

4. Херцберг Р.В.. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов. – Металлургия. Москва 1989. – 575 с.
5. Тимошенко С.П., Гудьер Дж., Теория упругости. – Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука». Москва 1975. – 576с.
6. Дерюгин Е.Е., Суворов Б.И.. Определение вязкости разрушения малоразмерных образцов с ултрамелкозернистой структурой. – Вестник Сам-ГТУ. Серия «Технические науки». Самара 2012. – 129 с.
7. Ильин А.А., Колачев Б.А. и др. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. – «ВИЛС - МАТИ». Москва 2009. – 520 с.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ СПЛАВА В96ЦЗ С ПОМОЩЬЮ ВОЛН ЛЭМБА

В.В. ПИЧУГОВ¹, Р.Т. ШАХ¹, М.В. БУРКОВ^{1,2}

¹Томский политехнический университет

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: vvp15@tpu.ru

NUMERICAL EVALUATION OF DEFORMATION AND FRACTURE PROCESSES OF AA7068 SPECIMENS USING LAMB WAVES

V.V. PICHUGOV¹, R.T. SHAH¹, M.V. BURKOV^{1,2}

¹Tomsk Polytechnic University

²Institute of Strength Physics and Materials Science

E-mail: vvp15@tpu.ru

***Abstract.** The Lamb wave technique for quantitative analysis of deformation and fracture processes of aluminum alloy specimens has been investigated. In order to study the evolution of propagation of ultrasonic elastic waves throughout static and fatigue mechanical tests the set of informative parameters has been calculated. There are two frequencies used: 60 kHz and 350 kHz. The informative parameters of registered signals are plotted versus elongation (for static test) and number of cycles (for fatigue test). The behavior and features of the obtained graphs have been analyzed and discussed in order to establish the relation between stress-strain (or fatigue) state of the specimens and changes of Lamb wave propagation through the gage length of the specimen.*

Введение. Неразрушающий контроль (НК) на всем протяжении времени остается одной из наиболее важных проблем в процессе эксплуатации машиностроительных изделий. На данный момент разработано множество методов НК, благодаря которым имеется возможность находить дефекты в деталях из металлов и сплавов в процессе производства и ремонта. Одним из основных недостатков НК является остановка эксплуатации изделия, что экономически не выгодно. Результаты контроля показывают, что обнаружение дефектов происходит в небольшом количестве деталей, в остальных же случаях дефекты в конструкции еще не образовались. Однако интервал контроля изделий расширить невозможно, так как конструкции, в которых зародились дефекты, в процессе эксплуатации могут разрушиться, что непозволительно во многих опасных отраслях промышленности: авиакосмической, нефтехимической и др.

Одним из актуальных направлений исследований в сфере НК, привлекающих множество инженеров и исследователей, является концепция Structural Health

Monitoring (SHM) [1]. Она подразумевает внедрение в конструкцию комплекса чувствительных элементов, регистрацию информации на протяжении всей эксплуатации с последующим анализом с помощью программных средств для своевременного обнаружения повреждений и ремонта. Несомненным плюсом такого подхода является возможность расширить интервалы планового контроля, если система не регистрирует изменений, превышающих некоторое пороговое значение. Одним из подходов к реализации SHM является сеть ультразвуковых (УЗ) датчиков, интегрированных в конструкцию, и используемых для прямого активного обнаружения дискретных дефектов (расслоений углепластиков, трещин в металлах и др.).

Одним из самых распространенных видов разрушений конструкций является усталостное разрушение — вследствие действия повторно-переменных механических нагрузок. Физические причины усталостного разрушения материалов достаточно сложны и ещё не до конца изучены. В металлах основной причиной усталостного разрушения принято считать образование и развитие трещин. В авиации проблема усталости является крайне сложной, при этом необходимость сделать самолёт как можно легче, существенно усложняет данную проблему. Необходимо найти грань между безопасностью и наименьшей возможной массой самолета, ведь самолет невозможно остановить в воздухе и отремонтировать. Поэтому разработка систем встроенного контроля с использованием сети датчиков для своевременного поиска дефектов в узлах самолета актуальной.

