

УДК 621.7.043

Влияние коэффициента трения на формоизменение трубной заготовки при совмещенной операции обжима и раздачи

А.А. Сулейман, И.Н. Шубин

Выполнено моделирование совмещенной операции обжима и раздачи в программе QFORM. Экспериментально исследованы деформации (по толщине, в меридиональном, окружном направлении, изменении высоты заготовки) трубчатых заготовок, полученных раздачей с обжимом в одном штампе. Установлены конкретные значения деформаций при варьировании коэффициентом трения на матрице и пуансоне.

Доказано, что с помощью совмещенной операции обжима и раздачи трубной заготовки можно получить переходник с большим коэффициентом формоизменения. Увеличение коэффициента трения в области раздачи приводит к повышению меридионального сжимающего напряжения σ_p и утонению стенки заготовки.

Ключевые слова: обжим, раздача, совмещенная операция, трубчатая заготовка, коэффициент трения, формоизменение, деформация, моделирование, QFORM.

Effect of the Friction Factor on Forming of Tubular Billets when Combined Swaging and Expanding Operations

A.A. Solaiman, I.N. Shubin

The modeling of combined swaging and expanding operations by the program QFORM is done. Tubular billet deformations (thickness, meridional, tangential and height variations) performed by swaging and expanding operations in one die were experimentally investigated. There were set specific deformation values by varying the friction factor on the die and punch. It is proved that with combined swaging and expanding operations of tubular billets it is possible to get a pipe adapter with a high coefficient of forming. Increase of friction factor in the field of expanding leads to the increase of meridional compressive stress and to thinning of the tubular billet walls.

Keywords: swaging, expanding, combined operation, tubular billet, friction factor, forming, deformation, simulation, QFORM.

При производстве конических деталей широко применяют совмещенный способ одновременного обжима с раздачей [1—4].

Особенностью совмещенного процесса обжима и раздачи является наличие двух участков пластической деформации, разделенных между собой упруго деформируемым участком заготовки. На одном из участ-

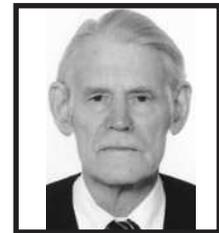


СУЛЕЙМАН

Актам Али
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

SOLAIMAN

Aktham Ali
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)



ШУБИН

Игорь Николаевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

SHUBIN

Igor Nikolaevich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)

ков пластической деформации осуществляется увеличение диаметра заготовки, т. е. раздача, на другом — уменьшение диаметра заготовки, т. е. обжим. Причем при одинаковых условиях на обоих участках согласно [1] деформирование на участке раздачи осуществляется более интенсивно, чем на участке обжима.

Совмещение раздачи с обжимом повышает суммарную критическую степень деформации за один переход штамповки и расширяет возможности формоизменения трубчатых заготовок, полученных раздачей с обжимом в одном штампе (рис. 1).

Суммарный коэффициент формоизменения равен произведению коэффициентов раздачи и обжима:

$$K_{\text{обж-раз}} = K_{\text{обж}} K_{\text{раз}} = \frac{D_3}{d_i} \frac{D_i}{D_3}, \quad (1)$$

где d_i — наименьший диаметр участка заготовки, деформируемого обжимом; D_i — наибольший диаметр участка заготовки, деформируемого раздачей; D_3 — диаметр исходной заготовки.

При одинаковой степени деформации и углах конусности α пуансона и матрицы сила раздачи примерно на 10 % меньше силы обжима [5] (сплав Д16Т), в связи с чем раздача происходит более интенсивно, чем обжим. Задача определения соотношения между зонами обжима и раздачи решена Е.А. Поповым [6, 7]. Приравняв меридиональные напряжения при обжиме и раздаче, полученные им ранее, и приняв суммарный коэффициент формоизменения равным произведению коэффициентов отдельных операций, он получил уравнение, связывающее коэффициенты обжима и раздачи.

При допустимых коэффициентах обжима $K_{\text{обж}} = 1,5$ и раздачи $K_{\text{раз}} = 1,25$ общий суммарный коэффициент формоизменения при совмещенной операции $K_{\text{обж-раз}} = 1,87$ [7]. Совмещение раздачи и обжима наиболее эффективно при изготовлении высоких конических деталей с прямолинейной или криволинейной образующей.

