

УДК 539.4

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРА НАГРУЖЕНИЙ НА УРОВЕНЬ НАКОПЛЕННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

© Расим Султанович Ахметханов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки « Институт
машиноведения им. А.А.Благоврава РАН» ИМАШ РАН, Москва

www.imash.ru

***Аннотация.** Статья посвящена оценке влияния сценария нагрузжений технических систем на их поврежденность. В ней рассматриваются подходы к оценке поврежденности элементов систем, а также приведены примеры экспериментальных и расчетных оценок поврежденности. Показано, что различные подходы дают консервативные или неконсервативные оценки поврежденности.*

***Ключевые слова:** технические системы, нагрузки, сценарии нагружения, накопление повреждений, поврежденность, методы оценки поврежденности.*

THE EFFECT OF LOADINGS ON THE LEVEL OF ACCUMULATED DAMAGE IN THE ELEMENTS OF TECHNICAL SYSTEMS

Rasim Sultanovich Akhmethanov

Federal state budgetary institution of science " Institute of machine science research.

A.Blagonravjva of the RAS" IMASH RAS, Moscow

***Abstract.** The article deals with the issue of assessing the impact loading character technical systems on their damage. Thus discusses approaches to estimating damage of system elements, provides examples of experimental and computational estimates of damage. It is shown that different approaches give conservative or non-conservative estimates of damage.*

***Keywords:** technical system, load, loading scenarios, damage accumulation, damage, methods of assessment of damage.*

Причинами возникновения аварийных ситуаций, перерастания их в аварии и катастрофы являются, как правило, отказы технических систем вследствие ошибок в проектировании, нарушения технологии изготовления, условий и режимов эксплуатации, а также опасные природные явления (землетрясений, сели, наводнения и т.д.). Для конструкций, длительное время находящихся в эксплуатации, такой причиной могут стать деградация свойств материалов, предельные уровни накопленных повреждений, образование и неконтролируемое распространение трещин. В связи с этим возникает необходимость в проведении большого объема исследований, связанных с изучением условий образования предельных состояний и отказов по критериям прочности, ресурса, надежности и живучести на разных стадиях возникновения и развития аварий и катастроф. Эти данные необходимы для оценки рисков аварий и катастроф [1,2] при обеспечении их безопасности.

При оценке рисков используются различные подходы и методы [3]. Для оценки вероятности возникновения аварий используются методы теории надежности и метод деревьев отказов.

Одним из важных подходов при оценке рисков является сценарный анализ[4]. Подобный сценарный анализ требуется проводить и при оценке вероятности перехода системы из одного состояния $P(t)$, остаточного ресурса системы, т.е. при оценке уровня накопленных повреждений d . На рис.1 приведен сценарий возникновения отказа – поток

событий [1].

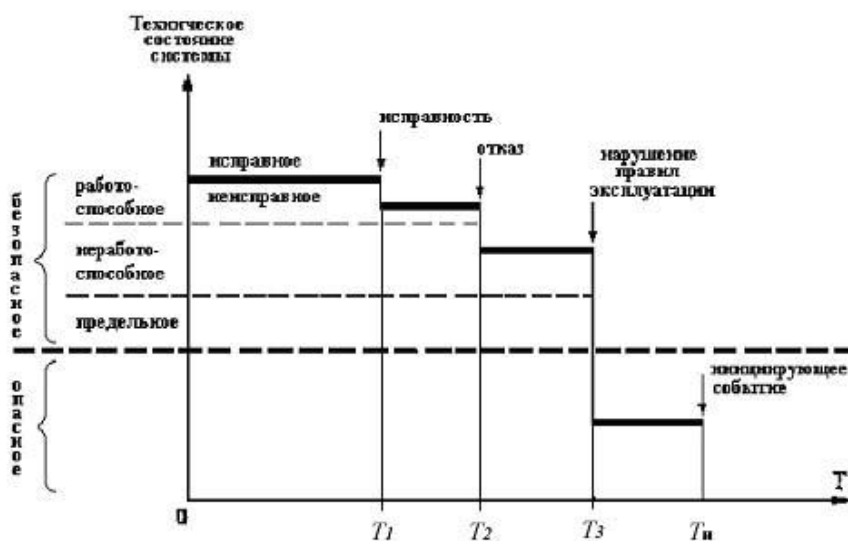


Рис. 1. Развитие аварии во времени: сценарий - поток событий (T₁, T₂, T₃, T_n)

В процессе функционирования техническое состояние конструкций, деталей, подвергающихся непрерывным разрушающим воздействиям, непрерывно ухудшается. Это обусловлено результатом воздействия технологических и внешних нагрузок и ряда других факторов, которые носят случайный характер. Данные факторы ведут к возникновению и протеканию различного вида повреждений (износа, физического старения, поломок и др.) элементов конструкций, деталей машин и оборудования. Достигнув критического уровня, накопленные в результате процесса эксплуатации, повреждения приводят к нарушению работоспособного состояния оборудования, выработке деталью ресурса, и как следствие, к ее отказу. Отказ любого элемента системы, оборудования, в свою очередь, приводит к остановке процесса производства, ухудшая его технологические и технико-экономические показатели.

