УДК 621.01

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ЦИКЛА НАГРУЖЕНИЯ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОМУ ДЕФОРМИРОВАНИЮ И РАЗРУШЕНИЮ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© М.М. Гаденин

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Россия, Москва

Аннотация. *Рассмотренные в статье закономерности являются основой методологии определения долговечности и ресурса безопасной эксплуатации работающих в сложных температурно-силовых условиях элементов оборудования по критериям циклической прочности и по основанным на них условиям достижения предельных состояний.*

Ключевые слова: *двухчастотные режимы нагружения, циклическое деформирование материала, закономерностей суммирования повреждений.*

Эксплуатационные условия нагружения элементов машин и конструкций характеризуются значительным количеством факторов, в числе которых, как правило, находятся температура, характер и уровни действующих нагрузок, коррозионные среды и т.п. Эти факторы могут обусловить существенное изменение характера поведения материала, его механических свойств, способности сопротивляться циклическому деформированию [1] по сравнению с обычными условиями нагружения (стационарное приложение циклической нагрузки, комнатная температура и др.).

Формы циклов эксплуатационных режимов нагружения имеют, как правило, более сложный характер, чем распространенные в практике лабораторных экспериментов синусоидальные или треугольные формы циклов нагружения. В ряде случаев реальные условия изменения нагрузок представляется возможным схематизировать такими упрощенными одночастотными режимами, однако в общем случае закономерности изменения действующих на элементы конструкций нагрузок носят, как правило, случайный характер. Приближение в возможно большей степени моделируемых условий нагруженности оборудования к реальным является действенным шагом к уточнению применяемых методов расчетов элементов оборудования, машин и конструкций на прочность.

В качестве определенного шага к упрощению анализа и выявлению особенностей влияния эксплуатационных режимов нагружения на характеристики циклической прочности эти режимы могут быть представлены эквивалентными стационарными случайными процессами, рассматриваемыми как совокупность совместно действующих гармонических нагрузок со случайным изменением амплитуд и фаз. Если при этом для существенно отличающихся по частотам гармоник пренебречь влиянием сдвига фаз, то возможно проведение аналогии между таким случайным и детерминированным полигармоническим процессами [2]. Дальнейший этап такой схематизации реальной нагруженности, исключающий из рассмотрения в полигармоническом процессе второстепенных гармоник, позволяет прийти к двухчастотным режимам нагружения, характеризующимся наложением на основной процесс циклического изменения напряжений их переменной составляющей более высокой частоты [1, 3].

Двухчастотные режимы нагружения оказываются достаточно доступными для реализации на испытательном оборудовании [4], а также для анализа и сопоставления получаемых результатов [3]. При этом они в должной степени соответствуют схематизированным условиям нагружения реального оборудования. В наиболее простой постановке изменение напряжений при двухчастотном режиме нагружения может быть представлено в виде суммы двух синусоидальных процессов (рис. 1,*а,б*)

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_{a1} Sin(2\pi f_1 \tau) + \sigma_{a2} Sin(2\pi f_2 \tau + \varphi), \qquad (1)$$

где результирующее напряжение в цикле σ складывается из амплитуды σ_{a1} основных, изменяющихся с частотой f_1 (низкочастотных) напряжений, амплитуды σ_{a2} наложенных, изменяющихся с частотой f_2 (высокочастотных) напряжений и среднего напряжения цикла σ_m. Характерным для двухчастотных режимов является также наложение высокочастотных напряжений на временные выдержки (трапецеидальная форма цикла) при экстремальных значениях основной (низкочастотной нагрузки (рис. 1,*в*).

Указанный характер нагружения свойственен технологическим трубопроводам, сосудам давления, резьбовым и сварным соединениям, в которых, как правило, высокочастотное нагружение является следствием колебаний (пульсаций) рабочего потока или воздействием побочных вибраций, а низкочастотные режимы обусловлены пусками и остановами оборудования или его периодическими испытаниями.

Диаграмма циклического деформирования материала, а, следовательно, и определяющие кинетику квазистатической d_s и усталостной d_f составляющих его повреждения деформационные параметры, для двухчастотного режима нагружения имеют особый характер (рис. 1,*г*) и оказываются функционально зависящими от условий такого процесса нагружения [1-6]. При этом в дополнение к таким, влияющим на процесс накопления повреждений, факторам, как температура и время деформирования [1, 5], относятся также характеризующие двухчастотность процесса нагружения параметры - частота f_2 и амплитуда e_{a2} наложенной высокочастотной деформации, а также их отношение к соответствующим низкочастотным характеристиками f_2/f_1 и e_{a2}/e_{a1}.

