



УДК 621.45.037, 629.7.017.1
ГРНТИ 78.25.13

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И КОЭФФИЦИЕНТ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ПОВРЕЖДЁННЫХ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ГОСУДАРСТВЕННОЙ АВИАЦИИ

*С.Ю. СТРУКОВ, кандидат технических наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
О.Н. КАРПЕНКО, кандидат технических наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

В данной статье описан подход к моделированию эксплуатационных поврежденных детали. Приведены результаты анализа методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния и коэффициента интенсивности напряжения в окрестности повреждения различной геометрической формы.

Ключевые слова: коэффициент интенсивности напряжения; метод конечных элементов; газотурбинный двигатель; рабочие лопатки.

THE STRESS-STRAIN STATE AND THE COEFFICIENT THE STRESS INTENSITY OF THE DAMAGED BLADES COMPRESSORS OF GAS TURBINE ENGINES OF AIRCRAFTS OF THE STATE AIRCRAFT

*S.U. STRUKOV, Candidate of Technical Sciences
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)
O.N. KARPENKO, Candidate of Technical Sciences
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

This article describes an approach to modelling operational damaged details. The results of analysis by finite element method stress-strain state and stress intensity factor in the vicinity of the damage of various geometric shapes.

Keywords: stress intensity factor; finite element method; gas turbine engine; rotor blades.

Повреждения рабочих лопаток компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) в виде забоин, вырывов материала деталей и т.п. являются типичными повреждениями от попадания посторонних частиц. Повреждения происходят в условиях руления, при движении по взлётно-посадочной полосе, при взлете и приземлении летательного аппарата, при включении реверса тяги и на стоянке при работающих двигателях. Поэтому проблема повреждения рабочих лопаток компрессора ГТД посторонними предметами при их попадании в газоздушный тракт и, соответственно, снижения числа досрочного съема с эксплуатации поврежденных двигателей является актуальной в течение всего периода существования летательных аппаратов с ГТД.

Из-за повреждений рабочих лопаток компрессора ГТД посторонними предметами с эксплуатации снимается в среднем до 30...40% двигателей от общего числа досрочно снимаемых. Одним из путей снижения материальных затрат из-за разрушения повреж-



денных рабочих лопаток компрессора является предотвращение их разрушения в процессе эксплуатации, которое возможно при наличии знаний поведения материала поврежденной лопатки.

Поведение повреждаемого материала лопаток при ударном воздействии на него твердых посторонних предметов (частиц) обычно описывается с привлечением понятий упругих явлений при больших скоростях деформации и неупругих явлений, таких как пластические течения и рост трещин. В настоящее время еще нет полного понимания этих явлений, поэтому отсутствуют математические модели, которые бы позволили точно описать поведение повреждаемого материала. Разработанные модели механики повреждения материала описывают частные случаи поведения материала при определенных граничных условиях и не полностью отражают реальные процессы повреждения лопаток компрессора ГТД посторонним предметом, что не позволяет выработать решения по предотвращению разрушения поврежденных рабочих лопаток.

Одним из подходов к решению задачи по предотвращению разрушения поврежденных лопаток является подход на основе знаний закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) и коэффициентов интенсивности напряжения поврежденных лопаток.

Эти параметры определяют в дальнейшем ресурс поврежденной лопатки, в частности коэффициент интенсивности напряжения вблизи вершины (фронта) трещины - циклическую долговечность.

Исследование изменения коэффициента интенсивности напряжения поврежденных лопаток компрессора ГТД проводится в соответствии с методикой, предусматривающей:

1. Подготовку геометрической модели лопатки;
2. Задание механических свойств материала лопатки;
3. Построение конечно-элементной модели (сетки);
4. Задание существующих граничных условий;
5. Задание действующих нагрузок;
6. Выполнение расчёта НДС;
7. Исследование КИН.