Из работы [1] известно, что процесс раздачи происходит более интенсивно, чем процесс об-

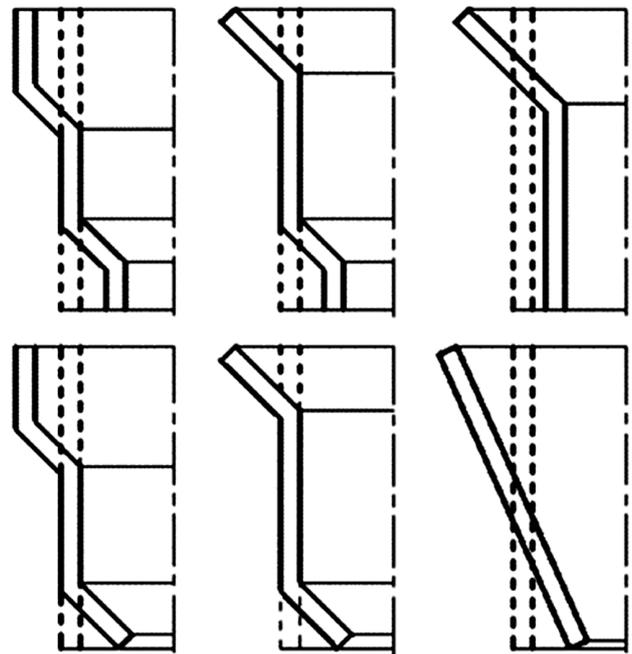


Рис. 1. Типовые детали, получаемые раздачей с обжимом

жима. Процессом одновременного деформирования заготовки можно управлять посредством совмещения операций обжима и раздачи путем варьирования значения коэффициента трения. Для обеспечения одновременного выполнения операций раздачи и обжима значение коэффициента трения в области раздачи деформируемой заготовки должно в 3–5 раз превышать значения коэффициента трения в области обжима за счет чего возрастают меридиональные сжимающие напряжения раздачи, равные или несколько большие напряжений обжима ($\sigma_{\rho \max}^{\text{раз}} \geq \sigma_{\rho \max}^{\text{обж}}$).

Учитывая сказанное, можно сформулировать условия выполнения моделирования и эксперимента совмещенной операции обжима и раздачи. Размеры заготовки и конструкция штампа совмещенной операции показана на рис. 2.

Моделирование совмещенной операции в программе QFORM. Моделированные исследования процесса совмещенной операции обжима и раздачи выполнены в программе QFORM. Для моделирования в программе коэффициент трения в области раздачи выбран в 3 раза больше, чем в области обжима. Деталь, полученная

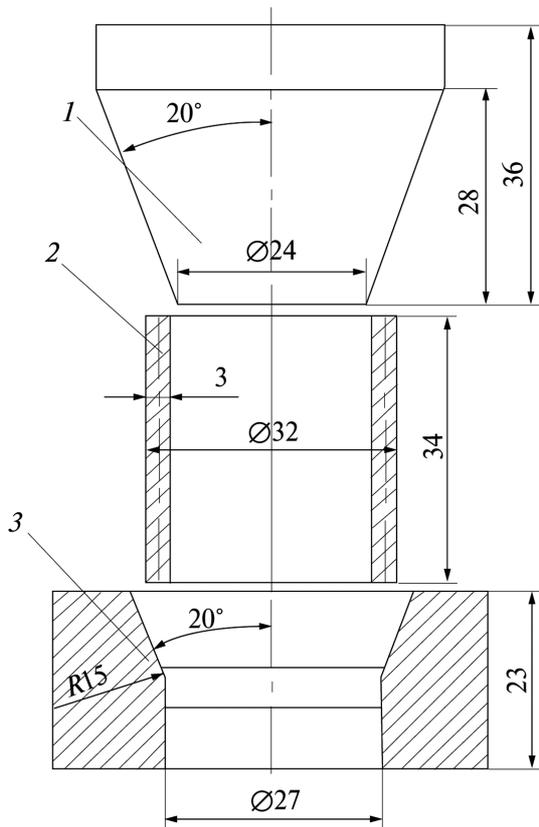


Рис. 2. Штамп одновременного обжима и раздачи:
1 — пуансон; 2 — заготовка; 3 — матрица

деформированием силой 15,2 кН, показана на рис. 3.

