

УДК 621.01:541

Шевчук Е. И.  
Сивак Р. И.  
Сухоруков С. И.

## ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАННОГО РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛА ПРИ РОТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКЕ КОНИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК

При изготовлении тонкостенных осесимметричных деталей находят всё более широкое применение методы обработки давлением с созданием локального очага деформации. Одним из таких методов является ротационная вытяжка [1–4]. Значительное место в общем объёме деталей, изготавливаемых ротационной вытяжкой, занимает производство тонкостенных осесимметричных деталей. Основными проблемами, которые имеют место при ротационной вытяжке, являются потеря устойчивости и разрушение заготовки вследствие исчерпания запаса пластичности [5, 6]. В большинстве случаев при разработке технологических процессов ротационной вытяжки используют эмпирические зависимости или результаты теоретических исследований, в которых не в полной мере учитываются локальный характер пластической деформации и немонотонность нагружения, обусловленная цикличностью нагружения и сложностью траектории движения деформирующего ролика, которая выбирается так, чтобы обеспечить устойчивость формоизменения и избежать разрушения заготовки.

Целью данной работы является исследование влияния напряжённо-деформированного состояния и закономерностей его изменения в очаге деформации на величину использованного ресурса пластичности с учётом влияния немонотонности нагружения, обусловленной сложностью траектории движения деформирующего ролика и количеством переходов, необходимых для изготовления детали заданной формы и размеров.

В работе выполнены исследования процесса ротационной вытяжки конических деталей из листовых заготовок. Процесс вытяжки реализовали на станке 6P13Ф3 с числовым программным управлением. При программном управлении таким станком задается информация как о скорости вращения заготовки, скорости подачи и ускорения перемещения, так и о траектории движения рабочего инструмента. Благодаря этому можно добиться минимального использования запаса пластичности материала заготовки и создания благоприятных условий деформирования. При необходимости параметры процесса формоизменения можно изменять в любой момент на каждом переходе, добиваясь заданной шероховатости поверхности, высокой точности и высокой производительности обработки. Для этого разработана программа, которая позволяет задавать необходимую траекторию движения инструмента и, благодаря этому, полностью обрабатывать заготовки, как простой, так и сложной геометрической формы.

Нами выполнены экспериментальные исследования процесса ротационной вытяжки конических деталей из листовых заготовок диаметром  $d=80$  мм и толщиной  $\delta=1$  мм из стали 10. В качестве рабочего инструмента, который обеспечивает заданную геометрию и размеры детали, использовали деформирующий ролик диаметром  $D_p=140$  мм с радиусом рабочей поверхности  $R=4$  мм и коническую оправку. Угол рабочего конуса оправки  $\alpha_{оп}=30^\circ$ , а диаметр верхней части, к которой крепится заготовка, равняется  $d_0=32$  мм.

Для выбора рациональных параметров процесса ротационной вытяжки, при которых обеспечивается минимальное использование запаса пластичности металла заготовки, необходимо иметь информацию о влиянии параметров процесса на величину использованного ресурса пластичности  $\psi$ . Величина  $\psi$  зависит как от физико-механических характеристик материала заготовки, так и от напряженно-деформированного состояния в очаге деформации и законов его изменения в процессе пластической деформации [6–8].

Так как при ротационной вытяжке листовых заготовок имеет место немонокотная пластическая деформация, то для оценки интенсивности накопления повреждений в данном случае использовали тензор повреждений, предложенный в работе [9]

$$\psi_{ij} = \int_0^{e_u} F(e_u^*, \eta, \mu_\sigma) \beta_{ij} de_u^*, \quad (1)$$

где  $e_u = \int_0^t \dot{\varepsilon}_u d\tau$  – степень деформации;  $\dot{\varepsilon}_u$  – интенсивность скоростей деформаций;

$\eta = \frac{3\sigma}{\sigma_u}$  – показатель жесткости напряженного состояния;  $\sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}$  – среднее напряжение;

$\sigma_u$  – интенсивность напряжений;  $\mu_\sigma$  – параметр Надаи-Лоде;  $t$  – время деформирования от начала пластической деформации до деформированного состояния, которое рассматривается.

