

УДК 620.194.23

МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT3-1 В ОБЛАСТИ СВЕРХМНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

А.А. ШАНЯВСКИЙ, К. БАТИЯ, А.Д. НИКИТИН, Т. ПАЛИН-ЛЮК

Выполнен комплекс испытаний и исследований поведения титанового сплава VT3-1 в области сверхмногоциклового усталости. Образцы вырезаны из диска компрессора первой ступени двигателя Д30-КУ и испытаны при частоте нагружения 20 кГц на специальной установке в Парижском университете «ITMA». Показано, что в исследованной области зарождение трещин происходит под поверхностью от различных структурных неоднородностей материала. При симметричном нагружении формирование очага под поверхностью происходит с формированием мелкокристаллической структуры рельефа, а при растяжении первоначально формируется преимущественно гладкая фасетка раскалывания по α -фазе. Рассеивание экспериментальных данных при фиксированном уровне напряжений составляет почти три порядка.

Ключевые слова: титановый сплав, сверхмногоцикловая усталость, зарождение трещин, усталостные кривые.

Введение

Многочисленные исследования усталостных разрушений дисков компрессоров авиационных ГТД, изготавливаемых из титановых сплавов, показывают, что разрушение может происходить в разной области циклического нагружения [1]. Наиболее типичными разрушениями ступицы и полотна являются малоцикловые разрушения, что отражает последовательность переходных режимов работы двигателя в пределах полетного цикла. В ободной части диска во многих случаях также происходит малоцикловое разрушение, но этот вид разрушения реализуется на втором этапе роста усталостной трещины. На первом этапе зарождения и роста трещины разрушение реализуется в области многоциклового усталости из-за значительного влияния малых амплитуд нагрузок от колебания лопаток.

В зависимости от частоты колебания лопаток и длительности эксплуатации двигателя в ободной части диска предельное состояние с зарождением усталостной трещины может быть достигнуто не только по критерию многоциклового (МНЦУ) и сверхмногоциклового усталости (СВМУ). Область СВМУ относят к долговечности более 10^8 циклов нагружения. Это новое направление исследований материала, в рамках которого показано, что при больших долговечностях, чем 10^8 циклов нагружения, разрушения материала происходят с формированием очага разрушения под поверхностью гладкого образца [3-5].

Применительно к образцам с концентратором напряжений зарождение трещины в области СВМУ может происходить с поверхности при долговечности 10^9 циклов, если концентрация напряжений по поверхности будет выше, чем концентрация напряжений под поверхностью [6]. Применительно к титановым дискам компрессоров, у которых колебания лопаток могут быть реализованы с частотой не менее 100 Гц, при реализуемом сроке эксплуатации не менее 10 000 ч длительность нагружения малыми амплитудами нагрузок, которые накладываются на растягивающее напряжение диска, составляет не менее $10000 \times 3600 \times 100 = 3,6 \times 10^9$ циклов. Это даже при наличии концентратора напряжений в виде радиусного перехода в зоне паза под лопатку соответствует области СВМУ. С повышением длительности эксплуатации дисков и частоты колебания лопаток возникает высокая вероятность зарождения усталостных трещин не только с поверхности концентратора напряжений, но и под поверхностью.

В связи с изложенным было проведено комплексное исследование титанового сплава VT3-1 на гладких образцах в области СВМУ.

Методика исследования

Образцы были изготовлены из диска компрессора первой ступени низкого давления двигателя Д30-КУ-154, имевшего наработку в эксплуатации в течение 8000 ч. Диск был изъят из эксплуатации в связи с ограничением ресурса всему парку этого типа дисков. Ограничения по наработке были введены в связи с имевшими место случаями ранних по наработке разрушений дисков в эксплуатации.

На момент изъятия диска из эксплуатации никаких замечаний по его состоянию не было. Материал диска соответствовал требованиям по техническим условиям, которые заложены в технологию его изготовления. Отклонений от заданных условий эксплуатации двигателя, на котором эксплуатировался диск, не было зафиксировано.

Таким образом, состояние титанового сплава VT3-1 для диска компрессора соответствовало общепринятым механическим характеристикам: предел прочности – 1100 МПа, предел текучести 960 МПа, удлинение 12,5%.