Алюминиевые сплавы остаются основным конструкционным материалом авиакосмической техники. Объем их применения в настоящее время составляет около 70% от всего количества конструкционных материалов в плане серийно производящихся самолетов. Алюминиевый сплав В96Ц3Т12 (Al=91; Zn=8,0; Cu=1,6; Mg=2; Zr=0,1 %) применяется: для производства полуфабрикатов - длинномерных катаных плит, листов и пресованных профилей, панелей, применяемых для верхних обшивок крыла, стоек, балок и других элементов в преимущественно сжатых зонах планера перспективных самолетных конструкций. И как видно из таблицы 1, предел прочности В96Ц3Т12 значительно выше, чем у традиционно используемого Д16Т на ~50 % (предел текучести – на ~100 %), а так как плотность данных сплавов примерно равна, применение В96Ц3Т12 является очень перспективным.

Таблица 1 – Механические характеристики В96Ц3Т12 и Д16Т

Наименование сплава	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
В96Ц3Т12	650	630	9
Д16Т	420	295	10

Однако столь высокая прочность приводит к появлению следующего недостатка – это плохая трещиностойкость (высокая скорость роста усталостной трещины). Таким образом, конструктор вынужден применять более высокие коэффициенты безопасности при проектировании авиационной техники с использованием данного сплава, что немного утяжеляет конструкцию. При этом в силу различных отклонений при производстве и повреждений при эксплуатации задача своевременного обнаружения усталостных трещин в течение всего жизненного цикла остается достаточно важной.

В данной работе была поставлена задача исследовать методику с использованием волн Лэмба для оценки состояния образцов алюминиевого сплава В96Ц3Т12.

Необходимо при статических и циклических испытаниях изучить особенности изменения (затухания) ультразвуковых сигналов, проходящих через рабочее сечение нагружаемого образца.

Материал и методика исследования

Для проведения экспериментов с приложением статических нагрузок использовали испытание на одноосное растяжение. В качестве оборудования использовали электромеханическую испытательную машину Instron 5582 с клиновыми захватами. Помимо регистрации данных для исследования ультразвуковой методики, в результате проведения эксперимента был получен предел прочности, необходимый для расчета параметров циклического нагружения.

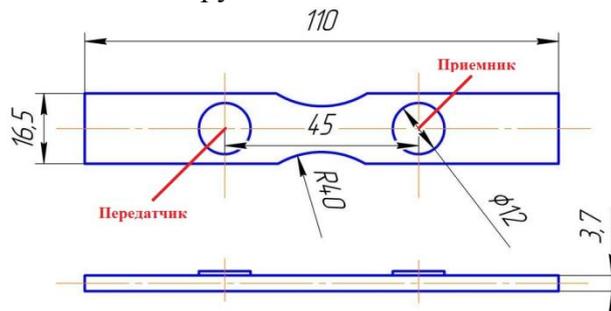


Рисунок 1 – Эскиз образца для испытаний

Параметры эксперимента на статическое растяжение:

- Скорость перемещения подвижного захвата – 0,6 мм/мин;
- Запись нагрузки и перемещения с частотой 2 Гц, для построения диаграммы σ - ϵ ;
- Для регистрации УЗ сигналов нагружение останавливали в заранее определенных точках с шагом по нагрузке 1 кН;
- При достижении нагрузки, приводящей к появлению пластической деформации, шаг регистрации УЗ сигналов меняли на 0,2% по удлинению.

Для проведения экспериментов с приложением циклических нагрузок использовали испытание на одноосное циклическое растяжение. Испытания проводились на сервогидравлической машине Universal Testing Machine 150.

