

## **О ПАРАЛЛЕЛЬНОСТИ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТАЛЕЙ ПРИ АСИММЕТРИЧНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

Объективные условия современного рынка, диктующего повышенные требования к потребительским характеристикам изделия, обуславливают необходимость проектирования узлов с высокой весовой эффективностью, предполагающей их повышенную нагруженность. Происходит внедрение новых высокопрочных и технологичных материалов. Это диктует потребность использования разработчиками весьма точных и универсальных расчетных методик.

Такие методики должны быть физически обоснованными, достаточно простыми в реализации, применимыми для различных материалов, учитывать влияние программ и асимметрии нагружения на долговечность создаваемых изделий.

Подавляющая часть периодической нагрузки, действующей на элементы конструкции самолета, является асимметричной. При этом усталостная долговечность конструкционных сплавов и соединений существенно зависит от средних напряжений цикла нагружения.

Исследования данной проблемы имеют давнюю историю и охватывают до настоящего времени широкий спектр задач – от построения реологических моделей до детального экспериментального и теоретического рассмотрения процессов, связанных с циклическим деформированием, особенно в упругопластической области. Тем не менее начатые Гербером [1] и Гудменом [2] еще в начале прошлого века, судя по многочисленным публикациям, они до сих пор, несмотря на достигнутый существенный прогресс, не потеряли своей актуальности и продолжают в исследовательских центрах всего мира.

Особенно это касается вновь созданных специализированных материалов и сплавов. Следуя динамичным требованиям рынка и внутренним регламентам производителей, как правило и инвестирующих данные работы, в большинстве случаев публикуемые результаты исследований получены в условиях уже устоявшейся за последнее десятилетие процедуры. Они представляют собой практически стандартизованный набор данных о новых сплавах при регулярных циклических нагрузках и различной их асимметрии. Находят применение силовой и деформационные подходы к выбору уравнений кривых усталости. Наибольшее распространение в последние десятилетия получил деформационный подход в виде уравнений Коффина и Мэнсона, хотя при этом его и несколько ограниченно используют при расчетах долговечности в условиях сложных программ

нагружения и тем более при наличии существенных перегрузок. Не до конца решен вопрос и об учете асимметрии нагрузок.

Так, уже в 2004 г., проведя комплексный обзор [3] полученных данных о наиболее широко используемых конструкционных сталях, алюминиевых и титановых сплавах и проанализировав применимость по отношению к ним повсеместно используемых и постоянно уточняемых и модифицируемых зависимостей, основанных на уравнениях Мороу, Смита – Ватсона – Топпера (SWT), Валкера, известный авторитет в данной области Н. Даулинг был вынужден констатировать, что ни одна из них даже в условиях регулярного нагружения не может считаться полностью универсальной для всех материалов и нагрузок, а решения некоторых из уравнений в ряде случаев приводят просто к сомнительным результатам. Поэтому довольствоваться достигнутым и прекращать исследования в данном направлении, ограничившись применением известных уравнений в деформационной трактовке, еще преждевременно.

В подтверждение этому несколько позже на примере нержавеющей стали AISI304 было в очередной раз проиллюстрировано, что те же уравнения SWT, модифицированные для использования в виде определяющего параметра энергии пластического деформирования, т.е. энергетических критериев, обеспечивают существенно более высокую надежность результата [4].

Но при этом очевидно, что их использование при моделировании реальных процессов, предполагающих некое нерегулярное или программное нагружение, возможно и рационально исключительно в условиях установления функциональной связи между напряжениями и деформациями при упругопластическом циклическом деформировании, в том числе с учетом средних напряжений и характеристик упрочнения.

Поэтому задача об учете влияния асимметрии нагрузок на циклические деформационные характеристики при оценке усталостной долговечности, особенно при реализации современных эффективных энергетических критериев накопления повреждений [5], по-прежнему является одной из важнейших.

Для решения указанной задачи были проведены экспериментальные исследования влияния средних напряжений на величины средних значений амплитуд пластических деформаций. Усталостные испытания проведены на цилиндрических образцах диаметром 6 мм при мягком (stress-controlled) нагружении с частотой 15 Гц в диапазоне долговечностей от  $5 \cdot 10^3$  до  $2 \cdot 10^6$  циклов. Деформации при циклическом нагружении измеряли по методу петли гистерезиса специальными тензometрами с точностью до  $10^{-5}$  мм/мм. Закономерности циклического деформирования исследовали для широко используемых в авиастроении конструкционных сталей 30ХГСА

в термообработках, соответствующих  $\sigma_{\sigma} = 860$  МПа (HRC=22) и  $\sigma_{\sigma} = 1200$  МПа (HRC=35), 12ХН3А в термообработке, соответствующей  $\sigma_{\sigma} = 525$  МПа (HRC=14), и стали 45 в термообработке, соответствующей  $\sigma_{\sigma} = 730$  МПа (HRC=30). По результатам испытаний были получены кривые усталости, кинетические диаграммы деформирования (циклического разупрочнения – упрочнения) и основные диаграммы циклического деформирования (в литературе традиционно CSSC) при различных средних напряжениях цикла (рис. 1).