Например, развитие аварии на сложных технических объектах (СТС) начинается, как правило, с появления неисправности, которая переводит систему из исправного в неисправное состояние, но оставляет ее в работоспособном состоянии. Отказ, в свою очередь, переводит систему из работоспособного в неработоспособное состояние. Дальнейшая эксплуатация системы, находящейся в неработоспособном состоянии, но способной функционировать, в случае нарушения правил эксплуатации, может привести систему в опасное состояние. В данном случае, нарушение правил эксплуатации следует отнести к иницирующим условиям. Возникновение аварии, при нахождении системы в опасном состоянии, обусловлено иницирующим событием. Иначе говоря, иницирующему событию, как правило, предшествует фаза накопления каких-либо неисправностей (T₁), отказов (T₂), дефектов или отклонений (нарушений) от правил эксплуатации (T₃), переводящих систему в опасное состояние (рис. 1).

При функционировании технических систем решается задача технической диагностики ее состояния, определяется уровень повреждений методами неразрушающего контроля. При этом одним из важных показателей является остаточный ресурс системы, определяемый уровнем накопленных в системе повреждений.

Решение задачи анализа фундаментальных закономерностей накопления повреждений, достижения предельных состояний объектов при комбинированных многопараметрических воздействиях силовых факторов и среды реализуется с

использованием нагрузочных испытаний при модельных и натурных экспериментах. При этом сценарии нагружений силовыми воздействиями на системы могут быть реализованы следующими способами:

- вероятностный сценарий;
- детерминированный сценарий;
- комбинированный сценарий.

Эти подходы соответствуют существующим нормативным подходам при обеспечении прочности элементов технических систем.

В общем случае при формировании сценариев нагружения при эксплуатации технических систем, как правило, учитываются три основных типа нагрузок:

- механические F_m (от давления, массы, сил инерции и т.д.);
- тепловые F_t (от неравномерного распределения температур и (или) неоднородности теплофизических свойств материалов);
- электромагнитные F_{em} (от воздействия электромагнитных полей).

Тогда суммарные эксплуатационные нагрузки, возникающие при эксплуатации систем, могут быть представлены в виде функционала [5,6]

$$F = (F_m, F_{em}, F_t) . \quad (1)$$

Они создают соответствующие напряжения σ и деформации e :

$$\{\sigma, e\} = \{(\sigma_m, e_m), (\sigma_{em}, e_{em}), (\sigma_t, e_t)\} . \quad (2)$$

Характер нагрузочных воздействий на системы зависит от внутренних и внешних факторов, которые меняются во времени. При этом меняются и характерные воздействия. В соответствии с этим периоды функционирования могут быть разделены на соответствующие этапы, которые особенностями действий нагрузочных воздействий. По схеме на рис. 2 [5] для представленного блока эксплуатационного нагружения выделяют режимы: монтаж (М), испытания (И), пуск (П) в эксплуатацию, стационарный (С) режим с поддержанием заданных рабочих параметров, регулирование (Р) базовых параметров, возникновение аварийных (А) ситуаций, срабатывание систем защиты (З) и останов (О) эксплуатации после плановых или аварийных режимов. Эти режимы отличаются как по величине максимальной нагрузки F_{max} и возникающих напряжений σ_{max} , так и по частотным характеристикам их изменения.

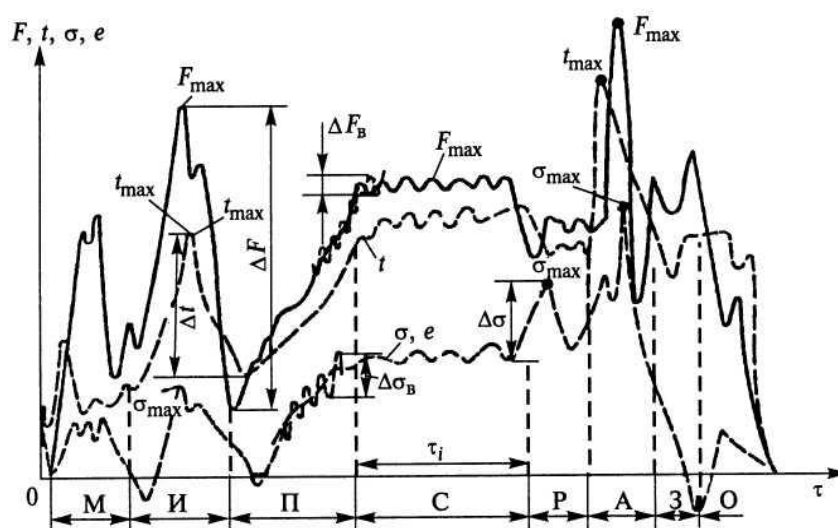


Рис. 2. Схема эксплуатационного нагружения и основные параметры эксплуатационных нагрузок

С учетом параметров эксплуатационного нагружения: числа циклов нагружения N , времени τ , температуры t , представленных на рис. 2, эксплуатационных усилий F , определяемых по (1), напряжений σ и деформаций e – по (2) строят временные зависимости F, t, σ, e . Эти зависимости являются исходными для анализа прочности, ресурса, надежности и инженерной безопасности технических систем. Величины F, t и τ , как правило, задаются режимами эксплуатации и могут регистрироваться контрольно-измерительными системами машин и установок.

В сценарном анализе для последующих расчетно-экспериментальных оценок прочности, ресурса, надежности и безопасности принимаются определяющими характеристики истории нагружения:

- максимальная расчетная нагрузка F_{max} ;
- максимальная (или минимальная) расчетная температура $t_{max}(t_{min})$;
- время заданного режима нагружения τ_i и общее время всех режимов и блоков режимов τ_{Σ} (временной ресурс).

