

УДК 620.178.3

В.Е. Десятников, Н.А. Миронов, С.Н. Пичков, А.Ю. Сидоров

**МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ  
УСТАЛОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ  
В УСЛОВИЯХ МНОГОЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ**

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова

В работе представлено исследование сопротивления усталостному разрушению стали 08X18H10T, широко используемой при создании оборудования и элементов судовых ядерных энергетических установок (ЯЭУ): трубопроводных систем, ГЦН, парогенераторов, арматуры и др. Проведен численный анализ с использованием метода конечных элементов для определения оптимальной формы образца и расчета первой собственной частоты. Получены значения числа циклов до разрушения образцов в зависимости от амплитуды деформаций при симметричном цикле нагружения с коэффициентом асимметрии  $R = -1$ , построена кривая многоциклового усталости, используемая при расчетах прочности и ресурса оборудования ЯЭУ. Приведена методика построения кривой многоциклового усталости.

*Ключевые слова:* атомное машиностроение; численное моделирование; собственные частоты; полные деформации; многоцикловая усталость (МнЦУ); образец из стали 08X18H10T; симметричный цикл нагружения.

В современном атомном машиностроении выдвигаются жесткие требования по металлоемкости конструкций, наряду с обоснованием их ресурса на 60 и более лет. Поскольку современные вычислительные мощности позволяют избежать высоких затрат на проведение экспериментальных исследований при обосновании прочности конструкций, данные требования ведут к более детальному изучению и численному моделированию механизмов деградации материалов конструктивных элементов оборудования и трубопроводных систем реакторных установок [1]. Вместе с тем, при решении задач прочности, используя высокопроизводительное численное моделирование процессов деформирования и расчета ресурса конструкций невозможно обходиться без фактических данных по свойствам конструкционным материалам. Определенную сложность в данный вопрос вносит то, что для конструкционных сталей и сплавов имеется существенный разброс по ресурсным характеристикам, вследствие технологических особенностей изготовления полуфабрикатов материалов (прутки, поковки и др.) Соответственно, необходимы современные методы определения ресурсных характеристик сталей и сплавов, которые будут отвечать таким требованиям как: достоверность получаемых характеристик, минимальные временные затраты, представительность исследований.

**Методика проведения исследований**

В данной работе рассматриваются результаты исследований по определению ресурсных характеристик конструкционных материалов при многоцикловом нагружении на примере конструкционной стали аустенитного класса 08X18H10T.

В исследованиях использованы образцы, изготовленные из трубы 60x5 стали 08X18H10T. Проведение исследований по построению кривой многоциклового усталости проводилось в два этапа:

- на первом этапе проводился численный анализ для определения оптимальной формы образцов и расчету первой собственной частоты. Критерием оптимальной формы выступало равномерное распределение полей напряжений и деформаций в наиболее нагруженной области образца;

- проведение экспериментальных исследований по построению кривой многоцикло-вой усталости.

Выбор формы образца осуществлялся с помощью метода конечных элементов [2], исходя из следующих требований:

- 1) размеры образца: длина  $\leq 70$  мм, ширина  $\leq 15$  мм, толщина  $\leq 4$  мм. Данные требования являются необходимыми для оптимального использования материала трубы;
- 2) определения вида и способа закрепления образца на актуаторе вибростенда для достижения наибольшей жесткости с минимальными массогабаритными характеристиками узла крепления;
- 3) максимальные полные продольные деформации при изгибе должны быть равномерно распределены по ширине и длине наиболее нагруженного участка образца в целях обеспечения нулевого градиента поверхностного распределения деформаций в месте установки тензодатчиков.

Были приняты следующие граничные условия при численном моделировании:

- верхняя и нижняя поверхности широкой части образца закреплены по всем направлениям;
- на консоли задано смещение в вертикальном направлении (ось  $Y$  рис. 2-4) равное 0,5 мм.

### Результаты

Результат выбора формы образца для испытаний на многоцикловую усталость после проведения численного моделирования приведен на рис. 1. Номинальная толщина образца принята равной 2 мм. Количество образцов для испытаний на МнЦУ, изготовленных из одной трубы составило 8 шт.

Результат распределения полных продольных деформаций по образцу приведен на рис. 2 (по длине образца, ось  $Z$ ). Из анализа результатов расчета следует, что центр зоны равномерно распределенных по ширине образца полных продольных деформаций находится на расстоянии 38 мм от широкой части образца, а длина этой зоны равна  $\approx 7,5$  мм. Таким образом, место наклейки тензорезистора (середина его рабочей базы) для проведения экспериментальных исследований расположено на расстоянии 38 мм от широкой части образца.

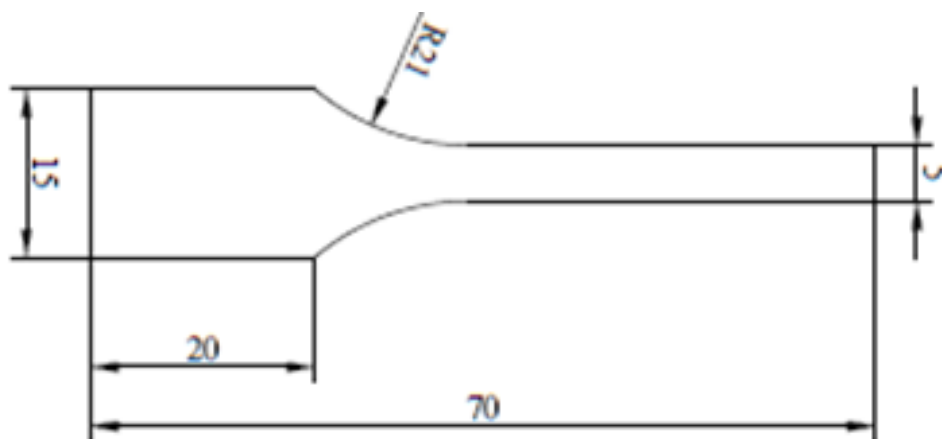


Рис. 1. Образец номинальной толщиной 2,0 мм для испытаний на МнЦУ

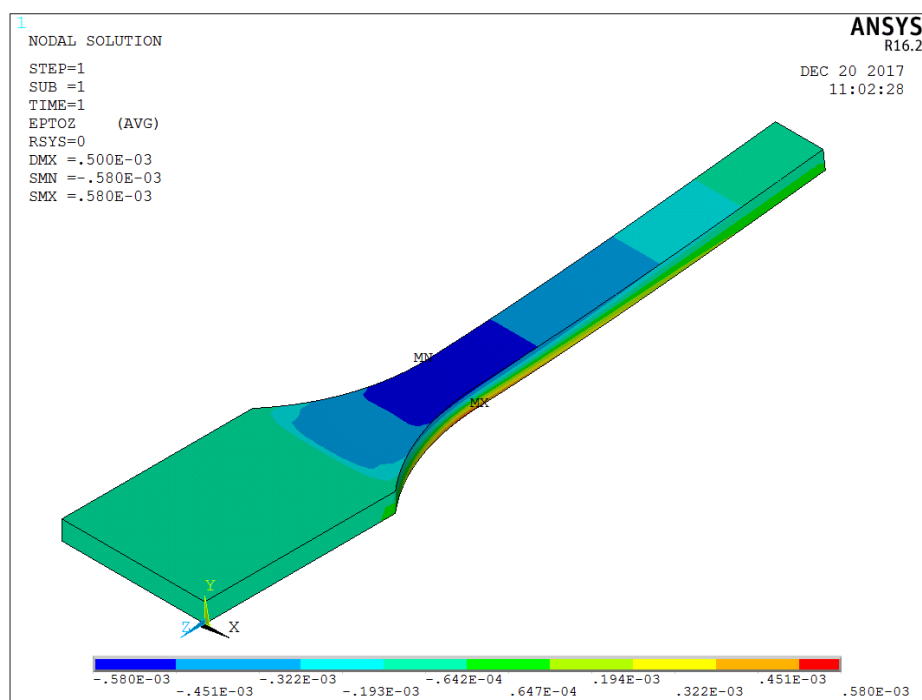


Рис. 2. Распределение полных продольных деформаций по образцу

Расчетное определение первой собственной частоты образца производилось методом конечно-элементного анализа (граничные условия: верхняя и нижняя поверхности широкой части образца закреплены по всем направлениям (рис 3)). В качестве конечного элемента был выбран SOLID 186. На консоли образца смоделирована присоединенная масса, имитирующая пьезоакселерометр (его установка необходима для фактического определения виброперемещений на консоли при проведении эксперимента). Диапазон расчетного определения первой собственной частоты составлял  $0 \div 500$  Гц. В указанном диапазоне первая собственная частота составила 111,9 Гц. Форма колебаний, соответствующая первой собственной частоте приведена на рис. 4.

