

Расчетно-экспериментальное определение материальных функций нержавеющей стали 12Х18Н10Т

д.ф.-м.н. проф. Бондарь В.С., Пролубникова А.А., Абашев Д.Р.

Университет машиностроения, ФГУП ЦНИИмаш

8(495)2230523 доб. 1318, tm@mami.ru, 8(495)5135554; Lab55541@tsniimash.ru

Аннотация. Рассматриваются основные положения и уравнения теории упругопластического деформирования. Выделяются материальные функции, замыкающие теорию. Формулируется базовый эксперимент и метод идентификации материальных функций. На основе базового эксперимента определяются материальные функции нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

Ключевые слова: пластичность, накопление повреждений, базовый эксперимент, идентификация материальных функций.

Введение

Разработка определяющих уравнений описания процессов упругопластического деформирования в настоящее время идет двумя основными направлениями. К первому направлению относятся различные варианты теории упругопластических процессов, базирующиеся на общей математической теории пластичности А.А. Ильюшина [1, 2]. Ко второму направлению относятся различные варианты теории пластического течения при комбинированном упрочнении, базирующейся на концепции микронапряжений, выдвинутой В.В. Новожиловым [3].

Математическое моделирование процессов накопления повреждений при произвольных режимах пропорционального и непропорционального (сложного) циклического нагружения возможно только на основе формулировки кинетических (эволюционных) уравнений накопления повреждений, т.к. повреждение является функционалом процесса нагружения. Наиболее перспективны кинетические уравнения [3-7], построенные на энергетическом принципе, где в качестве энергии, отвечающей за процесс накопления повреждений, принимается энергия, равная работе микронапряжений на поле пластических деформаций.

Рассматривается достаточно простой вариант второго направления – теория упругопластического деформирования, являющаяся частным вариантом теории неупругости [4, 5]. Данный вариант теории пластичности прошел обширную верификацию [4, 6] на широком спектре конструкционных сталей и сплавов и программ экспериментальных исследований.

Очевидно, что ни одна теория не может иметь практического приложения, если четко не сформулированы базовый эксперимент и метод определения параметров и функций материала, замыкающих эту теорию.

В настоящей работе для теории упругопластического деформирования формулируется базовый эксперимент и метод идентификации (определения) материальных функций, замыкающих эту теорию.

Основные положения и уравнения теории пластичности

Материал однороден и начально изотропен. Тензор скоростей деформации представляется в виде суммы тензоров скоростей упругой и пластической деформаций:

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

Упругие деформации при изменении напряжений следуют обобщенному закону Гука:

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

где E, ν - соответственно модуль Юнга и коэффициент Пуассона, $\sigma_0 = \frac{1}{3} \sigma_{ii}$ – среднее напряжение.

Полагается, что в пространстве составляющих тензора напряжений существует поверхность нагружения, разделяющая области упругого и упругопластического состояний. Поверхность нагружения изотропно расширяется или сужается и смещается в процессе нагружения. Уравнение поверхности нагружения принимается в следующем виде:

$$f(\sigma_{ij}) = \frac{3}{2}(s_{ij} - a_{ij})(s_{ij} - a_{ij}) - [C_p(\varepsilon_{u*}^p)]^2 = 0. \quad (3)$$

Здесь $s_{ij}^* = s_{ij} - a_{ij}$ - девиатор активных [3] напряжений, s_{ij} - девиатор напряжений, ε_{u*}^p - длина дуги пластической деформации (накопленная пластическая деформация, параметр Од-квиста). Тензор a_{ij} (добавочных напряжений, остаточных микронапряжений) характеризует смещение поверхности нагружения, а скаляр C_p отвечает размеру (радиусу) поверхности нагружения. Функция $C_p(\varepsilon_{u*}^p)$ характеризует изотропное упрочнение, а тензор a_{ij} - анизотропное упрочнение.

Смещение поверхности нагружения определяется следующим эволюционным уравнением:

$$\begin{aligned} \dot{a}_{ij} &= \frac{2}{3} g \dot{\varepsilon}_{ij}^p + \left(\frac{2}{3} g_\varepsilon \varepsilon_{ij}^p + g_a a_{ij} \right) \dot{\varepsilon}_{u*}^p, \\ g &= E_a + \beta \sigma_a, \quad g_\varepsilon = \beta E_a, \quad g_a = -\beta. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь g, g_ε, g_a - функции, подлежащие экспериментальному определению. В общем случае g, g_ε и g_a - являются функционалами процесса нагружения. Здесь же g, g_ε и g_a считаются константами материала, выражающимися через материальные параметры E_a, σ_a, β .

