

Термовязкопластическое циклическое деформирование и разрушение материалов

д.ф.-м.н. проф. Бондарь В.С., к.ф.-м.н. доц. Даншин В.В.
 Университет машиностроения
 8 (495) 223-05-23, tm@mami.ru

Аннотация. Рассматриваются основные положения и уравнения современной теории термовязкопластичности (неупругости). Выделяются материальные функции, формулируется базовый эксперимент и метод идентификации материальных функций, замыкающих теорию термовязкопластичности. Иллюстрируются возможности теории термовязкопластичности по адекватному описанию процессов деформирования и разрушения конструкционных сталей и сплавов при различных режимах термосиловых циклических нагружений.

Ключевые слова: термовязкопластичность, неупругость, циклическое нагружение, накопление повреждений, разрушение, малоцикловая усталость.

Проблемы надежного функционирования и снижения материалоемкости конструкций современной техники, работающих в условиях высокого уровня силовых и температурных нагрузок, делают весьма актуальной задачу математического моделирования термовязкопластического деформирования и разрушения конструкционных материалов в условиях повторности и длительности воздействия температурносиловых нагрузок. В данной работе рассматривается основной базовый вариант теории неупругости (термовязкопластичности) [1, 2], относящейся к классу одноповерхностных теорий течения при комбинированном (трансляционно-изотропном) упрочнении, при котором поверхность нагружения изотропно расширяется или сужается, а центр поверхности нагружения смещается. Для радиуса поверхности нагружения формулируется эволюционное уравнение, отражающее изотропное упрочнение, неизотермический переход и разупрочнение при отжиге. Эволюционное уравнение для тензора смещения центра поверхности нагружения имеет трехчленную структуру, т.е. разложение тензора скорости смещения (добавочных напряжений, остаточных микронапряжений) осуществляется по тензорам скорости неупругой деформации, смещения и неупругой деформации. Первые три слагаемых этого эволюционного уравнения отражают анизотропное упрочнение, последующие – неизотермический переход и рекристаллизацию (разупрочнение). Следует отметить, в данной теории нет разделения деформации на пластическую и деформацию ползучести, а есть единая неупругая деформация. Для описания процессов накопления повреждений формулируются кинетические уравнения накопления повреждений, где в качестве энергии, расходуемой на создание повреждений в материале, принимается работа микронапряжений (тензора смещения) на поле неупругих деформаций. Кинетические уравнения, кроме слагаемого, отражающего накопление повреждений за счет работы микронапряжений, содержат слагаемые, обеспечивающие неизотермический переход, охрупчивание и залечивание. Далее приводятся основные уравнения теории неупругости (термовязкопластичности):

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p, \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}^e = \frac{1}{E} \left[\dot{\sigma}_{ij} - \nu (3\dot{\sigma}_0 \delta_{ij} - \dot{\sigma}_{ij}) \right] + \alpha_{ij}^{eT} \dot{T}, \quad (2)$$

$$\alpha_{ij}^{eT} = \alpha_T \delta_{ij} - \frac{1}{E^2} \left[\sigma_{ij} - \nu (3\sigma_0 \delta_{ij} - \sigma_{ij}) \right] \frac{dE}{dT} - \frac{1}{E} (3\sigma_0 \delta_{ij} - \sigma_{ij}) \frac{d\nu}{dT},$$

$$f(\sigma_{ij}) = \frac{3}{2}(s_{ij} - a_{ij})(s_{ij} - a_{ij}) - C^2 = 0, \quad (3)$$

$$\dot{C} = q_\varepsilon \dot{\varepsilon}_{u^*}^p + q_T \dot{T} - q_R, \quad \dot{\varepsilon}_{u^*}^p = \left(\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \varepsilon_{ij}^p \right)^{1/2}, \quad (4)$$

