

# РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ СПЕКТРА НЕСТАЦИОНАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

А.А. ЛУКАШЕВИЧ

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАНУ. 01014, г. Киев, ул. Тимирязевская, 2. E-mail: ips@ipp.kiev.ua

Определены временные параметры составляющих спектра нестационарного нагружения сварных соединений углеродистой стали, имеющие доминирующее влияние на интенсивность усталостного повреждения конструктивных элементов железнодорожных локомотивов. Предложен новый метод анализа результатов тензометрического измерения эволюции неоднородности деформаций в зоне термического влияния сварного соединения в процессе развития усталостной трещины. Установлено, что в каждом блоке нагрузок, на определенных частотах существуют деформации, которые являются доминирующими при усталостном разрушении. Библиогр. 12, рис. 5.

*Ключевые слова:* нестационарные нагрузки, угловое сварное соединение углеродистой стали, рост усталостной трещины, тензометрический нуль-индикаторный метод, частотно-временной анализ.

Детали и элементы конструкции транспортных машин при эксплуатации подвергаются воздействию нестационарной нагрузки, что обусловлено многими эксплуатационными факторами [1] (рис. 1).

Частота колебаний элементов механических конструкций экипажных частей железнодорожного подвижного состава находится в диапазоне от 1,5 до 110 Гц [2]. Сложный характер силового воздействия дорожного полотна на экипажные части обусловлен тем, что рамы тележек, рамы кузовов, несущие кузова являются колебательными системами со многими степенями свободы, а их возбуждающие факторы носят случайный характер. Длительная эксплуатация сопровождается возникновением усталостных повреждений в виде трещин, в частности, в сварном соединении, что делает металл этой зоны наиболее уязвимым к разрушению [3].

Целью работы является создание дискретного метода определения спектра частот колебаний, которые коррелируют с максимальными амплитудами деформаций подконтрольных участков поверхностей исследуемого элемента конструкций или образца при их нестационарном нагружении.

**Объект и методика испытаний.** В работе приведены результаты испытаний на консольный изгиб в режиме нестационарного нагружения лабораторных образцов углеродистой стали Ст3сп [4], с угловыми сварными соединениями. Образцы корсетного типа размером 3×60×165мм изготовлены согласно требованиям нормативного документа [5], с угловым сварным соединением [6] и концентратором (рис. 2).

Размеры механического концентратора, которые определены экспериментально (вид А на рис. 2), составляют:  $a' = 570,4^{+141,6}_{-190,4}$  мкм;  $b' = 309,4^{+251,6}_{-104,4}$  мкм;  $P_1$  — направление действия силы на образец, — направление перемещения стола вибростенда; П — переключатель; ПК — персональный компьютер. Образец 1 с грузом 3 устанавливался на кронштейн 2 (рис. 2).

На модернизированном вибростенде ВЕДС-400А [7] в образцах около концентратора выращивали усталостную трещину до размера 3...7 мм при номинальных напряжениях консольного изгиба  $\sigma_a = 88...98$  МПа.

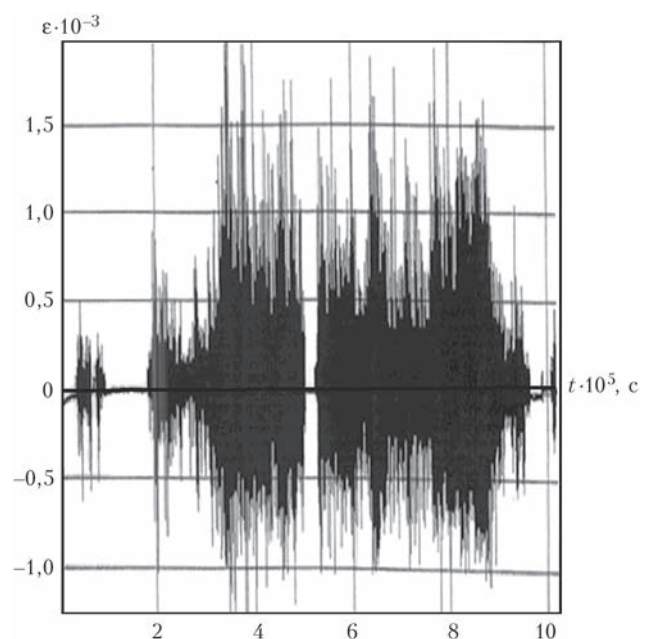


Рис. 1. Спектр относительных амплитуд деформаций элемента конструкции локомотива ДСЗ во время его эксплуатации