Тензор скоростей пластической деформации определяется следующим уравнением (ассоциированный с (3) закон течения, градиентальный закон течения):

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \dot{\lambda} = \frac{3}{2} \frac{s_{ij}^*}{\sigma_{u*}^*} \dot{\varepsilon}_{u*}^p. \quad (5)$$

Здесь σ_{u*}^* - интенсивность активных напряжений, $\dot{\varepsilon}_{u*}^p$ - интенсивность скоростей пластической деформации.

Используя зависимости (1) – (5), можно получить уравнения для скорости накопленной пластической деформации соответственно для мягкого и жесткого нагружений:

$$\dot{\varepsilon}_{u*}^p = \frac{1}{E_*} \frac{3}{2} \frac{s_{ij}^*}{\sigma_{u*}^*} \dot{\sigma}_{ij}^*, \quad (6)$$

$$\dot{\varepsilon}_{u*}^p = \frac{3G}{E_* + 3G} \frac{s_{ij}^*}{\sigma_{u*}^*} \dot{\varepsilon}_{ij}^*, \quad (7)$$

$$E_* = q_e + g + g_\varepsilon \varepsilon_{u*}^{p*} + g_a a_{u*}^*, \quad q_e = \frac{d C_p(\varepsilon_{u*}^p)}{d \varepsilon_{u*}^p}, \quad \varepsilon_{u*}^{p*} = \frac{s_{ij}^* \varepsilon_{ij}^p}{\sigma_{u*}^*}, \quad a_{u*}^* = \frac{3}{2} \frac{s_{ij}^* a_{ij}}{\sigma_{u*}^*}.$$

Условия упругого и упругопластического состояний имеют вид:

- упругость

$$\sigma_{u*}^* < C_p(\dot{\varepsilon}_{u*}^p) \cup \dot{\varepsilon}_{u*}^p \leq 0, \quad (8)$$

- упругопластичность

$$\sigma_{u*}^* = C_p(\dot{\varepsilon}_{u*}^p) \cap \dot{\varepsilon}_{u*}^p > 0. \quad (9)$$

Здесь под $\dot{\varepsilon}_{u*}^p$ подразумевается выражение, задаваемое уравнением (6) или (7) или аналогичным ему для смешанных нагружений.

Для описания процесса накопления повреждений используется энергетический подход и в качестве энергии, расходуемой на создание повреждений в материале, принимается энергия, равная работе добавочных напряжений (микронапряжений) на поле пластических деформаций. Кинетическое уравнение накопления повреждений принимается в следующем виде:

$$\dot{\omega} = \alpha \omega^{\alpha-1} \frac{1}{W_0} a_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^p, \quad (10)$$

$$\alpha = (\sigma_a / \sigma_{ua})^{n_\alpha},$$

$$\sigma_{ua} = \left[\frac{3}{2} \left(a_{ij} - \frac{2}{3} E_a \varepsilon_{ij}^p \right) \left(a_{ij} - \frac{2}{3} E_a \varepsilon_{ij}^p \right) \right]^{1/2}.$$

Здесь σ_{ua} - интенсивность микронапряжений (добавочных напряжений) нелинейного типа. Уравнение (10) адекватно описывает нелинейные процессы накопления повреждений. Критерием разрушения материала будет достижение повреждением предельного значения, обычно принимаемого близким к единице.

Материальные функции

Теорию упругопластического деформирования замыкают следующие материальные функции, подлежащие экспериментальному определению:

E, ν - упругие параметры;

$C_p(\varepsilon_{u*}^p)$ - функция изотропного упрочнения;

E_a, σ_a, β - параметры анизотропного упрочнения;

W_0 - энергия разрушения;

n_α - параметр нелинейности процесса накопления повреждений.

Базовый эксперимент и метод идентификации материальных функций. Для определения материальных функций теории упругопластического деформирования достаточно следующего минимального набора экспериментальных данных базового эксперимента:

- упругие параметры, которые определяются традиционными методами;
- диаграмма одноосного растяжения до деформации $0.05 \div 0.1$;
- диаграмма одноосного растяжения до деформации $0.05 \div 0.1$ после предварительного сжатия до деформации $0.01 \div 0.02$;
- циклические диаграммы и число циклов до разрушения при одноосном растяжении-сжатии при жестком нагружении с постоянным размахом деформации $0.005 \div 0.025$ вплоть до появления макротрещины размером ~ 1 мм;
- циклические диаграммы и число циклов до разрушения при одноосном растяжении-сжатии при двухблочном жестком нагружении с увеличивающимся и уменьшающимся размахом деформации $0.005 \rightarrow 0.025$ и $0.025 \rightarrow 0.005$. Число циклов на первом блоке должно соответствовать $0.4 \div 0.5$ от числа циклов до разрушения при размахе деформации первого блока.