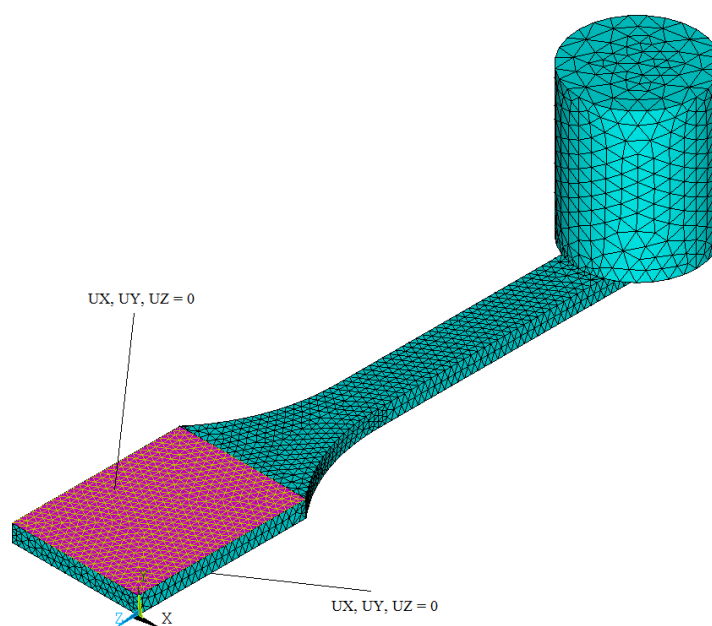


Рис. 3. Конечно-элементная модель образца для определения собственных частот

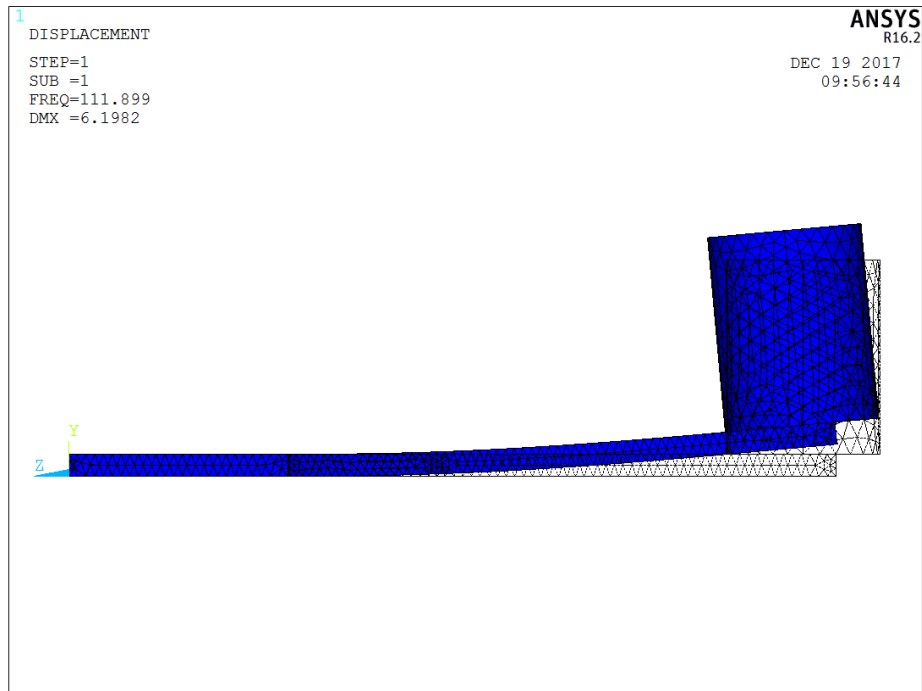


Рис. 4. Форма колебаний, соответствующая первой собственной частоте 111,9 Гц

Испытания на МнЦУ проводились на электродинамическом вибростенде при температуре 20 °С и симметричном циклическом нагружении с коэффициентом асимметрии  $R = -1$  (рис. 5).