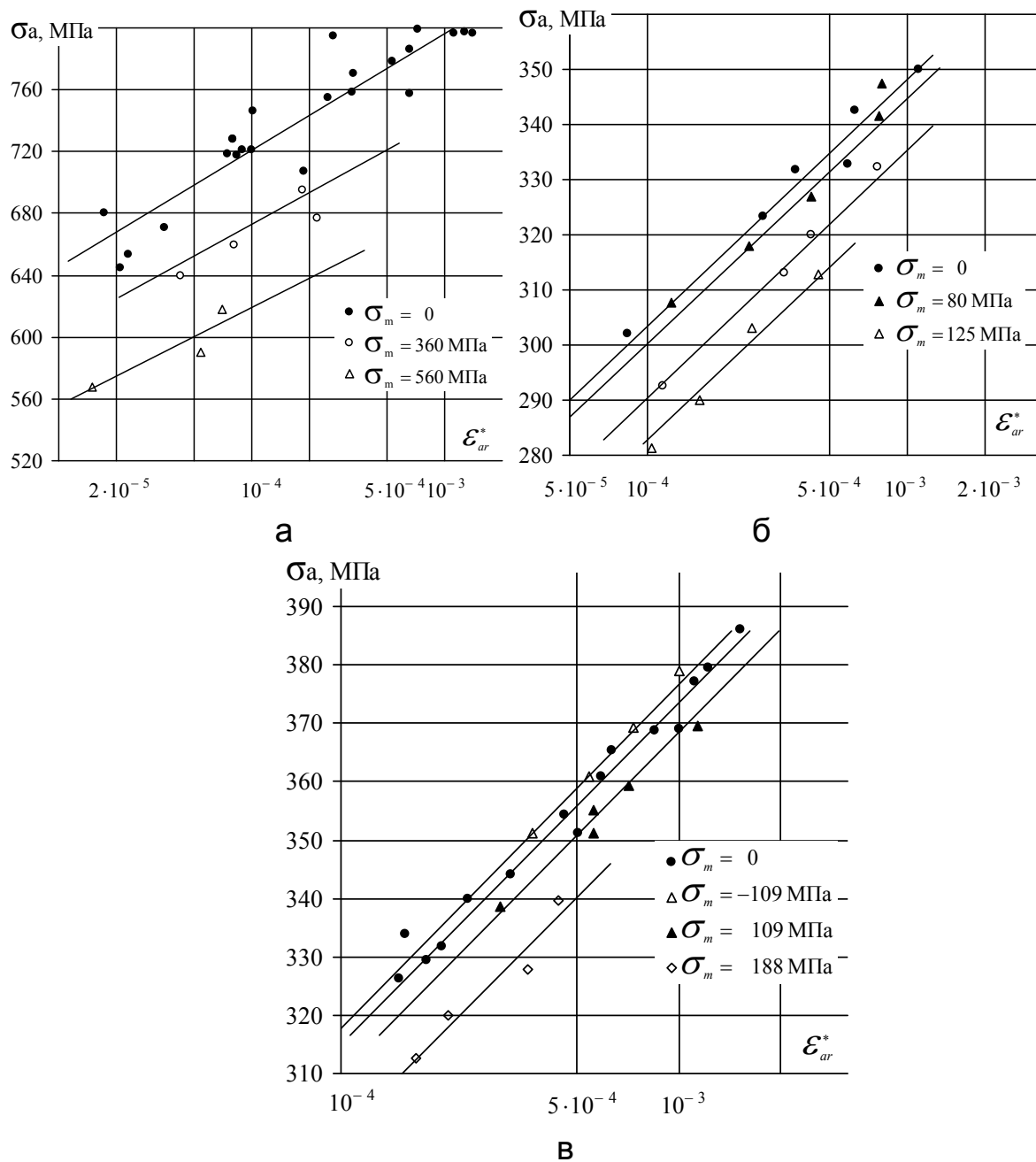


Рисунок 1 - Диаграммы циклического деформирования при различных средних напряжениях:  
 а – 30ХГСА (II), б – 12ХН3А, в – 45.

Анализ экспериментальных данных показал, что в области перехода от малоциклового к многоциклового и собственно многоциклового усталости с несущественными для практических расчетов отклонениями основные диаграммы циклического деформирования для различных средних напряжений представляют собой в логарифмических координатах параллельные прямые, из чего следует, что показатель циклического упрочнения  $m$  общепринятого [6] уравнения диаграммы

$$\varepsilon_{ar} = \left( \frac{\sigma_a}{K_m} \right)^m \quad (1)$$

не зависит от средних напряжений цикла нагрузок. Для коэффициента циклической прочности  $K_m$  в уравнении (1) на основании экспериментальных данных предложена зависимость от средних напряжений цикла  $\sigma_m$  в виде

$$K_m = K_{-1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_e} \right)^\omega \right] \quad (2)$$

где  $K_{-1}$  – коэффициент циклической прочности уравнения (1) при симметричном нагружении;  $\sigma_e$  – временный предел прочности, а  $\omega$  – параметр материала, изменяющийся в диапазоне значений 1.65 – 2.5.

Так, например, для сталей 30ХГСА (I) и 12ХНЗА  $\omega = 1.65$ , для 30ХГСА (II)  $\omega = 2.5$  и для стали 45  $\omega = 2$ .

Зависимость коэффициента циклической прочности от средних напряжений в виде уравнения (2) проиллюстрирована на рис. 2. Точками на графике отмечены экспериментально полученные значения.

Следует отметить, что полученные результаты не только не противоречат, но и косвенно подтверждаются данными экспериментальных исследований других авторов, опубликованных в [7] и посвященных определению зависимости параметров  $m$  и  $K$  аналогичного (1) уравнения от твердости на примере низкоуглеродистой легированной стали 42CrMo4 при различных термообработках. Известно [8,9], что изменение свойств пластичности и твердости при деформировании материалов, в том числе и при циклически изменяющейся нагрузке, имеют единую физическую природу и общность протекающих в кристаллической решетке структурных процессов, связанных в итоге с накоплением повреждений. Так, в [10] на примере стали 30ХГСНА экспериментально показано, что в процессе регулярного циклического нагружения и, соответственно, упрочнения-разупрочнения аналогично пластической деформации монотонно происходит изменение микротвердости.

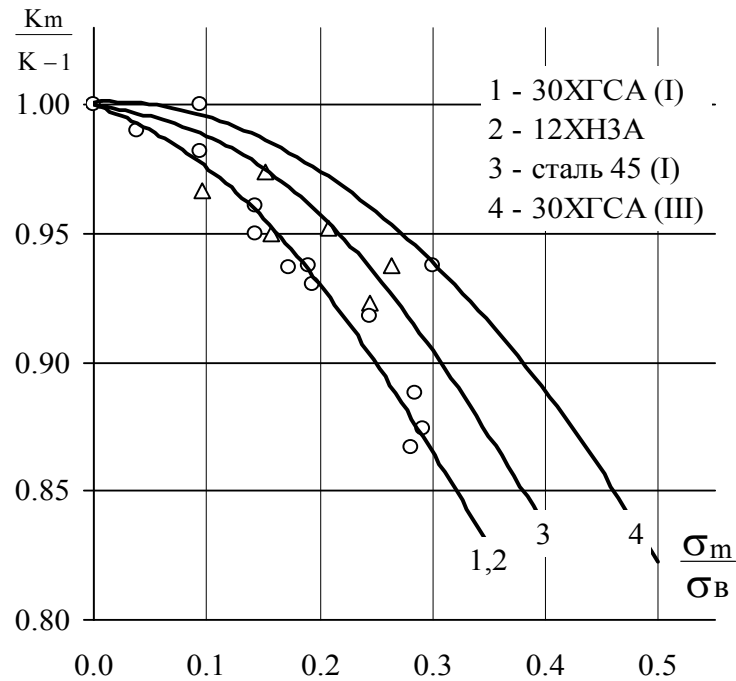


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента циклической прочности от средних напряжений

В [7] так же, как и в данной работе, было установлено, что показатель циклического упрочнения  $m$  не зависит от твердости и с достаточной точностью может быть принят постоянным. При этом коэффициент циклической прочности  $K$  аналогично хорошо соотносится с твердостью  $HВ$ , что проиллюстрировано на рис. 3.