Для определения параметров анизотропного упрочнения экспериментальные диаграммы растяжения и растяжения после предварительного сжатия стали 12Х18Н10Т представляются, вычитая из полной деформации упругую, в виде зависимостей между напряжениями σ_1 и σ_2 соответственно и накопленной пластической деформацией ε_{u*}^p (рисунок 1).

Рассматривая разность величины σ_1 и σ_2 при одинаковых значениях ε_{u*}^p можно получить [4-6] следующую зависимость в координатах:

$$y = (\sigma_1 - \sigma_2) / (2|\varepsilon_{02}^p|), \quad x = \varepsilon_{u*}^p - |\varepsilon_{02}^p|, \quad (11)$$

которая показана на рисунке 2.

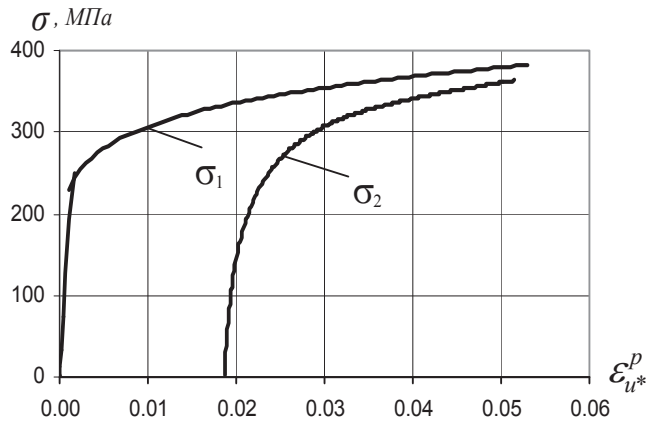


Рисунок 1. Диаграммы растяжения и растяжения после предварительного сжатия

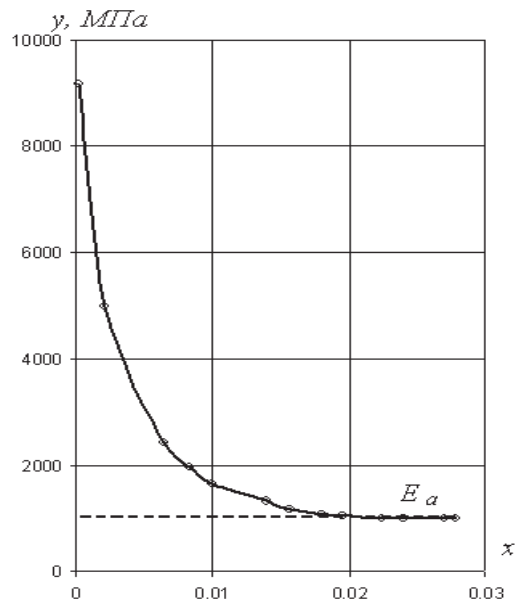


Рисунок 2. Кривая для определения параметра E_a

Горизонтальной асимптотой этой зависимости является прямая $y = E_a$, что позволяет графически определить для стали 12X18H10T значение $E_a = 1000 \text{ МПа}$.

Для получения параметров β и σ_a зависимость на рисунке 2 перестраивается в полулогарифмических координатах

$$z = \ln\left(\frac{y - E_a}{E_a}\right), \quad x = \varepsilon_{u*}^p - |\varepsilon_{02}^p|. \quad (12)$$

Полученная линейная зависимость (рисунок 3) позволяет по углу наклона φ и ординате z_0 определить β и σ_a по формулам:

$$\beta = \text{tg}\varphi, \quad \sigma_a = \frac{E_a |\varepsilon_{02}^p| \exp z_0}{1 - \exp(-\beta |\varepsilon_{02}^p|)}. \quad (13)$$