Параметры эксперимента на циклическое растяжение:

$$P_{\max} = 0,5 \times P_{\text{разр}};$$

$$P_{\text{разр}} = \sigma_b \times F;$$

$$P_{\min} = 0,1 \times P_{\max},$$

где P_{\max} – максимальная нагрузка цикла; P_{\min} – минимальная нагрузка цикла; F – площадь поперечного сечения; R – асимметрия цикла равная 0,1.

Ультразвуковые сигналы генерировали прибором AWG-4105 и регистрировали цифровым осциллографом Handyscope HS-4. В качестве тестового сигнала выступала 5-цикловая синусоида, модулированная окном Хэннинга. Генерацию сигналов проводила на двух частотах: 60 кГц и 350 кГц. Для снижения шума проводили осреднение по 100 сигналам. Схема использования ультразвуковой методики приведена на рисунке 2,а, также приведен пример тестового сигнала (рисунок 2,б). Более подробно процедура генерации, регистрации и количественной оценки сигналов приведена в работах [2,3].

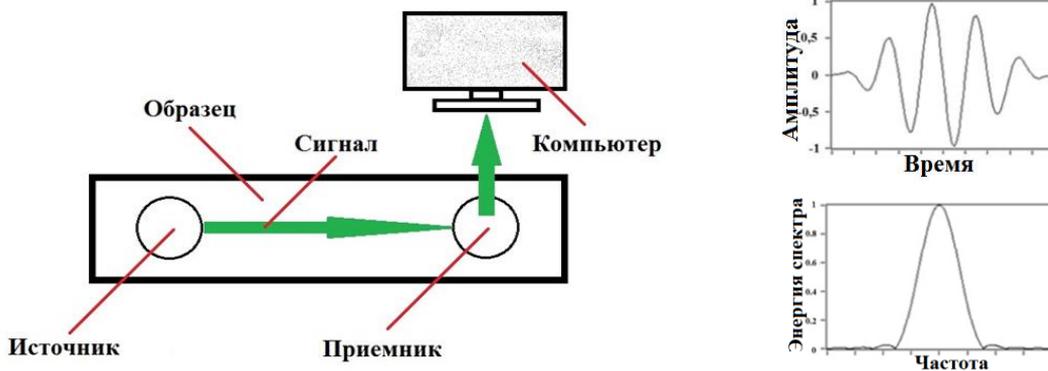


Рисунок 2 - Принцип работы ультразвукового контроля при использовании волн Лэмба

Для получения дополнительных данных о процессах деформации и разрушения использовали метод корреляции цифровых изображений (DIC), который используется для отслеживания и идентификации изменений на цифровых изображениях. Использование метода DIC в процессе механических испытаний позволяет измерить деформации на поверхности и построить поля их распределений.

Результаты экспериментов и обсуждение.

В данной работе были проведены статические и циклические испытания на одноосное растяжение образцов из алюминиевого сплава В96Ц3Т12, в течение которых регистрировали данные оптического метода корреляции цифровых изображений и ультразвуковой методики с использованием волн Лэмба. На рисунке 3 видно, что согласно диаграмме σ - ϵ предел прочности сплава В96Ц3Т12 составил 631,2 МПа.