По этим сценариям нагружения устанавливаются дополнительные расчетные параметры:

- размахи усилий ΔF и амплитуды усилий $F_a = \Delta F/2$;
- размахи температур Δt ;
- размахи усилий ΔF_B вибрационного (двух- или многочастотного) нагружения.

Из анализа всех i – сценариев устанавливаются наиболее неблагоприятные сочетания факторов F и t . $F_{max} - t_{max}$ для повышенных и высоких температур, $F_{max} - t_{min}$ для низких и криогенных температур. Число таких сочетаний определяется с учетом числа и геометрических форм рассчитываемых деталей или элементов и числа опасных зон и сечений в них, режимов нагружения системы.

Для простых условий эксплуатационного нагружения возможны и более простые функциональные соотношения при определении повреждений:

- для случаев кратковременного однократного нагружения механическими усилиями при комнатной температуре[6]:

$$d = [\{F_m\}]; \quad (3)$$

- для случаев классической изотермической усталости

$$d = [\{F_m\}, \{N\}_t]; \quad (4)$$

- для длительного статического высокотемпературного нагружения

$$d = [\{F_m, F_t\}, \{\tau\}_t]; \quad (5)$$

- для длительного циклического неизотермического нагружения

$$d = [\{F_m, F_t\}, \{\tau, N\}_t]. \quad (6)$$

Накопленные повреждения являются функционалом напряжений, деформаций, времени, числа циклов и температур

$$d = [\{\sigma, e\}, \{\tau, N\}_t]. \quad (7)$$

Суммарные эксплуатационные или аварийные нагрузки, соответствующие экстремальные механические напряжения и деформации $\{\sigma_{max}, e_{max}\}$ в зонах и вне зон концентрации, которые в конечном счете и определяют накопление эксплуатационных повреждений a по времени τ и числу циклов нагружения N [6]

$$d = [\{F_m, F_{em}, F_t\}, \{\tau, N\}_t] \leq [d], \quad (8)$$

где $[d]$ – допускаемое повреждение в штатных и аварийных ситуациях.

При оценке накопленных повреждений эксплуатационные нагрузки, как правило, разбиваются на блоки – проводят некоторую идеализацию характера нагрузок для упрощения проводимых расчетов. При этом используются различные законы суммирования повреждений, как правило, это линейные и нелинейные законы суммирования.

Усталостное разрушение происходит не мгновенно при достижении напряжениями предельных значений, а является длительным процессом накопления повреждений: зарождения и развития несплошностей типа трещин. Кроме того, его отличительная особенность та, что усталость металлов наблюдается при напряжениях как выше, так и значительно ниже обычного предела текучести материалов.

Обобщенное изображение сценариев накопления повреждений может быть представлено графически (см. рис. 3). Процесс накопления повреждений можно представить в виде некоторой траектории $D(N, t, \sigma)$, определяемой историей нагружения. История нагружения определяется сценариями многофакторных динамических воздействий на техническую систему. Результат этих многофакторных динамических воздействий реализуется в виде траектории $D(N, t, \sigma)$ в пространстве $D, (N, t)$ и σ [6]. Эта траектория может быть разделена на участки соответствующие характерным особенностям нагружений и соответствующему характеру накопления повреждений в области ниже предельной поверхности D_c .

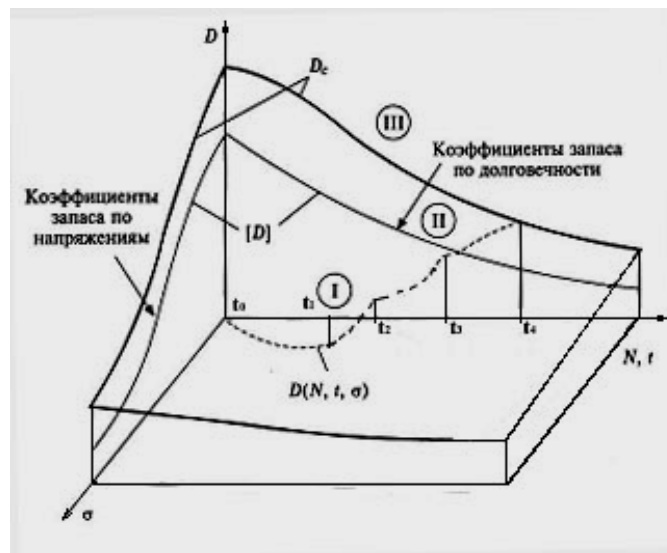


Рис. 3. Сценарий (схема) накопления повреждений D и оценки остаточного ресурса. I — область безопасности, II — область ограниченной безопасности, III — область опасности, t_1 - t_4 — время изменений комбинированных нагрузок по выбранному сценарию

Одним из методов обеспечения надежного функционирования конструкций и деталей оборудования на стадии эксплуатации, а также, оценки показателей надежности на стадии проектирования, является использование математического описания (моделирования) процессов повреждения.

Моделирование повреждений позволяет анализировать внутренние связи и внешние воздействия, характерные для уникальных категорий конструкций и оборудования. На основании общих принципов формирования отказов, данные модели обеспечивают: разработку алгоритмов оценки надежности сложных изделий, учет обратных связей во взаимоотношении «технологический процесс - выходные параметры машины», оценку взаимодействия параметров машины и особенностей потери ею работоспособности. Решение перечисленных задач дает возможность разрабатывать более совершенные модели отказов разнообразных элементов (деталей, узлов, механизмов).

При построении математических моделей накопления повреждений используется большое количество методов и подходов, имеющих определенные особенности и базирующиеся на различной исходной статистической информации.