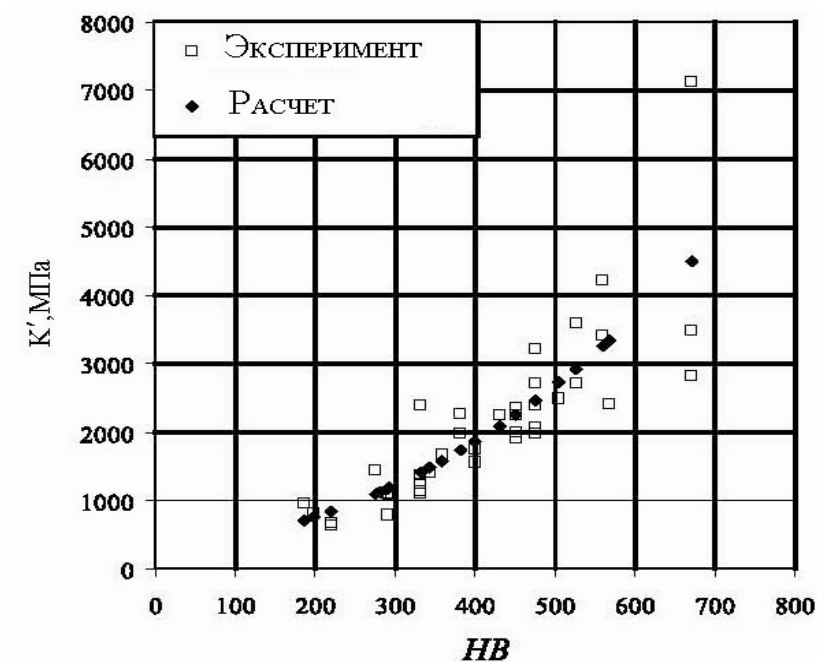


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента циклической прочности стали 42CrMo4 от твердости  $HВ$  [7]

В результате обработки данных эксперимента авторами работы [7] получена зависимость для коэффициента циклической прочности  $K$  в виде

$$K = 0.009 \cdot (HB)^2 + 0.1173 \cdot (HB) + 376.75. \quad (3)$$

Эта зависимость достаточно близка как по физическому смыслу, так и при проведении несложных преобразований по характеру аппроксимирующей кривой уравнения (2).

Таким образом, уравнение (1) с учетом (2) дает возможность определить величину пластической деформации за цикл нагрузок в зависимости от их амплитудных и средних значений, а применение энергетического критерия разрушения – находить число циклов до разрушения.

Установленная параллельность диаграмм циклического деформирования при различных средних напряжениях существенно упрощает решение и позволяет уменьшить объем необходимых экспериментальных исследований по определению циклических деформационных характеристик материала.

#### Список использованных источников

1. Mann, J. Y. The Historical Development of Research on the Fatigue of Materials and Structures / J. Y. Mann // The Journal of the Australian Institute of Metals. – Nov., 1958. - pp. 222 – 241.
2. Goodman, J. Mechanics Applied to Engineering / J. Goodman // Longmans, Green and Co., London, 1919 – pp. 631 – 636.
3. Norman E. Dowling, Mean Stress Effects in Stress-Life and Strain-Life Fatigue / E. Norman // 2nd SAE Brasil International Conference on Fatigue, June 2004, San Paulo, Brasil.
4. Yung-Chuan Chiou Experimental study of deformation behavior and fatigue life of AISI 304 stainless steel under an asymmetric cyclic loading // Journal of Marine Science and Technology, 2010. – Vol. 18. – No. 1. – pp. 122 – 129.
5. Трощенко, В.Т. Энергетический критерий усталостного разрушения [Текст] / В.Т. Трощенко, П.А. Фомичев // Пробл. Прочности, 1993. - №1. – С. 3 – 10.
6. Norman E. Dowling, Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue / E. Norman // Prentice Hall International, New Jersey, 2006.
7. Basan, R. Estimation of cyclic stress-strain curves for low-alloy steel from hardness. // R. Basan, M. Franulovic, S. Smokvina Hanza // Metalurgija, 2010. - Vol. 49, pp. 83 – 86.

8. Shih-Wei Mao Dislocation Substructures of Interstitial-Free Steel Subjected To Low Cycle Fatigue At Various Strain Amplitude / Shih-Wei Mao, Wen-Chun Lo, Hsing-Lu Huang, and New-Jin Ho // Journal of Marine Science and Technology, 2011. - Vol. 19. - No. 2. - pp. 115 – 119.

9. Праведников, И.С. Определение напряжений в пластически деформируемых деталях [Текст] / И.С. Праведников // Нефтегазовое дело, 2005. – С. 1 – 8.

10. Щипачев, А.М. Влияние усталостной повреждаемости на твердость и внутреннюю накопленную энергию металла [Текст] / А.М. Щипачев, Е.В. Пояркова // Вестник УГАТУ. Машиностроение, материаловедение и термическая обработка металлов. - Т.9, № 6 (24). – 2007. С. 152 – 157.

*Поступила в редакцию 29.06.2011г.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. П.А. Фомичев,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*