

## Моделирование многоциклового усталости материалов при двухчастотном и программном видах нагружения на разных масштабно-структурных уровнях

Научный руководитель – Завойчинская Элеонора Борисовна

*Панарин Игорь Юрьевич*

*Студент (специалист)*

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,  
Механико-математический факультет, Кафедра теории упругости, Москва, Россия  
E-mail: panarin\_igor@bk.ru

Двухчастотные многоцикловые нагружения являются эксплуатационными режимами различных элементов энергетического оборудования, авиационных двигателей и др. Элементы технологических трубопроводов и сосудов давления, резьбовые и сварные соединения часто находятся в условиях, когда на переменные напряжения по основной частоте, обусловленные изменениями режимов работы, накладываются напряжения с более высокими частотами от термических, вибрационных, гидроаэродинамических нагрузок. Это делает задачу моделирования усталостного разрушения при этих видах нагружений актуальной проблемой при оценке долговечности. Анализ результатов изучения физических закономерностей развития усталостного разрушения приводит к необходимости его рассматривать как разномасштабный случайный стадийный процесс прохождения определенных структурных уровней [3]. В данной работе предлагается использовать такой подход. Рассматривается двухчастотное одноосное нагружение на интервале времени  $\tau \in [0, t]$  вида:

$$\sigma = \sigma_{a1} \sin(\omega_1 \tau) + \sigma_{a2} \sin(\omega_2 \tau).$$

Также в настоящей работе в рамках системного подхода к оценке безопасности эксплуатации инженерных систем на стадиях проектирования и эксплуатации исследуется проблема конструкционного риска элемента при программных нагружениях следующего вида:  $\sigma(\tau) = \sigma_a \sin\left(\frac{2n\pi}{t}\tau\right) \sum_{q=1}^Q \sigma_{a,q} [h(t - t_{q-1}) - h(t - t_q)]$ . Определяются шесть масштабно-структурных уровней эволюции разрушения. Вводится понятие вероятности достижения дефектами предельного состояния. Функции  $Q_j = Q_j(t)$  представляются в виде интегрального оператора Гильберта-Шмидта на процессе нагружения. Для них строится система определяющих соотношений с выходом на кривую усталости по дефектам макроуровня и образованию макротрещины-лидера такого вида:

$$Q_j(t) = \alpha_j(t) \max_{z \in [0, t]} \varphi_j(z) \varphi_j(z) = \frac{2}{t} \int_0^t K(z, \tau) \sigma(\tau) d\tau.$$

Где функции  $\alpha_j = \alpha_j(t)$  определяются для каждого уровня и зависят от моментов времени начала образования дефектов всех предыдущих уровней, функции  $\varphi_j(z)$  разлагаются в ряд по собственным функциям ядра  $K = K(z, \tau)$ . При двухчастотном нагружении находятся две собственные функции и два собственных значения на каждом уровне. Собственные значения определяются по данным стандартных усталостных одночастотных испытаний с учетом результатов физических исследований по развитию хрупких трещин. Для 23-процентной углеродистой стали, стали 20 и стали 08X18H12T найдены собственные значения при нагружении. По модели для частных случаев отношения частот в зависимости от отношений амплитуд построены области развития дефектов каждого уровня и кривые усталости по уровням дефектности. Полученные теоретические результаты согласуются с известными опытными данными [1,2], а также с теорией накопления повреждений.

### Источники и литература

- 1) Трощенко В.Т., Хамаза Л.А. Усталость и циклическая неупругость аустенитной стали после длительной эксплуатации при различных режимах нагружения//Проблемы прочности, 2012 № 5 5-14.
- 2) Yamada T., Kitagawa S. Investigation of Fatigue Strength of Metals under Actual Service Loads // Bulletin of JSME. V.10. N 38 1967 245-252.
- 3) Zavoychinskaya E.B. A Stochastic Theory of Scale-Structural Fatigue and Structure Durability at Operational Loading//Understanding complex systems. 2021 71-89 DOI: 10.1007/978-3-030-50302-4.