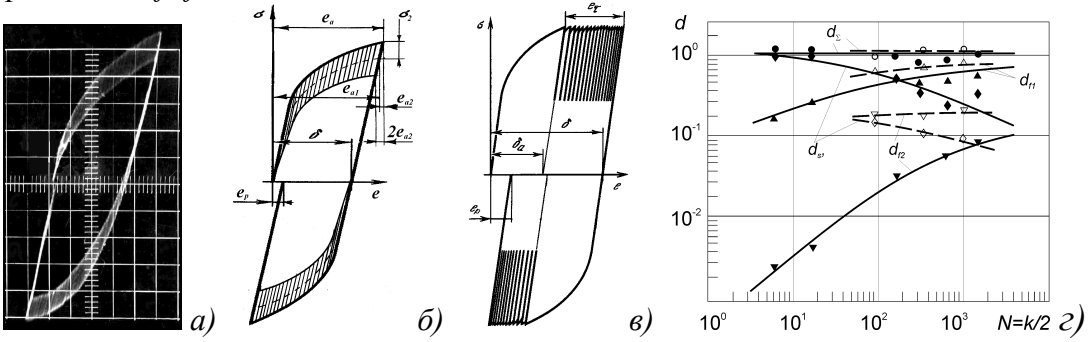


Рис. 1. *Диаграммы циклического упругопластического деформирования (а-в) и накопления повреждений (г) при двухчастотных режимах нагружения.*

Экспериментально показано [1, 3, 6], что в развитие используемой для одночастотного малоциклового нагружения гипотезы линейного суммирования усталостных (от основного процесса малоциклового нагружения) d_f^I и квазистатических (от односторонне накопленной деформации) d_s повреждений в виде $d_\Sigma = d_f^I + d_s$ [1, 5], накопление повреждений для двухчастотного малоциклового нагружения с варьируемыми отношениями амплитуд и частот циклических напряжений (деформаций) может быть также описано на основе линейного суммирования дополнительной составляющей усталостного повреждения d_f^{II} от наложенной высокочастотной амплитуды напряжения σ_2 или деформации e_{a2} (рис. 1,*б*), и тогда суммарное повреждение d_Σ для двухчастотного режима и условие достижения предельного состояния d_Σ=1,0 при малоцикловом нагружении и разрушающем числе циклов N_K на основе гипотезы линейного суммирования рассматриваемых составляющих повреждений могут быть выражены следующим уравнением

$$d_\Sigma = d_f^I + d_f^{II} + d_s = \int_0^{N_K} \frac{1}{N[e_a(n), t, \tau]} dn + \int_0^{N_K^*} \frac{1}{N^*[e_{a2}, t, \tau, r(n^*)]} dn^* + \int_0^{N_K} \frac{e_p}{e_K^{t\tau}} dn = 1{,}0. \qquad (2)$$

В качестве примера суммирования по уравнению (2) рассмотренных выше состав-

ляющих повреждения на рис 1,*г*. приведены расчетные (линии) и экспериментальные (точки) данные о суммировании составляющих повреждений при двухчастотных режимах малоциклового нагружения образцов из стали Х18Н10Т при температуре t=650°С с соотношениями частот прикладываемых нагрузок f_2/f_1=80 (темные точки) и f_2/f_1=18000 (светлые точки).

Таким образом, при анализе закономерностей суммирования повреждений в условиях циклического упругопластического деформирования материала, эксплуатируемого как при комнатной, так и повышенных температурах, а также как при простых, так и при сложных формах цикла нагружения, следует иметь ввиду, что рассматриваемое выше суммирование усталостных и квазистатических повреждений, как линейное, при детальном рассмотрении процессов их накопления в действительности является существенно нелинейным, так как определяющие каждую из этих составляющих 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 [1-6].

