

УДК 621.73.042

Хван А. Д.

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ СДВИГА НА ПЛАСТИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ УДЛИНЯЕМЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК

При реализации техпроцессов обработки металлов давлением (ОМД), связанных с возникновением растягивающих нормальных напряжений в обрабатываемой заготовке, не всегда удается за одну операцию из последней получить деталь с заданными проектными размерами из-за потери пластической устойчивости. При этом для получения готовой детали заготовку последней подвергают для восстановления пластичности дополнительному высокотемпературному отжигу (один или более раз в зависимости от свойств материала детали). В связи с этим в ОМД придается важное значение разработкам критериев оценки пластической устойчивости материала в условиях действия растягивающих напряжений и их экспериментальным обоснованиям [1].

В теории пластичности применяются различные критерии устойчивости [2], среди которых для проектирования техпроцессов ОМД часто используется критерий положительности работы добавочных нагрузок [3].

Целью работы является исследование влияния деформации сдвига на устойчивость удлиняемых заготовок с расчетной длиной l_0 и радиусом R_0 на основе указанного критерия, имеющего в данном случае вид:

$$dPdl + dMd\varphi \geq 0, \quad (1)$$

где dP, dM – соответственно приращения растягивающей силы P и крутящегося момента M ; $dl, d\varphi$ – соответственно приращения и углов поворота концевых сечений заготовки.

Устойчивость удлиняемых заготовок в работе исследуется на основе решения задачи, представленной в [1]. При этом осевое напряжение σ_z и касательное напряжение τ принимаются равными:

$$\sigma = \sigma_0(e)/\Delta; \tau = \sigma_0(e) \cdot \gamma(1 + \varepsilon)\rho / 3\Delta, \quad (2)$$

где σ_0 – интенсивность напряжений; e – накопленная пластическая деформация; ε , γ – соответственно относительная деформация и сдвиг на поверхности заготовки с текущим радиусом R ; ρ – координата произвольной точки в поперечном сечении заготовки; $\Delta = \sqrt{1 + \gamma^2(1 + \varepsilon^2) / 3\varepsilon^2 \rho^2}$.

Приложенные к заготовке нагрузки определяются по соотношениям:

$$\left. \begin{aligned} P &= 2\pi \int_0^R \sigma \rho d\rho; \\ M &= 2\pi \int_0^R \rho^2 d\rho. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Текущая расчетная длина и угол поворота двух поперечных сечений относительно друг друга на указанной длине будут соответственно равны:

$$l = l_0(1 + \varepsilon); \quad (4)$$

$$\varphi = \frac{\gamma l}{R} = \frac{\gamma l_0}{R_0} \cdot \varepsilon(1 + \varepsilon)^{\frac{3}{2}}, \quad (5)$$

где $R = R_0 \sqrt{1/\varepsilon}$ – текущий радиус заготовки; $c = \gamma/\varepsilon$ – коэффициент, характеризующий отношение угловой деформации на поверхности заготовки к относительной деформации последней.

Малые же изменения этих кинематических параметров будут равны:

$$dl = l_0 d\varepsilon; d\varphi = \frac{cl_0}{R_0} \left(1 + \frac{5}{2}\varepsilon\right) (1 + \varepsilon)^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

После подстановки выражений (2–6) в критерий (1) с учетом соотношения А. Надаи [4]:

$$\sigma_0(e) = Ae^n = A[\ln(1 + \varepsilon) \cdot \Delta_2]^n, \quad (7)$$

где A, n – характеристики материала, определяемые статистической обработкой результатов испытаний на растяжение стандартных образцов [5], получим критерий устойчивости в виде:

$$\int_0^R A_1 \rho d\rho + \frac{c^2(1 + \varepsilon) \left(1 + \frac{5}{2}\varepsilon\right)}{3R_0^2} \int_0^R A_2 \rho^3 d\rho - K_2 = 0. \quad (8)$$

$$\text{где } A_1 = \frac{K_1 \Delta_2^2 - [\ln(1 + \varepsilon) \cdot \Delta_2]^n B}{\Delta_2^3};$$

$$A_2 = \frac{\left\{ K_1(1 + \varepsilon) + \frac{3}{2} [\ln(1 + \varepsilon) \cdot \Delta_2]^n \right\} \Delta_2^2 - [\ln(1 + \varepsilon) \cdot \Delta_2]^n (1 + \varepsilon) B}{\Delta_2^3},$$