Эксперимент совмещенной операции. Экспериментальные исследования процесса совмещенной операции обжима и раздачи выполнены в штампе, изображенном на рис. 2.

Для совмещенной операции были выбраны холоднодеформированные трубные заготовки из алюминиевого сплава (АД1). Исходные размеры заготовки: высота заготовки $H = 34$ мм, срединный диаметр $D_{cp} = 29$ мм, толщина стенки заготовки $S = 3$ мм. На поверхность матрицы, подвергаемую обжиму, наносилась технологическая смазка. Поверхность, на которой выполняется операция раздачи, оставалась сухой (поверхность пуансона).

Деталь, полученная деформированием силой 16,5 кН, показана на рис. 4.

Из анализа результатов физического эксперимента, установлено, что для принятых трубных заготовок за один переход можно получить деталь с выходом в цилиндрическую часть матрицы.

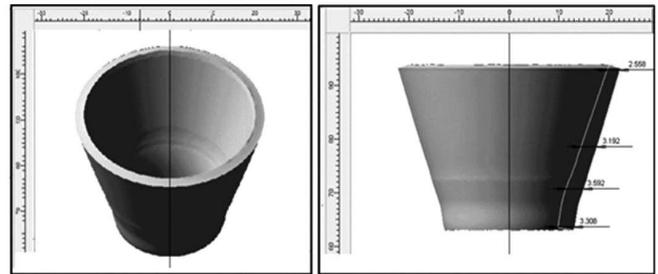


Рис. 3. Моделирование совмещенной операции

Анализ результатов эксперимента и моделирования. На рисунке 5 видно, что максимальный диаметр заготовки в области раздачи при эксперименте и моделировании составил $D_{и}^{экс} = 41,46$ мм и $D_{и}^{мод} = 42$ мм, т.е. результаты эксперимента и моделирования практически совпадают. Расхождение — 1,3%.

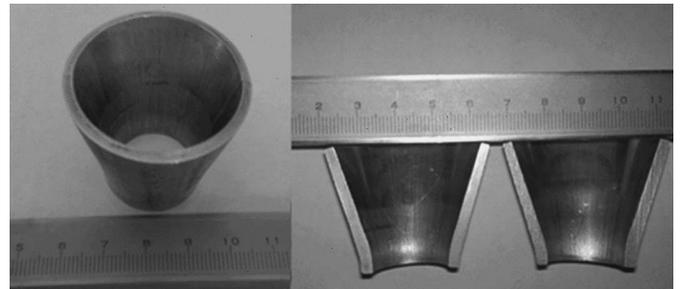


Рис. 4. Эксперимент совмещенной операции

Минимальный диаметр заготовки в области обжима при эксперименте и моделировании: $D_{и}^{экс} = 23,22$ мм, $D_{и}^{мод} = 22,4$ мм. Расхождение — 3,5%.

Коэффициент формоизменения для совмещенной операции при эксперименте $K^{экс} = 1,8$, а при моделировании $K^{мод} = 1,87$. Расхождение — 3,9%.

Диаметр заготовки, разграничивающий области раздачи и обжима после деформирования ($S = S_0 = 3$ мм), соответственно равен: при моделировании $D_{гр}^{мод} = 31,6$ мм, при эксперименте $D_{гр}^{экс} = 32,42$ мм. Расхождение — 2,5%.

На рисунке 6 видно что, высота заготовки при моделировании $H^{мод} = 30,7$ мм, при эксперименте $H^{экс} = 30,95$ мм. Расхождение — 0,8%.

При совмещенной операции раздачи и обжима общая высота заготовка уменьшается (8,9% при эксперименте, 9,7% при моделировании).

При моделировании высота заготовки в области раздачи $h^{\text{мод}} = 15$ мм, в области обжима $h^{\text{мод}} = 15,7$ мм, при эксперименте высота заготовки в области раздачи $h^{\text{экс}} = 13,53$ мм, а в области обжима $h^{\text{экс}} = 17,42$ мм. Расхождение в первом случае составляет 10,9%, во втором — 9,8%.

Толщина стенки заготовки. Стенка заготовки имеет минимальную толщину в области раздачи (у края заготовки), а максимальную — в области обжима у входа в цилиндрическую часть матрицы. Толщина стенки немного уменьшается по мере приближения к краевой части заготовки за счет положительного значения σ_θ в этой части.