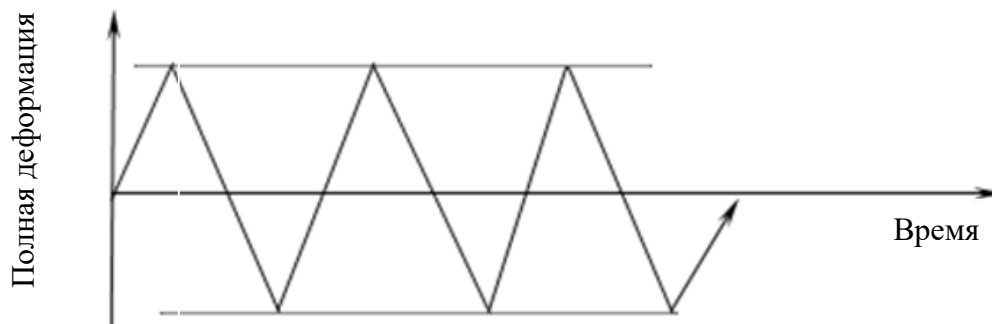


Рис. 5. Испытания на МнЦУ при симметричном цикле нагружения с коэффициентом асимметрии  $R = -1$

Для построения кривой усталости в диапазоне циклов от  $10^4$  до  $10^7$  определялись необходимые значения полных деформаций. Перед проведением испытаний на рабочую часть (определенную ранее с помощью численного анализа) каждого образца наклеивался тензорезистор FLA-5-11, после чего образцы устанавливались на вибростенд и снимались показания полных деформаций.

Регистрация показаний тензорезисторов осуществлялась универсальным тензометрическим усилителем MGCplus. Контроль необходимой амплитуды колебаний осуществлялся при помощи измерительной системы, состоящей из пьезоакселерометра типа AP40 и измерительно-вычислительного комплекса MIC-200 с усилителем заряда типа ME-908. Параметры нагружения определялись путем выполнения динамической тарировки, заключающейся в определении зависимости величины полных деформаций, возникающих в рабочей части образца, от амплитуды его колебаний. Тарировочная зависимость определялась для каждого образца.

Необходимая амплитуда полных деформаций достигалась в образцах методом вынужденных колебаний на резонансной частоте. Предварительно для каждого образца проводилось определение собственных частот (СЧ) методом «вынужденных колебаний» и методом начальных отклонений. Для определения СЧ по методу «вынужденных колебаний» на электродинамическом вибростенде, с установленным на нем образцом с присоединенной массой на краю (пьезоакселерометр для измерения виброперемещений), задавался режим «плавающей частоты» в необходимом частотном диапазоне (СЧ ранее была определена численным моделированием) с амплитудой колебаний вибростенда  $10 \text{ м/с}^2$ . Резонансом считалось увеличение амплитуды колебаний на краю (консоли) изделия в два и более раз относительно амплитуды на вибростенде.

Критерием возникновения трещины в образце являлось падение амплитуды колебаний на консоли при неизменной амплитуде вынужденных колебаний. Испытания завершались при возникновении излома в месте образования трещины (рис. 6).

По результатам испытаний на многоцикловую усталость получены значения числа циклов до разрушения образцов в зависимости от амплитуды деформаций при симметричном циклическом нагружении с коэффициентом асимметрии  $R = -1$ . Всего было испытано 8 образцов. Полученные данные приведены в табл. 1. По полученным данным построена кривая многоциклового усталости для стали 08X18H10T, приведенная на рис. 7, где точками обозначены экспериментальные данные.



Рис. 6. Фото образца №1 после испытаний

Таблица 1

Результаты испытаний образцов на многоцикловую усталость

Номер образца	Амплитуда полной деформации, %	Число циклов до разрушения	Фактическая толщина образца, мм
1	0,3304	50000	1,95
2	0,3258	58000	1,95
3	0,3200	83625	1,95
4	0,2786	446426	1,95
5	0,3021	138900	1,97
6	0,2810	402600	2,00
7	0,2548	4153680	2,01
8	0,2490	9262371	1,98