Диск был разрезан на две части вдоль диаметра, и из него были изготовлены три партии цилиндрических образцов диаметром 3 мм в рабочей части. Первая партия была изготовлена из ободной части в зонах межпазовых выступов по направлению параллельно пазу под лопатки. Размеры образцов соответствовали типу машины, на которой в условиях растяжения-сжатия и растяжения с асимметрией цикла 0,1 при диаметре в рабочей части 3 мм была реализована амплитуда напряжений в интервале 450 – 350 МПа.

Схема испытательного комплекса, разработанного в лаборатории «ТМА» [3], который использован для проведения циклических испытаний с частотой 20 кГц, представлена на рис. 1.

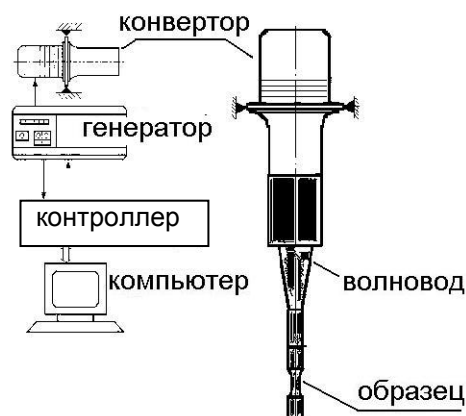


Рис. 1. Принципиальная схема и внешний вид установки для усталостных испытаний с высокой частотой нагружения

Принцип действия установки заключается в следующем: программа, контролирующая параметры тестирования образца, посылает сигнал, несущий информацию о параметрах генерируемых сверхзвуковых импульсов, на вход генератора, где он обрабатывается и проводится модуляция требуемого сигнала. После чего сгенерированный сигнал подается на вход конвертора и обратно в компьютерную программу, что позволяет точно отслеживать качество сигнала. Конвертор преобразует электрический сигнал в механические вибрации той же частоты. Далее посредством специально разработанных волноводов проводится увеличение амплитуды механических смещений, которые и прикладываются к образцу. Форма образца имеет форму «песочных часов», что позволяет увеличить максимальные действующие напряжения в образце. Длина образца переменна, и при ее изменении производится перерасчет всей цепи нагружения с заданной точностью для воспроизведения частоты нагружения.

В процессе испытаний выявлено, что образцы, которые были вырезаны из диска и механически обработаны по поверхности, имели высокую шероховатость. Поэтому часть испытаний была проведена в области СВМУ на образцах с указанной шероховатостью, а большая часть образцов была подвержена полировке с целью снижения шероховатости поверхности.

После проведения испытаний до заданного числа циклов все разрушенные образцы были подвергнуты фрактографическому исследованию (анализировался рельеф излома) на растровом электронном микроскопе фирмы Карл Цейсс.

Материал образцов был исследован на световом микроскопе Неофот в плоскости шлифов, которые были изготовлены в направлении вдоль и поперек оси образцов.

Результаты исследования

Выполненные испытания показали, что у неполированных образцов разрушения в области СВМУ происходят при меньшем уровне максимальных напряжений, чем у полированных образцов (рис. 2). Такое поведение материала следует связывать не только со снижением концентрации напряжений по поверхности из-за снижения шероховатости, но и с небольшим упрочнением материала по поверхности в процессе механической полировки. Это подтверждается результатами анализа мест, где располагаются очаги разрушения образцов.

В большинстве образцов расположение очагов разрушения было на небольшом удалении от поверхности. При этом в образцах с разной долговечностью очагами разрушения являлись различные неоднородности структуры материала. Сопоставление структуры материала с рельефом излома в очагах разрушения показало, что трещины под поверхностью зарождаются на границах ориентированных волокон штампованного материала, в местах неоднородного расположения пластинчатой структуры, а также в зоне границ стыка различно ориентированных пластин двухфазового материала в пределах одного зерна. При этом сам очаг разрушения может представлять собой две разные поверхности излома.

Первый вид поверхности представляет собой гладкую фасетку в пределах одной α -фазы, размер которой полностью определяется размером этой фазы. Ранее было проанализировано формирование гладкой фасетки в титановом сплаве ВТЗ-1 и предложен механизм исчерпания прочности по одной из плоскостей скольжения в пределах α -фазы за счет возникновения вихревых потоков деформации [6]. Указанный вид разрушения преимущественно отвечает нагружению с положительной асимметрией цикла независимо от реализуемой долговечности.