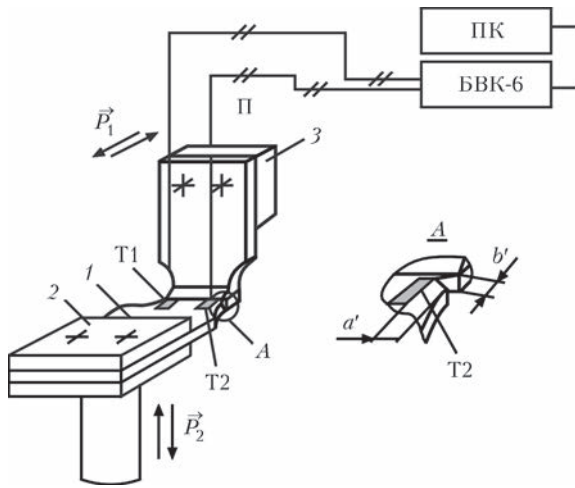


Рис. 2. Схема нагружения образца на вибростенде (обозначения см. в тексте)

Спектр нагружения образца, который соответствует характерному спектру частот циклов в диапазоне 20... 50 Гц (рис. 1), разделен программно на три блока разной продолжительности каждый. Нагружение создается путем периодического перемещения вибростола с амплитудой ± 8 мм в определенном диапазоне частот.

Амплитуда деформаций поверхности образца регистрировалась тензорезисторами Т1 и Т2. С целью расширения динамического диапазона чувствительности измерительной системы один из резисторов Т2 расположен решеткой к вершине концентратора напряжений (вид А на рис. 2). Рост усталостной трещины в сварном соединении регистрировали тензометрическим нуль-индикаторным методом путем измерения тензорезисторами Т1 и Т2 разницы амплитуд деформаций [8]. Для повышения чувствительности в системе установлен усилитель сигнала к  $U_{max} = 1500$  мВ. Обработку результатов измерений осуществляли

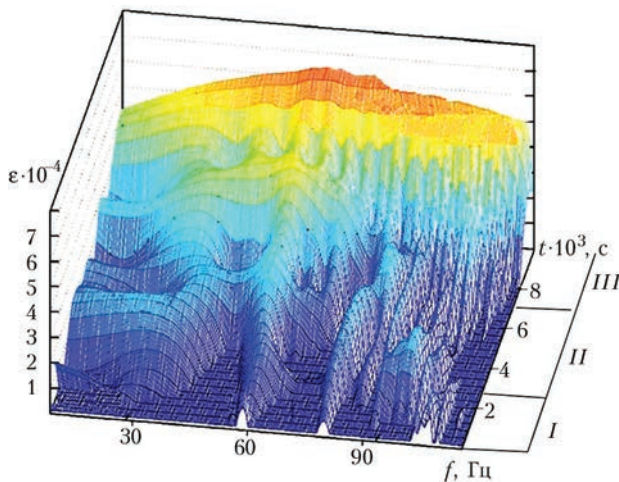


Рис. 3. Объемный вейвлет-спектр в диапазоне частот 20...150 Гц вынужденных колебаний углового образца стали Ст3сп (I, II, III — промежутки времени, которые соответствуют определенным блокам деформаций)

с помощью персонального компьютера (ПК), присоединенного к прибору БВК-6 [9].

