

УДК 621.73.011.001.5

Сивак Р. И.
Деревенько И. А.**ОЦЕНКА ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛА ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ВЫДАВЛИВАНИИ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ОСАДКОЙ***

В производственных процессах обработки металлов давлением пластическая деформация часто является немонотонной. Механизм накопления и залечивания повреждений при такой деформации полностью не изучен. В настоящее время нет единой точки зрения относительно оценки деформируемости металлов при немонотонном нагружении [1–7]. Поэтому актуальной остается проблема оценки уровня поврежденности металла при немонотонной пластической деформации.

Целью данной работы является оценка влияния геометрических параметров матрицы и немонотонности нагружения, обусловленной переходом от радиального выдавливания к осадке, на величину использованного ресурса пластичности.

Процесс накопления повреждений в элементарном объеме металла зависит от физико-механических характеристик металла, схемы напряженного состояния и истории нагружения.

В данной работе для количественной оценки влияния схемы напряженного состояния на пластичность использовали поверхность предельных деформаций $e_p(\eta, \mu_\sigma)$, а историю нагружения задавали пространственными траекториями $\eta(e_u), \mu_\sigma(e_u)$.

Выполнены исследования процесса поперечного выдавливания с последующей осадкой заготовки из стали 10. Расчётная схема процесса приведена на рис. 1. При этом на первом этапе реализуется процесс поперечного выдавливания (рис. 1, б), а на втором – осадка полученного утолщения (рис. 1, в). Расчет напряженно-деформированного состояния проводили методом конечных элементов.

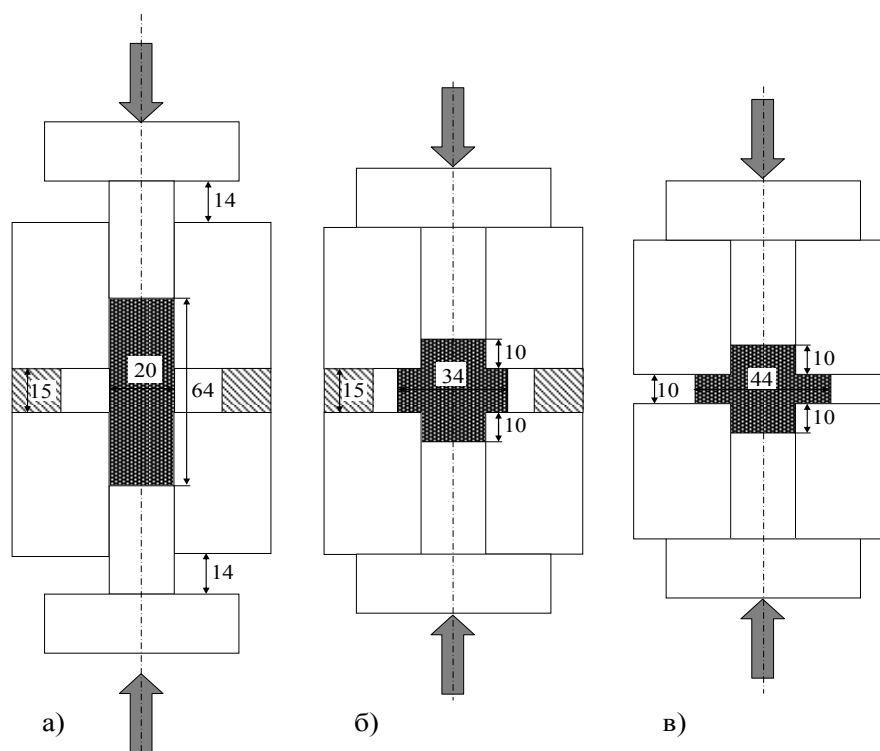


Рис. 1. Расчётная схема процесса поперечного выдавливания с последующей осадкой

* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. В. А. Огородникова.

Результаты расчетов интенсивности напряжений σ_u и интенсивности деформаций ε_u приведены на рис. 2. На рис. 2, а приведены распределения σ_u и ε_u в конце этапа выдавливания, а на рис. 2, б – после осадки для случая, когда радиус скругления матрицы $r = 1$ мм ($\frac{r}{d_0} = 0,05$) и высота фланца после выдавливания равна $h_1 = 15$ мм, а после осадки $h = 10$ мм ($\frac{h}{d_0} = 0,5$).

Аналогичные результаты получены для матрицы с геометрическими характеристиками ($r = 3$ мм; $h_1 = 15$ мм; $h = 10$ мм; $r/d_0 = 0,15$; $h/d_0 = 0,5$) и матрицы с характеристиками ($r = 5$ мм; $h_1 = 15$ мм; $h = 10$ мм; $r/d_0 = 0,25$; $h/d_0 = 0,5$).

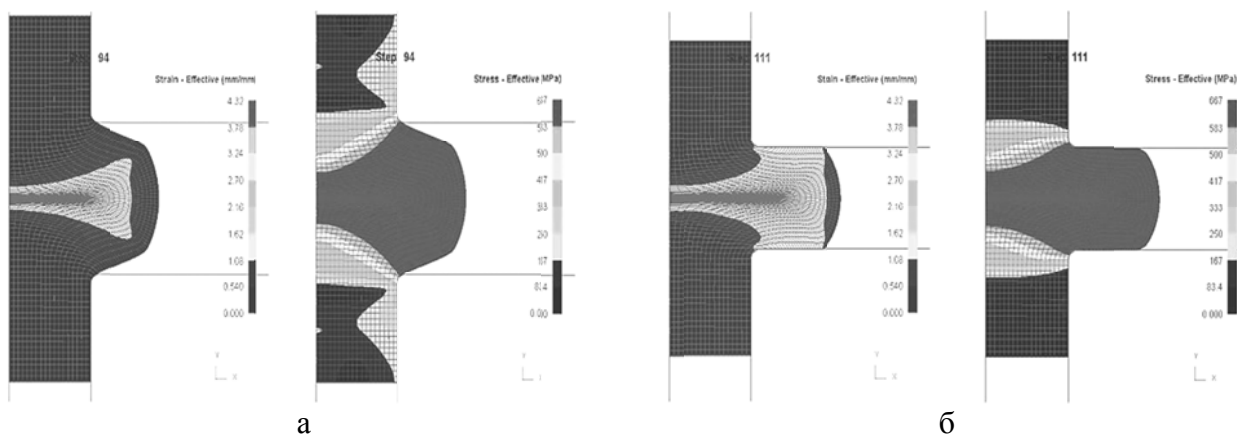


Рис. 2. Распределение интенсивности деформаций и интенсивности напряжений для $r = 1$ мм:

а – после радиального выдавливания; б – после осадки

Из полученных результатов следует, что конечные значения σ_u и ε_u в опасной, с точки зрения разрушения, точке (находится на внешней поверхности фланца в горизонтальной плоскости симметрии) от величины радиуса скругления матрицы r зависят незначительно.

Накопленную деформацию e_u , показатель жесткости напряженного состояния η и параметр Надаи-Лоде μ_σ рассчитывали по формулам:

$$e_u = \int_0^t \dot{\varepsilon}_u d\tau, \quad \eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}} = \frac{3\sigma}{\sigma_u}, \quad \mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \quad (1)$$

где $\dot{\varepsilon}_u$ – интенсивность скоростей деформаций;

t – время деформирования;

σ – среднее напряжение;

σ_u – интенсивность напряжений;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

Поверхность предельных деформаций $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ для стали 10 аппроксимировали полученной ранее в работе [8] зависимостью:

$$e_p(\eta, \mu_\sigma) = 0,68 \exp(0,43 \mu_\sigma - 0,71 \eta),$$

где $e_p = \int_0^{t_p} \dot{\varepsilon}_u d\tau$ – предельная деформация;

t_p – время деформирования до разрушения.

Значения e_u , η , μ_σ , полученные после расчетов по формулам (1), использовали для построения траекторий нагружения в этих координатах. Полученные траектории для радиусов скругления матриц $r = 1$ мм, $r = 3$ мм, $r = 5$ мм приведены на рис. 3, 4, соответственно. Траектории приведены для 3-х точек, которые лежат на горизонтальной оси симметрии с начальными радиусами $r_{01} = 3,3$ мм (точка 1), $r_{02} = 6,6$ мм (точка 2) и $r_{03} = 10$ мм (точка 3).

Из анализа характера этих траекторий и их расположения в выбранном пространстве следует, что с увеличением радиуса скругления матрицы r траектории смещаются в область более мягких схем нагружения, т. е. условия пластической деформации становятся более благоприятными с точки зрения деформируемости.

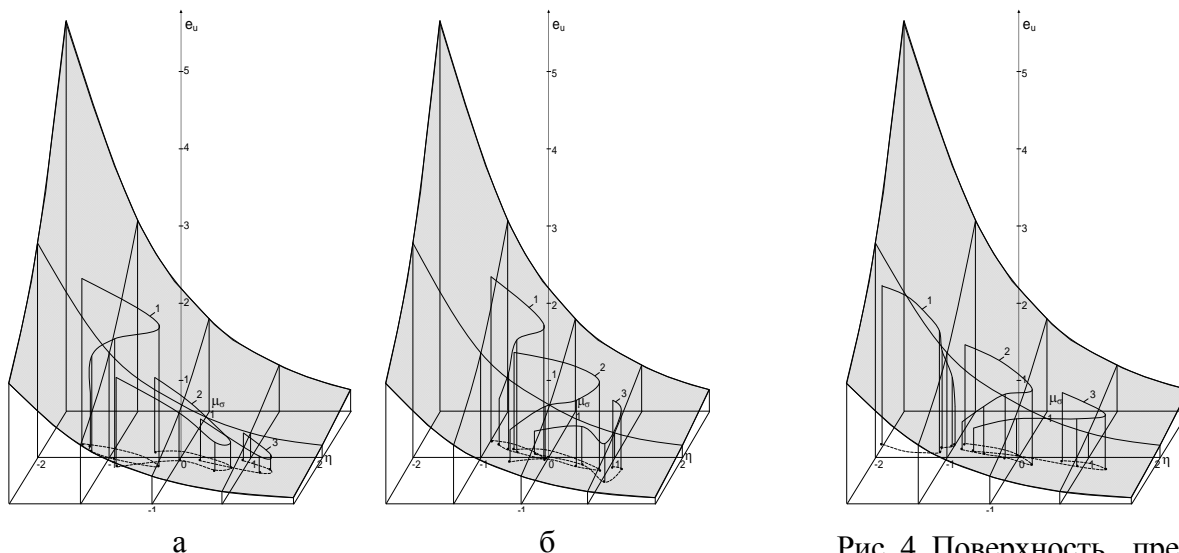


Рис. 3. Поверхности предельных деформаций и пути деформирования частиц материала для точек с начальными радиусами $r_{01} = 3,3$ мм (точка 1), $r_{02} = 6,6$ мм (точка 2) и $r_{03} = 10$ мм (точка 3), (а – $r = 1$ мм; б – $r = 3$ мм)

Рис. 4. Поверхность предельных деформаций и пути деформирования частиц материала для точек с начальными радиусами $r_{01} = 3,3$ мм (точка 1), $r_{02} = 6,6$ мм (точка 2) и $r_{03} = 10$ мм (точка 3), ($r = 5$ мм)

Это подтверждается и результатами расчетов величины использованного ресурса пластичности ψ . Исходя из того что в данном случае имеет место немонотонность нагружения, значения ψ рассчитывали по критерию Г. Д. Деля [5] по методике, изложенной в работе [9]:

$$\psi = \psi_{ij} \psi_{ij},$$

где $\psi_{ij} = \int_0^{e_u} \left(1 - a + 2a \frac{e_u^*(\eta, \mu_\sigma)}{e_p(\eta, \mu_\sigma)} \right) \beta_{ij} \frac{de_u^*(\eta, \mu_\sigma)}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}$ – компоненты тензора повреждений;

$\beta_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{d\varepsilon_{ij}}{de_u}$ – компоненты направляющего тензора приращений деформаций.

Значение постоянной a для стали 10 принимали равной $a = 0,25$.

Расчет использованного ресурса пластичности ψ в данной работе выполнен для случаев $\frac{r}{d_0} = 0,05$ ($r = 1$ мм); $\frac{r}{d_0} = 0,15$ ($r = 3$ мм); $\frac{r}{d_0} = 0,25$ ($r = 5$ мм). При этом в каждом случае значение ψ рассчитывали для 3-х точек, лежащих на горизонтальной оси симметрии: точка 1 – $r_{01} = 3,3$ мм (ψ_1); точка 2 – $r_{02} = 6,6$ мм (ψ_2) и точка 3 – $r_{03} = 10$ мм (ψ_3). Результаты расчетов ψ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения ψ в точках, лежащих на оси Oz

$r/d_0 = 0,05$			$r/d_0 = 0,15$			$r/d_0 = 0,25$		
ψ_1	ψ_2	ψ_3	ψ_1	ψ_2	ψ_3	ψ_1	ψ_2	ψ_3
0,58	0,84	0,98	0,49	0,68	0,94	0,46	0,54	0,86

Значения ψ в таблице приведены для диаметра фланца $d_{max} = 44$ мм при $d_0 = 20$ мм.

Из анализа результатов, приведенных в табл. 1, следует, что увеличение радиуса скругления r от 1 мм до 3 мм практически не влияет на величину использованного ресурса пластичности в опасной точке и только при $r = 5$ мм ψ уменьшается до 0,86.

Однако, если радиус скругления матрицы меньше 3 мм ($r < 3$ мм), ресурс пластичности в опасной точке практически исчерпан и только при $r = 5$ мм можно получить фланец диаметром $d_{max} = 44$ мм ($d_0 = 20$ мм) без разрушения. При экспериментальных исследованиях трещина на экваторе фланца возникает при диаметре фланца $d_{max} = 48$ мм для значения $r/d_0 = 0,213$ ($r = 4,26$ мм). Результаты расчетов удовлетворительно согласуются также с результатами, полученными в работе И. С. Алиева и его учеников [6].

ВЫВОДЫ

Выполнены исследования пластичности металла при немонотонном нагружении, которое имеет место при радиальном выдавливании цилиндрических заготовок с последующей осадкой. Установлено, что оптимальными являются условия выдавливания, при которых диаметр фланца, полученного после радиального выдавливания, составляет 60–70 % от конечного диаметра фланца, полученного после осадки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дель Г. Д. *Технологическая механика* / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1978. – 174 с.
2. Огородников В. А. *Энергия. Деформации. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы)* / В. А. Огородников, В. Б. Киселев, И. О. Сивак. – Винница : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 204 с.
3. Колмогоров В. Л. *К математическому моделированию динамики течения и разрушения металла при пластической деформации* / В. Л. Колмогоров // *Математическое моделирование систем и процессов.* – 2001. – № 9. – С. 47–66.
4. Богатов А. А. *Ресурс пластичности металлов при обработке давлением* / А. А. Богатов, О. И. Мижирецкий, С. В. Смирнов. – М. : Металлургия, 1984. – 144 с.
5. Дель Г. Д. *Пластичность деформированного металла* / Г. Д. Дель // *Физика и техника высоких давлений.* – 1982. – № 11. – С. 28–32.
6. Матвийчук В. А. *Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов : монография* / В. А. Матвийчук, И. С. Алиев. – Краматорск : ДГМА, 2009. – 268 с.
7. Михалевич В. М. *Тензорні моделі накопичення пошкоджень* / В. М. Михалевич. – Винница : «УНІВЕРСУМ – Вінниця», 1998. – 195 с.
8. Сивак Р. И. *Влияние неравномерности пластической деформации на использованный ресурс пластичности* / Р. И. Сивак // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 3 (32). – С. 40–43.
9. Сивак Р. И. *Тензорная модель процесса накопления повреждений при немонотонном нагружении* / Р. И. Сивак, Е. И. Коцюбовская, И. О. Сивак // *Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании' 2012» : сборник научных трудов SWorld.* – Одесса : КУПРИЕНКО, 2012. – Выпуск 4. – Том 6. – С. 14–20.

Сивак Р. И. – канд. техн. наук, доц. ВНАУ;

Деревенько И. А. – ассистент ВНАУ.

ВНАУ – Винницкий национальный аграрный университет, г. Винница.

E-mail: sivak_r_i@mail.ru