В качестве упрощенной модели лопатки (рисунок 1) принята модель консольной пластины (рисунок 2) с размерами, подобными размерам рабочей лопатки компрессора высокого давления ГТД 4-го поколения ($a = 50$ мм, $b = 25$ мм, $t = 1$ мм), закреплённой по нижнему торцу и нагруженной растягивающей распределённой нагрузкой по верхнему торцу.

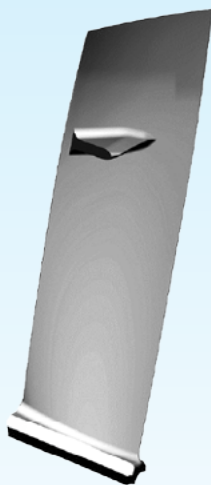


Рисунок 1 – Лопатка КНД 1-й ступени

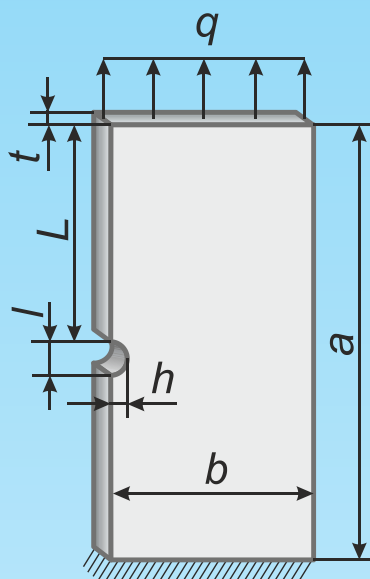


Рисунок 2 – Расчетная модель – консольная пластина с повреждением

Расположение повреждения (трещины) на кромке пластины и форма (геометрия) повреждения в виде забоин выбраны с учетом данных статистики повреждения рабочих лопаток компрессора авиационных ГТД в процессе их эксплуатации.

Типичным повреждением рабочих лопаток компрессора авиационных ГТД является повреждение кромки рабочей лопатки в виде полукруглой забоины. Поэтому повреждение пластины принято в виде полукруглой забоины.

Общий анализ напряженно-деформированного состояния расчетной модели показал (рисунок 3), что наибольшие напряжения возникают в месте максимальной глубины повреждения данного вида.

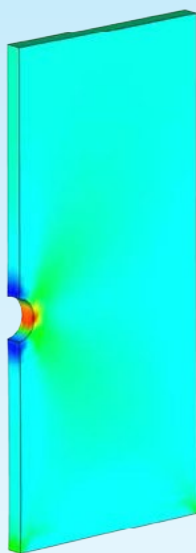


Рисунок 3 – Напряженно-деформированное состояние расчетной модели

Для выявления закономерности изменения напряженно-деформированного состояния и коэффициента интенсивности напряжения, в зависимости от повреждения исследовались модели поврежденных консольных пластин с различной геометрической формой начального повреждения.

С позиций линейной механики разрушения забоины и усталостные трещины лопаток в начальной стадии их развития можно рассматривать как начальные поврежде-



ния, определяющие дальнейший процесс развития повреждения. Они, как и металлургические и технологические дефекты, могут оказывать влияние на свойство материала сопротивляться развитию процесса повреждения, т.е. влиять на характеристики трещиностойкости (K_C , K_{IC}). Поэтому оценку поврежденных лопаток целесообразно проводить с использованием значений K_{IC} .

Одним из основных параметров, определяющих процесс развития повреждения (трещины) при циклических нагрузках, является размах коэффициента интенсивности напряжений ΔK :

$$\Delta K = f(g, Q_1, Q_2, Q_3), \quad (1)$$

где g – геометрические параметры повреждения лопатки, Q_1, Q_2, Q_3 – нагрузки, вызывающие растяжение, изгиб и кручение лопатки соответственно.

Расчет значений коэффициента интенсивности напряжения в вершине макроскопической трещины, зародившейся на поверхности начального повреждения детали, проводится с использованием системы инженерного анализа (CAE – Computer Aided Engineering) твердотельных 3D моделей деталей (рисунок 4), доработанных для решения рассматриваемой задачи.