На рисунках 5, 6 видно, что увеличение толщины стенки заготовки в области обжима при

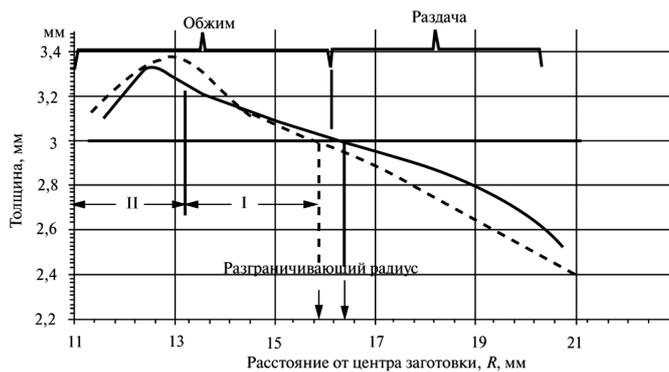


Рис. 5. Изменение толщины стенки заготовки относительно расстояния от центра заготовки:

--- — моделирование;
— — эксперимент

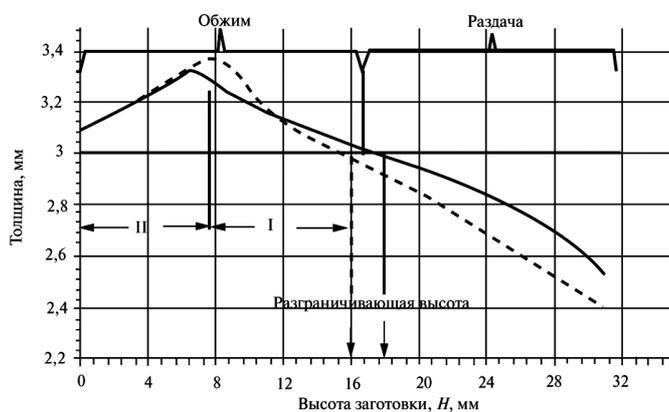


Рис. 6. Изменение толщины стенки заготовки по высоте заготовки:

--- — моделирование;
— — эксперимент

моделировании составляет 3...3,37 мм (I зона), а уменьшение — 3,37...3,1 мм (II зона).

Соответственно при эксперименте увеличение толщины стенки заготовки в области обжима 3...3,33 мм (I зона), уменьшение толщины стенки — 3,33...3,1 мм (II зона).

Результаты моделирования и эксперимента совпадают в области обжима с точностью 1,2%.

Также на рис. 5, 6 видно, что уменьшение толщины стенки заготовки в области раздачи при моделировании составляет 3...2,4 мм, а при эксперименте — 3...2,53 мм.

Утонение при моделировании достигает 20%, а при эксперименте 15,6%.

Результаты моделирования и эксперимента совпадают в области раздачи с точностью 5,14%.

Деформация по толщине стенки ϵ_z . Отрицательные значения деформации по толщине стенки в области раздачи (рис. 7) свидетельствуют о наличии утонения в этой области. В области обжима имеют место положительные значения деформаций по толщине, т. е. утолщение.

На рисунке 7 видно, что увеличение деформации по толщине стенки в области обжима при моделировании составляет 0...0,116 мм (I зона), а уменьшение — 0,116...0,033 мм (II зона); при эксперименте соответственно 0...0,105 (I зона) и 0,105...0,033 мм (II зона). Таким образом, расхождение составляет 10,5%.

Уменьшение деформации по толщине стенки в области раздачи при моделировании составляет 0...—0,223 мм, при эксперименте — 0...—0,17 мм (см. рис. 7). Расхождение достигает 31,1%.

Окружная деформация ϵ_θ . В области раздачи значения окружной деформации положительные и диаметр заготовки увеличивается (рис. 8); в области обжима наоборот — отрицательные значения окружной деформации, а диаметр заготовки уменьшается.

На рисунке 8 видно, что уменьшение окружной деформации в области обжима при моделировании составляет 0...—0,258 мм.

Уменьшение окружной деформации в области обжима при эксперименте лежит в диапазоне 0...—0,222 мм, расхождение — 16,2%.