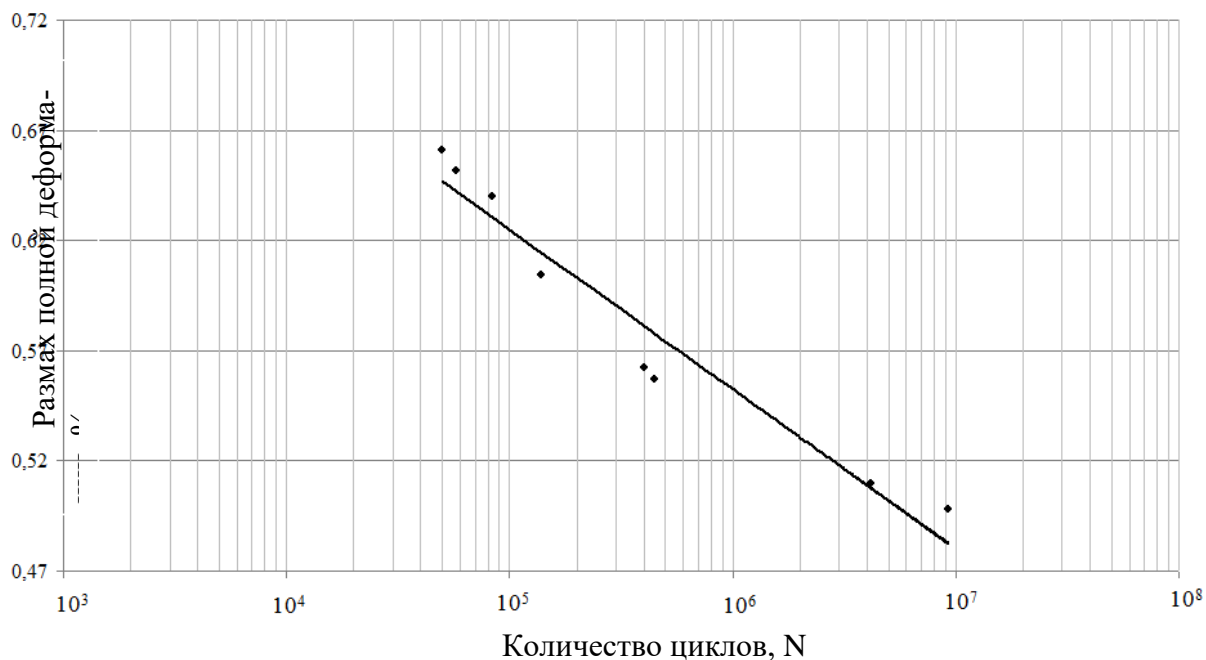


Рис. 7. Кривая многоциклового усталости при температуре 20 °С

### Заключение

1. Проведен численный анализ с использованием метода конечных элементов для определения оптимальной формы образца и расчету первой собственной частоты.
2. Численный анализ позволил:
  - определить способ закрепления образца на актюатор электродинамического вибростенда;
  - обеспечить равномерное распределение полных продольных деформаций при изгибе по ширине и длине наиболее нагруженного участка образца.
3. Получены значения числа циклов до разрушения образцов в зависимости от амплитуды деформаций при симметричном цикле нагружения с коэффициентом асимметрии  $R = -1$ .
4. Построена кривая многоциклового усталости, используемая при расчетах прочности и ресурса оборудования ЯЭУ.

### Библиографический список

1. Методы обоснования ресурса ядерных энергетических установок / Ф.М. Митенков, Ю.Г. Коротких, С.Н. Пичков и др. – М.: Машиностроение, 2007. – 448 с.
2. ANSYS Программа ANSYS. Регистрационный номер паспорта аттестации ПС № 327 от 18.04.13.

*Дата поступления  
в редакцию: 10.04.2019*

---

V.E. Desjatnikov, N.A. Mironov, S.N. Pichkov, A.J. Sidorov

**METHODICAL APPROACH TO DETERMINATION OF FATIGUE CHARACTERISTICS OF CONSTRUCTION STEELS IN CONDITIONS OF MULTICYCLE LOADING**

Afrikantov OKB Mechanical Engineering

**Purpose:** the article is devoted to researches of resistance to fatigue fracture of austenitic stainless steel (08Kh18N10T). This steel is widely used in the construction of equipment and elements of shipboard nuclear power facilities: pipeline systems, primary pumps, steam generators, valves, etc.

**Results:** a numerical analysis was carried out to determine the optimal shape of steel sample and to calculate the first natural frequency (used finite element method). The values of the number of cycles to failure of the steel samples was obtained depending on the amplitude of deformations with a symmetric loading cycle with an asymmetry factor  $R = -1$ . A curve of multicycle fatigue was constructed. The article presents a method for constructing a curve of multicycle fatigue.

**Conclusion:** A curve of multicycle fatigue is used for strength calculations and resource valuation of nuclear equipment.

*Key words:* nuclear mechanical engineering; numerical simulation; natural frequencies; full deformations; multicycle fatigue; steel sample; 08Kh18N10T; symmetric load cycle.