Компоненты направляющего тензора приращений деформаций  $\beta_{ij}$  в (1) приняты равными [9]

$$\beta_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{d\varepsilon_{ij}}{de_u}. \quad (2)$$

Функция  $F(e_u, \eta, \mu_\sigma)$  зависит от физико-механических свойств материала и истории нагружения. В данной работе принято, что

$$\psi_{ij} = \int_0^{e_u} \left( 1 - a + 2a \frac{e_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)} \right) \beta_{ij} \frac{de_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}, \quad (3)$$

где  $e_p(\eta, \mu_\sigma)$  – поверхность предельных деформаций,  $a$  – постоянная, значение которой принимали равным  $a=0,5$ .

В качестве меры пластичности принята величина предельной деформации

$$e_p = \int_0^{t_p} \dot{\varepsilon}_u d\tau, \quad (4)$$

где  $t_p$  – время деформирования до разрушения.

Для оценки уровня поврежденности металла, обусловленной пластической деформацией, принята величина использованного ресурса пластичности

$$\psi = \sqrt{\psi_{ij} \psi_{ij}}. \quad (5)$$

В работе [10] для определения компонент направляющего тензора приращений деформаций  $\beta_{ij}$  предложена следующая методика. Так как компоненты направляющего тензора определяются формулой (2), то используя физические уравнения теории пластичного течения

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{3}{2} \cdot \frac{de_u}{\sigma_u} S_{ij}, \quad (6)$$

где  $S_{ij}$  – компоненты девиатора напряжений, получим

$$\frac{d\varepsilon_{ij}}{de_u} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \beta_{ij} = \frac{3}{2} \cdot \frac{S_{ij}}{\sigma_u}. \quad (7)$$

или

$$\beta_{ij} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{S_{ij}}{\sigma_u}. \quad (8)$$

Так как

$$\mu_{\sigma} = \frac{2S_2 - S_1 - S_3}{S_1 - S_3}, \quad (9)$$

$$S_1 + S_2 + S_3 = 0, \quad 2\sigma_u^2 = (S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_3 - S_1)^2, \quad (10)$$

то после решения системы уравнений (9) и (10) находим

$$\frac{S_1}{\sigma_u} = -\frac{1}{3} \cdot \frac{\mu_{\sigma} - 3}{\sqrt{\mu_{\sigma}^2 + 3}}, \quad \frac{S_2}{\sigma_u} = \frac{1}{3} \cdot \frac{2\mu_{\sigma}}{\sqrt{\mu_{\sigma}^2 + 3}}, \quad \frac{S_3}{\sigma_u} = -\frac{1}{3} \cdot \frac{\mu_{\sigma} + 3}{\sqrt{\mu_{\sigma}^2 + 3}}. \quad (11)$$

Из (8) и (11) следует, что главные компоненты направляющего тензора приращений деформаций  $\beta_{ij}$  равны

$$\beta_1 = -\frac{1}{\sqrt{6}} \cdot \frac{\mu_{\sigma} - 3}{\sqrt{\mu_{\sigma}^2 + 3}}, \quad \beta_2 = \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot \frac{2\mu_{\sigma}}{\sqrt{\mu_{\sigma}^2 + 3}}, \quad \beta_3 = -\frac{1}{\sqrt{6}} \cdot \frac{\mu_{\sigma} + 3}{\sqrt{\mu_{\sigma}^2 + 3}}. \quad (12)$$

Для построения траекторий нагружения в координатах  $e_u$ ,  $\eta$ ,  $\mu_{\sigma}$ , а также для расчетов величины использованного ресурса пластичности  $\psi$  по формуле (5) использовали информацию о напряженно-деформированном состоянии в очаге пластической деформации, полученную после решения задачи методом конечных элементов. Расчёты выполнены для листовой заготовки диаметром  $d=80$  мм и толщиной  $\delta=1$  мм из стали 10 и деформирующего ролика диаметром  $D_p=140$  мм с радиусом рабочей поверхности  $R=4$  мм.

Решение данной задачи выполнено в пакете динамического конечно-элементного (КЭ) анализа LS-DYNA.

Для тонколистового металла заготовку моделировали оболочкой с заданием в *SECTION\_SHELL* в качестве формулировки элементов оболочки опции *ELFORM = 16* для полноинтегрируемого оболочечного элемента. В качестве материала заготовки выбрана модель *MAT\_POWER\_LAW\_PLASTICITY* ( $\epsilon$ ;  $B$ ,  $m$  – коэффициенты степенного закона  $\sigma = B\epsilon^m$ ), для не деформируемых элементов и инструмента выбрана модель "MAT\_RIGID" ( $E$ ,  $\mu$ ).