$$\dot{a}_{ij} = \frac{2}{3} g \dot{\varepsilon}_{ij}^p + \left(\frac{2}{3} g_\varepsilon \varepsilon_{ij}^p + g_a a_{ij} \right) \dot{\varepsilon}_{u^*}^p + \left(\frac{2}{3} g_\varepsilon^T \varepsilon_{ij}^p + g_a^T a_{ij} \right) \dot{T} - \left(\frac{2}{3} g_\varepsilon^R \varepsilon_{ij}^p + g_a^R a_{ij} \right), \quad (5)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \dot{\lambda} = \frac{3}{2} \frac{s_{ij}^*}{\sigma_u^*} \dot{\varepsilon}_{u^*}^p, \quad s_{ij}^* = s_{ij} - a_{ij}, \quad \sigma_u^* = \left(\frac{3}{2} s_{ij}^* s_{ij}^* \right)^{1/2}, \quad \dot{\varepsilon}_{u^*}^p = \frac{1}{E_*} \left[\frac{3}{2} \frac{s_{ij}^* \dot{\sigma}_{ij}}{\sigma_u^*} - B^T \dot{T} + B^R \right], \quad (6)$$

$$\dot{\varepsilon}_{u^*}^p = \frac{1}{E_* + 3G} \left[3G \frac{s_{ij}^* \dot{\sigma}_{ij}}{\sigma_u^*} - B^T \dot{T} + B^R \right],$$

$$E_* = q_\varepsilon + g + g_\varepsilon \varepsilon_u^{p*} + g_a a_u^*, \quad B^T = q_T + g_\varepsilon^T \varepsilon_u^{p*} + g_a^T a_u^*, \quad B^R = q_R + g_\varepsilon^R \varepsilon_u^{p*} + g_a^R a_u^*,$$

$$\varepsilon_u^{p*} = \frac{s_{ij}^* \varepsilon_{ij}^p}{\sigma_u^*}, \quad a_u^* = \frac{3}{2} \frac{s_{ij}^* a_{ij}}{\sigma_u^*},$$

$$\sigma_u^* < C \cup \dot{\varepsilon}_{u^*}^p \leq 0 \quad - \text{упругость} \quad (\dot{\varepsilon}_{u^*}^p = 0), \quad (7)$$

$$\sigma_u^* = C \cap \dot{\varepsilon}_{u^*}^p > 0 \quad - \text{неупругость} \quad (\dot{\varepsilon}_{u^*}^p \neq 0),$$

$$\dot{\omega} = \alpha \omega^{\frac{\alpha-1}{\alpha}} \frac{1}{W} (a_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^p) - g_\omega \omega, \quad (8)$$

$$\dot{W} = g_W^T \dot{T} - g_W W. \quad (9)$$

Здесь ε_{ij} , ε_{ij}^e , ε_{ij}^p – тензора полной, упругой и неупругой деформаций; E, ν, α_T – модуль Юнга, коэффициент Пуассона, коэффициент температурного расширения; T – температура; $\sigma_0 = \sigma_{ii}/3$ – среднее напряжение; δ_{ij} – символ Кронекера; σ_{ij} , s_{ij} – тензор и девиатор напряжений; a_{ij} – девиатор смещения; C – радиус (размер) поверхности нагружения; $\varepsilon_{u^*}^p$ – накопленная неупругая деформация; s_{ij}^* – девиатор активных напряжений; G – модуль сдвига; ω – повреждение ($\omega \in [0;1]$); W – энергия разрушения.

