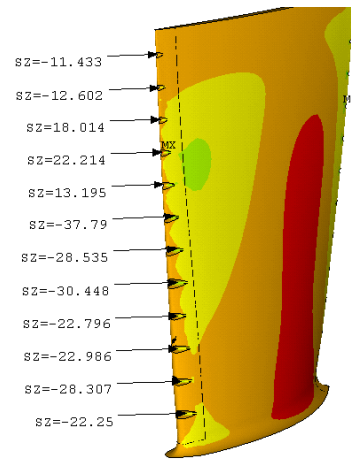


Рис. 8. Максимальные напряжения в забоинах на входной кромке девятой ступени компрессора

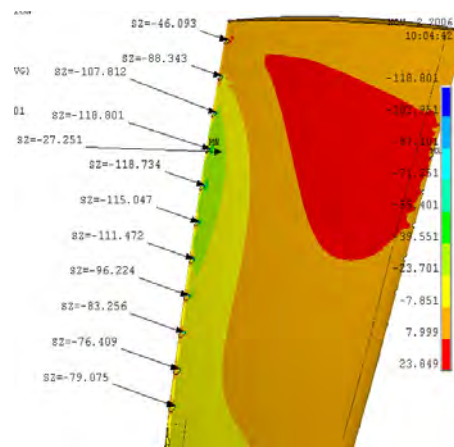


Рис. 9. Максимальные напряжения в забоинах на выходной кромке девятой ступени компрессора

Как видно из показанных на рисунках картин распределения напряжений:

- забоины, нанесённые для испытаний, действительно являются критическими (максимально напряжёнными) на всех трёх ступенях;

- распределение напряжений в забоинах на выходных кромках первой и девятой ступеней на крутильных формах соответствующих формам проведения усталостных испытаний соответствует преимущественному растяжению кромки;

- распределение напряжений в забоинах на пятой ступени на основном тоне колебаний, соответствующем форме проведения усталостных испытаний, соответствует преимущественному изгибу кромки;

- распределения уровней максимальных напряжений в забоинах качественно соответствуют распределениям напряжений по соответствующей кромке;

– концентрация напряжений в забоинах на выходной и входной кромках рабочих лопаток первой ступени и выходной кромке лопатки девятой ступени на крутильных формах значительно выше, чем на входной кромке лопатки девятой ступени на крутильной форме колебаний и входной и выходной кромках пятой ступени на основном тоне колебаний.

Результаты анализа совместно с результатами усталостных испытаний показали, что:

– полученные экспериментальные данные по выносливости лопаток с забоинами качественно соответствуют результатам расчёта на моделях и подтверждают существенно большее влияние забоин на выносливость лопаток при крутильных формах колебаний, чем при изгибных (за счёт более высокой концентрации напряжений);

– распространение результатов испытаний лопаток с забоинами на определённых формах колебаний на другие формы колебаний конкретной лопатки, а также на лопатки других ступеней в соответствии с ОСТ 1 00304 – 79 может быть некорректным без проведения 3D анализа для выявления особенностей НДС при колебаниях или потребует проведения весьма большого дополнительного объёма усталостных испытаний (для каждой отмеченной по результатам тензометрирования формы колебаний и практически для лопаток каждой ступени);

– при сходных формах колебаний распределения максимальных условных коэффициентов концентрации в забоинах на геометрически похожих лопатках достаточно близки и есть основание для распространения результатов для сходных форм колебаний на другие лопатки по ОСТ 1 00304 – 79, хотя подтверждение 3D анализом на наш взгляд в любом случае необходимо.

– использование принципа эталонной забоины в критической зоне (как это предполагалось до получения первых результатов) гарантирует безопасность, но необоснованно ограничивает размер допустимых забоин в других частях профиля лопатки

– при установлении достоверного (проведенные работы показывают такую возможность) эмпирического соотношения предела выносливости лопатки с забоиной и ус-

ловного уровня концентрации напряжений в забоине, принципиально возможно на базе результатов 3D анализа, ограниченного объёма усталостных испытаний и специальных резонансных испытаний на двигателе установить нормы допустимых забоин для различных зон каждой лопатки.