Построению математических моделей предшествует тщательное изучение процессов, приводящих к зарождению, развитию и достижению критического уровня повреждения деталей металлургического оборудования.

При исследовании надежности элементов конструкций и деталей машин используются классические и современные критерии прочности и уравнения накопления повреждений. С позиций теории прочности обычно рассматривают следующие типы предельных состояний технических объектов:

- а) разрушение (вязкое и хрупкое);
- б) пластическое деформирование по всему сечению элемента;
- в) потеря устойчивости;
- г) возникновение недопустимых формоизменений;
- д) появление макротрещин при циклическом нагружении;
- е) разгерметизация (не связанная с макро-разрушениями);
- ж) износ, эрозия, фреттинг;
- з) коррозия.

Усталости материалов, представленных в виде кривых и поверхностей усталости, также необходимы данные о закономерностях накопления усталостных повреждений с увеличением числа циклов нагружения. Считают, что для начального состояния материала усталостное повреждение d равно нулю, а для момента образования заметной усталостной трещины или полного разрушения конструкции оно равно единице.

Усталостное повреждение d можно представить в виде функций от напряжений σ и от числа циклов нагружения n [7]:

$$d = f(\sigma, n). \quad (9)$$

В общем случае результаты расчета на долговечность при нерегулярном нагружении зависят от чередования нагрузок (истории нагружения). Пусть, например, элемент конструкции нагружается n_1 циклами с напряжением σ_1 , n_2 циклами с напряжением σ_2 и т.д. (рис. 5, а). Тогда за k блоков нагружения суммарное усталостное повреждение определится следующим выражением

$$d(t) = d(n_1, \sigma_1) + d(n_{21} + n_2, \sigma_2) + d(n_{31} + n_3, \sigma_3) + d(n_{k,k-1} + n_k, \sigma_k). \quad (10)$$

где $d = d(\sigma, n)$ - закономерность накопления усталостных повреждений при уровне напряжений σ , $n_{i,i-1}$ ($i = 1, 2, \dots$) - решение следующего уравнения [7]:

$$d(n_{i,i-1}, \sigma_i) = d(n_1, \sigma_1) + d(n_2 + n_2, \sigma_2) + \dots + d(n_{i,i-2} + n_{i-2}, \sigma_{i-2}). \quad (11)$$

Принцип линейного суммирования усталостных повреждений, выраженный соотношениями (2) и (3), поясняется графиками на рис. 4. Гипотеза линейного суммирования – простейшая модель накопления повреждений, она не учитывает порядок приложения нагрузок (сценарий – историю нагружения). Поэтому в предсказании долговечности возможны ошибки, для исключения которых необходимо проведение экспериментов по ее проверке для конкретных материалов и режимов нагружения. Более сложные модели накопления повреждений описаны в специальной литературе [8].

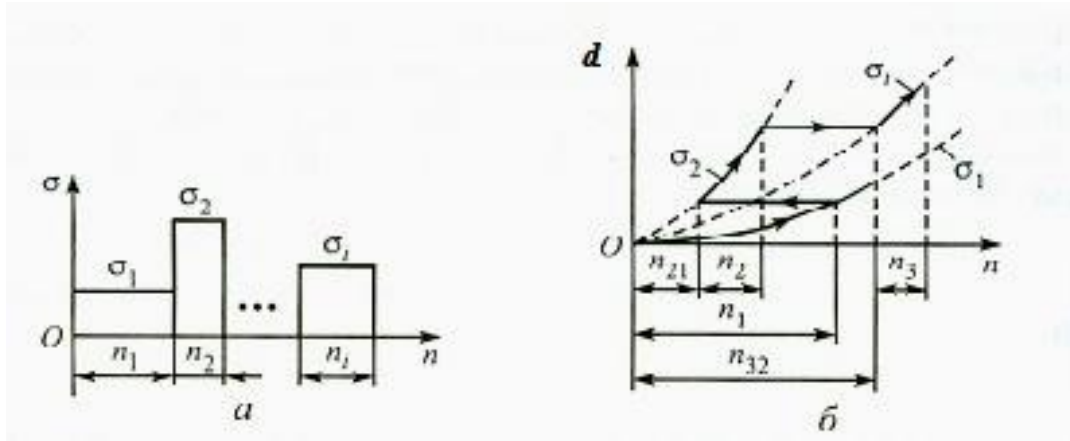


Рис.4. Графическое представление принципа суммирования повреждений: а – график нагружений, б – схема суммирования повреждений

Для блока эксплуатационного нагружения можно осуществить анализ прочности и ресурса на основе выделения характерных точек и величин напряжений. В таком анализе используют ряд методов: максимумов, экстремумов, размахов, полных циклов [7]. Для узкополосных спектров эксплуатационного нагружения эти методы дают сопоставимые результаты при оценках повреждаемости.

Оценку усталостной долговечности, которая на практике наиболее близка к ее действительному значению, можно получить, используя метод полных циклов [7]. Суть метода состоит в том, что все циклы случайного процесса выявляются путем постепенного исключения мелких промежуточных циклов и формирования из них последовательности простых циклов. При этом исходный процесс со сложной структурой заменяют на эквивалентный по содержанию циклов процесс с простой структурой.

Совместное рассмотрение сценариев нагружения и местных напряженно-деформированных состояний позволяет подойти к анализу нагруженности конструктивных элементов и выявлению амплитуд местных напряжений и деформаций. Из анализа особенностей сценариев эксплуатационной и местной нагруженности вытекают возможности оценки механизмов накопления повреждений и видов предельных состояний.