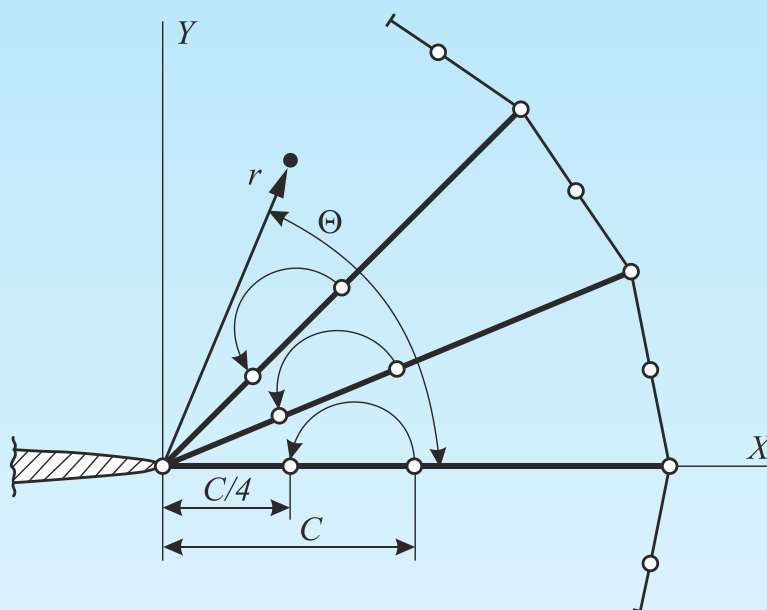


Рисунок 4 – Вырожденные треугольные сингулярные КЭ

Для расчета численных значений коэффициента интенсивности напряжения построена конечно-элементная модель поврежденной пластины. В конечно-элементной модели математически тонкая трещина расположена в наиболее вероятном месте ее появления. Очевидно, что такое место находится в области наибольшей интенсивности напряжений.

Моделирование трещины произведено следующим приемом [1]. Берега трещины описаны квадратичными конечными элементами (КЭ), вокруг вершины трещины создан слой вырожденных треугольных сингулярных КЭ с узлами, сдвинутыми на $1/4$ в сторону вершины, моделирующими сингулярную (корневую) пропорциональную $1/\sqrt{r}$ особенность напряжений в непосредственной близости от вершины острой трещины, где r – расстояние от вершины трещины.

