

# СВЕРХМНОГОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Бураго Н.Г.<sup>1</sup>, Никитин А.Д.<sup>2,3</sup>, Никитин И.С.<sup>2,3</sup>, Якушев В.Л.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем механики РАН им. А.Ю. Ишлинского, 101, пр. Вернадского, 119526, Москва

<sup>2</sup> Институт автоматизации проектирования РАН, 19/18, 2ая Брестская улица, 123056, Москва

<sup>3</sup> «МАИ» - Национальный Исследовательский Университет, 4, Волоколамское шоссе, 125080, Москва

В последнее десятилетие было показано, что преждевременный выход из строя элементов авиационных двигателей, таких как диски и лопатки компрессора, может происходить вследствие незначительных циклических напряжений (малых в сравнении с пределом текучести материала) прикладываемых с высокой частотой (порядка 1 кГц и выше) [1, 2]. Высокочастотное нагружение приводит к значительным наработкам ( $10^9 - 10^{10}$  циклов) за время расчетного срока службы изделия. Указанный диапазон долговечностей известен в литературе как сверхмногоцикловая или гигацикловая усталость [3]. Сверхмногоцикловая усталость (СВМУ) характеризуется сменой механизма зарождения усталостной трещины и монотонным снижением усталостной прочности с увеличением количества циклов.

Для количественной оценки величины снижения усталостной прочности в области сверхмногоцикловой усталости используются резонансные пьезоэлектрические испытательные установки [4]. При этом особое внимание уделяется проектированию образцов для усталостного испытания. В данной работе описаны основные принципы работы резонансных испытательных комплексов [5] (Рис. 1).

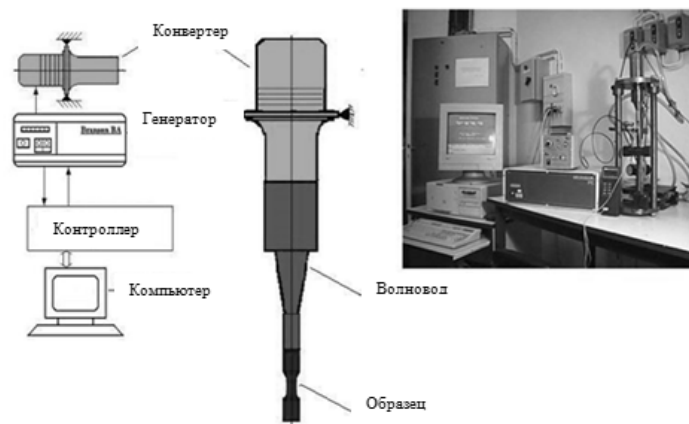


Рис. 1. Схема и вид установки для усталостного тестирования в режиме СВМУ

Приводятся результаты экспериментального исследования авиационного титанового сплава ВТЗ-1 в области сверхмногоциклового усталости (Рис.2)

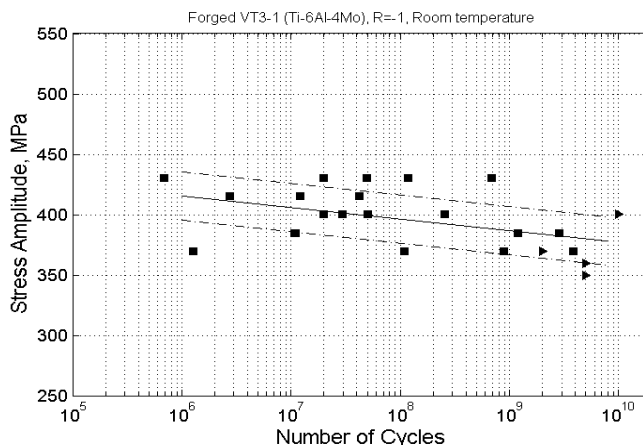


Рис. 2. Экспериментальные данные для сплава ВТЗ-1 в области сверхмногоциклового усталости

Как видно из анализа кривой усталости для титанового сплава ВТЗ-1 усталостная прочность сплава постоянно снижается с увеличением количества циклов нагружения. Анализ поверхностей излома для всех испытанных образцов показал, что при увеличении количества циклов до разрушения очаг зарождения трещины смещается с поверхности в подповерхностные объемы материала. При этом анализ зоны зарождения показывает, что трещиноподобный дефект формируется в отсутствие каких-либо микроструктурных дефектов, таких как неметаллические включения. На Рис. 3 показана характерная для сплава ВТЗ-1 поверхность излома с подповерхностным зарождением.