Приведем примеры. В работе [9] представлены результаты расчета долговечности цилиндрического образца для одноосного растяжения – сжатия при блочном циклическом растяжении – сжатии с различными амплитудами пластических деформаций Δe_{11}^p в блоках нагружений. В данной работе расчет циклической долговечности проводился по программе «Ресурс-НН», реализующей модель накопления повреждений по нормам расчета [10] и разработанной авторами модели [11]. На рис. 5 приведены результаты расчета усталостной долговечности при блочном нагружении при переходе с большой амплитуды пластических деформаций на меньшую: 0,004→0,003→0,002[9].

Элементы кривой определяют этапы различные этапы воздействий на систему. Эти этапы отражают сценарий нагрузочных испытаний.

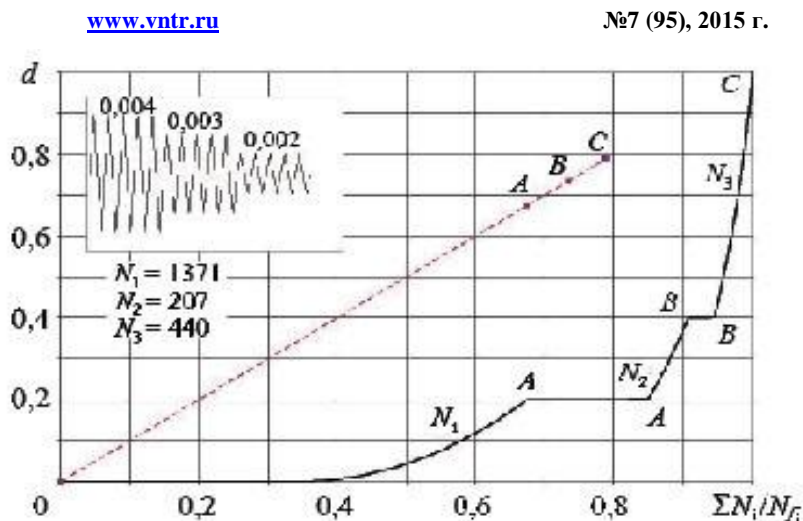


Рис. 5. Кривые накопления повреждений при 3-х блочном нагружении

Штриховой линией показан расчет по [10] $d=N_i/N_{fi}$, а сплошной линией - расчет по модели из работы [11]. Точка *A* соответствует поврежденности в конце первого блока, точка *B* – поврежденности в конце второго блока, точка *C* – поврежденности $d=1$ при нелинейном суммировании повреждений по модели [11].

В соответствии с законом линейного суммирования повреждений, согласно [11] $d=N_i/N_{fi} = 0,78$, что соответствует результатам экспериментов при блочном нагружении с уменьшением амплитуды деформаций. В этом случае авторами показано, что модель [11] дает погрешность в неконсервативную сторону примерно 22%.

На рис.6 приведены аналогичные результаты блочного циклического растяжения-сжатия при переходе с меньшей амплитуды пластических деформаций на большую: $0,002 \rightarrow 0,003 \rightarrow 0,004$. При линейном суммировании повреждений $d = \sum_i N_i / N_{fi} = 1,16$.

Расчеты по [11] в этом случае дают погрешность в консервативную сторону примерно 16%.

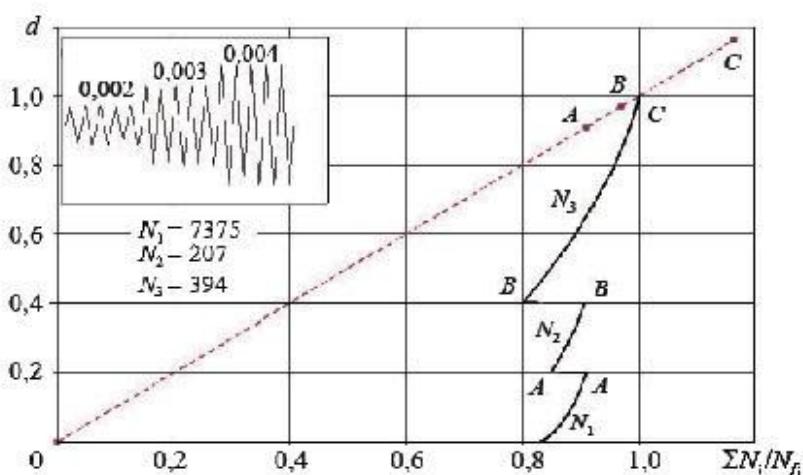


Рис. 6. Кривые накопления повреждений для различных амплитуд деформации

По результатам проведенного исследования был сделан вывод о том, что гипотеза линейного суммирования повреждений дает ошибку в консервативную сторону (с запасом) при переходе с меньшей на большую амплитуды нагружения и в

неконсервативную сторону (с недостатком) при переходе с большей амплитуды нагружения на меньшую.

Рассмотрим другой пример – влияние асимметрии нагрузки на накопление повреждений. На рис 7 приведен график роста трещины при циклическом растяжении образца с постоянным коэффициентом асимметрии R из работы [12].