В качестве примеров, иллюстрирующих рассмотренные выше закономерности кинетики деформационных характеристик, которые, в свою очередь, влияют на условия суммирования накапливаемых повреждений, на рис. 2,*а* показаны экспериментальные данные об изменении предела прочности $\sigma_B^{t,\tau}$ и предельной пластичности $\psi_K^{t,\tau}$ стали Х18Н10Т при t=650°С с увеличением времени нагружения и о правомерности описания их степенными уравнениями. Рис. 2,*б* иллюстрирует достоверность описания учитывающими изменение $\sigma_B^{t,\tau}$ и $\psi_K^{t,\tau}$ по параметрам времени и температуры уравнениями [1, 5] кинетики циклической пластической деформации $\delta_p^{(k)} = 2e_{ap}$ при мягком режиме нагружения стали Х18Н10Т при t=650°С, когда ими удовлетворительно описывается регистрируемый в экспериментах переход стадии исходного (в первых циклах нагружения) упрочнения материала в стадию циклического разупрочнения.

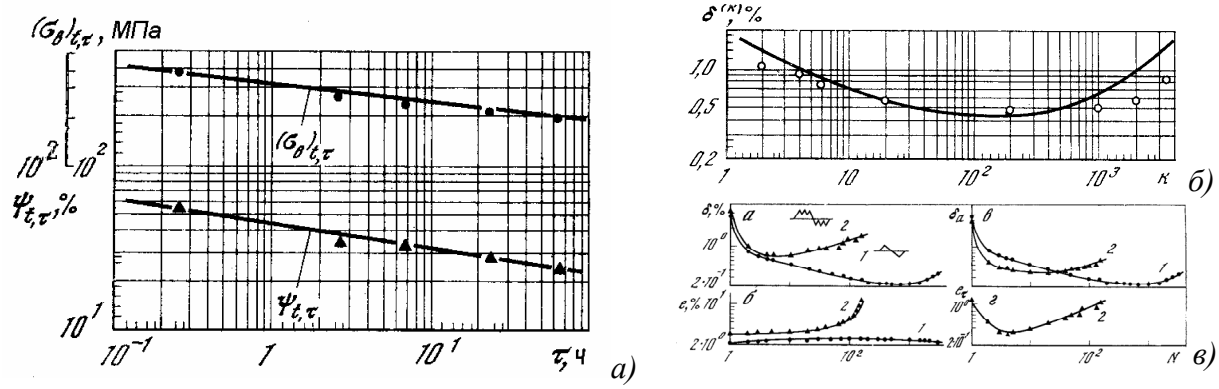
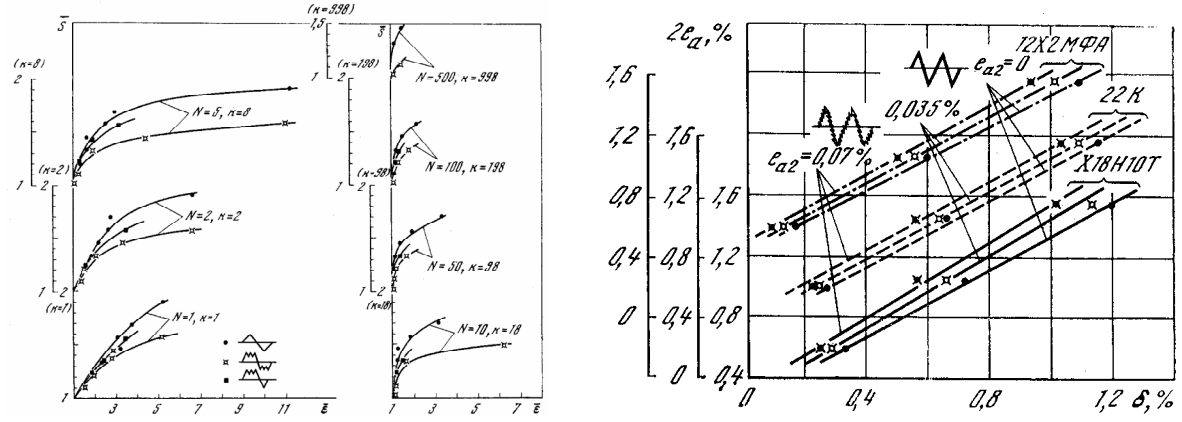


***Рис. 2**. Изменение по времени и числу циклов нагружения характеристик предельной прочности, пластичности (а) и упругопластических деформаций при одночастотном (б) и двухчастотном (в) режимах нагружения*