Определяющие функции $q_\varepsilon, q_T, q_R, g, g_\varepsilon, g_a, g_\varepsilon^T, g_a^T, g_\varepsilon^R, g_a^R, g_\omega, g_W^T, g_W, \alpha$ выражаются через материальные функции следующим образом [1, 2]:

$$q_\varepsilon = \frac{\partial C_p}{\partial \varepsilon_{u^*}^p}, \quad q_T = \frac{C}{C_p} \frac{\partial C_p}{\partial T}, \quad q_R = q_\varepsilon P_c,$$

$$g = E_a + \beta \sigma_a, \quad g_\varepsilon = \beta E_a, \quad g_a = -\beta,$$

$$g_\varepsilon^T = \frac{dE_a}{dT} - \frac{E_a}{\sigma_a} \frac{d\sigma_a}{dT}, \quad g_a^T = \frac{1}{\sigma_a} \frac{d\sigma_a}{dT},$$

$$g_\varepsilon^R = g_\varepsilon P_a, \quad g_a^R = (g + g_a a_u) \frac{P_a}{a_u}, \quad a_u = \left(\frac{3}{2} a_{ij} a_{ij} \right)^{1/2},$$

$$g_\omega = \lambda, \quad g_W = \rho, \quad g_W^T = \frac{W}{W_0} \frac{dW_0}{dT},$$

$$\alpha = \left(\frac{\sigma}{\sigma_{au}} \right)^{n_\alpha}, \quad \sigma_{au} = \left[\frac{3}{2} \left(a_{ij} - \frac{2}{3} E_a \varepsilon_{ij}^p \right) \left(a_{ij} - \frac{2}{3} E_a \varepsilon_{ij}^p \right) \right]^{1/2},$$

$$P_c = \exp(b_c) |C - C_{P0}|^{n_c} (1 - \omega)^{-m_\omega}, \quad C_{P0} = C_P(T, 0),$$

$$P_a = \exp(b_a) (a_u)^{n_a} (1 - \omega)^{-m_\omega},$$

$$\lambda = \begin{cases} 0, & \text{если } \sigma_{ii} \geq 0, \\ \exp(b_\lambda) |\sigma_{ii}|^{n_\lambda}, & \text{если } \sigma_{ii} < 0, \end{cases}$$

$$\rho = \exp(b_\rho) (\sigma_u)^{n_\rho}, \quad \sigma_u = \left(\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij} \right)^{1/2}.$$

Окончательно уравнения теории неупругости (термовязкопластичности) замыкают следующие материальные функции, подлежащие экспериментальному определению:

$E(T), \nu(T), \alpha_T(T)$ – упругие параметры;

$C_P(T, \varepsilon_{u*}^P)$ – функция изотропного упрочнения;

$E_a(T), \sigma_a(T), \beta(T)$ – параметры анизотропного упрочнения;

$W_0(T)$ – начальная энергия разрушения;

$n_a(T)$ – параметр нелинейности процесса накопления повреждений;

$b_c(T), b_a(T), n_c(T), n_a(T), m_\omega(T)$ – параметры изотропной и анизотропной ползучести;

$b_\omega(T), b_W(T), n_\omega(T), n_W(T)$ – параметры залечивания и охрупчивания.

Для определения материальных функций необходим следующий набор данных базового эксперимента при различных уровнях температуры.

Упругие параметры определяются традиционными методами.

Для термопластических процессов необходимы:

- диаграмма одноосного пластического растяжения до деформации $0.05 \div 0.1$;
- диаграмма одноосного пластического растяжения до деформации $0.05 \div 0.1$ после предварительного сжатия до деформации $0.01 \div 0.02$;
- циклические пластические диаграммы при одноосном растяжении-сжатии с постоянным размахом деформации $0.01 \div 0.03$.

Для описания процессов накопления повреждений и разрушения дополнительно необходимы:

- данные по малоцикловой усталости при одноблочном циклическом пластическом нагружении с постоянным размахом деформации $0.01 \div 0.03$;
- данные по малоцикловой усталости при двухблочном циклическом пластическом нагружении с размахом деформации на первом блоке $0.005 \div 0.015$ и на втором блоке $0.02 \div 0.03$. Или (и) наоборот, на первом блоке $0.02 \div 0.03$, а втором блоке $0.005 \div 0.015$.

