

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХМНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЯХ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Н.Г. Бураго¹, И.С. Никитин², В.Л. Якушев²

1 – *Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва*

2 – *Институт автоматизации проектирования РАН, г. Москва*

burago@ipmnet.ru

Аннотация. Решается задача оценки долговечности диска переменной толщины при высокочастотном циклическом нагружении. Предложен метод расчета трехмерного напряженно-деформированного состояния упругих дисков под действием циклических нагрузок от крутильных вибраций лопаток в компрессорах газотурбинных двигателей. Принято приближенное представление зависимости решения от координат по толщине диска и в окружном направлении. Для определения коэффициентов формул представления, зависящих от радиальной координаты, получена система дифференциальных уравнений, краевые задачи для которой решены с использованием неявной разностной схемы. Рассчитанное НДС использовано для оценок долговечности на основе критерия сверхмногоциклового усталостного разрушения.

Различные элементы конструкций газотурбинных двигателей, в частности, диски и лопатки компрессоров, подвергаются долговременным циклическим полетным (взлет-полет-посадка) и вибрационным (высокочастотные колебания) нагрузкам. Оценка времени их безопасной эксплуатации представляет значительный практический и теоретический интерес [1].

Для полетных циклов (МЦУ – малоцикловая усталость) в [2, 3] было рассчитано напряженно-деформированное состояние (НДС) и получены оценки усталостной долговечности вращающегося диска переменной толщины под действием центробежных нагрузок в диске и лопатках. Для оценки долговечности диска в полетных циклах нагружения были использованы известные критерии многоосного усталостного разрушения титановых сплавов. На основе этих критериев были получены распределения долговечности по диску, определены опасные зоны и сроки зарождения усталостной поврежденности в диске. Было показано, что усталостная долговечность титанового диска для характерных частот вращения может снижаться до критических значений $N \sim 10^4$ полетных циклов (30000–50000 часов реального времени) в окрестности контактной зоны лопаток и обода диска.

В последнее время установлено [1, 4], что низкоамплитудные вибрационные нагрузки при эксплуатации, действующие в течение длительного времени, тоже могут вызывать разрушение конструкций (СВМУ – сверхмногоцикловая усталость). Напряжения в дисках, вызванные вибрациями, существенно ниже не только предела текучести, но и предела усталости для МЦУ режима, то есть по классическим представлениям теории малоцикловой усталости такие вибрационные напряжения вообще не должны были бы представлять опасности. Однако, фрактографические исследования поверхностей излома разрушенных в процессе эксплуатации дисков показали, что первоначальное зарождение усталостного микроповреждения в дисках может происходить в циклических процессах обоих типов (механизмов): и МЦУ, и СВМУ. Отличительной особенностью разрушения по механизму СВМУ является то, что очаг зарождения микротрещин находится под поверхностью элемента конструкции, а не примыкает к ней, как в случае циклического процесса МЦУ. Эта особенность позволяет экспериментаторам различать данные механизмы при классификации первичного очага поврежденности. Отметим, что дальнейшее развитие усталостной трещины, как правило, происходит в режиме малоцикловой усталости и наблюдается в виде усталостных бороздок на поверхности излома в соответствии с полетными циклами нагружения. Отсюда следует, что механизмы МЦУ и СВМУ являются альтернативными и зачастую взаимодополняющими и взаимоусиливающими друг друга. Обзор экспериментальных исследований в этом направлении можно найти в [1, 4].

Следует заметить, что основное нагружение диска осуществляется в полетных циклах под действием на диск и лопатки центробежных сил и аэродинамических давлений на лопатки от набегающего потока. На этот силовой фон накладывается вибрационное нагружение вследствие крутильных колебаний лопаток. В принятой постановке мы не рассматриваем причины вибраций, такие, как действие пульсаций давления, возбуждение собственных форм колебаний лопаток, переходные режимы работы двигателя и так далее, а считаем вибрации заданными. Данные по амплитудам и частотам вибраций дисков приведены в [1].

В данной работе проведена оценка долговечности диска переменной толщины в СВМУ циклическом процессе.

Предложен метод расчета трехмерного напряженно-деформированного состояния упругих дисков переменного сечения под действием циклических нагрузок от крутильных вибраций лопаток.

Принято приближенное представление зависимости решения от координат по толщине диска и в окружном направлении. Для определения коэффициентов формул данного представления, зависящих от радиальной координаты, получена система дифференциальных уравнений, краевые задачи для которой решены с использованием неявной разностной схемы.

Рассчитанное НДС от вибраций было наложено на НДС в полетных циклах и использовано для оценок долговечности эксплуатации и определения зон поврежденности рассматриваемых дисков на основе обобщенного критерия сверхмногоциклового усталостного разрушения [5, 6].

На рис. 1 показаны радиальные распределения логарифма долговечности (логарифма числа циклов N до разрушения) около внешнего обода диска для суммарного действия полетных циклов и вибраций без учета аэродинамических нагрузок на лопатки (а) и с учетом этих нагрузок (б).

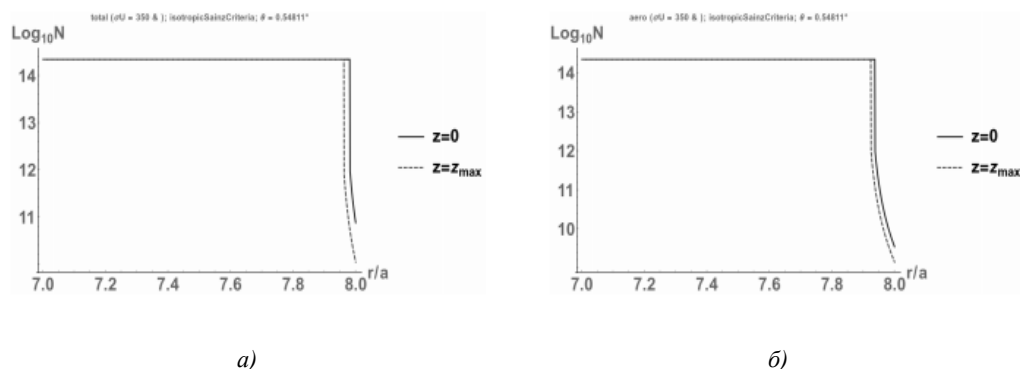


Рис. 1. Распределения логарифма долговечности по радиальной координате в окрестности внешнего обода диска

Выявлено значительное (до $10^{9.5}$ – 10^{10} циклов) падение долговечности на внешнем обode (в зоне контакта диска и лопаток). При вибрациях период колебаний имеет порядок 0.01 с. Поэтому реальное время до усталостного разрушения в результате вибраций лопаток может составить величину 10 000 – 30 000 часов, вполне достижимую в процессе эксплуатации.

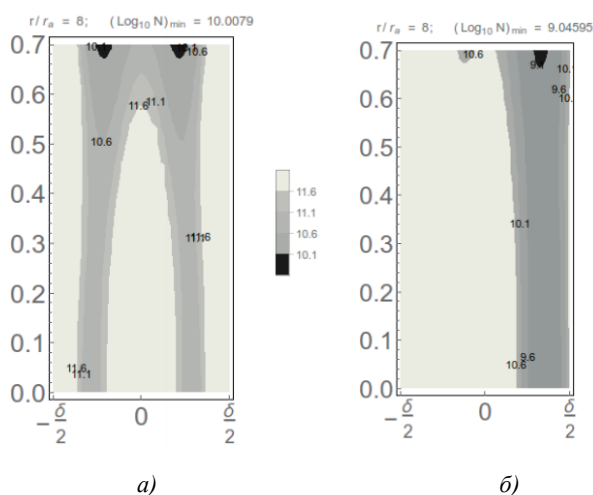


Рис. 2. Изолинии логарифма долговечности в прямоугольном сечении на внешнем обode диска (под лопаткой)

На рис. 2 показаны изолинии логарифма долговечности в прямоугольном сечении на внешнем обode диска (под лопаткой) для СВМУ режима, наложенного на основной МЦУ, без учета аэродинамических нагрузок на лопатки (а) и с учетом этих нагрузок (б). Темным цветом выделены области минимальной долговечности, которые соответствуют зонам зарождения и возможного развития усталостной поврежденности. Более реалистично выглядит правый график, расположение этой зоны соответствует данным фрактографических исследований поверхностей излома дисков, разрушенных в эксплуатации [1].

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ 15-08-02392-а.

Литература

1. Шанявский А.А. Моделирование усталостных разрушений металлов. Уфа: Изд-во «Монография», 2007. 498 с.
2. Бурого Н.Г., Журавлев А.Б., Никитин И.С., Юшковский П.А. Влияние анизотропии усталостных свойств титанового сплава на долговечность элементов конструкций. Препринт ИПМех РАН № 1064. Москва. 2014. 35 с.
3. Бурого Н.Г., Журавлев А.Б., Никитин И.С. Модели многоосного усталостного разрушения и оценка долговечности элементов конструкций. // Изв. РАН. МТТ. 2011. № 6. С. 22-33.
4. Bathias C., Paris P.C. Gigacycle fatigue in mechanical practice. New York: Marcel Dekker, 2005. 304 p.
5. Бурого Н.Г., Журавлев А.Б., Никитин И.С. Сверхмногоцикловое усталостное разрушение титановых дисков компрессора // Вестн. ПНИПУ. Механика. 2013. № 1. С. 52-67.
6. Бурого Н.Г., Никитин И.С., Юшковский П.А. Исследование сверхмногоциклового усталости дисков компрессора газотурбинного двигателя. Препринт ИПМех РАН № 1094. Москва. 2015. 24 с.