Наряду с температурно-временными эффектами на кинетику диаграмм циклического деформирования, а, следовательно, и на процесс накопления повреждений, существенное влияние оказывает и форма цикла нагружения. На рис. 2,*в* показано сопоставление характера изменения величин полной циклической пластической деформации δ и ее составляющей от активного деформирования δ_a при треугольной форме цикла и при двухчастотном режиме, а также величины односторонне накапливаемой пластической деформации e_p при обоих режимах для стали Х18Н10Т при t=650°С. Из этого рисунка видно, что наличие в цикле нагружения выдержек с наложением на них высокочастотной деформации существенным образом изменяет как величину, так и поцикловую кинетику δ и e_p, и происходит это, в основном, за

счет наличия деформации циклической ползучести e_τ, которая и обусловлена наложением высокочастотной деформации.

Эффект роста циклической пластической деформации при двухчастотной форме цикла в сравнении с эквивалентным по величине напряжений одночастотным нагружением связан со снижением сопротивления деформированию материалов. Это снижение иллюстрируется также экспериментальными данными, приведенными на рис. 3,*а* для условий мягкого нагружения при одночастотной и двухчастотной формах цикла с односторонним и двусторонним наложением на выдержки высокочастотной составляющей деформации. При жестком режиме нагружения, когда деформация ползучести отсутствует, наличие высокочастотной составляющей уменьшает размах циклической пластической деформации (рис. 3,*б*) при одинаковой величине размаха упругопластической деформации $2e_a$ в цикле.



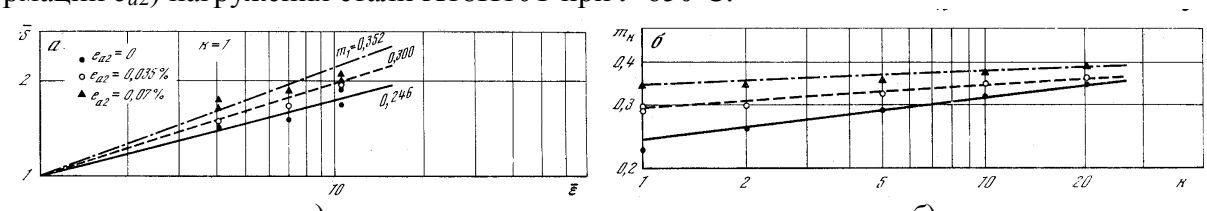
а) *б*)

Рис. 3. *Изменение параметров диаграмм циклического деформирования при двухчастотных формах цикла нагружения в мягком (а) и жестком (б) режимах*

Отмеченное изменение сопротивления деформированию отражается в первую очередь на величине показателей (модулей) упрочнения m_0 и m_k, значения которых для исходного m_0 и для последующих m_k полуциклов циклического упругопластического деформирования определяются соответственно зависимостями [1, 5]

$$m_0^t = (1-0{,}3\psi_K^{t,\tau})\frac{\lg[\sigma_B^{t,\tau}/\sigma_{0,2}^{t,\tau})/(1+1{,}4\psi_K^{t,\tau})]}{\lg\left[\dfrac{1}{(\sigma_{0,2}^t/E^t+0{,}2\cdot10^{-2}}\ln\dfrac{1}{1-\psi_K^{t,\tau}}\right]},\quad m_k^t=\frac{\lg\bar{e}^{(0)^{m_0^t}}}{\lg\left[\bar{e}^{(0)^{m_0^t}}+\dfrac{A^t}{2}(\bar{e}^{(0)}-1)/F(k)\right]} \qquad (3)$$

Расчетные (линии) и экспериментальные (точки) данные об изменении модуля упрочнения m_0 показаны на рис. 4,*а* для различных уровней деформирования в исходном полуцикле, а на рис. 4,*б* - модуля циклического упрочнения m_k для жесткого режима одночастотного (e_{a2}=0) и двухчастотного (с двумя уровнями амплитуды наложенной высокочастотной деформации e_{a2}) нагружения стали Х18Н10Т при t=650°С.