Для описания термовязкопластических процессов деформирования и накопления повреждений необходимы:

- данные по релаксации напряжения при постоянной деформации растяжения $0.03 \div 0.05$;
- данные по зависимости скорости установившейся ползучести от напряжения растяжения;
- диаграмма кратковременной ползучести при постоянном напряжении растяжения вплоть до разрушения.

Для описания процессов залечивания и охрупчивания необходимы:

- данные по длительной прочности при растяжении и сжатии;
- данные по малоцикловой усталости с постоянным размахом деформации (порядка $0.01 \div 0.02$) после ползучести при наборе различных уровней напряжения растяжения.

Расчетно-экспериментальный метод определения (идентификации) материальных функций по данным базового эксперимента подробно изложен в работах [1, 2, 3], в которых для ряда конструкционных сталей и сплавов приведены материальные функции.

На широком спектре конструкционных сталей и сплавов и программ эксперименталь-

ных исследований проведена [1, 2, 3, 4] верификация теории неупругости (термовязкопластичности) как по компонентам напряженно-деформированного состояния, так и по характеристикам разрушения. Ниже приводятся некоторые результаты верификации теории термовязкопластичности на основе сопоставления результатов расчетов и экспериментов при циклических нагружениях.

Расчетные и экспериментальные исследования усталости нержавеющей стали 304 проводятся при пропорциональном симметричном жестком циклическом нагружении в условиях нормальной температуры, как при постоянном размахе деформации, так и при блочном изменении размаха деформации. На рисунке 1 сплошной линией показана расчетная кривая малоциклового усталости, а светлыми кружками – экспериментальные данные [5]. Нарушение правила линейного суммирования повреждений при двухблочном изменении размаха деформации приведено на рисунке 2. Результаты расчетов на этом рисунке изображены сплошными кривыми, а результаты экспериментов [5] темными кружками при возрастании размаха деформации ($0.005 \rightarrow 0.015$) и светлыми кружками при убывании размаха деформации ($0.015 \rightarrow 0.005$). Наблюдается существенное отклонение от правила линейного суммирования повреждений при удовлетворительном соответствии результатов расчетов и экспериментов.

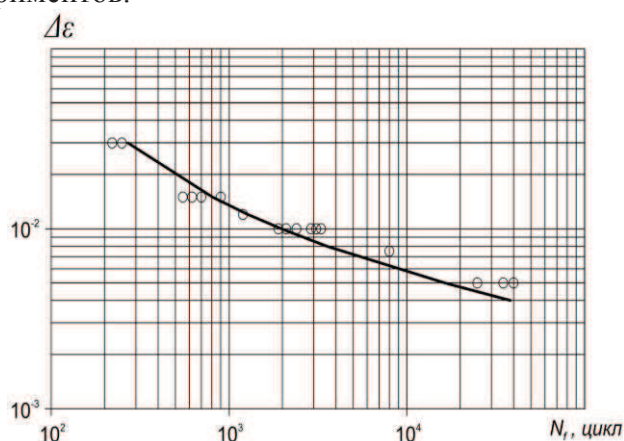


Рисунок 1. Кривая малоциклового усталости стали 304

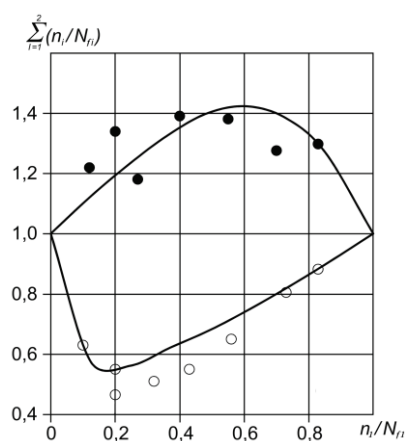


Рисунок 2. Суммирование повреждений при двухблочном изменении амплитуды деформации

Расчетные и экспериментальные исследования усталости нержавеющей стали AISI 304 проводятся в условиях нормальной температуры как при пропорциональном жестком циклическом нагружении, так и при непропорциональном (сложном) циклическом нагружении по траектории деформаций в виде окружности. Результаты расчетов изображены на рисунке 3 сплошными кривыми, а результаты экспериментов [6] светлыми кружками при пропорциональном нагружении и темными кружками при непропорциональном (сложном). Наблюдается значительно больший повреждающий эффект непропорционального нагружения по сравнению с пропорциональным – снижение долговечности достигает практически порядка. Соответствие результатов расчетов и экспериментов удовлетворительное.