$$\text{где } K_1 = n [\ln(1 + \varepsilon) \cdot \Delta_2]^{n-1} \left[\frac{\Delta_2}{1 + \varepsilon} + \frac{B}{\Delta_2} \ln(1 + \varepsilon) \right]; K_2 = \frac{R_0^2 [\ln(1 + \varepsilon) \cdot \Delta_1]^n}{2\Delta_1 (1 + \varepsilon)^2} \left[1 + \frac{c^2}{3} (1 + \varepsilon) \left(1 + \frac{5}{2}\varepsilon\right) \right];$$

$$B = \frac{c^2 \rho^2 (1 + \varepsilon)}{2R_0^2}; \quad \Delta_1 = \sqrt{1 + c^2(1 - \varepsilon^2)/3}; \quad \Delta_2 = \sqrt{1 + c^2(1 - \varepsilon^2)\rho^2 / 3R^2}.$$

Если рассматривается только растяжение ($c = 0$), то из этого соотношения следует, что $\Delta_1 = \Delta_2 = 1$, $B = 0$ и критическая деформация будет равна $e_{кр} = n$.

Решением уравнения (8) находят критическое значение относительной деформации $\varepsilon_{кр}$, при котором начинается локализация деформации в заготовке при ее растяжении с кручением.

Величину же критической накопленной деформации рассчитывают по формуле:

$$e_{кр} = \sqrt{\ln^2(1 + \varepsilon_{кр}) + \frac{1}{3} c^2 \varepsilon_{кр}^2}. \quad (9)$$

Экспериментальную проверку критерия устойчивости (1) проводят на сплошных цилиндрических образцах. При этом нагружение образцов осуществляется в условиях монотонного нагружения в соответствии с зависимостью (5). Для проведения опытов составляется программа с учетом выражения:

$$\varphi = c \cdot \frac{l-l_0}{R_0} \left(\frac{l}{l_0} \right)^{\frac{3}{2}}. \quad (10)$$

Согласно данному выражению, задаваясь текущей длиной $l > l_0$ при фиксированном значении коэффициента c , определяют угол взаимного поворота отстоящих друг от друга на этой длине поперечных сечений заготовки в радианах.

При выполнении экспериментов потеря устойчивости (начало появления шейки) образца фиксируется визуально по силомеру испытательной машины определением момента падения растягивающей силы. Фактическое значение критической относительной деформации, при достижении которой происходит потеря устойчивости (образование шейки) в заготовке, рассчитывают по формулам:

$$\varepsilon_{кр} = \frac{l_k - l}{l_0} \cong 2 \frac{d_0 - d_k}{d_0}, \quad (11)$$

где l_k, d_k – расчетные текущие длина и диаметр образца, замеренные мерительными инструментами.

Действительное значение деформации сдвига на поверхности образца определяют по соотношению:

$$\gamma = \operatorname{tg} \alpha, \quad (12)$$

где α – угол между риской, нанесенной до деформирования заготовки вдоль ее оси и последней.

Тогда опытное значение критической накопленной деформации в рассматриваемом случае будет определяться по соотношению:

$$e_{кр} = \sqrt{e_z^2 + \frac{1}{3} \gamma^2}, \quad (13)$$

или с учетом выражений $e_z = \ln(l_k / l_0)$ и (12):

$$e_{кр} = \sqrt{\ln^2 \frac{l_k}{l_0} + \frac{1}{3} \operatorname{tg}^2 \alpha}. \quad (14)$$

С целью экспериментальной проверки решения рассмотренной задачи были проведены опыты на цилиндрических образцах диаметром $d_0 = 15$ мм и расчетной длиной $l_0 = 90$ мм из отожженной при $t = 850$ °С с выдержкой в течении 2-х часов стали 45 со следующими установленными для нее характеристиками кривой течения, аппроксимированной в виде (7): $A = 1060$ МПа ; $n = 0,18$. Эксперименты проводились на гидропрессе ZDMU – 30. При этом значение коэффициента c в выражении (5) определялось в первом приближении по формуле:

$$c = \operatorname{tg} \alpha / \varepsilon_{кр}. \quad (15),$$

На рис. 1 и 2 представлены соответственно зависимости критической накопленной и относительной деформации от коэффициента c , характеризующего степень закручивания заготовки, для исследованной стали (сплошная линия – расчетная зависимость; точки – опытные значения критических деформаций).