Контакт описывался опцией *\*CONTACT\_2D\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE*, которая реализует контактный алгоритм по методу штрафов.

Значения  $\eta$  рассчитывали по формуле

$$\eta = \frac{3\sigma}{\sigma_u}. \quad (13)$$

Степень деформации  $e_u$  рассчитывали по формуле

$$e_u = \int_0^t \dot{\epsilon}_u d\tau, \quad (14)$$

параметр Надаи-Лоде рассчитывали по формуле (9), а компоненты направляющего тензора  $\beta_{ij}$  – по формулам (12).

Поверхность предельных деформаций для стали 10 аппроксимировали зависимостью

$$e_p(\eta, \mu_{\sigma}) = 0.68 \exp(0.43\mu_{\sigma} - 0.91\eta),$$

полученной в работе [7].

Поверхность предельных деформаций  $e_p(\eta, \mu_{\sigma})$  для стали 10 и траектории нагружения точек заготовки с начальными координатами  $r_0=20$  мм,  $r_0=25$  мм,  $r_0=30$  мм,  $r_0=35$  мм приведены на рис. 1. При построении этих траекторий использовали информацию о напряженно-деформированном состоянии и закономерностях его изменения в рассматриваемых точках, полученную после решения задачи методом конечных элементов.

Величину использованного ресурса пластичности для точек заготовки с начальными координатами  $r_0=20$  мм,  $r_0=25$  мм,  $r_0=30$  мм,  $r_0=35$  мм рассчитывали по формуле (5). При этом компоненты тензора повреждений  $\psi_{ij}$  определяли по формуле (3), компоненты направляющего тензора приращений деформаций рассчитывали по формулам (12). В результате расчётов получены следующие значения использованного ресурса пластичности: для точек с начальными радиусами  $r_0=20$  мм  $\psi(20)=0,21$ ; при  $r_0=25$  мм  $\psi(25)=0,30$ ; при  $r_0=30$  мм

$\psi(30)=0,37$ ; при  $r_0=35$  мм  $\psi(35)=0,33$ . Такие расхождения между численными значениями  $\psi$  в рассматриваемых точках обусловлены различными условиями протекания пластической деформации в этих точках, что и следует из вида траекторий нагружения, приведённых на рис. 1.

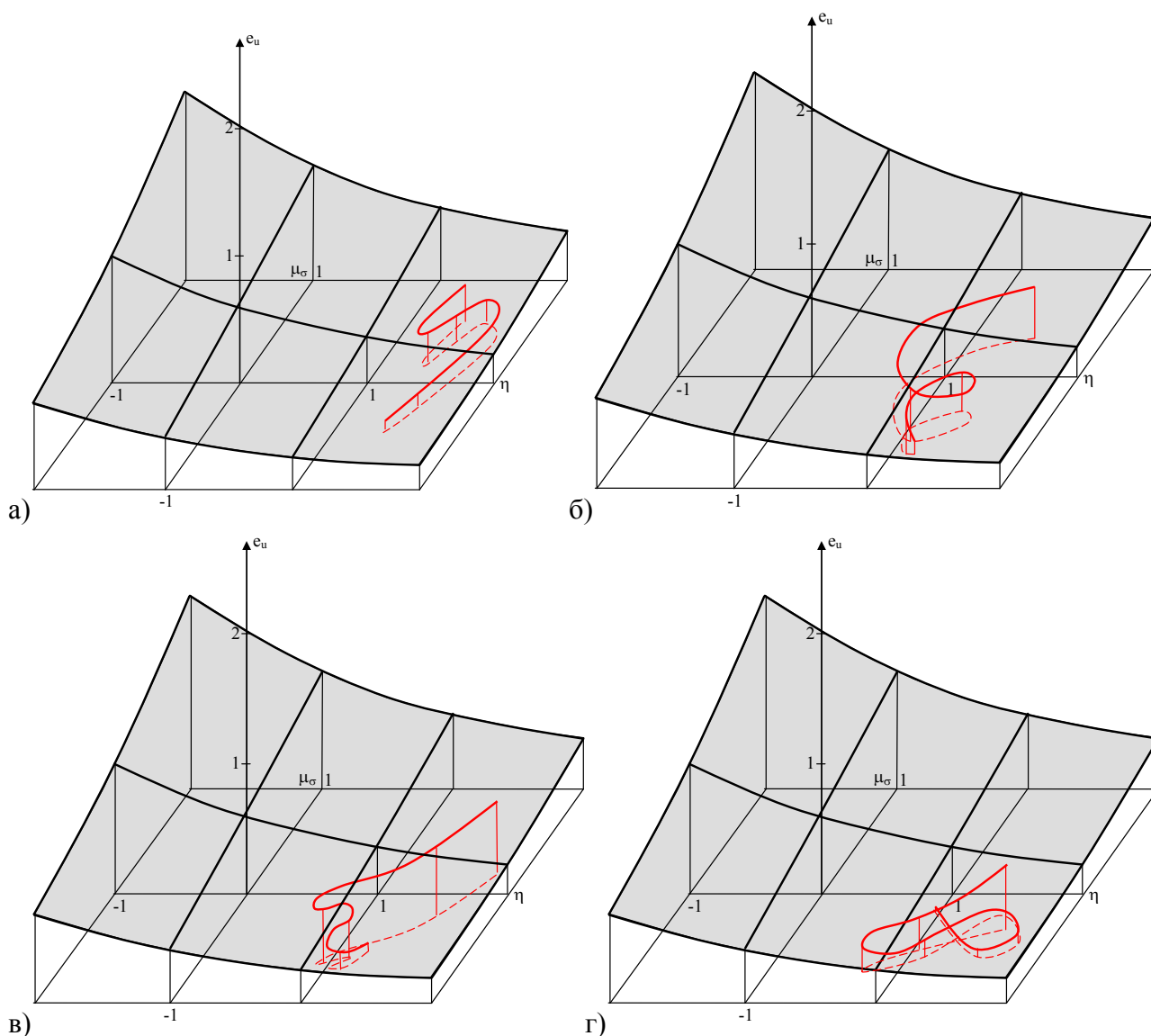


Рис. 1. Поверхности предельных деформаций для стали 10 и траектории деформирования для точек с начальным радиусом: а)  $r_0=20$  мм; б)  $r_0=25$  мм; в)  $r_0=30$  мм; г)  $r_0=35$  мм

### ВЫВОДЫ

Методом конечных элементов определено напряжённо-деформированное состояние в очаге деформации и законы его изменения в процессе ротационной вытяжки конических деталей из листовых заготовок. Результаты расчётов использованы для определения траекторий деформирования разных точек заготовки в координатах  $e_u$ ,  $\eta$ ,  $\mu_\sigma$ . Анализ характера полученных траекторий показал, что при ротационной вытяжке имеет место немонокотонная пластическая деформация. Кроме того, вид траекторий зависит от координаты точки. Установлено, что при немонокотонной пластической деформации значительно уменьшается интенсивность накопления повреждений. Поэтому, если для расчётов величины использованного ресурса пластичности  $\psi$  использовать критерии деформируемости, в основу которых положена скалярная модель процессов накопления повреждений [6], то расчётные значения  $\psi$  будут превышать полученные в данной работе по формуле (5), на (20–40)% в зависимости от вида траектории нагружения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковлев С.С. Технологии изготовления осесимметричных деталей ротационной вытяжкой / С.С. Яковлев, В.И. Трегубов, Д.В. Дудука // *Известия ТулГУ ; Серия : Технологии и оборудование для обработки металлов давлением*. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – Вып. 3. – С. 121–127.
2. Юдин Л. Г. О предельных возможностях формоизменения при многооперационной ротационной вытяжке / Л. Г. Юдин, В. А. Коротков, Н. А. Горюнова // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1998. – №10. – С. 24–26.
3. Дель Г.Д. Моделирование операций ротационной вытяжки с утоншением / Г.Д. Дель, В.И. Корольков // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1996. – № 3. – С. 23.
4. Алиев И. С. Классификация и области применения локального ротационного деформирования / И. С. Алиев, В. А. Матвийчук // *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. – Краматорск: ДГМА, 2010. – №1 (22). – С. 137–143.
5. Грушко О. В. Діагностування граничного формозмінення листових матеріалів / О. В. Грушко // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. – 2008. – №1. – С. 111–115.
6. Огородников В. А. Энергия. Деформации. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы) / В. А. Огородников, В. Б. Киселёв, И. О. Сивак. – Винница: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 204 с.
7. Сивак И. О. Пластичность металлов при объёмном напряжённом состоянии / И. О. Сивак, Е. И. Коцюбовская // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: тематичний збірник наукових праць*. – Краматорськ-Хмельницький, 2007. – С. 73–76.
8. Михалевич В. М. Тензорні моделі накопичення пошкоджень / В. М. Михалевич. – Винница: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998. – 196 с.
9. Дель Г. Д. Пластичность деформированного металла / Г. Д. Дель // *Физика и техника высоких давлений*. – 1983. – №11. – С. 28–32.
10. Сивак Р. И. Оценка пластичности металла при холодном двухэтапном деформировании / Р. И. Сивак, В.А. Огородников, И. О. Сивак // *Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти»*. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – С. 74–80.

## REFERENCES

1. Jakovlev S.S. Tehnologii izgotovlenija osesimetrichnyh detalej rotacionnoj vytjazhkoj / S.S. Jakovlev, V.I. Tregubov, D.V. Duduka // *Izvestija TulGU ; Serija : Tehnologii i oborudovanie dlja obrabotki metallov davleniem*. – Tula: Izd-vo TulGU, 2010. – Vyp. 3. – S. 121–127.
2. Judin L. G. O predel'nyh vozmozhnostjakh formoizmenenija pri mnogooperacionnoj rotacionnoj vytjazhke / L. G. Judin, V. A. Korotkov, N. A. Gorjunova // *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo*. – 1998. – №10. – S. 24–26.
3. Del' G.D. Modelirovanie operacij rotacionnoj vytjazhki s utonsheniem / G.D. Del', V.I. Korol'kov // *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo*. – 1996. – № 3. – S. 23.
4. Aliev I. S. Klassifikacija i oblasti primenenija lokal'nogo rotacionnogo deformirovanija / I. S. Aliev, V. A. Matvijchuk // *Obrabotka materialov davlenim: sbornik nauchnyh trudov*. – Kramatorsk: DGMA, 2010. – №1(22). – S. 137–143.
5. Grushko O. V. Diagnostuvannja granichnogo formozminennja listovih materialiv / O. V. Grushko // *Visnik Vinnic'kogo politehničnogo institutu*. – 2008. – №1. – S. 111–115.
6. Ogorodnikov V. A. Jenergija. Deformacii. Razrushenie (zadachi avtotehničeskoj jekspertizy) / V. A. Ogorodnikov, V. B. Kisel'ov, I. O. Sivak. – Vinnicja: UNIVERSUM-Vinnicja, 2005. – 204 s.
7. Sivak I. O. Plastichnost' metallov pri objomnom naprjazhjonnom sostojanii / I. O. Sivak, E. I. Kocjubivskaja // *Udoskonalennja procesiv i obladnannja obrobki tiskom v metalurgii i mashinobuduvanni: tematičnij zbirnik naukovih prac'*. – Kramators'k-Hmel'nic'kij, 2007. – S. 73–76.
8. Mihalevich V. M. Tenzorni modeli nakopichennja poshkodzen' / V. M. Mihalevich. – Vinnicja: UNIVERSUM-Vinnicja, 1998. – 196 s.
9. Del' G. D. Plastichnost' deformirovannogo metalla / G. D. Del' // *Fizika i tehnika vysokih davlenij*. – 1983. – №11. – S. 28–32.
10. Sivak R. I. Ocenka plastichnosti metalla pri holodnom dvuhjetapnom deformirovanii / R. I. Sivak, V.A. Ogorodnikov, I. O. Sivak // *Materiali VI Mizhnarodnoi naukovu-tehničnoi konferencii «Teoretichni ta praktični problemi v obrobci materialiv tiskom i jakosti fahovoi osviti»*. – K.: NTUU «KPI», 2015. – S. 74–80.

Шевчук Е.И. – аспирант, каф. ТАМ ВНТУ

Сивак Р.И. – канд. техн. наук, доц. каф. ЗТДОП ВНАУ

Сухоруков С.И. – канд. техн. наук, доц. каф. ТАМ ВНТУ

ВНТУ – Винницкий национальный технический университет, г. Винница;

ВНАУ – Винницкий национальный аграрный университет, г. Винница.

E-mail: shevae\_111@mail.ru; sivak\_r\_i@mail.ru; ssergeii@ukr.net

Статья поступила в редакцию 27.07.2016 г.