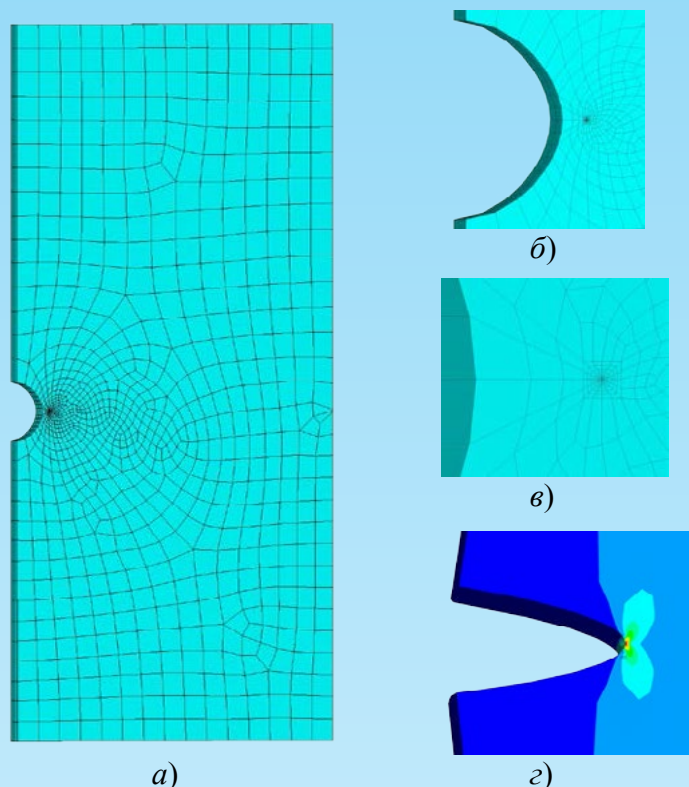


Рисунок 5 – КЭ модель пластины с полукруглым повреждением и трещиной (а):
 б) – регулярная КЭ сетка вблизи берегов трещины;
 в) – свободная КЭ сетка в окрестности фронта трещины;
 г) – распределение интенсивности напряжений вблизи вершин трещины при полукруглом повреждении

В итоге получена КЭ модель (рисунок 5 а) повреждённой пластины с трещиной в месте повреждения. Основной объём пластины, ввиду её возможной сложной формы, смоделирован свободной КЭ сеткой. Объём вблизи берегов трещины смоделирован регулярной КЭ сеткой (рисунок 5 б), в окрестности фронта трещины - свободной сеткой, состоящей из вырожденных сингулярных КЭ (рисунок 5 в).

Используя вышеуказанный подход для анализа коэффициента интенсивности напряжения, так же были смоделированы и не типовые, маловероятные, идеальной геометрической формы, начальные повреждения кромки лопаток ГТД. Такие, как трещина без начального повреждения кромки, V-образное повреждение с трещиной в вершине угла в 60 градусов (соответствует рекомендуемому ОСТ [2] искусственному способу нанесения забоин фрезой), прямоугольное повреждение с трещиной в средней части и с трещиной, развивающейся из угла (ближайшего к заделке). Глубины начального повреждения h выбраны 1, 2 и 3 мм от кромки (что составляет от 8-й до 25-й части ширины b пластины) с длинами трещины при них в 0,1 и 0,5 мм (от 30-ой части до половины глубины начального повреждения). Расположение начального повреждения относительно свободного торца консоли $L = a/2$.

На рисунках 6-9 представлены трехмерные сеточные КЭ модели начальных повреждений различных типов с трещиной и распределения интенсивности напряжений (по Мизесу) вблизи вершин трещины.

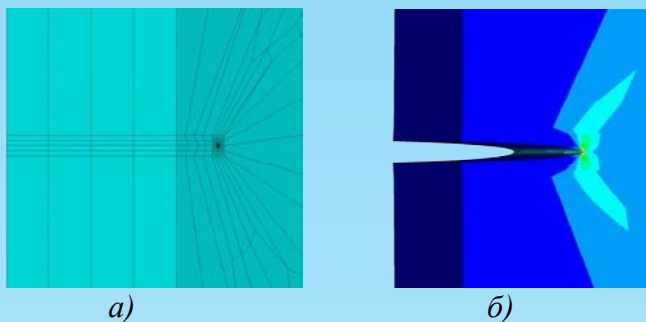


Рисунок 6 – КЭ модель пластины с трещиной, без начального повреждения а) и распределение интенсивности напряжений вблизи вершин такой трещины б)

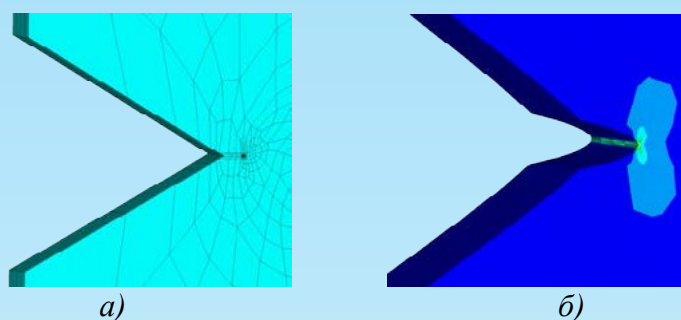


Рисунок 7 – КЭ модель пластины с V-образным повреждением с трещиной в вершине угла а), распределение интенсивности напряжений вблизи вершин трещины при V-образном повреждении б)