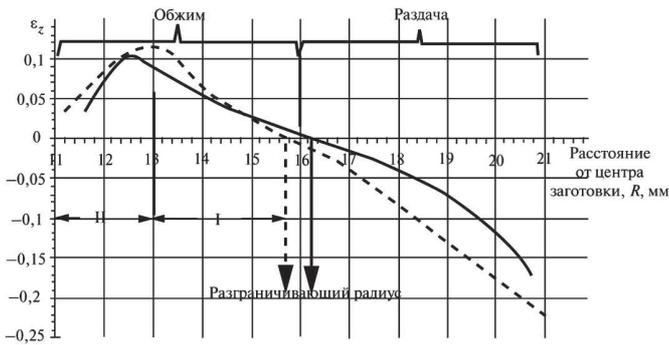


Рис. 7. Деформация по толщине стенки относительно расстояния от центра заготовки:

--- — моделирование;
— — эксперимент

Также на рис. 8 видно, что увеличение окружной деформации в области раздачи при моделировании составляет 0...0,37 мм, а при эксперименте — 0...0,357 мм, расхождение — 3,6%.

Меридиональная деформация ϵ_r . Деформированное состояние при обжиме неоднородно по очагу деформации, оно зависит от соотношения нормальных напряжений σ_r и σ_θ . В точках $\epsilon_r = 0$, $\sigma_r = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} = \frac{0 + \sigma_\theta}{2} = \frac{-\sigma_s}{2}$ (из условия пластичности при обжиме $\sigma_\theta = -\sigma_s$) $|\epsilon_z| = |\epsilon_\theta|$ (из условия несжимаемости, $\epsilon_r + \epsilon_z + \epsilon_\theta = 0$), а абсолютные значения напряжений $\sigma_r = \left| \frac{\sigma_\theta}{2} \right|$ и $\sigma_\theta = \sigma_s$. При этом меридиональная деформация ϵ_r заготовки в процессе деформирования не изменяется (равна нулю), деформированное состояние плоское. На остальных участках заготовки деформированное состояние объемное.

На рисунке 9 видно, что отрицательное значение ϵ_r находится в зоне I, которая расположена от разграничивающего диаметра области обжима и раздачи до точки $\epsilon_r = 0$ и $\sigma_r = \frac{-\sigma_s}{2}$. Положительное значение ϵ_r находится в зоне II, которая располагается от точки $\epsilon_r = 0$ до края заготовки, где ϵ_r имеет максимальное положительное значение.

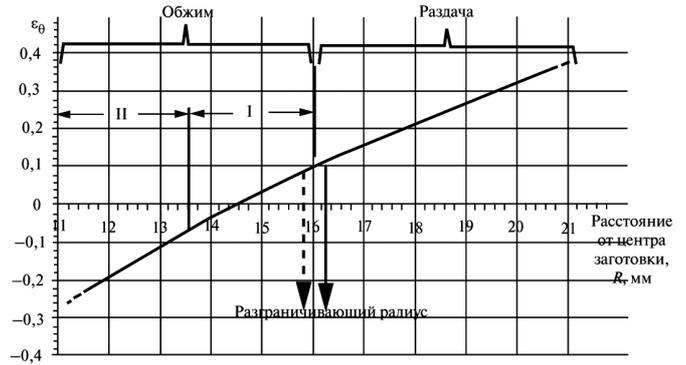


Рис. 8. Окружная деформация относительно расстояния от центра заготовки:

--- — моделирование;
— — эксперимент

Деформированное состояние при раздаче также неоднородно по очагу деформации, оно зависит от соотношения нормальных напряжений σ_r и σ_θ . В точках, где абсолютные значения напряжений $\sigma_r = \sigma_\theta$ толщина заготовки в процессе деформирования не изменяется, $\epsilon_z = 0$ при $\sigma_z = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} = 0$ (из условия пластичности при раздаче $\sigma_\theta - \sigma_r = \sigma_s$), деформированное состояние плоское и $|\epsilon_r| = |\epsilon_\theta|$ (из условия несжимаемости). В общем случае деформированное состояние заготовки объемное. Причем, где $|\sigma_r| > |\sigma_\theta|$ происходит даже утолщение стенки ($\epsilon_z > 0$), а на участке, где $|\sigma_r| < |\sigma_\theta|$ — утонение ($\epsilon_z < 0$). В области раздачи ϵ_r имеет отрицательное значение.

Увеличение меридиональной деформации в области обжима при моделировании (см. рис. 9) составляет 0...0,225 мм (II зона), при уменьшении меридиональной деформации — 0...-0,086 мм (I зона); соответственно 0...0,189 мм (II зона) и 0...-0,112 мм (I зона).