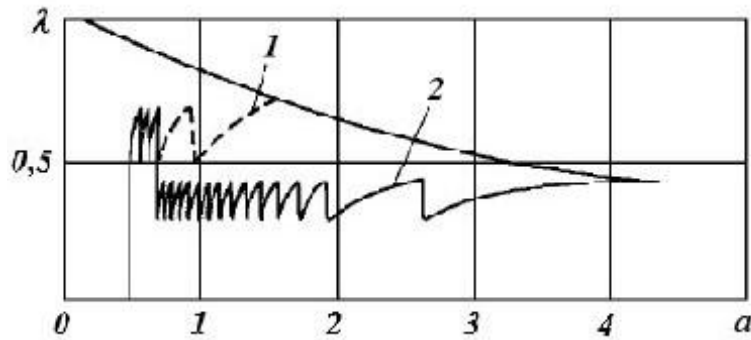


Рис. 7. Рост трещины в пластинке при циклическом растяжении с постоянным коэффициентом асимметрии цикла $R = \lambda_{\min} / \lambda_{\max} = 0,7 : 1$ – рост трещины при постоянных $\lambda_{\max} = 0,7$ и $\lambda_{\min} = 0,49$, т.е. $R=0.7$; 2 – сначала трещина росла при постоянных $\lambda_{\max} = 0,7$ и $\lambda_{\min} = 0,49$ ($R=0.7$), затем при постоянных $\lambda_{\max} = 0,45$ и $\lambda_{\min} = 0,32$ ($R=0.7$), а - безразмерная длина трещины, λ - безразмерная нагрузка

Для оценки накопления повреждений значение имеют и перегрузки. Рассмотрим вопрос влияния перегрузки на характер накопления повреждений. На рис. 8 приведен сценарий нагружения образца с перегрузкой, характеризуемой циклами изменения напряжений в образце (рис. 8а), а также и кривые роста длины трещины a (рис. 8б) и скорости нарастания длины трещины (рис.8в) в зависимости от числа циклов нагружений. Эти результаты приведены в работе [13].

В первой области (рис. 8в) скорость роста трещины возрастает в результате увеличения максимального напряжения. Данная область - это относительно короткая по сравнению с последующими областями. Во второй области трещина растет в поле сжимающих остаточных напряжений, при этом результирующая скорость роста трещины достигает минимального значения. В третьей области скорость роста трещины асимптотически возрастает до стабилизированного значения.

Рассмотрим другой пример из работы [14]. На рис. 9 приведены графики роста длины трещин a в зависимости от числа циклов нагружения N . Перегрузка (100%) приводит к замедлению роста трещин: в одном случае на 22000 циклов (рис. 9а), а в другом на 27000 цикло (рис.9б).

Одним из важных вопросов при оценке поврежденности является анализ многочастотных нагружений. При суммировании повреждений в условиях циклического упругопластического деформирования материала, эксплуатируемого при различных температурах, при простых и сложных формах цикла нагружения, следует учитывать то, что данный процесс является существенно нелинейным. Данная нелинейность вытекает из того, что определяющие повреждения деформационные характеристики имеют в процессе нагружения сложную кинетику, нелинейным образом зависящую от числа циклов (циклическое упрочнение или разупрочнение материала в упругопластической области), а также от температуры и времени нагружения (температурно-временное изменение характеристик прочности и пластичности материала) и от формы цикла действующих напряжений.

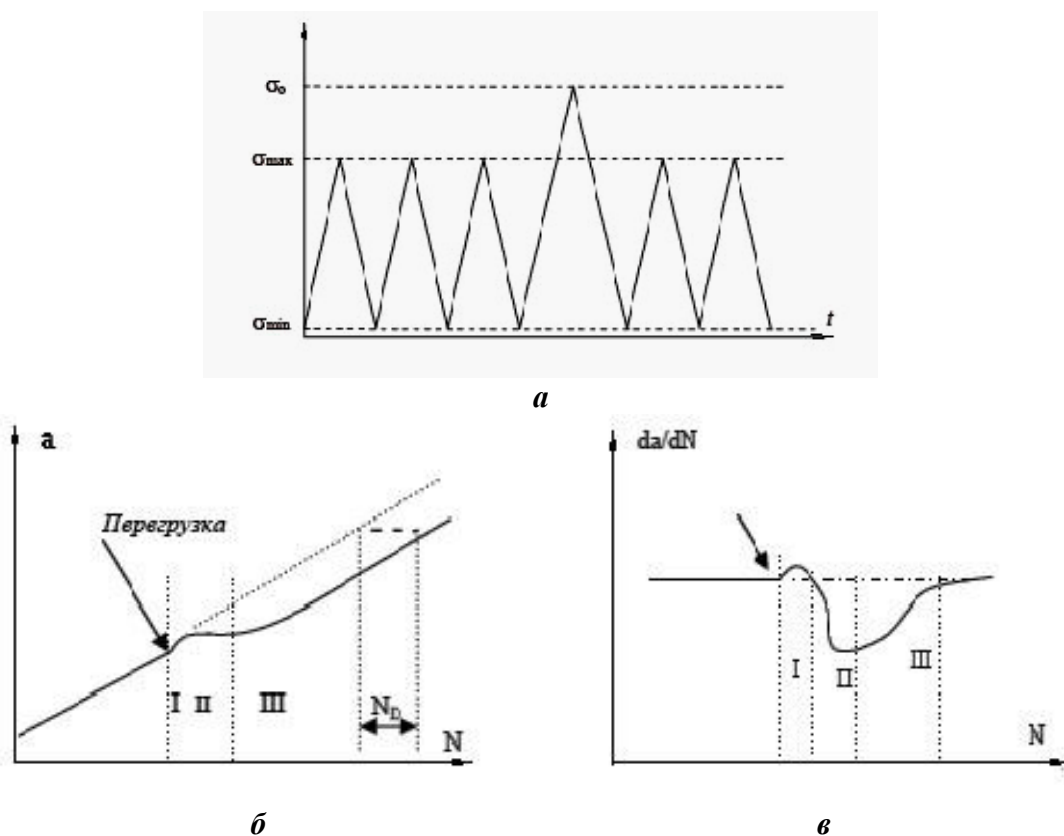


Рис.8. Рост длины трещины (б) и изменение скорости роста трещины (в) в зависимости от числа циклов нагружения N после простой перегрузки (а)