Анализ приведенных данных показывает, что рассмотренный критерий устойчивости достаточно точно (с погрешностью $\leq 10\%$) подтверждается экспериментом. С увеличением степени закручивания критическая накопленная деформация монотонно возрастает, а критическая относительная деформация убывает. В связи с этим следует отметить, что процесс нагружения одновременным действием растягивающей силы и крутящего момента в условиях обеспечения постоянного значения отношения угловой деформации γ и относительной ε нельзя использовать для увеличения критической относительной деформации удлиняемой

заготовки. Эффекта увеличения критической деформации можно достичь, как представлено в [6], только лишь немонотонным нагружением заготовки, характеризующимся тем, что указанное выше условие ($c = const$) не будет выполняться.

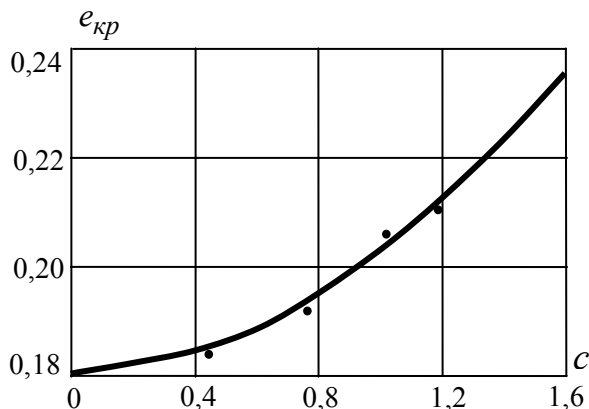


Рис. 1. Изменение критической накопленной деформации

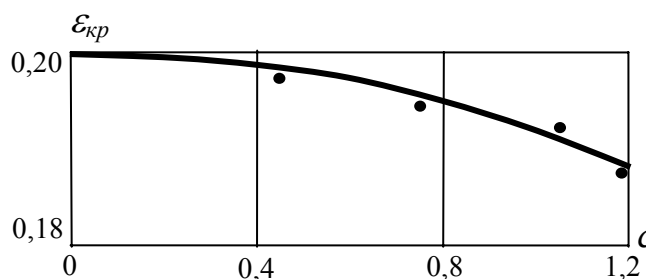


Рис. 2. Изменение относительной критической деформации

Таким образом, результаты сопоставления расчетных и опытных значений критических деформаций позволяют заключить о правомерности полученного решения задачи об осадке (растяжении) с кручением заготовок [1] и широко используемого при исследовании устойчивости пластического деформирования критерия положительности работы добавочных нагрузок.

ВЫВОДЫ

1. На основе решения задачи о кручении с растяжением цилиндрических заготовок сформулировано условие пластической устойчивости последних в соответствии с критерием положительности работы добавочных нагрузок.

2. Расчетами и экспериментально установлено, что с ростом сдвиговых деформаций происходит уменьшение относительной критической деформации удлиняемой заготовки при нагружении последней в условиях постоянства отношения угловой деформации к относительной, и в связи с этим рассмотренный процесс нагружения нельзя использовать для увеличения критической деформации заготовки

3. Дано экспериментальное обоснование возможности использования критерия положительности работы добавочных нагрузок при исследованиях пластической устойчивости деформирования в ОМД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дель Г. Д. *Технологическая механика* / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1978. – 180 с.
2. Хван Д. В. *Технологические задачи пластического кручения* / Д. В. Хван, И. Г. Амрахов, А. А. Воропаев, А. Д. Хван. – Воронеж : ВГУ, 2001. – 160 с.
3. Хван Д. В. *Повышение эффективности в обработке металлов давлением* / Д. В. Хван. – Воронеж : ВГУ, 1995. – 224 с.
4. Малинин Н. Н. *Прикладная теория пластичности и ползучести* / Н. Н. Малинин. – М. : Машиностроение, 1985. – 400 с.
5. ГОСТ 1497-84. *Металлы. Методы испытаний на растяжение*, 1984. – 110 с.
6. *Увеличение критической деформации удлиняемых цилиндрических заготовок* / А. Д. Хван, А. А. Воропаев, Д. В. Хван, С. В. Пустовалов // *Кузнечно-штамповочное производство. ОМД*. – 2002. – № 2. – С. 13–16.

Хван А. Д. – канд. техн. наук, доц. ВГТУ.

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

E-mail: prmex@prmex.vorstu.ru