Результаты измерений деформаций хранились на флэш-карте формата SD. Полученная информация в виде отдельных файлов записана с помощью специальной программы, созданной на базе LABVIEW [10]. Количество блоков полученной информации обусловлено объемом оперативной памяти компьютера. После ввода в компьютер полученных экспериментальных данных программа отображает на экране осциллограммы зависимостей амплитуд деформаций от времени. Программа работает с частотой распознавания информации 4096 точек/с. На монитор компьютера выводились осциллограммы колебаний и значения амплитуд деформаций образца с частотой дискретизации 2048 точек/с. Количество блоков, в которых размещена информация относительно значений деформаций, измеренных в дискретных точках поверхности образца, высчитывается по формуле:

$$N_6 = N_{инф} / (N_{точ} / 2), \quad (1)$$

где  $N_6$  — количество блоков в данном объеме информации;  $N_{инф}$  — количество записанной информации полной выборки;  $N_{точ}$  — количество амплитуд максимальной деформации (определяется по количеству точек в одном блоке информации).

**Анализ полученных результатов.** Разница амплитуд  $\Delta U$  сигналов, полученных с помощью тензорезисторов Т1 и Т2, вычислена по формуле:

$$\Delta U = U_{T2} - U_{T1}, \quad (2)$$

где  $U_{T2}$ ,  $U_{T1}$  — падение электрического напряжения на тензорезисторах Т2, Т1.

При этом разница относительных деформаций  $\Delta \epsilon$  составляла:

$$\Delta \epsilon = \Delta U M_\epsilon, \quad (3)$$

где  $M_\epsilon$  — масштабный коэффициент, равный  $10^{-6} \text{ мВ}^{-1}$ .

Спектральный анализ блоков разниц относительных деформаций осуществлен методом вейвлет-преобразования [11].

Вейвлет-преобразование сигнала  $\Delta \epsilon(t)$  имеет вид [11]:

$$[W_\psi \Delta \epsilon](\tau, s) = \int_{-\infty}^{\infty} \Delta \epsilon(t) \psi_{\tau, s}^*(t) dt, \quad (4)$$

где  $\tau$  — сдвиг по времени;  $s$  — масштаб;  $\psi_{\tau, s}^*(t)$  — материнский вейвлет Гаусса [12]. Принято:  $\tau = 250$  мс,  $s = (0...150) \text{ Гц}^{-1}$ .

Материнский вейвлет — это функция, которая является прототипом сигнала всех масштабов  $s$ , генерируемых при вейвлет-преобразовании  $[W_\psi \Delta \epsilon](\tau, s)$ , и подбирается оператором отдельно для каждой фазы временного сдвига периода колебания, согласовывая с масштабным и времен-

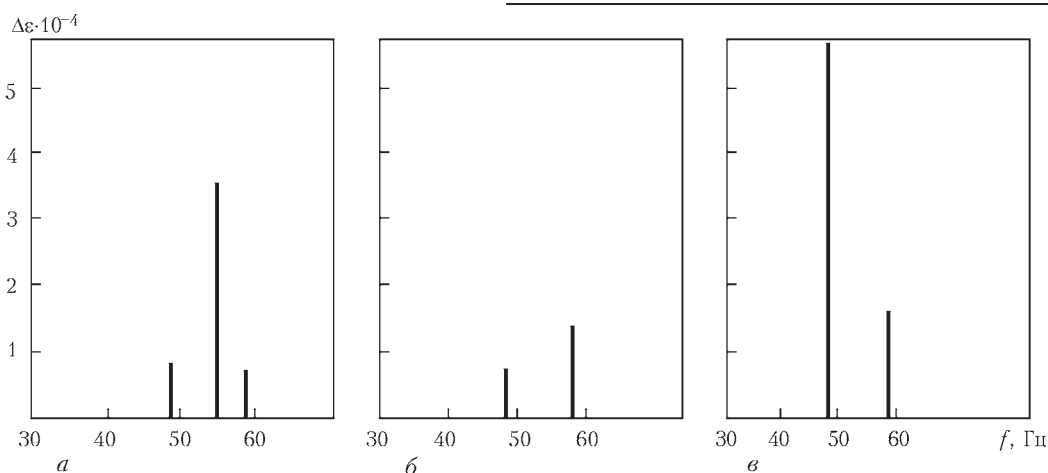


Рис. 4. Зависимость разницы амплитуды деформации от частоты нагружения образца в блоках I (а); II (б); III (в)

