ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

INTERNATIONAL WORKSHOP

**«Multiscale Biomechanics and Tribology
of Inorganic and Organic Systems»**

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ,
ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ
ИНСТИТУТА ХИМИИ НЕФТИ**

«Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа»

Томск
Издательский Дом ТГУ
2019

DOI: 10.17223/9785946218412/32

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ
НЕОБРАТИМЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В АМГ-6 В ПРОЦЕССЕ ГИГАЦИКЛОВОЙ
УСТАЛОСТИ**

Банников М.В., Билалов Д.А., Оборин В.А., Наймарк О.Б.
Институт механики сплошных сред УрО РАН

В работе приведена методика «in situ» определения накопления необратимых усталостных повреждений, основанная на анализе нелинейных проявлений сигнала обратной связи в замкнутой системе ультразвуковой усталостной установки. В режиме сверхмногоциклового (гигациклового) усталости проявляются аномалии упругих свойств материала, что приводит к эффекту нелинейности в амплитуде колебаний. Данный эффект возрастает с иницированием и ростом усталостной трещины. Методика была применена к образцам из сплава АМГ-6 с предварительным динамическим деформированием при различных уровнях среднего напряжения для определения момента иницирования и роста усталостной трещины в режимах сверхмногоциклового усталости. Показано, что методика применима для раннего обнаружения усталостных трещин как на поверхности, так и внутри материала при циклическом нагружении в ультразвуковом режиме. Получены определяющие соотношения в рамках модели среды с дефектами для описания зарождения усталостной трещины в сверхмногоцикловом диапазоне нагружения. Результаты математического моделирования находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными.

Усталостное нагружение проводилось на ультразвуковой [1] испытательной машине резонансного типа Shimadzu USF-2000 при уровнях напряжений 90-162 МПа и симметричном цикле $R=-1$. Принцип работы испытательной машины заключается в том, что в системе Генератор-волновод-образец образуется стоячая волна. При этом максимум амплитуды перемещений приходится на торцы образца, а максимум амплитуды напряжений на его центр. Со стороны свободного торца образца закреплен индуктивный датчик, позволяющий определять перемещения торца с точностью десятых долей микрон и частотой до 1 МГц.

В процессе эксперимента $\beta_{relative}$ незначительно увеличивается на начальном этапе, что обычно связывают с эффектом нагрева образца и, вследствие этого, изменением его линейных размеров [2-4], затем основную часть времени эксперимента амплитуда второй гармоники остается постоянной и значительно увеличивается при образовании усталостной трещины и её росте. Амплитуда второй гармоники связывается с деформацией, вызванной системой дефектов. При задаваемых параметрах нагружения макроскопически система находится в упругой области, и все деформации являются обратимыми. Дефекты слабо коррелируют между собой, а амплитуда второй гармоники мала и слабо изменяется, однако в процессе многочисленных циклических сдвигов образуются необратимые повреждения, которые начинают взаимодействовать друг с другом, что приводит впоследствии к образованию усталостной трещины.

Широкодиапазонные определяющие соотношения [5-7], описывающие связь кинетики поврежденности, обусловленной дефектами, с релаксационными свойствами материалов, использованы для построения математической модели, способной описывать деформационное поведение металлов и сплавов при усталостном нагружении.

Численное исследование поведения реальной конструкции и даже лабораторного образца в режиме гигациклового усталости не представляется возможным в связи с требованием огромных вычислительных и временных ресурсов. Поэтому вместо решения краевой задачи рассматривается задача нагружения представительного объема материала с условиями нагружения в виде приложенных циклических напряжений по гармоническому закону.

Рис.1. Кинетика дефектов (пунктирная линия) в расчёте и изменение амплитуды второй гармоники перемещений в эксперименте (сплошная линия)

На рис. 1 изображены нормированные кривые изменения параметра p , отнесённого к p_c и амплитуда второй гармоники перемещений, отнесённая к её максимальному значению. На рис.1. представлены экспериментальные данные, соответствующие предварительно нагруженному образцу. Согласно предложенной модели, изменение структуры за счёт предварительного нагружения описывается в терминах параметра δ . А именно – предварительно нагруженному образцу соответствует меньшее значение начального условия δ_0 .

Таким образом, предложенная модель способна адекватно описывать поведение материала в режимах много- и гигацикловой усталости. Опираясь на результаты численного моделирования, можно сделать вывод о том, что изменение амплитуды второй гармоники перемещений в эксперименте даёт адекватную информацию о накоплении повреждённости в материале.

1. Bathias C., Paris P.C. Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice. – Marcel Dekker Publisher Co, 2005. – 328 p.
2. Froustey C., Naimark O., Bannikov M., Oborin V. Microstructure scaling properties and fatigue resistance of pre-strained aluminium alloys (part 1: AlCu alloy // European Journal of Mechanics A/Solids, 2010.– 29.– Pp. 1008-1014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2010.07.005>
3. Oborin V.A., Bayandin Yu. V., Bilalov D. A., Sokovikov M. A., Chudinov V. V., Naimark O. B. Self-similar laws of damage development and evaluation of the reliability of alloys D16T and AMg6 under combined dynamic and gigacycle loading // Phys. Mezomekh, 2018.– 21(6).– Pp. 135-145 DOI: 10.1134/S1029959919020048
4. John H. Cantrell, William T. Yost Nonlinear ultrasonic characterization of fatigue microstructures // Int. J. of Fatigue, 2001.– 23.– Pp.487–490. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(01\)00162-1](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(01)00162-1)
5. Билалов Д.А., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. Математическое моделирование процесса разрушения сплава АМг2.5 в режиме много- и гигацикловой усталости // Вычислительная механика, 2018. – 11(3) – с. 323-334. DOI: <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2018.11.3.24>
6. Naimark O.B. Collective properties of defects ensembles and some nonlinear problems of plasticity and fracture // Physical mesomechanics, 2003.– 6(4), pp. 39-63.
7. Mikhail Bannikov, Dmitry Bilalov, Vladimir Oborin, Oleg Naimark Damage evolution in the AMg6 alloy during high and very high cycle fatigue, Frattura ed Integrità Strutturale, 49 (2019) 383-395; DOI: 10.3221/IGF-ESIS.49.38