Для формирования зависимости предела выносливости лопатки с забоиной от уровня концентрации напряжений в качестве последнего может быть выбрано отношение амплитуды максимального условно-упругого напряжения в направлении вдоль кромки с забоиной (для низконапорных ступеней это практически радиальное напряжение) к амплитуде напряжения в зоне постановки контрольного датчика, по которому формально устанавливается предел выносливости. В качестве предполагаемого варианта зависимости выбрана степенная функция, используемая обычно в подобных случаях.

По имеющимся результатам усталостных испытаний и 3D анализа лопаток получена зависимость

$$\sigma_{заб} = \sigma_{зл} \left[ 1 - 0,16 \left( \frac{\sigma_{заб}^y}{\sigma_{контр}^y} - 1 \right)^{1,24} \right], \quad (1)$$

где  $\sigma_{заб}$ , - предел выносливости лопатки с забоиной по контрольному датчику;

$\sigma_{зл}$  - предел выносливости гладкой лопатки по контрольному датчику;

$\sigma_{заб}^y$  - максимальные упругие напряжения в направлении кромки в забоине;

$\sigma_{контр}^y$  - максимальные напряжения в направлении кромки по месту препарирования датчика (максимальных напряжений).

Эта зависимость может использоваться при  $\sigma_{заб}^y > \sigma_{контр}^y$ , и уровнях концентрации напряжений, не сильно превышающих проверенные.

При  $\sigma_{заб}^y \leq \sigma_{контр}^y$  естественно  $\sigma_{заб} = \sigma_{зл}$ . Эта зависимость в виде

$$\sigma_{заб} = \sigma_{зл} \left[ 1 - a \left( \frac{\sigma_{заб}^y}{\sigma_{контр}^y} - 1 \right)^B \right], \quad (2)$$

по всей видимости, достаточно универсальна, а значения коэффициента при степенном члене  $a$  и показателя степени  $B$  зависят от особенностей материала, технологии получения заготовки, технологии изготовления и упрочнения и определяются при усталост-

ных испытаниях. Не исключено также и использование стандартной полиномиальной аппроксимации.

Учитывая, что в выражении  $a$  и  $B$  однозначно определяются двумя испытаниями (учитывая эмпирический характер зависимости надо использовать испытания значительно отличающиеся по результату). Остальные результаты тестовые.

Достаточно хорошая аппроксимация получена также с использованием полинома второй степени:

$$\sigma_{заб} = -0,7194 \left( \frac{\sigma_{заб}^y}{\sigma_{контр}^y} \right)^2 - 5,2039 \frac{\sigma_{заб}^y}{\sigma_{контр}^y} + 48,287,$$

где постоянный член практически равен среднестатистическому пределу выносливости гладких лопаток первых ступеней.

В табл. 4 показаны результаты расчёта предела выносливости испытанных лопаток с забоинами по эмпирической степенной зависимости и результаты эксперимента.

Таблица 4 - Результаты тестирования

№ ступени	$\sigma_{гл}$	$\sigma_{заб}^y$	$\sigma_{контр}^y$	$\sigma_{заб}^{расч}$	$\sigma_{заб}^{ЭКСП}$	$\Delta$
1 вых. кр. глуб. забоины 0,8мм	48	117,8	27,3	14,1	14	0,7
1 вх. кр. глуб. забоины 0,6мм	48	105,2	27,4	19,8	18(<20)	0-10
5 глуб. забоины 0,6мм	42	26,22	9,9	29,5	30	1,7
9-вых. кр. 46мм глуб. забоины 0,8мм	44	118,2	27	12,2	12	1,7
9-вых. кр. 26мм глуб. забоины 0,6мм	44	84	30	29,4	26 (<30)	0-10
13 глуб. забоины 1 мм	32	22	24	32	32	-
Размерность	кГс/мм <sup>2</sup>					%

Результаты тестирования вполне удовлетворительные. Правда, при этом надо учесть, что зависимость получена по результатам расчёта и испытаний рабочих лопаток 1 и 5 ступеней, поэтому для них совпадение гарантировано. Тестовая рабочая лопатка 9 ступени по эталонной забоине дала результаты близкие к результатам по 1 ступени – на верхнем пределе устанавливаемой зависимости, а рабочая лопатка тринадцатой ступени из-за малой концентрации в забоине осталась критической по спинке и соответствует нижнему пределу устанавливаемой зависимости. Возникла необходимость провести дополнительное тестирование. Усталостные испытания были проведены с учётом расчётного анализа на 1 и 9 ступенях [8]. Место нанесения и глубина забоины на 1 ступени было выбрано в соответствии с расчётными кривыми распределения пределов выносливости по забоинам, полученным по эмпирической зависимости. Забоина глубиной 0,6мм была нанесена на входной кромке на расстоянии 165мм от подошвы замка (в месте максимальной концентрации).