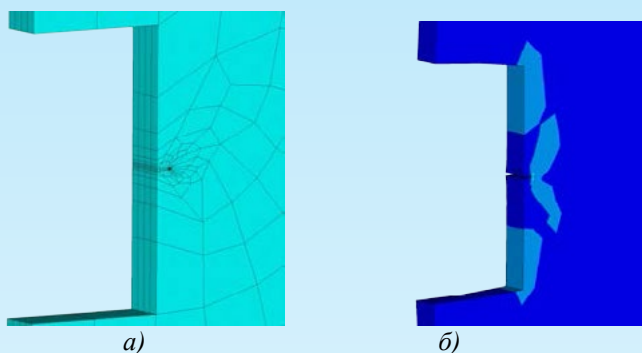


Рисунок 8 – КЭ модель пластины с прямоугольным повреждением с трещиной в средней части а), распределение интенсивности напряжений вблизи вершин трещины в средней части прямоугольного повреждения б)

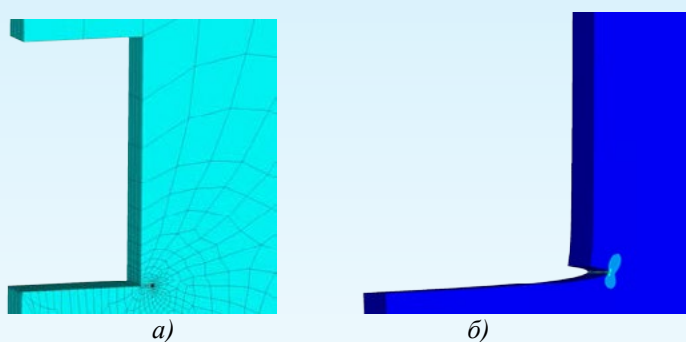


Рисунок 9 – КЭ модель пластины с прямоугольным повреждением с трещиной, развивающейся из угла а), распределение интенсивности напряжений вблизи вершин трещины, развивающейся из угла прямоугольного повреждения б)



Из анализа результатов расчёта значений коэффициента интенсивности напряжения при различных комбинациях глубины начального повреждения и длины трещины при нём, представленных на графиках (рисунок 10), интерполирующих результаты расчётов, следует:

- наибольшее значение коэффициента интенсивности напряжения, а также интенсивность их увеличения при росте глубины начального повреждения имеют повреждения V-образного типа. Величина коэффициента интенсивности напряжения незначительно (по сравнению с другими типами повреждений) зависит от длины трещины, расположенной в вершине угла и равномерно увеличивается с ростом глубины начального повреждения;

- для полукруглого начального повреждения наблюдается несколько иная зависимость – при данном типе начального повреждения увеличение длины трещины даёт большее увеличение коэффициента интенсивности напряжения (на графике отсутствует эквидистантное, от глубины трещины, увеличение коэффициента интенсивности напряжения с ростом глубины начального повреждения);

- коэффициент интенсивности напряжения в вершине трещины, развивающейся из угла прямоугольного повреждения при малой длине трещины, численно близок к коэффициенту интенсивности напряжения у вершины аналогичной длины трещины при полукруглом начальном повреждении. С увеличением длины трещины и глубины начального повреждения значение коэффициента интенсивности напряжения для рассматриваемого типа повреждения растёт более интенсивно, чем у полукруглого повреждения. Однако при значительных глубинах начального повреждения и длинах трещины величина коэффициента интенсивности напряжения при таком типе начального повреждения меньше, чем у рассмотренного ранее полукруглого типа;