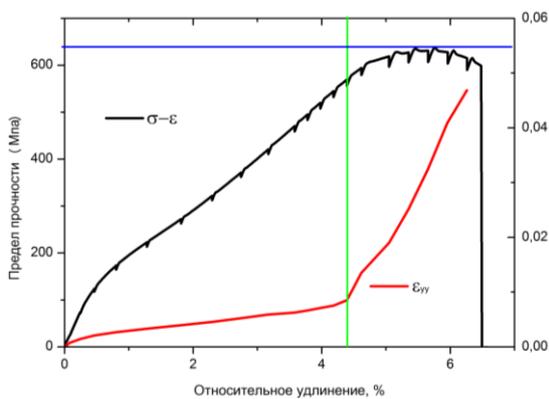


Рисунок 3 – Диаграмма нагружения

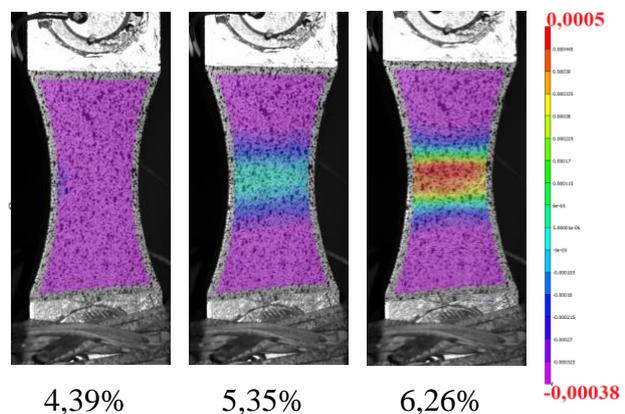


Рисунок 4 – Поля распределений деформаций ϵ_{yy} при статическом нагружении

На участке от 0 до 4,3% находится зона упругой деформации, а после – зона пластической. В довольно хорошем соответствии диаграмме нагружения находятся данные оптического метода корреляции цифровых изображений. Видно, что начало роста графика ϵ_{yy} соответствует началу пластической деформации на диаграмме нагружения. На рисунке 3 также приведены поля распределения продольной деформации ϵ_{yy} .

На рисунке 4 приведены поля распределения деформаций ϵ_{yy} , на различных стадиях статического испытания. Зона интенсивной пластической деформации находится в зоне воздействия максимальных напряжений в области минимального сечения. Кроме того видно, что в области вдали от зоны локализации пластической деформации материал образца находится под воздействием упругих напряжений. Вертикальной зеленой линией обозначена точка соответствующая перегибу как кривой σ - ϵ , так и графика ϵ_{yy} . Далее она будет обозначена на графиках информативных параметров ультразвукового метода.

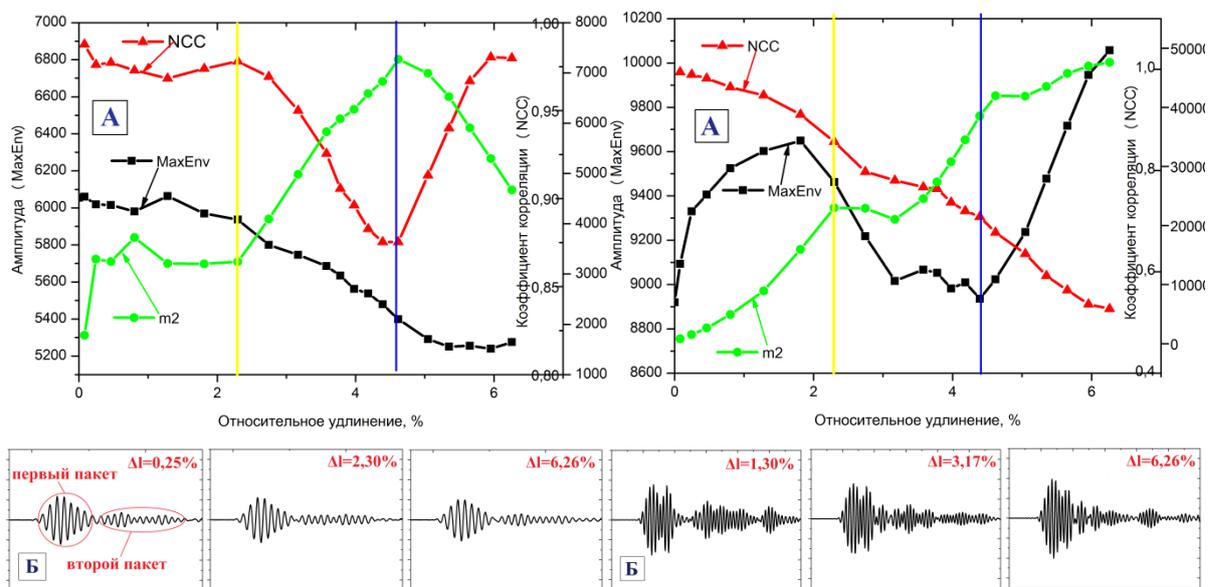


Рисунок 5 – Результаты статических экспериментов: (а) график зависимости информативных параметров от Δl при частоте 60 кГц; (б) формы сигналов при разных Δl

