

УДК 621.735.32

Хван А. Д.  
Хван Д. В.  
Крук А. Т.**ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СТОЕК  
РАЗДАЧЕЙ ВНУТРЕННИМ ДАВЛЕНИЕМ**

В машиностроении нередко требуется с целью повышения несущей способности выполнять различного рода упрочняющие технологические операции (термообработка, пластическое деформирование и др.) заготовок элементов конструкций [1, 2]. В связи с этим возникает проблема упрочнения, например, работающих на сжатие тонкостенных цилиндрических стоек, изготавливаемых по тем или иным техническим причинам из термически неупрочняемых металлов, к которым можно отнести нержавеющие стали аустенитного класса, цветные сплавы и др.

Целью работы является разработка способа пластического упрочнения указанных стоек, основанного на свойствах конструкционных металлов приобретать деформационную анизотропию механических характеристик, в частности, очень важного с точки зрения прочности деталей условного предела текучести на сжатие  $\sigma_{c0,2}$  (с допуском на пластическую деформацию 0,2 %). При этом обоснование возможности увеличения данной характеристики прочности дается на основе модели анизотропно-упрочняющегося тела Г. Бакхауза [3, 4], согласно которой компоненты девиатора напряжений  $S_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) определяются по соотношению:

$$S_{ij} = \frac{2}{3} \sigma_0(e) \frac{d\varepsilon_{ij}}{de} - \frac{1}{3} \int_0^e [1 - \beta(e^*)] \sigma_0(e^*) \varphi(e - e^*) \frac{d\varepsilon_{ij}^2}{de^{*2}} de^*. \quad (1)$$

Здесь  $\varphi(e - e^*)$  – функция, характеризующая наследственное влияние истории нагружения;  $e^*$  – переменная в подынтегральной функции. В теории предполагается независимость функций  $\varphi(e - e^*)$ ,  $\sigma_0(e)$ ,  $\beta(e)$  от вида напряженного состояния и истории нагружения, и их можно рассматривать как используемые в модели характеристики материала.

В работе [5] представлено решение задачи об определении напряженно-деформированного состояния при сжатии и растяжении в поперечном направлении растянутых пластически вдоль оси до накопленной деформации  $e$  цилиндрических стержней. Установлено, что условные пределы текучести на сжатие ( $\sigma_{c0,2}$ ) и растяжение ( $\sigma_{p0,2}$ ) при деформировании в поперечном направлении отличаются друг от друга, а значения их определяются по соотношениям:

$$\sigma_{c0,2} = \frac{1 - \beta + \sqrt{1 + 14\beta + \beta^2}}{4} \cdot \sigma_0(e); \quad (2)$$

$$\sigma_{p0,2} = \frac{-1 + \beta + \sqrt{1 + 14\beta + \beta^2}}{4} \cdot \sigma_0(e). \quad (3)$$

Здесь  $\sigma_0$ ,  $e$  – интенсивности напряжений и деформаций;

$\beta$  – параметр, характеризующий эффект Баушингера [6].

Из этих выражений следует, что  $\sigma_{c0,2} > \sigma_{p0,2}$ , для изотропно упрочняющегося тела  $\beta = 1$  и  $\sigma_{c0,2} = \sigma_{p0,2} = \sigma_0(e)$ .

В силу эффекта Баушингера, являющегося одним из проявлений деформационной анизотропии, условный предел текучести при сжатии в направлении противоположном растяжению образцов определяют по формуле:

$$\sigma'_{c0,2} = \beta \cdot \sigma_p(e), \quad (4)$$

где  $\sigma_p(e)$  – нормальное напряжение при растяжении, предшествующее сжатию.

Для большинства конструкционных металлов параметр  $\beta < 1$ , и его определяют по достаточно точно соответствующей опытным данным формуле:

$$\beta = \beta_0 + (1 - \beta_0) \exp(-100e). \quad (5)$$

Здесь  $\beta_0$  – асимптотическое значение параметра  $\beta$ , определяемое статистической обработкой опытных данных.

Представленные в работах [5, 7] опытные данные показывают, что предел текучести  $\sigma'_{c0,2}$  значительно меньше напряжения при растяжении в осевом направлении  $\sigma_p$ , которое можно принять равным интенсивности напряжений  $\sigma_0(e)$ . Тогда из соотношения (2) и (4) с учетом отмеченного следует, что  $\sigma_{c0,2} > \sigma'_{c0,2}$ .