- несмотря на то, что получение идеальной формы прямоугольного эксплуатационного повреждения маловероятно, развитие трещины из угла прямоугольного типа повреждения более вероятно, чем развитие трещины в середине плоского дна этого же типа повреждения. Об этом свидетельствует распределение интенсивности напряжений, показывающее, что зоны наибольшей интенсивности напряжений расположены у углов повреждения. Вместе с тем, представляют интерес численные значения коэффициента интенсивности напряжения, которые при малой длине трещины в середине дна повреждения прямоугольной формы значительно меньше коэффициента интенсивности напряжения при трещинах из угла прямоугольного типа повреждения. Они практически равны при значительных длинах трещины и малой глубине начального повреждения. С увеличением длины трещины из середины дна прямоугольного повреждения, коэффициент интенсивности напряжения растёт менее интенсивно, чем коэффициент интенсивности напряжения у трещины из угла прямоугольного повреждения;

- согласно расчётам, наименьшее значение коэффициента интенсивности напряжения имеют трещины, зародившиеся без начального повреждения детали.

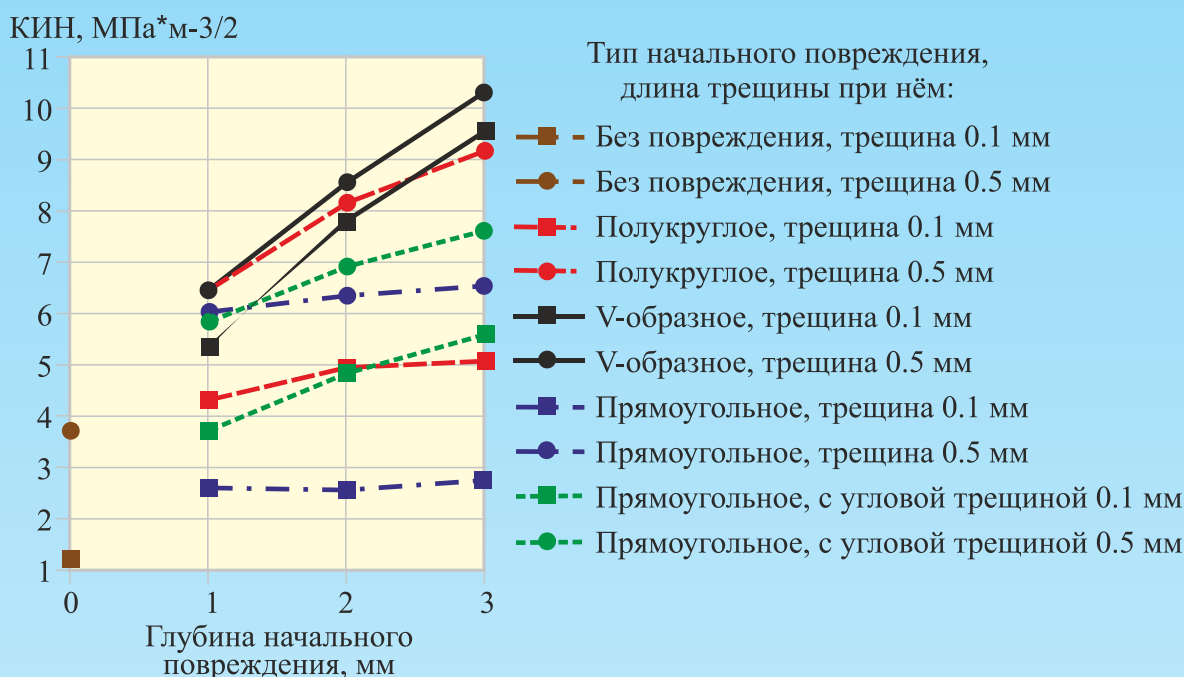


Рисунок 10 – Зависимость коэффициента интенсивности напряжения от глубины начального повреждения различного типа с трещиной

Рассмотрим более подробно характер изменения коэффициента интенсивности напряжения в вершине трещины по мере роста её длины от 0,1 мм до 10 мм, для наиболее вероятного начального повреждения полукруглого типа и стандартизированного повреждения V-образного типа, с глубиной в 1, 2 и 3 мм. Это соответствует суммарному повреждению пластины от 23-й части до половины её ширины b .