Рисунок 6 – Результаты статических экспериментов: (а) график зависимости информативных параметров от Δl при частоте 350 кГц; (б) формы сигналов при разных Δl

Из рисунка 5 (а) видно, что при использовании частоты генерации ультразвука 60 кГц амплитуда проходящего сигнала практически монотонно убывает (черная линия, MaxEnv), вплоть до разрушения. Нормированный коэффициент корреляции (и статический момент m2), характеризующий отличия форм начального и каждого последующего сигнала, убывает (m2 возрастает) вплоть до начала пластической деформации, а затем происходит изменение тренда на противоположный. Первый пакет (область расчета максимума огибающей), второй пакет – «хвостовая» часть сигнала не участвующая в расчете амплитуды, но влияющая на корреляцию и статический момент.

Для высокой частоты 350 кГц (рисунок 6 (а)) характерно монотонное снижение (или возрастание для статического момента m2) для нормированного коэффициента корреляции в течение всего нагружения. В то время как амплитуда имеет достаточно неоднозначный характер изменения (растет, падает, растет), что объясняется, прежде всего, очень сложным механизмом распространения волн Лэмба, на конечную амплитуду которых могут влиять различные переотражения и наложения симметричной и антисимметричной мод. В данном случае расчет максимума огибающей проводился по всему сигналу, а на рисунке 6 (б) видно, что вслед за первым

ми пакетом (симметричная мода S_0 с высокой скоростью распространения) следует второй пакет (предположительно антисимметричная мода A_0), который в интервале удлинений от 0,5 до 2,5 % больше по амплитуде. Необходимо скорректировать алгоритм расчета, чтобы иметь возможность выбирать локальный экстремум для расчета максимума огибающей.

Для обеих частот видно, изменение «хвостовой части» сигналов в течение испытаний намного более существенно, нежели первого пакета. Данные изменения никаким образом не могут быть зарегистрированы с помощью расчета максимума огибающей, но хорошо описываются численно с помощью расчета коэффициента корреляции и статического момента (данные параметры изменяются очень значительно).