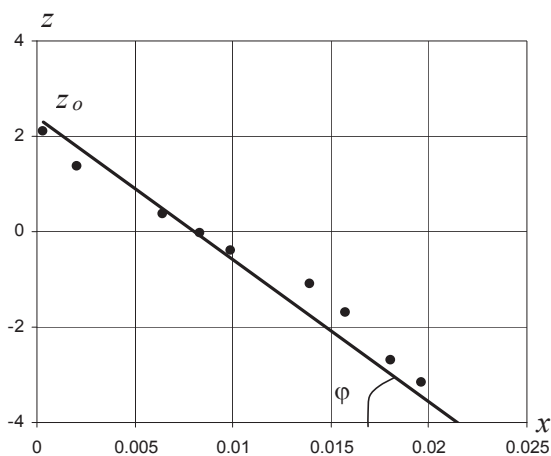


Рисунок 3. Кривая для определения параметров β и σ_a

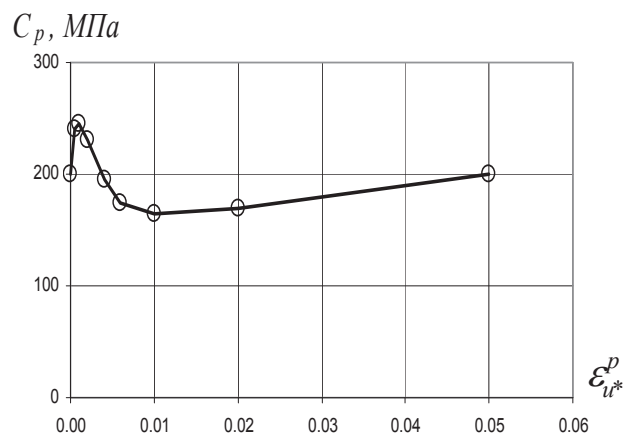


Рисунок 4. Зависимость $C_p(\varepsilon_{u*}^p)$ для стали 12X18H10T

Для стали 12X18H10T параметры $\beta = 260$ и $\sigma_a = 150$ МПа.

Получив параметры анизотропного упрочнения E_a , σ_a , β , можно теперь определить функцию изотропного упрочнения $C_p(\varepsilon_{u*}^p)$, используя экспериментальную диаграмму растяжения (рисунок 1), по формуле:

$$C_p(\varepsilon_{u*}^p) = \sigma_1(\varepsilon_{u*}^p) - E_a \varepsilon_{u*}^p - \sigma_a [1 - \exp(-\beta \varepsilon_{u*}^p)]. \quad (14)$$

На рисунке 4 показана зависимость $C_p(\varepsilon_{u*}^p)$ для стали 12X18H10T.

Для остальных значений накопленной пластической деформации функция изотропного упрочнения определяется по результатам циклических испытаний при постоянном размахе деформации порядка $0.02 \div 0.025$ на основе зависимости максимального напряжения растяжения σ_N в конце цикла от номера цикла N (рисунок 5). Тогда накопленная пластическая деформация будет равна:

$$\varepsilon_{u*}^p = \Delta \varepsilon^p / 2 + 2 \Delta \varepsilon^p N, \quad (15)$$

а значения функции изотропного упрочнения будут определяться по формуле:

$$C_p(\varepsilon_{u*}^p) = \sigma_N - E_a \Delta \varepsilon^p / 2 - \sigma_a \frac{1 - \exp(-\beta \Delta \varepsilon^p)}{1 + \exp(-\beta \Delta \varepsilon^p)}. \quad (16)$$

Окончательно зависимость $C_p(\varepsilon_{u*}^p)$ представлена на рисунке 6.

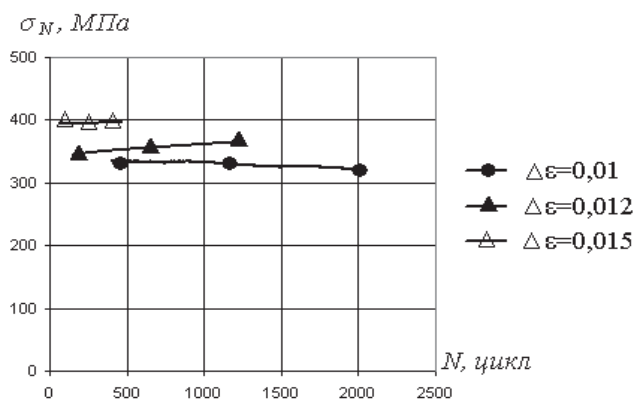


Рисунок 5. Зависимости максимального напряжения растяжения в конце цикла от номера цикла