Для 9 ступени забоина глубиной 0,6 мм была нанесена на входной кромке лопатки на расстоянии 26 мм от подошвы замка.

Результаты тестирования показали вполне удовлетворительный прогноз предела выносливости по полученному эмпирическому соотношению. Результаты прогноза находятся в пределах последней ступени снижения нагрузки при испытании методом ступенчатого увеличения нагрузки (Локатти).

Результаты анализа эксплуатации двигателей НК-12МП, а также других модификаций двигателя НК-12 на предмет усталостных разрушений рабочих лопаток компрессора показывает, что в лётной эксплуатации такие случаи редки. Как для лётных двигателей семейства НК-12, так и для двигателей наземного использования большинство случаев усталостных разрушений было связано с наличием дефектов лопаток, не выявленных при их изготовлении и установке, а с попаданием на вход посторонних предметов, разрушением статорных трактовых конструкций, коррозионно-эрозионным повреждением рабочих лопаток. Случаев выхода фрагментов разрушения за пределы корпусов при разрушении только

лопаточной части в эксплуатации и при стендовых испытаниях не было.

В процессе эксплуатации происходит эрозийная и коррозионная повреждаемость пера лопаток, особенно первых ступеней, что приводит к существенному снижению пределов выносливости лопаток. В зависимости от условий эксплуатации двигателей выносливость рабочих лопаток 1...4 ступеней после выработки гарантийного ресурса снижается в 1.85...3 раза. Вместе с тем, большинство случаев разрушения рабочих лопаток компрессора двигателей НК-12 происходит в начальный период эксплуатации – при наработках ~ 100...800 часов, т.е. обусловлены другими причинами. Это говорит о значительных фактических резервах прочности лопаток компрессора по многоциклового усталости.

Основным критерием при определении допустимости забоин на рабочих лопатках компрессора является обеспечение прочности лопаток с такими забоинами. Этому аспекту посвящены практически все работы и исследования, выполненные для определения норм допустимых забоин.

Однако при нормировании забоин, а также других повреждений лопаток необходимо учитывать ряд дополнительных факторов и соображений:

1. Актуальность разрешения повреждений по величине и месту расположения – из статистики повреждений лопаток двигателей НК-12 в эксплуатации подавляющее большинство повреждений незначительны по величине и располагаются в верхней части пера лопаток;

2. При определении допустимости забоин и других повреждений на рабочих лопатках компрессора дополнительно необходимо рассматривать их как фактор, показывающий возможность недопустимых повреждений других элементов конструкции, осмотр которых невозможен, а также как возможное следствие критических разрушений других элементов конструкции;

3. Обеспечение возможности выявления забоин имеющимися диагностическими средствами, исходя из их разрешающей способности.

4. Помимо забоин в практике эксплуатации имеют место другие повреждения пе-

ра лопаток компрессора – погнутости (выпучивания) кромок пера и отгибы уголков лопаток. Допустимые размеры этих повреждений назначаются, исходя из опыта эксплуатации, с учётом п.п. 1 и 2. Погнутости (выпучивания) допускаются только в тех зонах кромок пера, где допускаются забоины глубиной более 0,2 мм.

С учётом вышесказанного для внесения в эксплуатационную документацию предлагаются следующие нормы допустимых повреждений пера рабочих лопаток компрессора:

1. *По всей поверхности пера не допускаются трещины, а также растрескивания в местах расположения забоин, погнутостей или загибов пера лопаток;*

2. *По всей длине входной и выходной кромок пера лопаток всех ступеней допускаются забоины глубиной не более 0,2 мм;*

Значение допустимой глубины 0,2 мм по существу согласуется с требованиями п.п. 2.2. и 2.3. ОСТ 1 00304 – 79 (см. раздел 1.) [3]. Расчёт влияния забоин глубиной 0,2 мм на снижение выносливости лопаток и обоснование их допустимости в соответствии с принятыми критериями надёжности приведены в [9].

3. *Глубина, длина и местоположение на входной и выходной кромках пера допустимых забоин с глубиной более 0,2 мм приведены в таблице 5.1, схема расположения допустимых забоин на рис. 5.1.;*

Допустимая глубина и местоположение забоин определены исходя из обеспечения прочности лопаток с забоинами такой глубины и местоположения с параметрами, предписанными ОСТ 1 00304 – 79:  $\alpha = 60^\circ$ ,  $r = 0,2$  мм, и с учётом п.1. дополнительных факторов. Допустимая длина определена с учётом п.2. дополнительных факторов.

4. *На лопатках каждой ступени допускается не более 5 забоин с глубиной более 2 мм. Относится к лопаткам тех ступеней, для которых такие забоины допускаются;*

Данное требование определено исходя из п.2. дополнительных факторов.

5. *Погнутости (выпучивания) на входной и выходной кромках пера лопатки допускаются с параметрами, не превышающими приведенных на рис. 5.2 и с располо-*



жением центра погнутости в пределах зоны А по рис. 5.1. и таблице 5.1.;

Обоснование см. п. 4. дополнительных факторов.

б. Отгибы уголков лопаток допускаются с параметрами, не превышающими приведённых на рис. 5.3.

Обоснование см. п. 4. дополнительных факторов.

По результатам осмотра лопаток двигателя допускается к дальнейшей эксплуатации только при выполнении вышеприведенных требований. При этом дополнительные осмотры рабочих лопаток, кроме предусмотренных регламентом технического обслуживания, не обязательны.

В отдельных случаях двигатель может быть допущен к дальнейшей эксплуатации только Разработчиком (СКБМ) по результатам исследований причин появления или специальных расчётов недопустимых отклонений.

#### **Библиографический список**

1. «Акт оценки технического состояния авиационных двигателей НК-12МП в эксплуатирующей организации в/ч 90724 Авиации ТОФ». - 12. 2006. – 2с.

2. «Акт оценки технического состояния авиационных двигателей НК-12МП в эксплуатирующихся частях 37 ВА ВГК (СН)». - 12. 2006. – 5 с.

3. Отраслевой стандарт ОСТ 1 00304 – 79 «Лопатки газотурбинных двигателей. Нормирование повреждения лопаток компрессоров от попадания посторонних предметов».

4. Положение «Об установлении и увеличении ресурсов и сроков службы газотурбинных двигателей военной авиации, их агрегатов и комплектующих изделий». - ЦИАМ, 2005. – 80 с.

5. Методика усталостных испытаний № ТИ 101-322.

6. Техническая справка № 101-08-06 «По результатам сравнительных усталостных испытаний рабочих лопаток 1, 5, 9 ступеней ротора компрессора изделия МП с забоинами и без забоин». - КНИЛ СКБМ, 08. 2006. – 25с.

7. Техническая справка № ТС 43-К-2007МП «Обоснование выбора схемы нанесения забоин на рабочих лопатках компрессора двигателя НК-12МП при специальных резонансно-циклических испытаниях для установления норм допустимых забоин». - СКБМ, 04. 2007. – 40 с.

8. Техническая справка № 101-11-06 «По результатам усталостных испытаний рабочих лопаток 1 и 9 ступеней ротора компрессора изделия НК-12МП с надрезами по дополнению № 2 к программе ОП-59-2006НК-12МП». - КНИЛ СКБМ. 11. 2006. – 10 с.

9. Техническая справка №ТС-101-К-2007НК-12СТ «Анализ влияния допустимых по всем кромкам лопатки забоин конфигурации по ОСТ 1 00304-79 глубиной 0,2мм на сопротивление усталости рабочей лопатки 9 ступени компрессора». - СКБМ. 11. 2007. – 75 с.

#### **References**

1. The definition statement of technical state of aircraft engine NK-12MP into exploiting organization militant 90724 Aviation TOF. 12.2006. – 2p.

2. The definition statement of technical state of aircraft engine NK-12MP into exploiting militants 37 VA VGK(SN). - 12. 2006. – 5 p.

3. Branch standard OST 1 00304 – 79 «The gas turbine engines blades. Normalization damage of compressor blades from ingress foreign objects».

4. The provision «About establishment and increase of lives time and durability of gas turbine engine militant aviation there units and component parts». - CIAM, 2005. – 80p.

5. The methodology of fatigue test № ТИ 101-322.

6. The technological certificate № 101-08-06 «About results of relative fatigue tests of compressor rotor blades 1, 5, 9 stages for product MP with nicks and without nicks». - KNIL SCBM, 08. 2006. – 25p.

7. The technological certificate № ТС 43-К-2007MP «Validation choice of putting nicks plan on the compressor rotor blades for engine NK-12MP, with special resonance- cyclic tests for ascertainment rate of acceptable nicks». - SCBM, 04. 2007. – 40 p.

8. The technological certificate № 101-11-06 «About results of fatigue tests of compressor rotor blades 1 and 9 stages for product NK-



12MP with notch by addition №2 to program OP-59-2006NK12-MP». - KNIL SCBM. 11. 2006. – 10 p.

9. The technological certificate № TC 101-K-2007NK-12ST «The analysis influence of

admissible along all blade tip nocks by OST 1 00304-79 with depth 0,2 mm at fatigue resistance for compressor rotor blade 9 stage». – SCBM. 11. 2007. – 75 p.

## RESEARCH AND RATIONING ADMISSIBLE NICK ON WORKING BLADES OF THE COMPRESSOR FOR ENGINE NK-12 EXAMPLE

© 2009 A. V. Gritsin<sup>1</sup>, E. P. Kocherov<sup>2</sup>, A. P. Rempel<sup>1</sup>, V. A. Samoylov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University

<sup>2</sup>Samara Machine-Building Design Bureau

Results of this work are the analysis of geometry, experimental and design data for working blades of the compressor of engine NK-12, comparative fatigue tests. The methodology of design-experimental works on forecasting and check of reliability of blades with damages is offered specified concerning requirements of OST.

*Reliability, defects, working shovels, durability, endurance limit, method of final elements*

### Информация об авторах

**Грицин Алексей Валерьевич**, аспирант Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. (917) 140-35-40. E-mail: [grialeksey@zeos.net](mailto:grialeksey@zeos.net). Область научных интересов: надежность авиационных двигателей.

**Кочеров Евгений Павлович**, кандидат технических наук, Главный конструктор Самарского конструкторского бюро машиностроения. E-mail: [osnova@scbm.e4u.ru](mailto:osnova@scbm.e4u.ru). Область научных интересов: прочность элементов конструкции авиационных двигателей.

**Ремпель Александр Петрович**, аспирант Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. (927) 204-26-15. E-mail: [alrel@mail.ru](mailto:alrel@mail.ru). Область научных интересов: конструкция авиационных двигателей.

**Самойлов Виталий Андреевич**, аспирант Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. (960) 815-92-25. E-mail: [v.a.samoylov@list.ru](mailto:v.a.samoylov@list.ru). Область научных интересов: прочность элементов конструкции авиационных двигателей.

**Gritsin Alexey Valerievich**, postgraduate student of Samara State Aerospace University. Phone: (917) 140-35-40. E-mail: [grialeksey@zeos.net](mailto:grialeksey@zeos.net). Area of Research: Reliability of aircraft engine.

**Kocherov Evgeniy Pavlovich**, candidate of technical science, Design manager of Samara Machine-Building Design Bureau. E-mail: [osnova@scbm.e4u.ru](mailto:osnova@scbm.e4u.ru). Area of research: Strength of elements of aircraft engine.

**Rempel Alexandr Petrovich**, postgraduate student of Samara State Aerospace University. Phone: (927) 204-26-15. E-mail: [alrel@mail.ru](mailto:alrel@mail.ru). Area of research: Design of aircraft engine.

**Samoylov Vitaliy Andreevich**, postgraduate student of Samara State Aerospace University. Phone: (960) 815-92-25. E-mail: [v.a.samoylov@list.ru](mailto:v.a.samoylov@list.ru). Area of research: Strength of elements of aircraft engine.