Результаты исследования малоциклового усталости при изотермическом и неизотермическом нагружении нержавеющей стали 12X18H9 приводятся на рисунках 4, 5 и 6.

На рисунке 4 приведены расчетные кривые малоциклового усталости и экспериментальные результаты [7] (кружки, треугольники, светлые квадраты, звездочки, темные квадраты) при жестком циклическом нагружении при постоянной температуре $T = 500, 550, 600, 650^\circ C$ и переменной температуре $T = 150 \leftrightarrow 650^\circ C$ (синфазный неизотермический режим). Длительность цикла составляла 2 мин. (частота – 30 цикл/час).

На рисунке 5 приведены расчетные кривые малоциклового усталости и эксперимен-

тальные результаты [7] (кружки, треугольники, квадраты) при мягком циклическом нагружении при постоянной температуре $T = 650^{\circ}\text{C}$ и двух режимах переменной температуры $T = 150 \leftrightarrow 650^{\circ}\text{C}$, отличающихся частотой изменения температуры – 30 цикл/час и 60 цикл/час соответственно. Длительность цикла изменения напряжения 2 мин. (частота – 30 цикл/час).

На рисунке 6 приведены расчетные кривые и экспериментальные результаты [7, 8, 9] при жестком циклическом изотермическом нагружении ($T = 650^{\circ}\text{C}$) с различной длительностью циклов. Кривая 1 получена расчетным путем при скорости деформирования, когда временные эффекты малы, а светлый квадрат соответствует экспериментальному результату. Кривая 2 и треугольники получены при длительности цикла равной 2 мин, а кривая 3 и кружки – 8 мин.

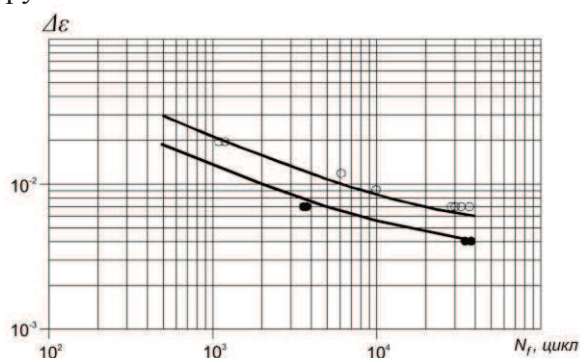


Рисунок 3. Кривые малоциклового усталости нержавеющей стали AISI 304 при простом и сложном нагружениях

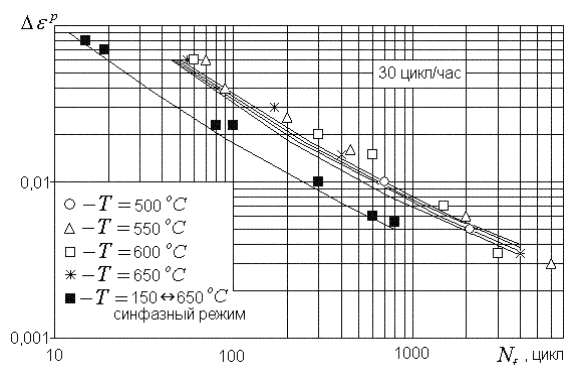


Рисунок 4. Кривые малоциклового усталости нержавеющей стали 12X18H9 при жестком циклическом изотермическом и неизотермическом нагружении