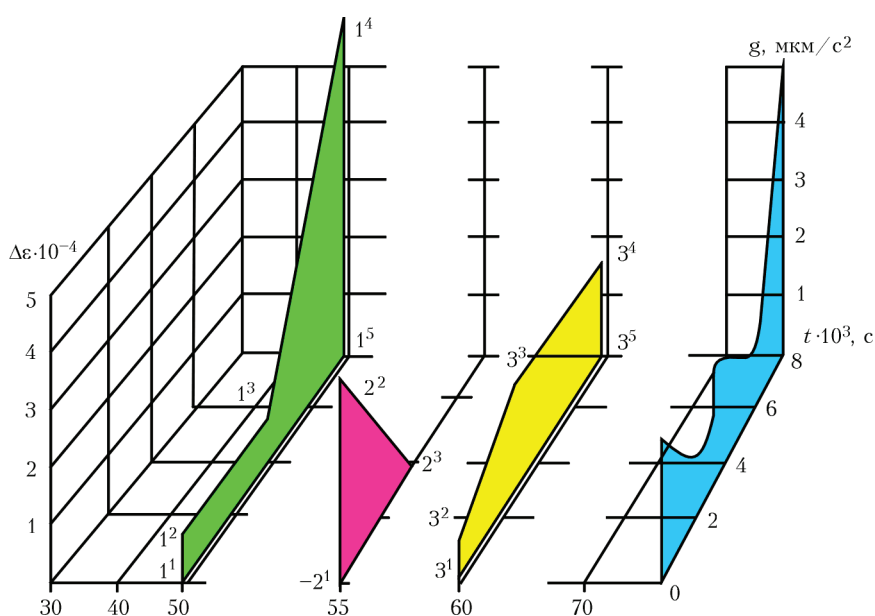


Рис. 5. Распределение во времени в разных блоках частотно-временного анализа доминирующих амплитуд колебаний образца

ным коэффициентами наибольшее сходство сигнала выбранной материнской функции. Наиболее распространенные материнские вейвлеты конструируются на основе производных функции Гаусса [12]:

$$\Psi_{\tau,s}^*(t) = \exp(-t/2). \quad (5)$$

Построение диаграммы распределения во времени частот амплитудного спектра деформаций осуществляли с помощью соответствующего программного обеспечения [10] (рис. 3).

На рис. 4 приведена зависимость разниц амплитуд деформации  $\Delta \epsilon$  поверхности образца от частоты нагрузки  $f$ , которые влияют на усталостное разрушение.

Распределение частот сигналов, при которых регистрировались разницы амплитуд деформаций поверхности образца, составила 48, 55 и 58 Гц. Рост трещины происходит при частотах 48, 55 и 58 Гц на I блоке деформаций и при 48 и 58 Гц на II и III блоках соответственно. Выявлено, что для

каждого блока существуют частоты, для которых амплитуда деформаций образца в виде всплеска (wavelet) являются доминирующими в процессе усталостного разрушения.

На рис. 5 в трехкоординатных измерениях приведены распределения во времени циклов деформирования с определенными частотами. В частности, для I блока — 55 Гц (плоскость  $2^1 - 2^2 - 2^3$ ), для II блока — 58 Гц (плоскость  $3^1 - 3^2 - 3^3 - 3^4 - 3^5$ ), для III блока — 48 Гц (плоскость  $1^3 - 1^4 - 1^5$ ). Трехмерное распределение частот колебаний образца во времени для блоков частотно-фазового анализа различий деформаций  $\Delta \epsilon$  коррелируются с распределением ускорений  $g$ .