В связи с этим следует отметить, что процесс пластического растяжения нельзя использовать в качестве упрочняющей технологической операции для работающих на сжатие тонкостенных цилиндрических стоек. Однако, на основании соотношения (1), можно сделать вывод о возможности упрочнения этих стоек раздачей их внутренним давлением, согласно которой можно представить следующую систему уравнений в цилиндрической системе координат [8]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z = \sigma_\rho = 0, \sigma_\eta = qR/t = \sigma_0(e); \\ e_\eta = e = \ln(R/R_0), e_z = e_\rho = -0.5e_\eta. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Здесь  $R = R_0 \cdot \exp(e)$ ,  $t = t_0 \exp(-0.5e)$  – текущие средний радиус и толщина стенки стойки;

$\sigma_\eta$ ,  $\sigma_z$ ,  $\sigma_{c0,2}$  – соответственно окружные, осевые и радиальные напряжения;

$e_\eta$ ,  $e_z$ ,  $e_\rho$  – соответственно окружные, осевые и радиальные логарифмические деформации.

Для удобства счета интенсивность напряжений  $\sigma_0$  представляется аппроксимацией  $A$ . Надаи:

$$\sigma_0 = Ae^n. \quad (7)$$

Здесь  $A$ ,  $n$  – характеристики материала определяемые статистической обработкой опытной кривой течения.

Согласно представленному выражению (1) для тонкостенной цилиндрической стойки можно ее окружную и осевую деформации рассматривать соответственно как деформацию растяжения вдоль оси и деформацию сжатия в поперечном направлении цилиндрического стержня.

В связи с этим рассматривается следующий алгоритм реализации способа упрочнения стоек. После подстановки выражения (7) в соотношения (2) и (6) получим формулы для определения давления  $q$  и соответствующего ему предел текучести на сжатие:

$$q = \frac{A \cdot t_0}{R_0} \cdot e^n \cdot \exp(-1.5e); \quad (8)$$

$$\sigma_{c0,2} = \frac{1 - \beta + \sqrt{1 + 14\beta + \beta^2}}{4} \cdot A e^n. \quad (9)$$

Для стойки с исходными геометрическими размерами и механическими характеристиками, задаваясь величиной накопленной деформации  $e$ , определяют по этим соотношениям внутреннее давление, а из соотношения (9) получают увеличенное относительно исходного предела текучести  $\sigma_T$  значение предела текучести на сжатие  $\sigma_{c0,2}$ . Таким образом, для упрочняемой стойки устанавливают зависимость  $q = f(\sigma_{c0,2})$ .

При выполнении расчетов по соотношениям (8) и (9) можно в них параметр  $\beta$  определять по аппроксимации (5).

В качестве примера рассматривается упрочнение стойки с  $R_0 = 50$  мм,  $t_0 = 5$  мм из нержавеющей стали аустенитного класса 1X18H9T ( $\sigma_T = 385$  МПа,  $A = 1450$  МПа,  $n = 0,3$ ,  $\beta_0 = 0,38$ ) [5].

На рис. 1 представлены графики изменения напряжений в зависимости от накопленной деформации  $e$ .

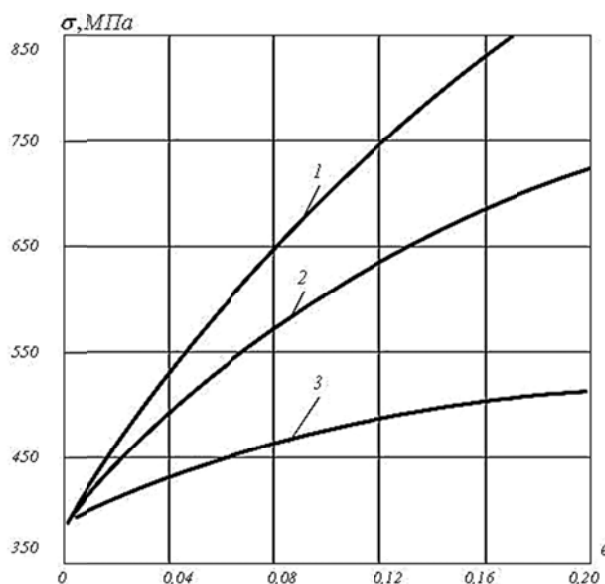


Рис. 1. Графики изменения  $\sigma$ :