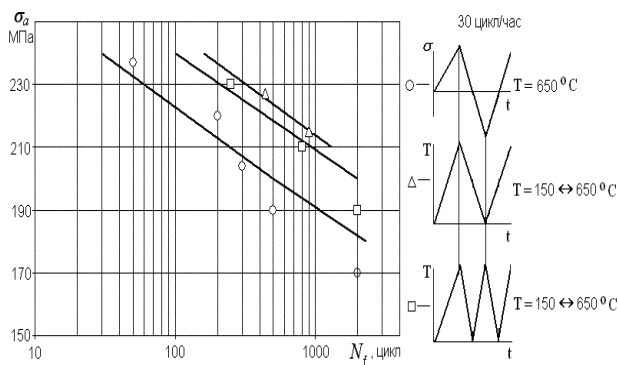


Рисунок 5. Кривые малоциклового усталости нержавеющей стали 12X18H9 при мягком циклическом изотермическом и неизотермическом нагружении

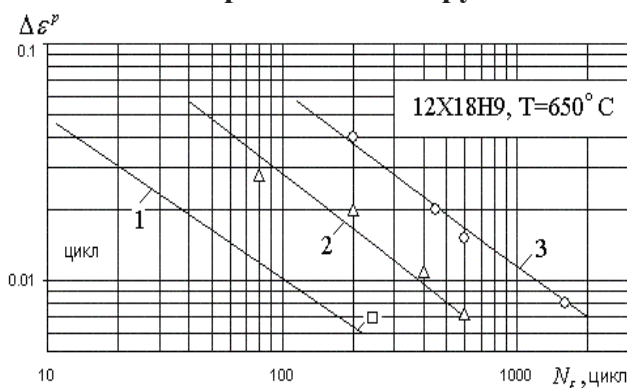


Рисунок 6. Кривые малоциклового усталости нержавеющей стали 12X18H9 при жестком циклическом изотермическом нагружении с различной длительностью циклов

Представленные результаты говорят о существенном влиянии на малоцикловую прочность длительности процесса, а также эффектов охрупчивания и залечивания, которые учитываются в основном варианте теории неупругости (термовязкопластичности).

Адекватное описание процессов термовязкопластического деформирования и разрушения конструкционных сталей и сплавов при разнообразных режимах циклического нагружения иллюстрирует широкие возможности современной теории неупругости (термовязкопластичности).

Литература

1. Бондарь В.С. Неупругое поведение и разрушение материалов и конструкций при сложном неизотермическом нагружении: дис. ... д-ра физико-математических наук; 01.02.04. – М., 1990. – 314 с.
2. Бондарь В.С. Неупругость. Варианты теории. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 144 с.
3. Бондарь В.С. Теория неупругости // Материалы 49-ой Межд. научно-техн. конференции ААИ. Школа-семинар «Современные модели термовязкопластичности». Часть 2. – М.: МАМИ, 2005. – С. 3 – 24.
4. Бондарь В.С., Даншин В.В. Пластичность. Пропорциональные и непропорциональные нагружения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 176 с.
5. Бернанд-Коннолли, Бью Куок, Бирон. Усталость коррозионнстойкой стали 304 при испытаниях в условиях многоступенчатой контролируемой деформации // Теор. основы инж. расчетов. – 1983. – № 3. – С. 47 – 53.
6. Соси Д. Модели разрушения при многоосной усталости // Теор. основы инж. расчетов. – 1988. – № 3. – С. 9 – 21.
7. Казанцев А.Г. Малоцикловая усталость при сложном термомеханическом нагружении. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 247 с.
8. Гусенков А.П. Прочность при изотермическом и неизотермическом малоцикловом нагружении. – М.: Наука, 1979. – 295 с.
9. Гусенков А.П., Котов П.И. Малоцикловая усталость при неизотермическом нагружении. – М.: Машиностроение, 1983. – 240 с.