Представление сигнала в трехкоординатном виде характеризует продолжительность во времени процесса нестационарного нагружения по действию амплитуд деформаций резонансных всплесков с определенными частотами и ускорениями.



**Выводы**

1. Определена на модели элемента сварной конструкции корреляция между максимальными амплитудами спектра частот и повреждающими всплесками разниц амплитуды деформаций поверхности углового образца.

2. Предложен экспериментально-расчетный подход к определению доминирующих деформаций на основе анализа спектра частот нестационарной нагрузки, что создает новые возможности для совершенствования методов расчета ресурса сварных элементов конструкций транспортных машин.

1. *Обобщение* передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса. I изд. / Дж. Харрис, С.М. Захаров, Дж. Лангрэн и др. – М.: Ин-текст, 2002. – 408 с.
2. *Басов Г.Г., Фалалеев Н.И., Яцько С.И.* Современные методы проектирования экипажных частей подвижного состава // *Залізничний транспорт України*. – 2004. – № 4. – С. 39–45.
3. *Махненко В.И.* Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. – Киев: Наук. думка, 2006. – 618 с.

4. *ДСТУ 2651–94.* Сталь вуглецева звичайної якості. [Чинний з 01.01.96]. – Київ: Держстандарт України, 1995. – 18 с.
5. *ГОСТ 25.502–79.* Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. [Действ. с 01.01.81]. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 25 с. (Межгосударственный стандарт).
6. *ГОСТ 5264–80.* Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. [Действ. с 01.07.81]. – М.: Стандартиформ, 2009. – 145 с. (Межгосударственный стандарт).
7. *Усталость металлов.* Влияние состояния поверхности и контактного взаимодействия. Т.2. / В.Т. Трощенко, Г.В. Цибанев, Б.А. Грязнов и др. – Киев: Ин-т пробл. прочноти им. Г.С. Писаренко НАН України, 2009. – 664 с.
8. *Assessment of the null-indicator method for the detection of fatigue cracks in structural elements / V.A. Leonets, A.O. Lukashevych, V.O. Degtyarev et al. // Strength of Materials.* – 2012. – 44, №3. – P. 325–332.
9. *Система динамико-прочностных испытаний несущих конструкций подвижного состава и верхнего строения пути при повышенных скоростях движения / О.Д. Токарев, В.А. Леонет, А.А. Леонет и др. // Ж.-д транспорт мира.* – 2002. – № 9. – С. 73–76.
10. *Трэвис Дж., Кринг Дж.* LabVIEW для всех. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 880 с.
11. *Астафьева Н.М.* Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // *Успехи физических наук*. – 1996. – № 11. – С. 1145–1170.
12. *Дьяков В.П.* Вейвлет. От теории к практике. – М.: Солон. – Р., 2002. – 448 с.

Поступила в редакцию 20.01.2016

**Международная конференция**  
**«СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ»**  
 13–15 июня 2016 г.  
 Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины

**Тематика конференции:**

- ◆ электронно-лучевая сварка
- ◆ лазерная сварка
- ◆ гибридные процессы сварки
- ◆ сварка трением с перемешиванием
- ◆ контактно-стыковая сварка высокопрочных сталей
- ◆ сварка дугой, вращающейся в магнитном поле
- ◆ 3D адитивные технологии, базирующиеся на сварочных процессах

**Контрольные даты**

- ◆ Подача заявок для участия и отправка доклада до 15.03.2016
- ◆ Рассылка программы конференции до 15.04.2016
- ◆ Оплата организационного взноса до 14.06.2016

**Организационный комитет:**  
 Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины  
 03680, г. Киев, ул. Боженко 11, тел./факс: +38(044) 200-82-77  
 E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua), [patonpublishinghouse@gmail.com](mailto:patonpublishinghouse@gmail.com)  
[www.pwi-scientists.com/rus/modernweld2016](http://www.pwi-scientists.com/rus/modernweld2016)  
[www.patonpublishinghouse.com](http://www.patonpublishinghouse.com)