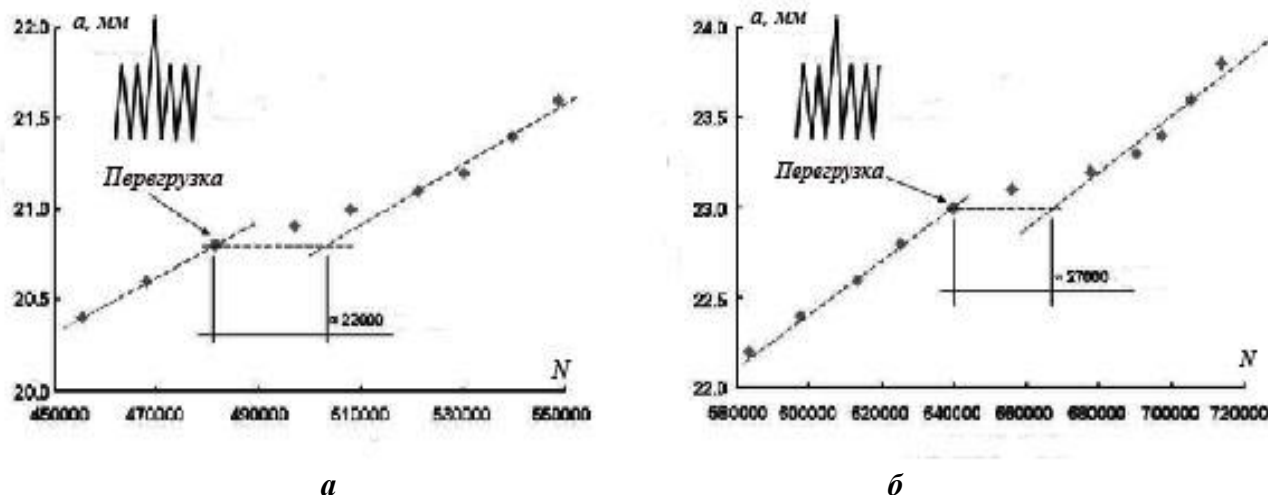


Рис.9. Рост длины трещины а в зависимости от числа циклов N и перегрузки

Более сложная задача оценки поврежденности возникает при нерегулярном циклическом нагружении. В работе [15] показана возможность оценки долговечности конструкционных сталей в зависимости от характера внешнего нерегулярного циклического нагружения, схематизированного блочной нагрузкой – обобщения феноменологического подхода к суммированию усталостных повреждений. Данный подход основан на

аппроксимации нагружения различными законами распределения и использовании блок-программных спектров нагружений по ГОСТ 25.507-85, где различие между блок-программными спектрами оценивается с помощью меры полноты спектра

$$V = \left[\frac{1}{n} \left[\sum_1^r \left[n_{ai} \left(\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{amax}} \right)^m \right] \right] \right]^{\frac{1}{m}}, \quad (12)$$

где r - число ступеней блока нагружения; n_{ai} , n - продолжительность (в циклах) i -ой ступени и блока нагружения; m - коэффициент наклона кривой выносливости материала при стационарном циклическом нагружении в двойных логарифмических координатах.

Преимуществом блочного нагружения является полное описание небольшим числом параметров сложного нагружения и возможность накопления большого числа экспериментальных данных из-за возможности многократного точного воспроизведения нагружения с относительно малыми техническими затратами, а также простота реализации на испытательных машинах. Недостаток - менее надежные значения долговечности.

Влияние характера блочного нагружения на долговечность материала предлагается описать выражением:

$$N_{\Sigma} = N_{cm} K, \quad (13)$$

где N_{cm} — долговечность материала при стационарном циклическом нагружении с амплитудой σ_{amax} , K — коэффициент нестационарности — может быть представлен выражением

$$K = 10^{C(1-V)}, \quad (14)$$

где C - постоянная, зависящая от свойств материала.

Было установлено, что значение параметра C зависит от величины коэффициента наклона исходной кривой выносливости m . Выявленная взаимосвязь параметров C и m позволила представить параметр C в виде:

$$C = 1 + q \lg m, \quad (15)$$

где q – коэффициент, определяемый для исследуемых марок конструкционных сталей.

В данной работе [16] предлагается определять долговечность материала при нерегулярном нагружении по следующей модели

$$N_{\Sigma} = \frac{N_G 10^{(1+q \lg m)(1-V)}}{\left(\frac{\sigma_{amax}}{\sigma_{-1}} \right)^m}, \quad (16)$$

где N_G , m , σ_{-1} - параметры кривой выносливости.

Эта зависимость предполагает, что при нестационарном циклическом многоступенчатом нагружении с постоянным значением полноты спектра V и различными величинами напряжения σ_{amax} значение коэффициента m не меняется. Принятое допущение находит подтверждено результатами испытаний, полученным и другими авторами.