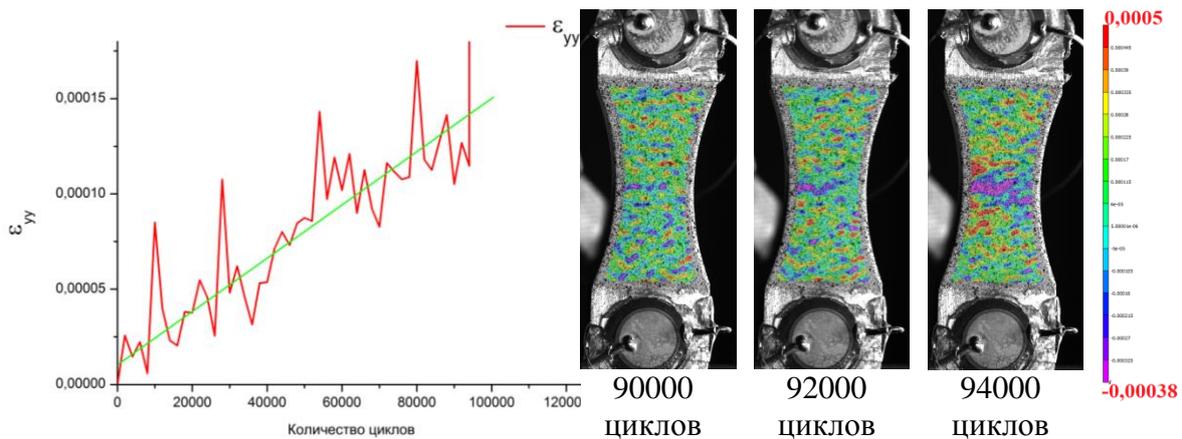


Рисунок 7 – кривая DIC для усталости

Рисунок 8 – Поля распределения деформации ϵ_{yy} при циклическом нагружении

На рисунке 7 приведены данные, полученные с помощью оптического метода в процессе циклических испытаний: слева кривая по DIC, справа поля распределений деформаций. На рисунке 7 видно, что кривая ϵ_{yy} имеет пилообразную форму с линейно растущим трендом, что связано с очень небольшой величиной прироста остаточной деформации (регистрация изображений в процессе циклических испытаний проводили при одинаковых нагрузках, поэтому влияние на ϵ_{yy} может оказать либо остаточная пластическая деформация, либо раскрытие трещины). Однако расчет параметра ϵ_{yy} проводили по всему сечению образца (рисунок 8), что в результате осреднения небольшой области растяжения-сжатия приводило к получению аналогичных значений ϵ_{yy} даже с большим раскрытием трещины перед разрушением.

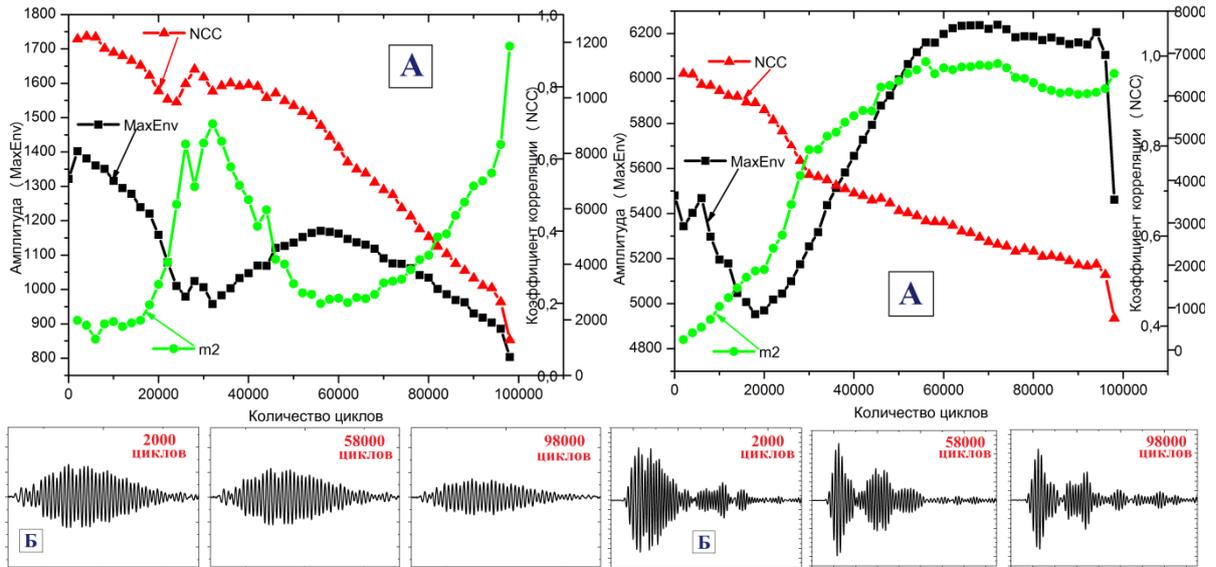


Рисунок 9 – Результаты циклических испытаний: (а) графики информативных параметров для частоты 60 кГц; (б) формы сигналов при разных наработках, циклов

Рисунок 10 – Результаты циклических испытаний: (а) графики информативных параметров для частоты 350 кГц; (б) формы сигналов при разных наработках, циклов

Из рисунка 9 (а) видно, что при частоте генерации ультразвука 60 кГц нормированный коэффициент корреляции снижается, вплоть до разрушения. Амплитуда проходящего сигнала значительно снижается при сравнении первого и последнего (перед разрушением) сигналов. Однако в середине видно сначала снижение, а затем резкое увеличение значения амплитуды. Сигналы данной частоты могут «почувствовать» зарождение и рост усталостной трещины в сечении образца.

На рисунке 10 (а) видно неоднозначное поведение амплитуды – сначала падает, а потом происходит подъем и постоянное значение на участке перед разрушением. Нормированный коэффициент корреляции равномерно снижается до самого разрушения. На последнем интервале характерно скачкообразное изменение всех параметров, это связано со значительным ростом размера усталостной трещины.

Выводы

Установлено, что в процессе статических испытаний при использовании частоты ультразвука 60 кГц амплитуда проходящего сигнала практически монотонно убывает, вплоть до разрушения. Нормированный коэффициент корреляции (и статический момент m_2), характеризующий отличия форм начального и каждого последующего сигнала, убывают (m_2 возрастает) вплоть до начала пластической деформации, а затем происходит изменение тренда на противоположный.

Для высокой частоты (350 кГц) характерно монотонное снижение (и возрастание) для нормированного коэффициента корреляции (и статического момента m_2) в течение всего нагружения. В то время как амплитуда имеет достаточно неоднозначный характер изменения (растет, падает, растет), что объясняется, прежде всего, очень сложным механизмом распространения волн Лэмба, на конечную амплитуду которых могут влиять различные переотражения и наложения симметричной и антисимметричной мод.

Для циклических испытаний, как для низкой, так и для высокой частоты сигналов, характерно значительное снижение нормированного коэффициента корреляции. Для низкой частоты сигнала характерно значительное снижение амплитуды при сравнении первого и последнего (перед разрушением) сигналов. Однако в середине испытания наблюдается область быстрого снижения, а затем роста амплитуды. В общем случае можно сделать заключение, что сигналы данной частоты позволяют почувствовать усталостную трещину в образце (прежде всего по амплитуде и коэффициенту корреляции). Для высокой частоты характерно неоднозначное поведение амплитуды зарегистрированных сигналов по испытанию (снижение, дальше большой рост и постоянное значение на последнем участке). Однако следует отметить резкое падение амплитуды непосредственно перед разрушением.

Список литературы

1. P.J. Schubel, R.J. Crossley, E.K.G. Boateng, J.R. Hutchinson // Renewable Energy – 2013 – V.51 – P.113-123.
2. Бурков М.В., Панин С.В., Бяков А.В., Любутин П.С., Еремин А.В., Применение ультразвукового метода с использованием волн Лэмба для контроля состояния алюминиевых сплавов. Ч. 2. Циклические механические испытания // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015 – Т. 58 – № 6-2 – С. 31-35.
3. Eremin A, Vyakov A, Panin, S Burkov M, Lyubutin P and Sunder R, Application of a Lamb waves based technique for structural health monitoring of GFRP under cyclic loading // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 124 (2016) 012084

ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО РАЗМЕРАМ И ЭНЕРГИЮ ВНУТРЕННИХ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА СТАЛИ 12ГБА

Д. А. ШУМАКОВА¹, П. В. КУЗНЕЦОВ^{1,2}, Т. В. РАХМАТУЛИНА²

¹Томский политехнический университет

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: dashad@tpu.ru

AN INFLUENCE OF GRAIN REFINEMENT METHOD ON GRAIN SIZE AND INTERNAL INTERFACE ENERGY DISTRIBUTIONS OF STEEL 12GBA

D. A. SHUMAKOVA¹, P. V. KUZNETSOV^{1,2}, T. V. RAHMATULINA²

¹Tomsk Polytechnic University

²Institute of Strength Physics and Materials Science

E-mail: dashad@tpu.ru

Abstract. Grain-subgrain structure sizes and internal interface energy of steel 12 GBA were estimated in three structural states: coarse grained, after multi-axes isothermal forging and warm rolling using scanning tunnel microscopy. Cumulative distribution function of grain boundary energy showed a shift to low energies after multi-axes forging and warm rolling. An energy shift could be explained by low-angle boundary share increase and impurity redistribution.