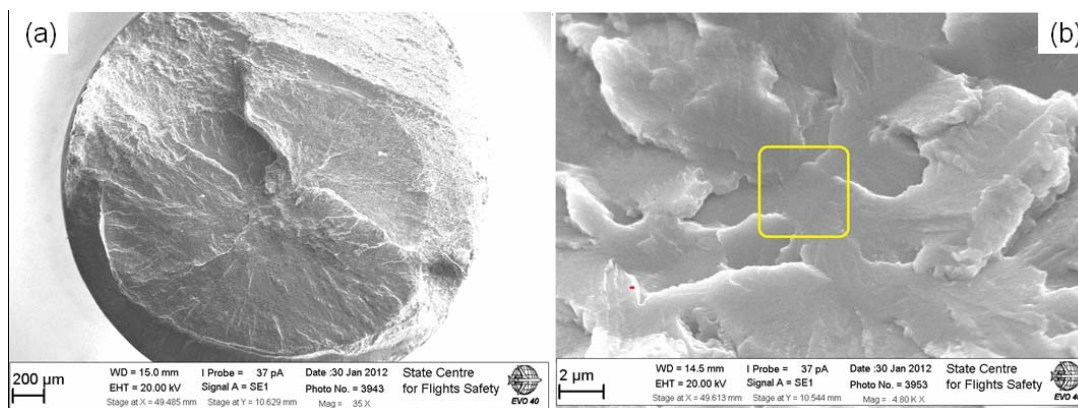


Рис. 3. Характерный вид поверхности излома в сплаве ВТЗ-1 при подповерхностном зарождении

На Рис. 3-а показаны результаты фрактографического исследования поверхности излома. Видно, что зарождение усталостной трещины происходит в самом центре образца и при дальнейшем росте формируется круговая трещина. Анализ области зарождения показывает, что в центре этой круговой трещины находится

гладкая фасетка, Рис. 3-б, соответствующая типичным пластинам альфа фазы. Таким образом, становится очевидно, что зарождение трещины не связано с наличием дефекта (включения). После зарождения трещина развивается в нескольких параллельных плоскостях, что связано со сложной организацией микроструктуры в штампованном титановом сплаве. Оценка, проведенная в [6], показывает, что рост круговой трещины в образце не превышает 10 процентов от общей долговечности. Таким образом, механизм сверхмногоциклового усталости связан с проблемой зарождения подповерхностной трещины.

С помощью конечно-элементного пакета проведено математическое моделирование проведенных экспериментов по высокочастотному нагружению образцов из сплава ВТ3-1, используемого для производства дисков и лопаток компрессоров. Определены поля напряжений, возникающих в образцах, и на этой основе даются оценки усталостной долговечности в режиме СВМУ по обобщенному критерию многоосного разрушения [6]. Параметры критерия определены с использованием данных усталостных испытаний для различных коэффициентов асимметрии цикла.

Исследование выполнено в рамках проекта РФФИ 15-08-02392.

## **Литература**

1. Nicholas T. Critical issues in high cycle fatigue// *Int. J. of Fatigue*. 1999. V. 21. Pp. 221 – 231.
2. Шаняевский А.А. Моделирование усталостных разрушений металлов. Синергетика в авиации. 2007. Уфа. «Монография». 2007. 498с.
3. C. Bathias, P.C. Paris. *Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice*. 2005. Dekker. New York.
4. C. Bathias. Piezoelectric fatigue testing machines and devices// *Int. J. of Fatigue*. 2006. V. 28. Pp. 1438 – 1445.
5. Никитин А.Д., Никитин И.С. Экспериментальное исследование сверхмногоциклового усталости титановых сплавов // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Механика*. № 7. 2015. С. 51-58.
6. Bathias C. Paris P.C. Huang Z., Wagner D. Subsurface crack initiation and propagation mechanisms in gigacycle fatigue// *Acta Materialia*. 2010. V. 58. Pp. 6046-6054.
7. Burago N., Nikitin I. *Multiaxial Fatigue Criteria and Durability of Titanium Compressor Disks in low- and giga- Cycle Fatigue Modes*. Heidelberg. Springer. *Mathematical Modeling and Optimization of Complex Structures*. 2016. Pp. 117-130.