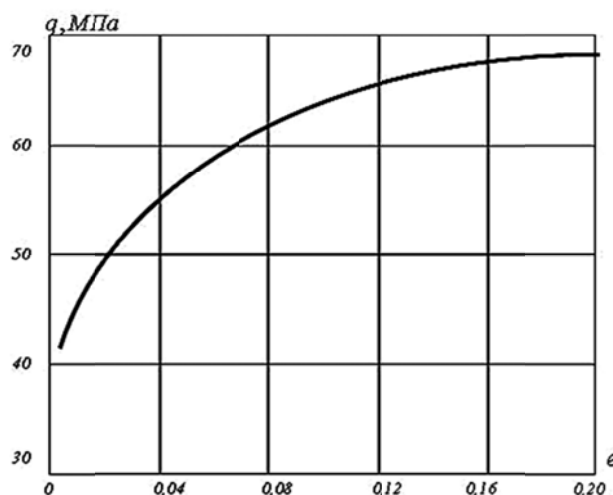
1 – кривая течения; 2 – предел текучести  $\sigma_{c0,2}$ ; 3 – предел текучести  $\sigma'_{c0,2}$

Из рисунка следует, например, при деформации  $e = 0,1$  условный предел текучести при сжатии  $\sigma_{c0,2} = 595$  МПа, что больше исходного на 54%. Условный предел же текучести  $\sigma'_{c0,2}$  при той же деформации составляет 464 МПа и превышает  $\sigma_T$  лишь на 20,4%.

На рис. 2 показана зависимость давления  $q$  при раздаче стойки от величины условного предела текучести на сжатие  $\sigma_{c0,2}$ .

Согласно графику на этом рисунке можно, задаваясь значением  $\sigma_{c0,2}$ , установить необходимое давление в упрочняемой стойке с приведенными размерами. Например, чтобы предельное сжимающее напряжение составило 600 МПа, следует подвергнуть раздаче стойку давлением 65 МПа.

Следует отметить также, что с увеличением условного предела текучести на сжатие повышается устойчивость длинномерных стоек, т. к. при этом уменьшается их критическая гибкость [9].

Рис. 2. График изменения давления  $q$ 

Таким образом, представленный способ [10] упрочнения стоек является достаточно эффективным с точки зрения повышения несущей способности элементов конструкций из термически неупрочняемых металлов и может использоваться в различных отраслях промышленности.

### ВЫВОДЫ

Разработан технологический способ повышения несущей способности тонкостенной цилиндрической работающей на сжатие стойки, основанный на эффекте увеличения условного предела текучести  $\sigma_{02}$  за счет немонотонности пластического деформирования. Использование данного способа в технике позволит улучшить эксплуатационные свойства и надежность конструкции.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берштейн М. Л. *Термомеханическая обработка металлов и сплавов* / М. Л. Берштейн. – М. : Металлургия, 1968. – 1172 с.
2. Гуляев А. П. *Металловедение* / А. П. Гуляев. – М. : Металлургия, 1987. – 646 с.
3. Бакхауз Г. *Анизотропия упрочнения. Теория в сопоставлении с экспериментом* / Г. Бакхауз // *Известия АН СССР. Механика твердого тела*. – 1976. – № 6. – С. 120–129.
4. Backhaus G. *Flie ß spannungen und Flie ß bedingungen bey zyklischen Verformungen* / G. Backhaus // *ZAMM*. – 1976. – № 56. – P. 337–348.
5. Хван Д. В. *Повышение эффективности в обработке металлов давлением* / Д. В. Хван. – Воронеж : Изд-во ВГУ, 1995. – 224 с.
6. Тальпов Г. Б. *Исследования эффекта Баушингера* / Г. Б. Тальпов // *Известия АН СССР. Механика и машиностроение*. – 1964. – № 6. – С. 131–137.
7. Дель Г. Д. *Технологическая механика* / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1978. – 180 с.
8. Малинин Н. Н. *Прикладная теория пластичности и ползучести* / Н. Н. Малинин. – М. : Машиностроение, 1975. – 400 с.
9. Федосьев В. И. *Сопротивление материалов* / В. И. Федосьев. – М. : Наука, 1986. – 512 с.
10. Пат. RU № 2252971. *Способ упрочнения материалов* / Хван А. Д. и др. – № 204116767 ; заявл. 02.06.2004 ; опубл. 27.05.2005, Бюл. № 15.

Хван А. Д. – канд. техн. наук, доц. ВГТУ;  
 Хван Д. В. – д-р. техн. наук, зав. каф. ВГТУ;  
 Крук А. Т. – д-р. техн. наук, проф. ВГТУ.

ВГТУ – Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия.

E-mail: tpm@vorstu.ru

Статья поступила в редакцию 05.03.2013 г.