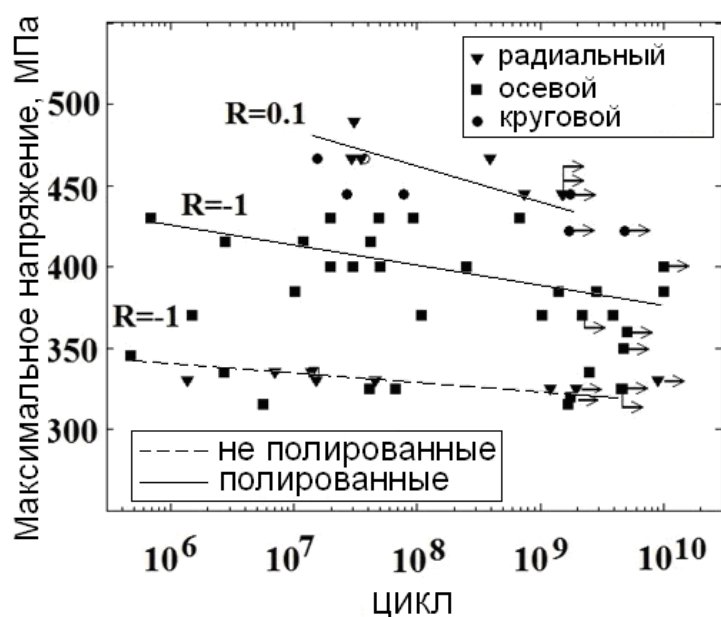


Рис. 2. Усталостные кривые титанового сплава ВТЗ-1 в области СВМУ при разной асимметрии цикла R и разном состоянии поверхности образцов

При испытании с отрицательной асимметрией цикла зарождение трещин происходит с формированием так называемой мелкокристаллической зоны (МК) [4]. Многочисленными исследованиями закономерности формирования этой зоны было показано, что ее возникновение является результатом того, что материал в зоне зарождения трещины переходит в сверхпластичное состояние [2]. В результате этого происходит формирование наноструктурированной плоской области с размерами зерен не более 50 нм. Далее под действием циклической нагрузки происходит разрушение материала по границам наноструктур, имеющих форму, близкую к сфере. От границы указанной структуры происходит зарождение и последующий рост усталостной трещины аналогично тому, как это происходит при зарождении и распространении сквозных трещин.

Различие в расположении очагов разрушения по структурным элементам материала приводит к высокому рассеиванию экспериментальных данных по усталости исследованного сплава. Так, например, для неполированных образцов (рис. 2) рассеивание результатов испытаний при фиксированном уровне напряжений составило почти три порядка. Это указывает на то, что в материале дисков компрессоров при реализуемой технологии их изготовления нижняя граница долговечности в области СВМУ, когда разрушение материала не происходит при долговечности 10^{10} циклов, составляет не менее 320 МПа для ободной части. Эта величина почти в полтора раза ниже, чем обычно регистрируемый предел усталости материала 420 МПа по уровню долговечности $10^7 - 10^8$ циклов без разрушения образцов из этого сплава на этой базе.

Из сказанного следует, что снижение уровня напряжений для усталостной кривой в ободной части в большей мере связано с более низкими усталостными свойствами материала, чем с его упрочнением по поверхности при полировке образцов. Этот факт основан на расположении очагов разрушения. При возникновении трещины под поверхностью влияние состояния поверхности (шероховатость) и легкое упрочнение поверхностного слоя при полировке не играют решающей роли в поведении материала при зарождении трещины под поверхностью. Тем не менее в рассматриваемом случае, когда большинство образцов разрушилось с формированием очага разрушения на небольшом удалении от поверхности, влияние остаточных напряжений проявляется в увеличении долговечности при том же уровне напряжений. Предельная величина уровня напряжений, ниже которой не происходит разрушение сплава при долговечности 10^{10} циклов, после полировки образцов увеличилась в области СВМУ до 360 МПа.

Результаты выполненного исследования показали, что разрушение титанового сплава ВТЗ-1 в области СВМУ реализуется при долговечности вплоть до 10^{10} циклов, и этот факт следует учитывать при определении ресурса дисков компрессоров, которые изготавливаются из этого материала.

Выводы

1. Выявлены закономерности поведения титанового сплава ВТЗ-1 и получены усталостные кривые в области сверхмногоциклового усталости вплоть до 10^{10} циклов при двух асимметриях цикла – 1 и 0,1.

2. Показано, что в области СВМУ рассеивание экспериментальных данных может достигать трех порядков при одном и том же уровне напряжений, что обусловлено влиянием различных структурных элементов сплава на зарождение усталостной трещины под поверхностью гладкого образца.

3. Зарождение трещин под поверхностью в области СВМУ происходит при положительной асимметрии цикла преимущественно в результате формирования первоначально гладкой фасетки путем разрушения одного из фрагментов α -фазы, тогда как при отрицательной асимметрии цикла доминирует механизм формирования мелкокристаллической зоны в результате возникновения сверхтекучести материала и формирования наноструктур преимущественно сферической формы с последующим формированием поверхности разрушения по границам этой структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шанявский А.А. Безопасное усталостное разрушение элементов авиационных конструкций. Синергетика в авиации. - Уфа, 2003.
2. Шанявский А.А. Самоорганизация наноструктур в металлах при сверхмногоцикловой усталости // Физическая Мезомеханика. - 2012. - Т. 15. - № 5. - С. 91-105.
3. Bathias C., Paris P.C. Gigacycle fatigue in mechanical practice // New York: Dekker Publisher, 2005.
4. Eds Sakai T., Ochi Y. Proceedings of the UHCF-3, the third international conference on very high cycle fatigue, September 2004, Kyoto (Japan), 2004.
5. Murakami Yu. Metals Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic inclusions. London: Elsevier Ltd, (UK), 2002.
6. Shanyavskiy A.A., Banov M.D. The twisting mechanism of subsurface fatigue cracking in Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si alloy // Engng. Fract. Mech. - 2010. - Pp.77-88.

**FATIGUE CRACKING MECHANISMS OF TITANIUM ALLOY VT3-1
IN VERY-HIGH-CYCLE-FATIGUE REGIME****Shanyavskiy A.A., Bathia C., Nikitin A.D., Palin-Luk T.**

Investigations and tests of specimens of VT3-1 titanium alloy were done in Very-High-Cycle-Fatigue regime. Specimens were manufactured from compressor disks of D30-KU engine, and tests under frequency 20 kHz performed on the special test-bed in laboratory of Paris University «ITMA». Crack origination takes place subsurface from different material structural inhomogeneities. Fatigue origin has fine-granular area in the case of specimen tests under symmetrical cycle of cyclic loads but in the case of cyclic tension, origin has flat facet because of α -phase splitting. Experimental data dispersion under the constant stress level covered three orders.

Keywords: titanium alloy, very-high-cycle-fatigue, crack origination, subsurface, SN-curves.

Сведения об авторах

Шанявский Андрей Андреевич, 1946 г.р., окончил МАИ (1970), профессор, доктор технических наук, заслуженный деятель науки РФ, начальник отдела «Металлофизические исследования авиационных материалов» ГосЦентра безопасности полетов, автор более 380 научных работ, область научных интересов – исследование механизмов и моделирование процессов разрушения элементов авиационных конструкций на основе подходов синергетики.

Батия Клод, 1938 г.р., окончил университет в г. Пуатье (1963), доктор технических наук, почетный профессор Парижского университета, автор более 240 научных работ, область научных интересов – исследование процессов зарождения и роста трещин при разных видах нагружения в металлах и композициях, преимущественно в области сверхмногоцикловой усталости.

Никитин Александр Дмитриевич, 1988 г.р., окончил МАТИ (2010), аспирант МАТИ, автор 5 научных работ, область научных интересов – синергетика, физика и механика разрушения металлов.

Палин-Люк Тьерри, 1966 г.р., окончил университет в г. Бордо (1989), доктор технических наук, профессор в объединенном университете ЕНСАМ г. Бордо, автор более 90 научных работ, область научных интересов – механика деформируемого твердого тела, изучение и моделирование процессов усталостного разрушения металлов при разных видах нагружения.