В результате проведения 600-т численных экспериментов получены зависимости значений коэффициента интенсивности напряжения, позволяющие сделать вывод о следующих особенностях изменения коэффициента интенсивности напряжения в вершине трещины при рассматриваемых типах начальных повреждений:

- повреждение V-образного типа характеризуется высокой величиной коэффициента интенсивности напряжения у вершины трещины минимальной длины. Дальнейший рост длины трещины приводит к пропорциональному увеличению коэффициента интенсивности напряжения в её вершине;

- увеличение расхождения результатов расчёта коэффициента интенсивности напряжения у трещин большой длины связано с высоким уровнем деформации расчётных моделей;

- повреждение полукруглого типа с трещиной минимальной длины характеризуется пониженным значением коэффициента интенсивности напряжения в вершине трещины. Это хорошо согласуется с действующим подходом к снятию концентрации напряжения путём выведения концентратора зачисткой, засверливанием, и говорит об адекватности принятой методики моделирования повреждения, анализа и расчёта коэффициента интенсивности напряжения. Далее, с ростом длины трещины при полукруглом повреждении, коэффициент интенсивности напряжения интенсивно растёт и при некоторой длине трещины становится практически равным значению коэффициента интенсивности напряжения в вершине трещины при V-образном типе повреждения. Можно предположить, что при достижении некоторой длины трещины относительно глубины начального повреждения, тип начального повреждения (его форма, размеры) перестаёт влиять на величину коэффициента интенсивности напряжения в вершине развивающейся трещины.



Для определения указанной относительной длины трещины проанализируем имеющиеся зависимости (рисунок 11). Для начального повреждения в 1 мм разница между значениями коэффициента интенсивности напряжения для V-образного и полукруглого повреждений перестаёт изменяться при длине трещины $\approx 0,7$ мм, для начального повреждения в 2 мм – при ≈ 1 мм, для 3 мм – при $\approx 1,7$ мм. Таким образом, характер повреждения перестаёт играть существенную роль при относительной длине трещины, равной 0,6 от глубины начального повреждения.

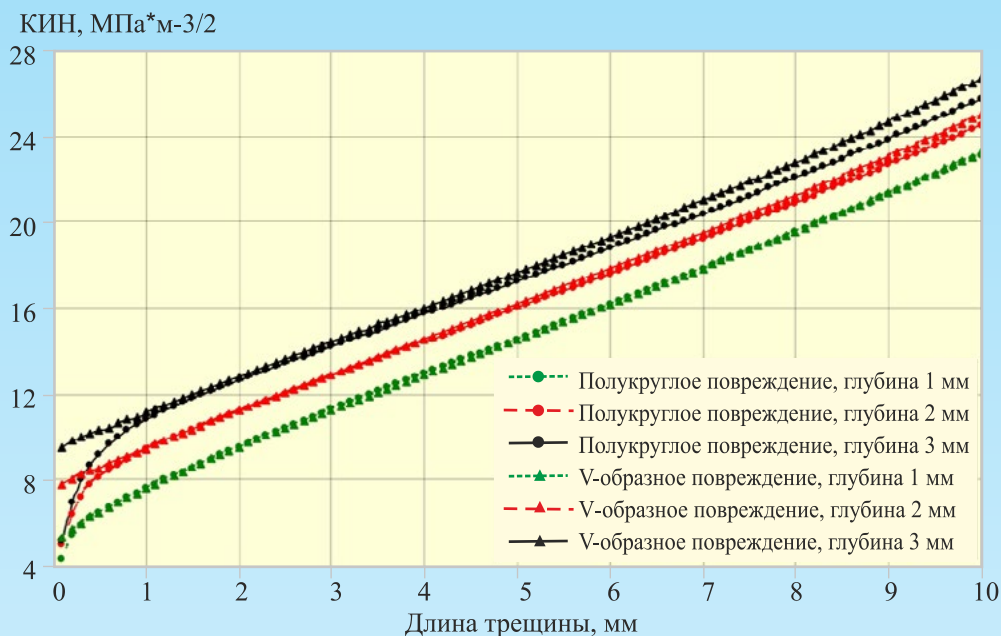


Рисунок 11 – Зависимость коэффициента интенсивности напряжения от глубины начального повреждения (полукруглого и V-образного типов) и длины трещины