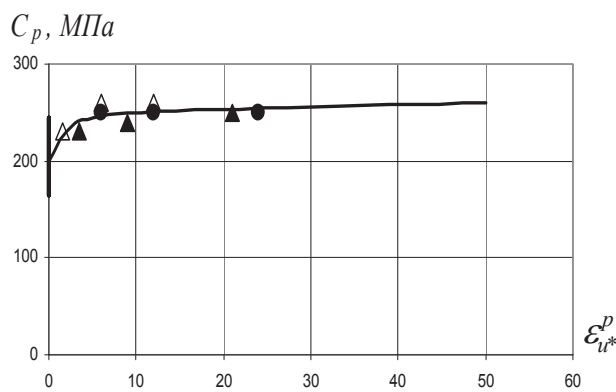


Рисунок 6. Зависимость $C_p(\varepsilon_{u*}^p)$

Энергия разрушения определяется из испытаний на малоцикловую усталость при постоянном размахе деформации, используя критерий малоциклового прочностного [4-6]. Тогда энергия разрушения будет определяться по формуле

$$W_0 = \frac{2\sigma_a}{\beta} \left[\beta \Delta \varepsilon^p - 2 \frac{1 - \exp(-\beta \Delta \varepsilon^p)}{1 + \exp(-\beta \Delta \varepsilon^p)} \right] N_p \quad (17)$$

При циклических испытаниях нержавеющей стали 12X18H10T с размахами деформации $\Delta \varepsilon = 0.01, 0.012, 0.015$ числа циклов до разрушения составили соответственно $N_p = 2010, 1100, 500$. Тогда среднее значение энергий разрушения, полученное по формуле (17), будет равно $W = 700$ МДж/м³.

Для определения параметра нелинейности процесса накопления повреждений проводятся расчеты при двухблочных режимах циклического нагружения, на основе которых подбирается значение n_a до совпадения числа циклов до разрушения при расчетах и экспериментах.

При двухблочном циклическом испытании нержавеющей стали 12X18H10T на первом

блоке с размахом деформации $\Delta\varepsilon = 0.02$ и числом циклов $N_1 = 175$ на втором блоке с размахом деформации $\Delta\varepsilon = 0.01$ получено число циклов до разрушения $N_2 = 350$. В другом испытании на первом блоке с размахом деформации $\Delta\varepsilon = 0.01$ и числом циклов $N_1 = 1000$ на втором блоке с размахом деформации $\Delta\varepsilon = 0.02$ получено число циклов до разрушения $N_2 = 300$. Эти испытания позволили определить $n_\alpha = 1.5$.

Окончательно для нержавеющей стали 12Х18Н10Т будут иметь место следующие значения материальных функций:

$$E = 2.0 \cdot 10^5 \text{ МПа}, \quad \nu = 0.3$$

$$E_a = 1000 \text{ МПа}, \quad \beta = 260, \quad \sigma_a = 150 \text{ МПа}$$

$$W_0 = 700 \frac{\text{Мдж}}{\text{м}^3}, \quad n_\alpha = 1.5$$

$\varepsilon_{u\bullet}^p$	0	0.0005	0.001	0.002	0.004	0.006	0.01	0.02	0.05
C_p МПа	200	240	245	230	195	175	165	170	200

$\varepsilon_{u\bullet}^p$	3.0	9.0	50	100
C_p МПа	240	250	260	270

Заключение

Базовый эксперимент, по результатам которого определяются материальные функции, достаточно прост и легко реализуем. Метод идентификации материальных функций строится на обработке экспериментальных кривых и не связан с определением пределов текучести и других величин с какими-либо допусками на деформации, что обычно вносит неоднозначность в получаемые результаты. Метод идентификации материальных функций алгоритмичен и позволяет достаточно просто проводить компьютерную обработку данных базового эксперимента и определять материальные функции.

Литература

1. Ильюшин А.А. Пластичность. Основы общей математической теории. - М.: Изд.АН СССР, 1963. - 271 с.
2. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. - М.: Изд-во МГУ, 1990. - 310 с.
3. Новожилов В.В., Кадашевич Ю.И. Микронапряжения в конструкционных материалах. - Л.: Машиностроение, 1990. - 224 с.
4. Бондарь В.С. Неупругое поведение и разрушение материалов и конструкций при сложном неизотермическом нагружении // Автореферат диссерт... д.ф-м.н. - Москва: МАМИ, 1990. - 40с.
5. Бондарь В.С. Неупругость. Варианты теории. - М.: Физматлит, 2004. - 144 с.
6. Бондарь В.С., Даншин В.В. Пластичность. Пропорциональные и непропорциональные нагружения. - М.: Физматлит, 2008. - 176 с.
7. Волков И.А., Коротких Ю.Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. - М.: Физматлит, 2008. - 424 с.