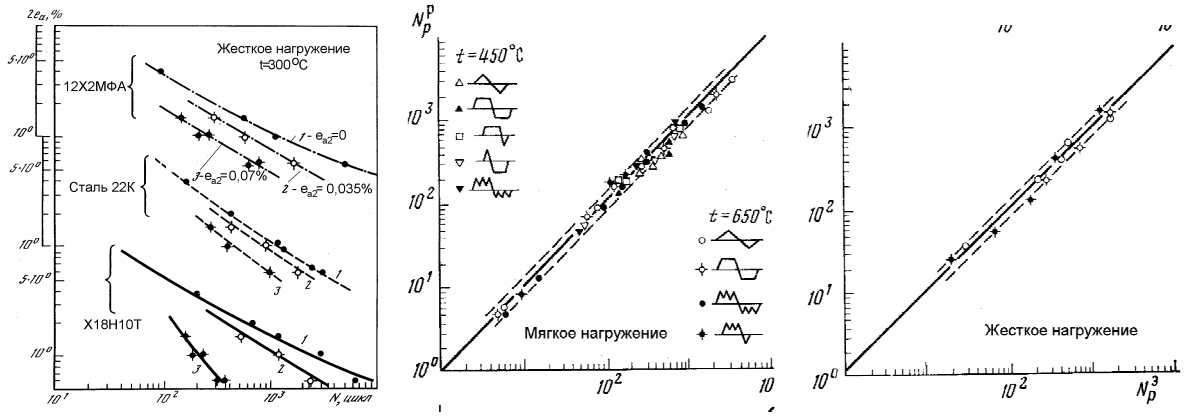


а) *б*)

Рис. 4. *Изменение модуля упрочнения материала в исходном (а) и последующих (б) циклах одночастотного и двухчастотного жесткого нагружения*

Таким образом, приведенные результаты экспериментов подтверждают влияние температурно-временных факторов и формы цикла нагружения на параметры диаграмм циклического деформирования материалов, а описывающие эти эффекты уравнения позволяют

расчетным путем определить с учетом указанных факторов кинетику деформационных характеристик, а, следовательно, с использованием зависимости (2) и условия достижения предельных состояний.



а) *б*) *в*)

Рис. 5. *Кривые усталости (а) и сопоставление расчетной и экспериментальной долговечностей (б, в) для различных режимов и условий малоциклового деформирования*

В качестве примера такого расчета на рис. 5,*а* приведены кривые усталости и соответствующие им экспериментальные долговечности для различных материалов и режимов нагружения, а на рис. 5,*б,в* сопоставление экспериментальных и рассчитанных по условию достижения предельного состояния в виде (2) данных о малоцикловой долговечности в рассматриваемых условиях нагружения. Эти данные свидетельствуют о применимости деформационно-кинетического подхода к описанию закономерностей накопления повреждений в сложных эксплуатационных условиях нагружения [6].

Таким образом, рассмотренные выше закономерности являются основой методологии определения долговечности и ресурса безопасной эксплуатации работающих в сложных температурно-силовых условиях элементов оборудования по критериям циклической прочности и по основанным на них условиям достижения предельных состояний.

Литература

1. Н.А.Махутов, М.М.Гаденин, Д.А.Гохфельд и др. Уравнения состояния при малоцикловом нагружении. Москва, Наука, 1981, 245 с.
2. В.П.Когаев. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: Машиностроение, 1993. 364 с.
3. М.М.Гаденин. Анализ нелинейных процессов накопления повреждений в конструкционных материалах. Science-6. Отчет о результатах научно-исследовательских работ за 2003-2004 гг. Москва: Институт машиноведения РАН. 2005 г. С. 129-135.
4. М.М.Гаденин. Методы и средства испытаний на прочность материалов и машин. Конструирование машин. Справочно-методическое пособие в 2-х томах. Том 2. М.: Машиностроение. 1994. с. 586-595.
5. Н.А.Махутов. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. В двух частях. Новосибирск: Наука. 2005. Часть 1: Критерии прочности и ресурса – 494 с. Часть 2: Обоснование ресурса и безопасности – 610 с.
6. М.М.Гаденин. Комплексный расчетно-экспериментальный анализ циклической прочности в процедурах нормирования. Материалы международной научно-практической конференции «Промышленная безопасность на взрывопожароопасных и химически опасных производственных объектах. Уфа, 13-14 февраля 2008. Уфа: Изд. УГНТУ, 2008. С. 62-72.

Поступила: 20.06.10.