Рассчитанные значения коэффициента интенсивности напряжения не только характеризуют сгущение силовых линий в связи с уменьшившейся площадью сечения в плоскости возникновения трещин, т.е. прочностные свойства повреждённой детали по критерию Ирвина, но и являются необходимым параметром для дальнейшего расчёта на циклическую долговечность детали.

Известно, что на этапе разработки рабочей документации опытного образца, в соответствии с отраслевыми стандартами [2] и руководствами для конструкторов, предусматривается формирование норм допустимых повреждений лопаток. Это требует проведения значительного объёма дорогостоящих экспериментальных работ. Ещё больший объём работ требуется для разработки норм, дифференцируемых по месту полученного повреждения.

Использование приведенного выше подхода к анализу коэффициента интенсивности напряжения позволяет свести к минимуму объём натурных специальных испытаний, а в некоторых случаях исключить проведение таких работ благодаря замене экспериментальных работ «численным экспериментом». В конечном итоге, уменьшение объёма экспериментальных работ приводит к снижению себестоимости и времени разработки изделия.

В отличие от аналитических методов расчёта коэффициента интенсивности напряжения, имеющих определенную область применения [3], система САЕ твердотельных 3D моделей деталей более приспособлена для расчета коэффициента интенсивности напряжения вблизи вершины (фронта) макроскопических трещин с начальной длиной 0,1...0,5 мм.



Таким образом, применение твердотельных 3D моделей повреждённых лопаток ГТД с использованием CAE комплексов для расчета коэффициента интенсивности напряжения вблизи вершины (фронта) макроскопических трещин с начальной длиной 0,1...0,5 мм позволяет проводить оценку ресурса повреждённых лопаток и разрабатывать мероприятия по предотвращению их разрушения.

Использование приведенного выше подхода к анализу расчёта коэффициента интенсивности напряжения позволяет значительно уменьшить объём дорогостоящих экспериментальных работ, а в некоторых случаях исключить проведение таких работ благодаря замене экспериментальных работ «численным экспериментом».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов Е.М., Муйземнек А.Ю., Шадский А.С. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения. М.: ЛЕНАНД, 2008. 456 с.
2. ОСТ 1 00304-79 Лопатки газотурбинных двигателей. Нормирование повреждённых лопаток компрессора от попадания посторонних предметов. Введ. 1979–07–01. М.: Изд-во стандартов, 1979. 15 с.
3. ГОСТ 25.506-85 Расчёты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. Введ. 1986–01–01. М.: Изд-во стандартов, 1985. 38 с.

BIBLIOGRAPHY

1. Morozov E.M., Muizemnek A.Yu., Shadskiy A.S. ANSYS in the hands of the engineer: fracture Mechanics. M.: LENAND, 2008. 456.
2. OST 1 00304-79 Blades of gas turbine engines. Normalization of the power-ideni compressor blades from foreign objects. Introd. 1979–07–01. M.: Publishing House of Standards, 1979. 15 p.
3. GOST 25.506-85 design and testing for durability. Methods of mechanical testing of metals. The determination of crack resistance characteristics (fracture toughness) under static loading. Introd. 1986–01–01. M.: Publishing House of Standards, 1985. 38 p.

© Струков С.Ю., Карпенко О.Н., 2017

Струков Сергей Юрьевич, кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского управления научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков д. 54А, vaiu@mil.ru

Карпенко Олег Николаевич, кандидат технических наук, заместитель начальника научно-исследовательского отдела научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков д. 54А, vaiu@mil.ru