Результаты блок-программного испытания по сравнению с результатами сравнимого случайного испытания дают погрешность, которая указывает заниженную прочность (не в запас прочности). Данная погрешность возрастает с увеличением числа блоков, так как кривая долговечности блок-программного испытания имеет более пологий наклон, чем кривая случайного испытания. Отличие результатов блок-программного испытания от случайного испытания вытекает, прежде всего, из незарегистрированного влияния последовательности напряжений и из влияния неучтенных изменений среднего напряжения. Степень отличия зависит от

параметров случайного процесса и от метода схематизации, а также от других факторов нагружения, конструкции и материала детали. А влияние последовательности блоков нагружения на погрешность возрастает с уменьшением полноты спектра (см. рис. 10). Чтобы исключить возможное влияние последовательности ступеней в блоке нагружения применяют различное их сочетания.

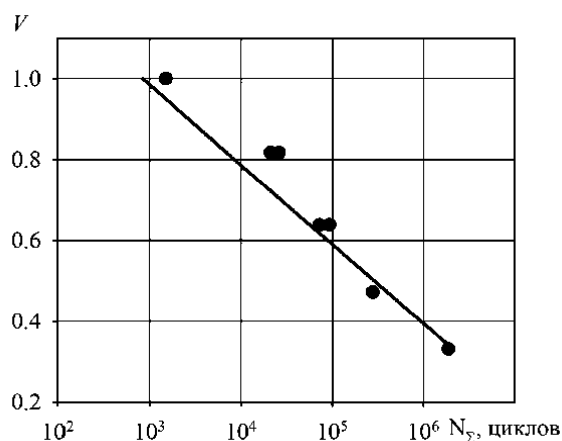


Рис.10. Изменения долговечности N_{Σ} (числа циклов) до разрушения стали 40X в зависимости от полноты спектра многоступенчатого нагружения (● – эксперимент; — – расчет).

Представленные в статье материалы показывают, что характер нагружения технических систем – последовательность приложения нагрузок с различным уровнем возникающих напряжений в элементах, перегрузки, нестационарный характер нагружения системы влияют на величину накопленных повреждений. Эти особенности истории нагружения (сценарии) технических систем требуется учитывать при оценке их остаточного ресурса или оценке вероятности возникновения аварийной ситуации. При этом нужно учитывать, что при использовании различных методов полученные оценки могут быть консервативными или неконсервативными в зависимости от используемых законов суммирования повреждений, которые влияют на точность оценки уровня поврежденности элементов конструкции и, в конечном счете, на оценку вероятности аварии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 14-08-90003 Бел_а.

Список литературы

1. Абросимов Н.В., Ахметханов Р.С., Махутов Н.А., Резников Д.О. и др., Безопасность России. Анализ риска и проблемы безопасности. Часть 1. Основы анализа и регулирования безопасности. – М.: МГФ «Знание». 2006. - 640 с.
2. Махутов Н.А., Петров В.П., Ахметханов Р.С. Природно-техногенно-социальные системы и риски// Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2004. № 3. С. 3-28
3. Махутов Н.А., Ахметханов Р.С., Земцов С.П., Овчинников В.В. Система оценки рисков при техническом регулировании. – М.: Издательство ОВЛ. 2006. - 96 с.
4. Махутов Н.А., Петров В.П., Ахметханов Р.С. и др. Особенности сценарного анализа возникновения и развития техногенных катастроф// Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2007. № 3. С. 3-28.

5. Махутов Н.А., Пермяков В.Н. Ресурс безопасной эксплуатации сосудов и трубопроводов. – Новосибирск: Наука. 2005. – 516 с.
6. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Ч. 1. Критерии прочности и ресурса – Новосибирск: Наука. 2005. – 494 с.
7. Гусев А.С. Вероятностные методы в механике машин и конструкций. – М.: Из-во МГТУ им. Н.Э.Баумана. 2009. -224 с.
8. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. – М.: Машиностроение. 1990. - 448 с.
9. Митенков Ф.М., Большухин М.А., Козин А.В. и др. Технология эксплуатационного мониторинга ресурса оборудования и систем ЯЭУ//Проблемы прочности и пластичности. Вып. 74. 2012. С. 68-77
10. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПН АЭ Г-7-002-86. - М.: Энергоатомиздат. 1989. - 525с.
11. Митенков Ф.М., Кайдалов В.Б., Коротких Ю.Г. и др. Методы обоснования ресурса оборудования ЯЭУ. - М.: Машиностроение. 2008. - 445 с.
12. Волков И.А., Коротких Ю.Г., Панов В.А., Шишулин Д.Н. Моделирование процессов накопления усталостных повреждений в конструкционных сталях при блочном малоцикловом нагружении //Вычислительная механика сплошных сред. 2014. Т. 7. № 1. – С. 15-22
13. Benedictus R., Schijve J., Alderliesten R.C., Homan J.J. Crack Closure in GLARE®. Master Thesis. 2005. Graduation Committee /Aerospace Materials Faculty of Aerospace Engineering Delft University of Technology. –129 p.
14. Vleggiolam M.A., Miranda A.C.O., Castro J.T.P., Martha L.F. Crack retardation equations for the propagation of branched fatigue/ International Journal of Fatigue. 27. 2005. P. 1398-1407
15. Савкин А.Н., Седов А.А. Прогнозирование долговечности материала при блочном переменном циклическом нагружении//Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. №4. С. 49-54
16. Седов А.А.. Прогнозирование долговечности материала и технических систем регулярном и нерегулярном циклическом нагружении. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Волгоград. 2015. -158 с.