Расхождение результатов моделирования и эксперимента составляет 19% для II зоны и 23,2% для I зоны.

Также на рис. 9 видно, что уменьшение меридиональной деформации в области раздачи при моделировании лежит в диапазоне -0,086...-0,147 мм,

а при эксперименте — $-0,112...-0,187$ мм, расхождение — $(21,4...23,2)\%$.

Общая высота заготовки после деформирования уменьшается за счет отрицательных значений ϵ_r при раздаче и в зоне I при обжиге.

На рисунке 10 видно, что значения меридиональной деформации в области раздачи отрицательные, уменьшается длина (высота) заготовки, а в области обжига знак меридиональной деформации ϵ_r меняется за счет различной интенсивности (приращений деформаций) изменения окружной деформации ϵ_θ и деформации по толщине ϵ_z .

Выводы

1. С помощью совмещенной операции обжига и раздачи трубной заготовки можно получить переходник с большим коэффициентом формоизменения. Это доказывают результаты моделирования ($K_{обж-раз}^{мод} = 1,87$) и эксперимента ($K_{обж-раз}^{экc} = 1,8$), которые совпадают с результатами теоретического исследования — $K_{обж-раз} = 1,87$.

2. Можно получить более устойчивый процесс деформирования заготовки путем варь-

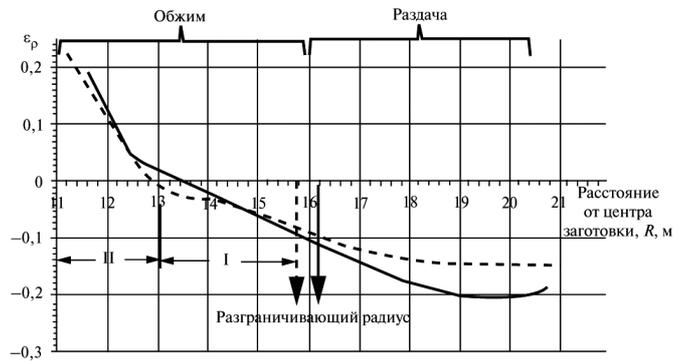


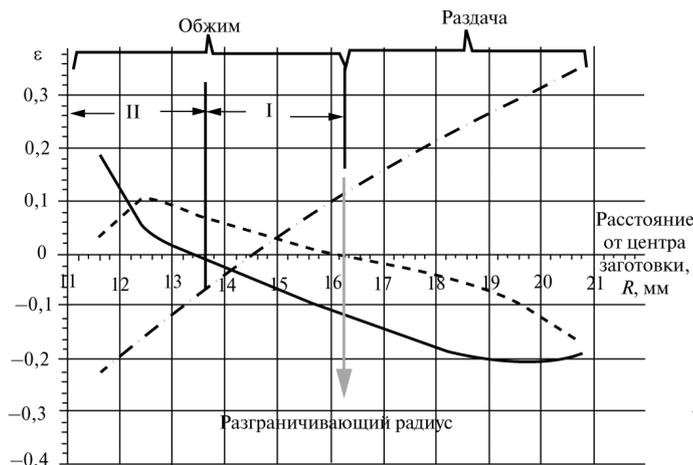
Рис. 9. Меридиональная деформация относительно расстояния от центра заготовки:

--- — моделирование;
— — эксперимент

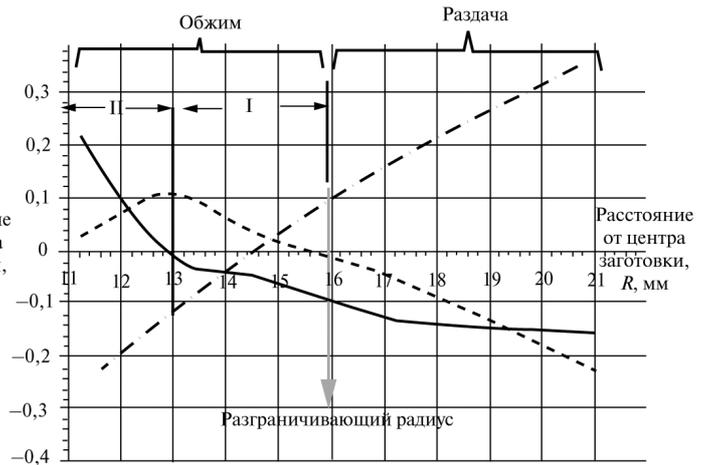
рования значения коэффициента трения между заготовкой и инструментом.

