

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСКАТКИ ФЛАНЦА НА ЗАГОТОВКЕ ИЗ ЛАТУНИ Л63

© 2016 г. **В.Н. Востров, П.В. Кононов, В.С. Модестов, И.Н. Логинов**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Статья поступила в редакцию 12.11.14 г., доработана 31.10.15 г., подписана в печать 09.11.15 г.

Построена математическая модель процесса холодной раскатки фланца на цилиндрической заготовке из сплава Л63. Проанализированы напряженные и деформированные состояния заготовки на трех этапах формообразования детали с фланцем. Установлено, что на первом этапе наиболее проблемна, с точки зрения возможности разрушения заготовки, область основания сформированного конуса. На втором и заключительном этапах формообразования фланца опасными являются торцевая поверхность фланца и цилиндрическая поверхность ступицы раскатной детали.

Ключевые слова: холодная раскатка, деталь с фланцем, сплав Л63, конечно-элементное моделирование.

Востров В.Н. — докт. техн. наук, профессор кафедры машин и технологий обработки металлов давлением Санкт-Петербургского политехнического университета (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29). Тел.: (812) 552-95-30. E-mail: vostrov-vn@mail.ru.

Кононов П.В. — инженер этой кафедры. E-mail: KPV710@rambler.ru.

Модестов В.С. — вед. инженер кафедры механики и процессов управления того же вуза. Тел./факс: (812) 552-77-78 (доб. 217). E-mail: vmodestov@spbstu.ru.

Логинов И.Н. — вед. инженер кафедры механики и процессов управления того же вуза. Тел./факс: (812) 552-77-78 (доб. 213). E-mail: Loginov_IN@spbstu.ru.

Для цитирования: Востров В.Н., Кононов П.В., Модестов В.С., Логинов И.Н. Конечно-элементное моделирование процесса раскатки фланца на заготовке из латуни Л63 // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2016. No. 5. С. 52–60. DOI: [dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-5-52-60](https://doi.org/10.17073/0021-3438-2016-5-52-60).

Vostrov V.N., Kononov P.V., Modestov V.S., Loginov I.N.

Finite element simulation of flange rolling on the L63 brass workpiece

The paper develops a mathematical model of the flange cold rolling process on the cylindrical workpiece made of L63 alloy. It analyzes stressed and strained states of the workpiece during three stages of a flanged piece forming. It is found that at the first stage the base area of the formed cone is most problematic in terms of possible workpiece destruction. Risks at the second and the final stage of flange forming are in the flange end surface and cylindrical hub surface of the rolling component.

Keywords: cold rolling, flanged piece, L63 alloy, finite-element simulation.

Vostrov V.N. — Dr. Sci. (Tech.), prof., Department of technology constructional materials and material science, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University (195251, Russia, St. Petersburg, Politeknicheskaya str., 29). E-mail: vostrov-vn@mail.ru.

Kononov P.V. — engineer of Department of technology constructional materials and material science, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. E-mail: KPV710@Rambler.ru.

Modestov V.S. — lead engineer of Department of mechanics and control processes, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. E-mail: vmodestov@spbstu.ru.

Loginov I.N. — lead engineer of Department of mechanics and control processes, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. E-mail: Loginov_IN@spbstu.ru.

Citation: Vostrov V.N., Kononov P.V., Modestov V.S., Loginov I.N. Konechno-elementnoe modelirovanie protsessa raskatki flantsa na zagotovke iz latuni L63. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2016. No. 5. P. 52–60. DOI: [dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-5-52-60](https://doi.org/10.17073/0021-3438-2016-5-52-60).

Введение

Исследование внутренних механических напряжений и деформаций в материалах имеет как фундаментальное научное, так и прикладное зна-

чение. Знание их величин при формоизменении заготовок способствует рациональному построению технологических процессов, выявлению и

устранению причин возникновения трещин в заготовках и готовых деталях, определению наклепа и остаточных напряжений [1, 2] поверхностного слоя деталей.

В настоящее время анализ напряженно-деформированного состояния изделий [3–8] осуществляется в программных комплексах — таких, как ANSYS, ABAQUS, QForm, DEFORM, Simufact Forming и др. [9], основанных на методе конечных элементов. Точность выполнения расчетов при компьютерном моделировании определяется достоверностью задаваемых исходных данных и адекватностью математической модели сопротивления деформации. Достоверность моделирования подтверждается экспериментами [10]. Программный комплекс ANSYS на текущий момент является лидером в области компьютерного моделирования [11].

Детали с фланцами широко используются в машиностроении [12–17] и промышленном строительстве.

В мировой литературе отсутствуют публикации, посвященные анализу напряженных и деформированных состояний заготовки из сплава Л63 в процессе холодной раскатки фланца. Поэтому цель данной работы — конечно-элементное моделирование процессов раскатки фланцев на цилиндрических заготовках из латуни Л63 в программном комплексе ANSYS с использованием программы LS-DYNA как решателя и оценка ресурса пластичности заготовки.

Методика исследований

Технологическая схема процесса раскатки трубчатой заготовки представлена на рис. 1, 3, 5, 7 [18, 19].

Формообразование детали с фланцем выполняют в три стадии. В исходном состоянии первый деформирующий валок 1 устанавливают под углом β_1 к оси приводной матрицы 2, а второй деформирующий валок 6 — под углом α (рис. 1). Исходную трубчатую заготовку 3 одевают на стержневой участок выталкивателя 4 и размещают в приводной матрице 2. Высота деформируемого участка заготовки равна l_d , длина ее базового участка — l_n . Опора выталкивателя 5 подводится к выталкивателю 4 и вводится с ним в контакт для повышения жесткости системы «заготовка—инструмент». Наружный диаметр базового участка заготовки — D_n , внутренний диаметр — $D_{вн}$, диаметр деформиру-

емого участка — D_d . В исходном состоянии заготовка под раскатку имеет вид, представленный на рис. 2.

На первой стадии раскатки детали с фланцем (рис. 3) приводную матрицу 2 с заготовкой 3 приводят во вращение. Вторым деформирующим валком 6 подводят к заготовке 3. В процессе деформирования выставленной части заготовки осуществляют ротационную высадку и формируют усеченный конус (рис. 4).

На второй стадии раскатки (рис. 5) формируется предварительный фланец. При этом первый деформирующий валок 1 устанавливают под углом β_2 к оси приводной матрицы 2. Заготовка приобретает форму, показанную на рис. 6.

На заключительной стадии (рис. 7) раскатывают предварительный фланец вторым раскатным

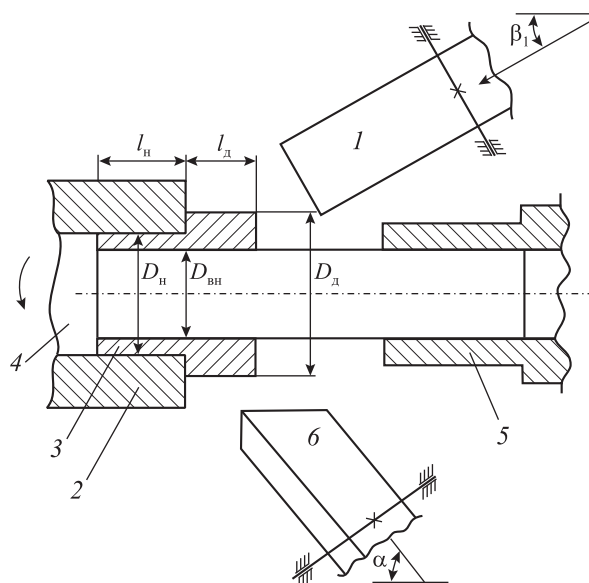


Рис. 1. Исходное положение раскатных валков



Рис. 2. Заготовка под раскатку детали с фланцем

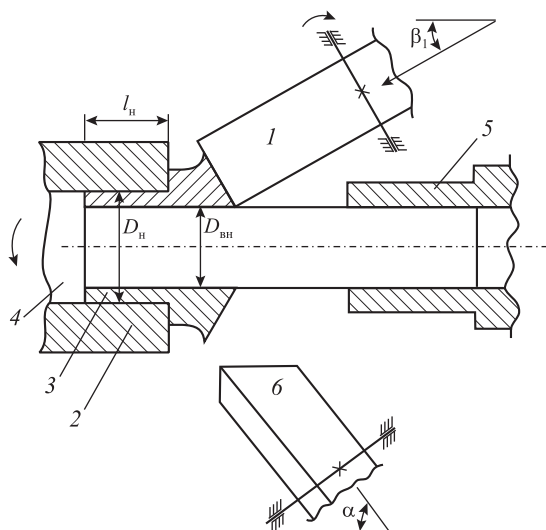


Рис. 3. Первая стадия формообразования детали с фланцем



Рис. 4. Конус, раскатанный на первой стадии формообразования детали с фланцем

валком 6, установленным под углом α к оси приводной матрицы 2, и заготовка приобретает требуемую форму (рис. 8).

На рис. 7 использованы следующие обозначения: $h_{\text{ф}}$ — высота фланца, $l_{\text{в}}$ — длина ступицы, $D_{\text{в}}$ — наружный диаметр ступицы, $D_{\text{ф}}$ — наружный диаметр фланца.

Химический состав латуни Л63 — материала исследуемой детали — составляет по ГОСТ 15527, %: 62–65 Cu, примеси (не более) — 0,2 Fe, 0,07 Pb, 0,005 Sb, 0,002 Bi, 0,01 P, другие примеси — 0,5 %, Zn — остальное.

Механические характеристики сплава Л63: модуль Юнга $E = 1,16 \cdot 10^5$ МПа (при $t = 20$ °С), коэффициент Пуассона $\nu = 0,364$, относительное удлинение — 30÷40 %, предел текучести $\sigma_{0,2} = 100 \div 140$ МПа, предел прочности $\sigma_{\text{в}} = 480 \div 550$ МПа.

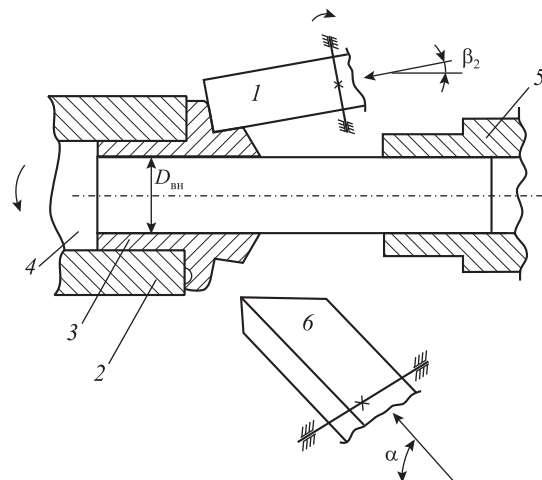


Рис. 5. Второй этап формообразования фланца



Рис. 6. Заготовка после второго этапа формирования фланца

Значение параметра гранецентрированной кубической решетки сплава Л63 — $a = 0,3650 \pm 0,0001$ нм — больше, чем у чистой меди, что характерно для твердого раствора цинка в меди.

Кривая упрочнения латуни Л63 (рис. 9) получена на экспериментальном комплексе «Gleeble-3800» при комнатной температуре в диапазоне скоростей деформации, соответствующих процессу раскатки детали с фланцем.

При построении математической модели процесса холодной раскатки фланца на образующей поверхности цилиндрической заготовки принимаем следующие допущения:

- материал подчиняется в упругом состоянии закону Гука и ассоциативному закону течения в пластическом состоянии;
- немонотонный процесс объемного формообразования заменяется рядом монотонных процессов;
- полная скорость деформации $\{\dot{\epsilon}\}$ включает

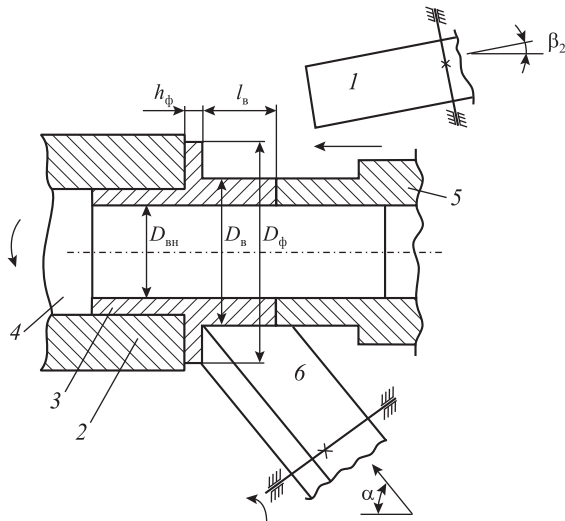


Рис. 7. Заключительная стадия раскатки детали с фланцем



Рис. 8. Раскатанная деталь с фланцем

скорость упругой деформации $\{\dot{\epsilon}^e\}$ и скорость пластической деформации $\{\dot{\epsilon}^p\}$:

$$\{\dot{\epsilon}\} = \{\dot{\epsilon}^e\} + \{\dot{\epsilon}^p\}; \quad (1)$$

- напряжение текучести $\sigma_{0,2}$ является функцией интенсивности деформации ϵ_i ;
- используется билинейная модель упругопластического материала. Критерий начала текучести (переход из упругого в пластическое состояние) оценивается по критерию Мизеса, согласно которому текучесть начинается при достижении величины эквивалентного напряжения σ_i , превышающей предел текучести материала [19]:

$$\sigma_i = \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)] \right\}^{1/2}. \quad (2)$$

На кафедре механики и процессов управления

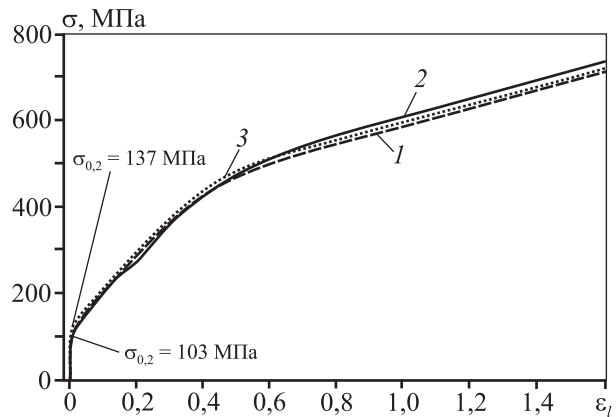


Рис. 9. Зависимости истинных напряжений от истинных деформаций для сплава Л63, полученные растяжением при различных скоростях деформации $\dot{\epsilon} = 0,1 \text{ с}^{-1}$ (1), $0,5 \text{ с}^{-1}$ (2), 15 с^{-1} (3)

Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого создан программный комплекс на основе ANSYS и LS-DYNA [19–21]. Программа адаптирована для расчета процесса ротационного формообразования деталей с фланцем, причем инструмент представлен в виде абсолютно твердого тела для уменьшения времени расчета.

Граничные условия заданы следующим образом. На свободных поверхностях, где нет контакта заготовки с раскатным валком, матрицей и оправкой, заданы нулевые силовые условия в виде сил, действующих по нормали к поверхности: $\{P\} = 0$. Для контактных точек напряжения, действующие по нормали к поверхности, определяются по формуле

$$\sigma_N = \sigma_{xx} \sin^2 \alpha + \sigma_{yy} \cos^2 \alpha - 2\sigma_{xy} \alpha \cos \alpha, \quad (3)$$

где α — угол наклона контактной поверхности в анализируемой точке.

Условие $\sigma_N > 0$ дает основание судить о возможном сходе точки с контактной поверхности и необходимости в дальнейшем рассматривать ее как точку свободной поверхности [19].

Контактное трение формирует очаг деформации. Усилие трения и вызываемые им на контактных поверхностях касательные напряжения зависят от прочностных показателей металла, нормального к контактной поверхности напряжения, шероховатости инструмента, вязкости смазочной среды, скорости скольжения в зоне контакта, толщины смазочной прослойки, температурного поля, возникающего в поверхностном смазочном слое, и других факторов.

Для ротационных процессов показатель трения на контактных поверхностях (τ_k) рекомендуется определять по закону Зибеля как долю (ν) предела текучести ($\sigma_{0,2}$) формообразуемого металла со знаком, противоположным знаку скорости течения материала на поверхности контакта [19, 22]:

$$\tau_k = \nu \sigma_s. \quad (4)$$

Вывод результатов вычислений в комплексе ANSYS производится в виде цветового отображения (эпюр) градиентов физических величин. Данный способ удобен для определения значений деформаций и напряжений в исследуемых зонах модели.

Результаты и их обсуждение

В ходе расчетов были определены параметры процесса раскатки: скорость вращения (n) и подача раскатных валков (S). По результатам расчетов выбран наиболее рациональный режим раскатки, с точки зрения технологичности и обеспечения условий прочности, на каждом этапе формирования фланца ($n = 60 \div 120$ об/мин, $S = 0,1 \div 0,5$ мм/об).

Распределение напряжений и деформаций в заготовке из сплава ЛБ3 на первой стадии формообразования детали с фланцем показано на рис. 10.

Напряженное и деформированное состояния заготовки на второй стадии раскатки представлены на рис. 11, а на заключительной стадии раскатки — на рис. 12.

Степень использования ресурса пластичности вычислялась по формуле В.Л. Колмогорова [23]:

$$\psi = \sum_{q=1}^n \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_p}, \quad (5)$$

где ε_q — логарифмическая степень деформации на q -м цикле деформирования заготовки в процессе раскатки; ε_p — логарифмическая степень деформации, соответствующая моменту разрушения.

Запас пластичности определялся следующим образом [24]:

$$\Delta\psi_{ij} = 1 - \psi_{ij}, \quad (6)$$

где $\psi_{ij} = \varepsilon_{ij}/\varepsilon_{pi}$ — степень использования пластичности на i -м этапе раскатки в j -й области заготовки.

Степень использования ресурса пластичности и запас пластичности в процессе холодной раскатки детали с фланцем из латуни ЛБ3 представлены в табл. 1. Номера характерных областей заготовки соответствуют рис. 10—12.

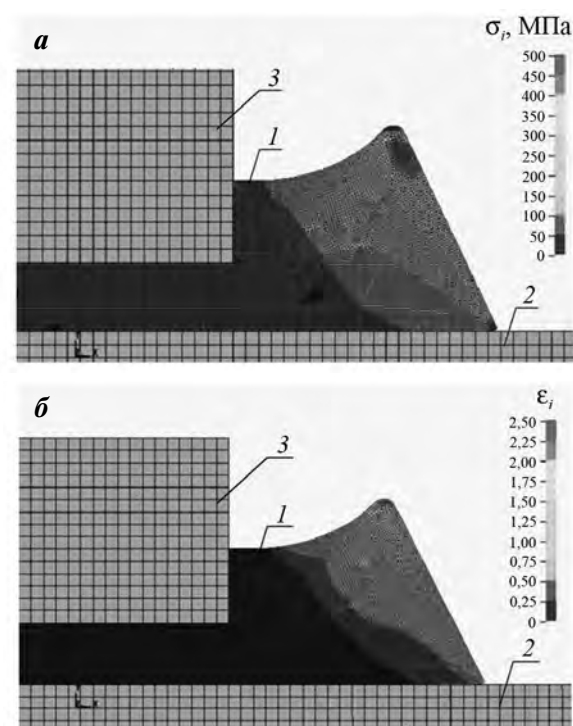


Рис. 10. Распределение напряжений (а) и деформаций (б) в заготовке из сплава ЛБ3

на первой стадии формообразования фланца

1 — заготовка, 2 — ось, 3 — матрица

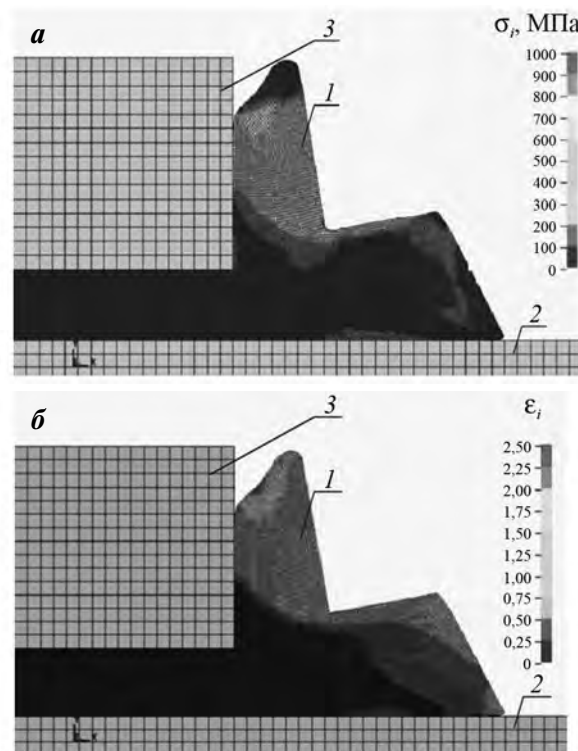


Рис. 11. Напряженное (а) и деформированное (б) состояния заготовки из сплава ЛБ3

на второй стадии раскатки детали с фланцем

1 — заготовка, 2 — ось, 3 — матрица

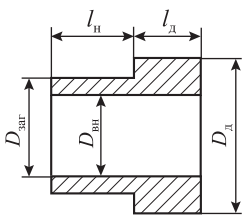
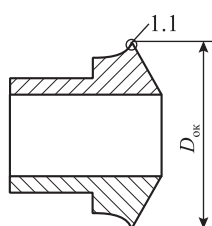
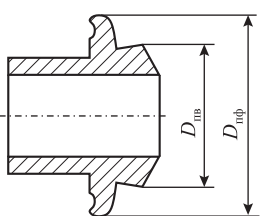
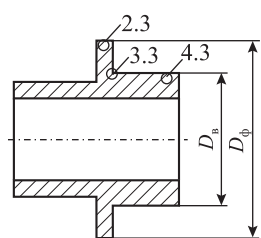
Таблица 1

Степень использования ресурса пластичности и запас пластичности в процессе холодной раскатки детали с фланцем из латуни Л63

Область заготовки (<i>j</i>)	Степень использования ресурса пластичности			Запас пластичности		
	1 стадия Ψ_{1j}	2 стадия Ψ_{2j}	3 стадия Ψ_{3j}	1 стадия $\Delta\Psi_{1j}$	2 стадия $\Delta\Psi_{2j}$	3 стадия $\Delta\Psi_{3j}$
1	0,26	0,42	0,55	0,74	0,58	0,45
2	0,34	0,53	0,62	0,66	0,47	0,38
3	0,22	0,37	0,46	0,78	0,63	0,54

Таблица 2

Стадии холодной раскатки детали с фланцем

Размеры исходной заготовки, мм	Формообразование конуса (1 стадия)	Формообразование предварительного фланца (2 стадия)	Формообразование фланца требуемой формы (3 стадия)
 $l_n = 25, l_d = 20,$ $D_d = 45, D_{вн} = 25,$ $D_{ар} = 35$	 $D_{ок} = 56 \text{ мм}$	 $D_{пф} = 62 \text{ мм}$	 $D_{ф} = 68 \text{ мм}$

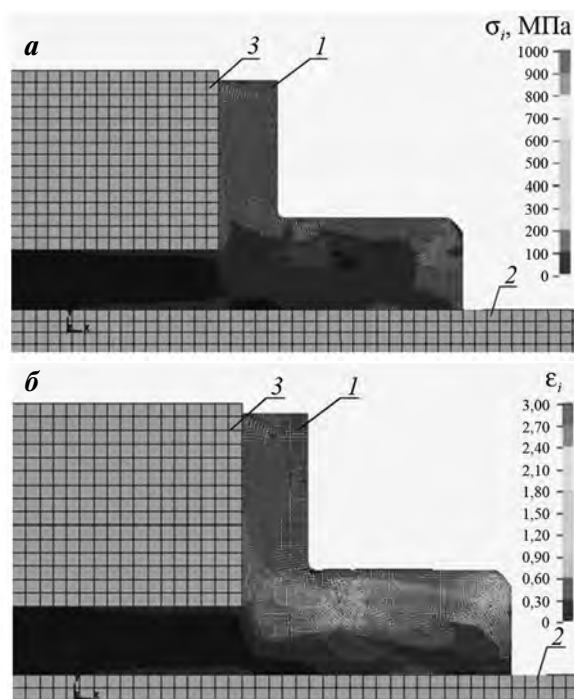


Рис. 12. Распределение напряжений (а) и деформаций (б) в детали из сплава Л63

на заключительной стадии раскатки детали с фланцем
1 – заготовка, 2 – ось, 3 – матрица

Диаграмма пластичности латуни Л63 (λ_p, Π) и пути деформирования исследуемых областей заготовки в процессе ее раскатки показаны на рис. 13, где $l_p = \sqrt{3}\epsilon_p$ – степень деформации сдвига. Показатель напряженного состояния имеет вид [23]

$$\Pi = 3\sigma_0/\sigma_i, \quad (7)$$

где $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ – гидростатическое давление; σ_i – интенсивность напряжений.

Экспериментальное построение кривой предельного состояния образцов (диаграммы пластичности), соответствующей различным схемам нагружения, выполнялось с использованием стандартного испытательного оборудования – комплекса «Instrop-8850» (НПО «Политехтест», г. Санкт-Петербург). Реализованы следующие схемы нагружения: одноосное растяжение; совместное одноосное растяжение и кручение; кручение; совместное одноосное сжатие и кручение; одноосное сжатие.

В качестве примера в табл. 2 представлены форма и размеры заготовки на трех стадиях холодной раскатки детали с фланцем из латуни Л63. Соотношение диаметров фланца и ступицы у формируемой детали равно $D_{ф}/D_{в} = 1,6$.

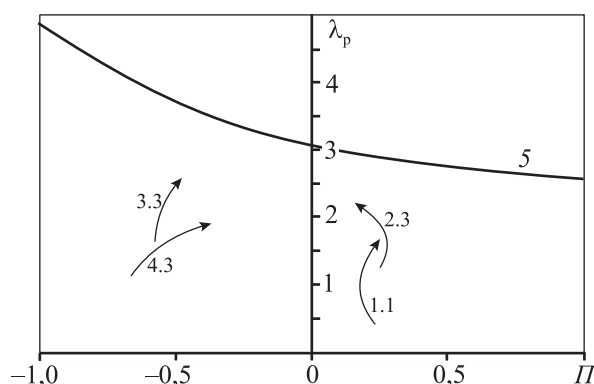


Рис. 13. Диаграмма пластичности латуни Л63 (кр. 5) и пути деформирования частиц материала в исследуемых областях заготовки (показаны стрелками)

- 1.1 – первая область на первой стадии раскатки
 2.3 – вторая область на третьей стадии раскатки
 3.3 – третья область на третьей стадии раскатки
 4.3 – четвертая область на третьей стадии раскатки

Максимально допустимый диаметр фланца требуемой формы, полученный раскаткой на третьей стадии, равен $D_{\text{ф}} = 68$ мм. При этом значение суммарной степени деформации сдвига в области 1 интенсивного деформирования составляет $\lambda_{1\text{max}} = 1,7 < \lambda_{1\text{p}} = 2,8$, в области 2 – $\lambda_{2\text{max}} = 2,2 < \lambda_{2\text{p}} = 2,9$, в опасной области 3 – $\lambda_{3\text{max}} = 2,7 < \lambda_{3\text{p}} = 3,6$, в опасной области 4 – $\lambda_{4\text{max}} = 1,9 < \lambda_{4\text{p}} = 3,5$. Здесь λ_{p} – степень деформации сдвига, соответствующая моменту разрушения.

Проведенные эксперименты в лабораторных условиях с использованием рациональных режимов на трех стадиях раскатки деталей с фланцами подтвердили адекватность применяемых компьютерных моделей и показали отсутствие разрушений формообразованных деталей из сплава Л63.

Выводы

1. На основании конечно-элементной математической модели, положенной в основу программного комплекса ANSYS, и выполненных параметрических расчетов процесса холодной раскатки деталей с фланцем из латуни Л63 определено изменение напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе ее формообразования, что позволило оценить область применения разработанной технологии изготовления деталей данного класса.

2. Получена информация о распределении в заготовке накопленной деформации, оценены степень использования ресурса пластичности и за-

пас пластичности на всех стадиях формирования раскаткой детали с фланцем.

3. Показана эффективность использования конечно-элементных пакетов программ ANSYS в качестве процессора и LS-DYNA как решателя при решении задач ротационного формообразования.

Знание опасных областей на раскатываемой заготовке, с точки зрения возможности их разрушения, позволило оценить область применения разработанной технологии изготовления деталей с фланцем из сплава Л63.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-08-31655 мол_а.

Литература

1. Withers P.J., Bhadeshia H.K.D.H. Residual stress. Part 1. Measurement techniques // Mater. Sci. Technol. 2001. Vol. 17. No. 4. P. 355–365.
2. Васильков С.Д., Александров А.С., Афанасьев И.В. Определение остаточных напряжений в поверхностном слое деталей из алюминиевого сплава после механической обработки // Инструмент и технологии. 2010. No. 27. С. 26–29.
3. Pesin A., Salganik V., Trahtengertz E., Cherniahovsky M., Rudakov V. Mathematical modelling of the stress–strain state in asymmetric flattening of metal band // J. Mater. Process. Technol. 2002. Vol. 125–126. P. 689–694.
4. Han X., Hua L. 3D FE modelling of contact pressure response in cold rotary forging // Tribol. Int. 2013. Vol. 57. P. 115–123.
5. Siddique M., Abid Muhammad, Junejo H.F., Mufti R.A. 3-D finite element simulation of welding residual stresses in pipe-flange joints: effect of welding parameters // Mater. Sci. Forum. 2005. Vol. 490–491. P. 79–84.
6. Govik A., Nilsson L., Moshfegh R. Finite element simulation of the manufacturing process chain of a sheet metal assembly // J. Mater. Process. Technol. 2012. Vol. 212. No. 7. P. 1453–1462.
7. Gao M., Krishnamurthy R., Tandon S., Arumugam U. Critical strain based ductile damage criterion and its application to mechanical damage in pipelines // 13-th Intern. conf. on fracture. Beijing, China. 2013. Vol. 5. P. 3723.
8. Shaban Ghazani M., Vajd A., Mosadeg B. 3D finite element study of temperature variations during equal channel angular pressing // J. Adv. Mater. Process. 2014. Vol. 2. No. 1. P. 47–54.
9. Горбунов И.В., Ефременков И.В., Леонтьев В.Л., Гисметулин А.Р. Особенности моделирования процессов механической обработки в САЕ-системах //

- Изв. Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. No. 4(4). С. 846—853.
10. Петров П.А. