

С. Д. Потапов, Д. Д. Перепелица

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММЫ DARWIN ДЛЯ ОЦЕНКИ СКОРОСТИ РОСТА ТРЕЩИН В ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЯХ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Проведено сопоставление результатов расчета скорости роста трещин в элементах авиационных конструкций, полученных с использованием программы DARWIN и разработанной в ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова» методики, основанной на применении программы MSC.Marc. *Механика разрушения; трещина; DARWIN; коэффициент интенсивности напряжений*

ВВЕДЕНИЕ

Программа DARWIN [4], наряду с ZENCRACK, FRANC3D, AFGROW и др., в практике двигателестроения используется для определения ресурсных показателей основных деталей (ОД) на основе механики разрушения. Программа DARWIN принята Федеральной Авиационной Администрацией США (FAA) в качестве базового программного продукта при расчетном определении ресурсных показателей на основе методов механики разрушения. Результатом работы программы является зависимость вероятности разрушения детали от числа полетных циклов. Вероятность разрушения ОД, получаемая при использовании DARWIN, зависит от вероятности наличия в детали дефектов определенного размера, вероятности попадания дефекта в зону с напряжениями, превышающими порог страгивания для дефекта данного размера, вероятности выявления дефекта при осмотрах в процессе эксплуатации и других факторов.

Обзор зарубежных публикаций, посвященных верификации результатов расчетов, полученных программой DARWIN, показывает [2], что DARWIN дает весьма консервативную оценку долговечности (в полетных циклах), по сравнению с перечисленными программными продуктами.

Консервативность оценки ресурсных показателей, с одной стороны, обеспечивает большую гарантию прочностной надежности ОД в процессе ее эксплуатации, с другой стороны – приводит к сокращению промежутков времени между осмотрами (ремонтами), что делает эксплуатацию экономически менее эффективной.

В отечественной практике определения ресурсных показателей ОД программа DARWIN

используется весьма непродолжительное время, в связи с чем опыт ее применения ограничен и надежность получаемых с ее помощью прогнозов должна быть подтверждена опытом эксплуатации.

Для того чтобы лучше понять причины и степень консервативности оценок, получаемых при использовании программы DARWIN, в ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова» проведен ряд работ по сопоставлению результатов определения долговечности, полученных на основе других программных продуктов и методик, а также данных фрактографических исследований [1]. Следует отметить, что поскольку результаты вероятностных расчетов поддаются проверке и сопоставлению значительно сложнее, чем результаты детерминированных расчетов, сравнение проводилось на базе детерминированных вычислений скорости роста трещины.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ РОСТА ТРЕЩИНЫ (СРТУ) В КОЛЬЦЕ, НАХОДЯЩЕМСЯ В ПОЛЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ

Геометрия кольца, схема нагружения, геометрия фронтов трещины (рис. 1), механические свойства материала и свойства трещиностойкости взяты из [3].

На рис. 2 представлено сравнение зависимостей коэффициентов интенсивности напряжения (КИН) от количества циклов нагружения ($0-n_{\max}-0$), полученных в программах DARWIN и MSC.Marc, для точки фронта трещины, расположенной на внутренней поверхности кольца.

Как видно из рис. 2, расчеты с использованием программ DARWIN и MSC.Marc дают практически совпадающие результаты.

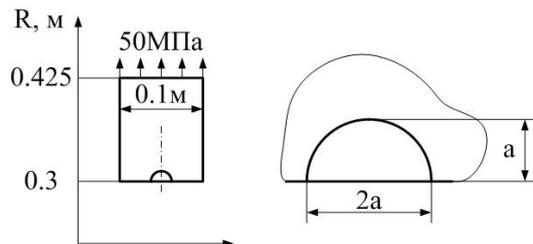


Рис. 1. Геометрия, схема нагружения кольца и фронт трещины

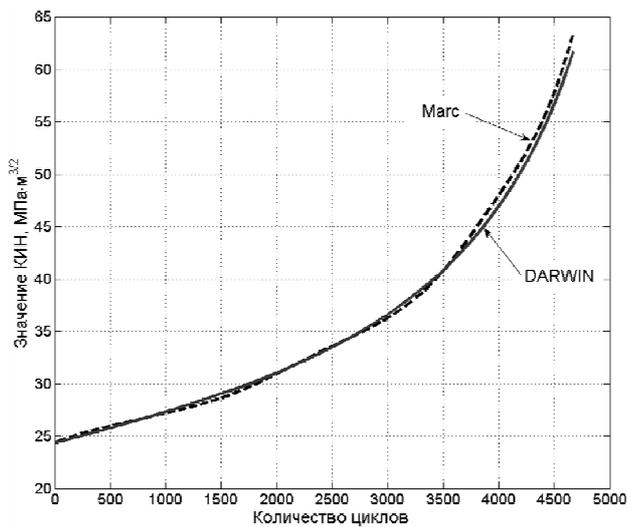


Рис. 2. Зависимость КИН от количества циклов нагружения

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ РОСТА ТРЕЩИНЫ В МОДЕЛЬНОМ ДИСКЕ В ПОЛЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ

Модельный диск (рис.3) циклически нагружался $0-n_{\max}-0$. Диск выполнен из титанового сплава BT9. Трещина развивалась в одном из эксцентричных отверстий от угловой формы до сквозной в радиальном направлении. Геометрия фронтов развития трещины (полученная при расчете CPTУ в программе DARWIN) от ее начального размера $0,5 \times 0,5$ мм для угловой формы до длины 3,94 мм при сквозной форме (рис. 4) использовалась для сравнения результатов расчетов CPTУ, полученных в программах DARWIN и MSC.Marc.

Графики результатов расчета CPTУ от начальной трещины, указанной на рис. 3, с использованием программ DARWIN и MSC.Marc представлены на рис. 4. На рис. 4 показано изменение формы фронта по мере развития трещины и переход от угловой трещины к сквозной. Результаты расчета CPTУ, полученные с использованием программы DARWIN, являются более консервативными, чем результаты, полученные на основе тех же фронтов трещины с помощью программы MSC.Marc, что совпадает с данными других исследований [2].

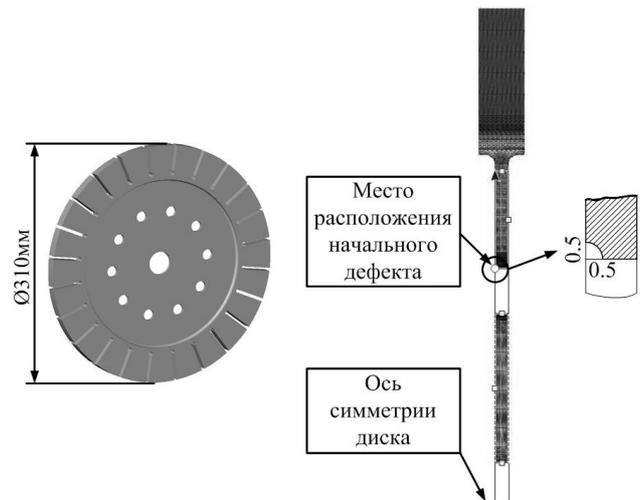


Рис. 3. Геометрия модельного диска и место расположения начальной трещины

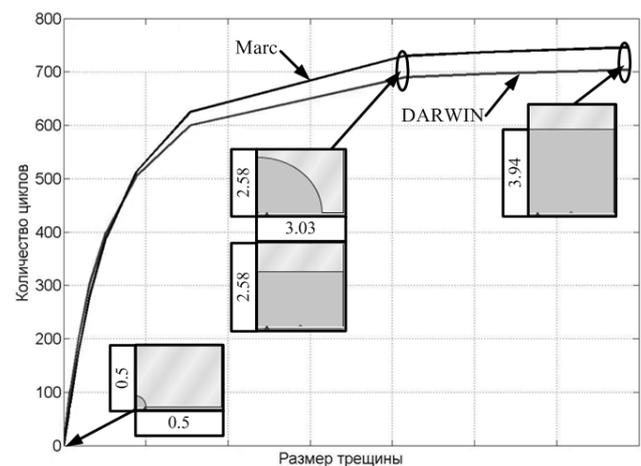


Рис. 4. CPTУ в модельном диске, рассчитанная с использованием программ DARWIN и MSC.Marc

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ РОСТА ТРЕЩИНЫ В ДИСКЕ КВД АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Результаты фрактографического исследования диска с трещиной (титановый сплав) приведены в [1]. Геометрия фронтов развития трещины (рис. 5), определенная на основе фрактографии диска, использовалась в расчетах CPTУ, проведенных в MSC.Marc. Графики зависимости глубины трещины (направление АВ, см. рис. 5) от количества циклов нагружения, построенные по данным фрактографии и результатам расчетов, представлены на рис. 6. Как видно из рис. 6, расчет CPTУ с использованием программы MSC.Marc хорошо согласуется с экспериментальными данными.

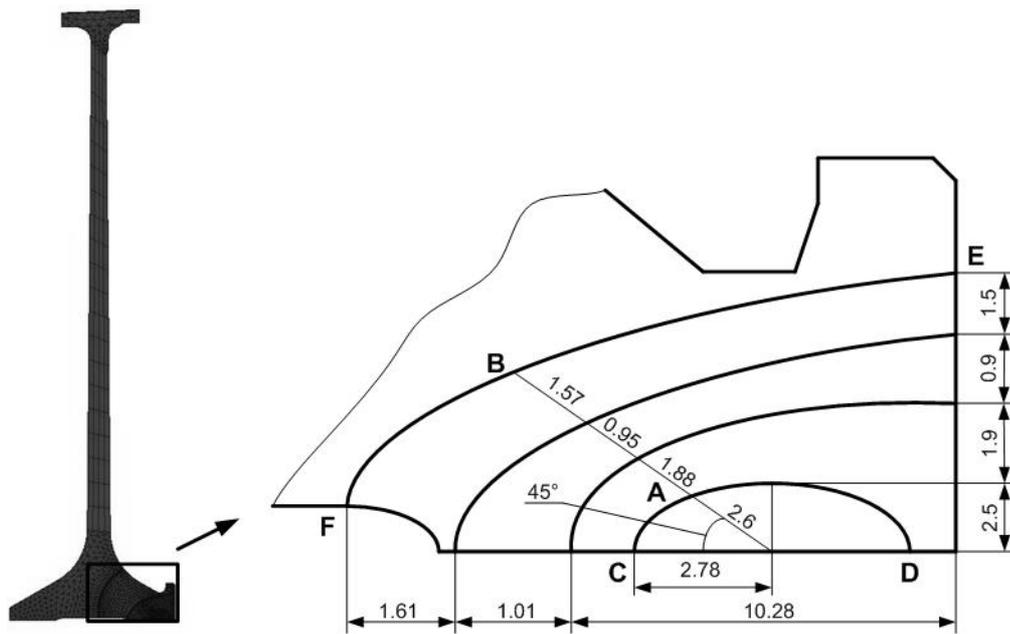


Рис. 5. Расположение и геометрия фронта трещины в сечении диска, полученная из фрактографических исследований [1]

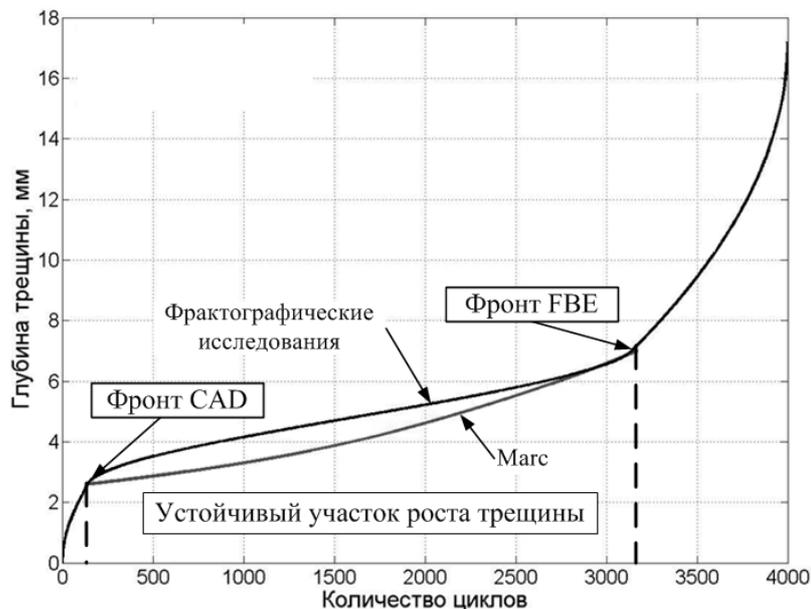


Рис. 6. СРТУ, полученные по результатам расчетов с использованием программы MSC.Marc и из фрактографических исследований

На рис. 7 показаны полученные с использованием программы DARWIN фронты развития трещины от начального (CAD на рис. 5), заданного в качестве исходных данных. Полученный при расчетах по программе DARWIN сценарий развития трещины на устойчивом участке ее роста качественно близок к определенному на основе фрактографии. Количественная оценка СРТУ, полученная по программе DARWIN, не

совпадает с данными фрактографии и результатами расчетов по программе MSC.Marc.

Причиной столь существенных отличий является неправильное определение в программе DARWIN величин КИН по мере развития трещины от первоначально заданного фронта. Кроме того, совершенно не физическим является «скачок» КИН при переходе от угловой модели трещины к сквозной.

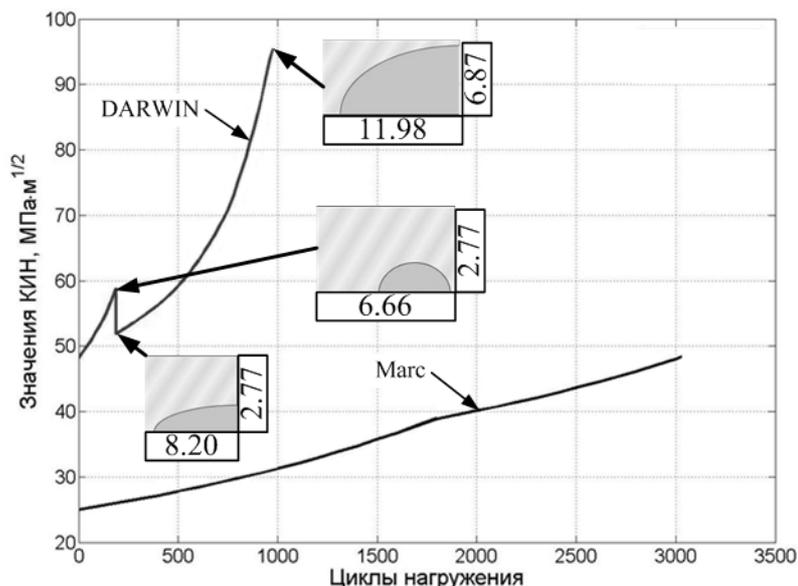


Рис. 7. Результаты расчета CPTУ в программах MSC.Marc и DARWIN

ВЫВОДЫ

Расчеты CPTУ в программах DARWIN и MSC.Marc хорошо согласуются друг с другом для деталей, сечение с трещиной в которых описывается правильным прямоугольником. Для случаев сложной формы сечения с расположенной в нем трещиной, расчеты CPTУ, выполненные в программе DARWIN, существенно отличаются (выше по скорости) от полученных в программе MSC.Marc. С практической точки зрения это приведет к необоснованно частой периодичности осмотров в эксплуатации.

Для всех протестированных на сегодняшний день задач, CPTУ, определенная с использованием программы DARWIN, является более консервативной, чем определенная с использованием программы MSC.Marc или по результатам фрактографии. Причиной консервативности оценки CPTУ в программе DARWIN является неверное (завышенное) определение величины КИН по мере развития фронта трещины.

Завышение значений КИН в программе DARWIN происходит из-за того, что ее алгоритм не учитывает изменение НДС в зоне дефекта по мере развития фронта и проводится вычисление КИН для ограниченной прямоугольной области, не отражающей реальной геометрии детали. При переходе от одного типа трещины к другому значения КИН, вычисленные с использованием программы DARWIN, могут изменяться «скачком», что противоречит физическому смыслу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Реконструкция и прогнозирование развития усталостных трещин в дисках авиационных ГТД / Н. В. Туманов [и др.] // Конверсия в машиностроении. 2005. № 4–5. С. 98–106.
2. 3D crack growth analysis and its correlation with experiments for critical turbine components under an international collaborative program / J. Hou [et al.] // Paper GT2008-50548, ASME Turbo Expo 2008, Berlin, Germany.
3. U.S. Department of Transportation. Federal Aviation administration. Advisory Circular. Subject: Damage Tolerance for High Energy Turbine Engine Rotors. Date: 1/8/01. AC No: AC 33.14-1.
4. Southwest Research Institute, Volume 2 DARWIN Theory Version 6.1, San Antonio, TX, June 2008.

ОБ АВТОРАХ

Потапов Сергей Давидович, нач. сектора ресурса ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова». Дипл. инженер (Пензенск. политехн. ин-т, 1983). Канд. техн. наук (Ленингр. кораблестр. ин-т, (ЛКИ, 1997). Иссл. в обл. ресурса авиац. двигателей.

Перепелица Дмитрий Дмитриевич, инженер того же сектора. Дипл. магистр (Моск. энерг. ин-т, 2010). Иссл. в обл. ресурса авиац. двигателей.