3. Высота заготовки после деформирования уменьшается на $8,9\%$ при эксперименте, и на $9,7\%$ при моделировании. Расхождение — $8,9\%$.

4. Увеличение коэффициента трения в области раздачи приводит к повышению меридионального сжимающего напряжения σ_r и утонению стенки заготовки. Утонение при



а



б

Рис. 10. Изменение деформации относительно расстояния от центра заготовки:

а — эксперимент; б — моделирование; - - - - ϵ_z ; - · - · - ϵ_θ ; — — ϵ_r

моделировании составляет 20%, при эксперименте — 15,6%.

5. Чем меньше утонение в области раздачи, тем меньше высота заготовки в этой области, а диаметр заготовки, разграничивающий области раздачи и обжима после деформирования ($S = S_0 = 3$ мм) возрастает и смещается к торцу заготовки.

6. Высота заготовки в области обжима немного увеличивается относительно высоты заготовки в области раздачи за счет положительного значения ϵ_p у входа в цилиндрическую часть матрицы.

Литература

1. Аверкиев Ю.А., Антонов Е.А., Белов Е.А. Ковка и штамповка: Справочник. В 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / Под ред. С.С. Яковлева. М.: Машиностроение, 2010. 732 с.
2. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд., 1979. 520 с.
3. Попов Е.А. Использование трубной заготовки вместо листовой // Новые процессы обработки металлов давлением. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. С. 144—150.
4. Меркулов В.И. Пути повышения эффективности процессов деформирования листовых, профильных и трубных заготовок // Кузнечно-штамповочное производство. 2000. № 2. С. 28—30.
5. Горбунов М.Н. Штамповка деталей из трубчатых заготовок. М.: Машгиз, 1960. 190 с.

6. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1968. 283 с.

7. Попов Е.А., Ковалев В.Г., Шубин И.Н. Технология и автоматизация листовой штамповки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 480 с.

References

1. Averkiev Yu.A., Antonov E.A., Belov E.A. *Kovka i shtampovka: spravochnik. Listovaia shtampovka* [Forging and Stamping. Reference. Stamping]. Ed. Iakovlev S.S. Moscow, vol. 4. Mashinostroenie publ., 2010. 732 p.
2. Romanovskii V. P. *Spravochnik po kholodnoi shtampovke* [Reference cold forming]. 6-th edition, Leningrad, Mashinostroenie publ., 1979. 520 p.
3. Popov E.A. Ispol'zovanie trubnoi zagotovki vmesto listovoi [Use billets instead leaf]. *Novye protsessy obrabotki metallov davleniem* [New processes of metal forming]. Moscow, Akademiia nauk SSSR publ., 1962, pp. 144—150.
4. Merkulov V.I. Puti povysheniia effektivnosti protsessov deformirovaniia listovykh, profil'nykh i trubnykh zagotovok [How to improve the processes of deformation of sheet, profile and billets]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo* [Forging and stamping production]. 2000, no. 2, pp. 28—30
5. Gorbunov M.N. *Shtampovka detalei iz trubchatykh zagotovok* [Stamping parts of tubular billets]. Moscow, Mashgiz publ., 1960. 190 p.
6. Popov E.A. *Osnovy teorii listovoi shtampovki* [Fundamentals of the theory of stamping]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1968. 283 p.
7. Popov E.A., Kovalev V.G., Shubin I.N. *Tekhnologiia i avtomatizatsiia listovoi shtampovki* [Technology and automation of stamping]. Moscow, MSTU named after N.E. Bauman publ., 2000. 480 p.

Статья поступила в редакцию 05.04.2013

Информация об авторах

СУЛЕЙМАН Актан Али (Москва) — аспирант кафедры «Технологии обработки давлением». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: so.solaiman@mail.ru).

ШУБИН Игорь Николаевич (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии обработки давлением». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Information about the authors

SOLAIMAN Aktham Ali (Moscow) — Post-Graduate of «Pressure Processing Technology» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: so.solaiman@mail.ru).

SHUBIN Igor Nikolaevich (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Pressure Processing Technology» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation).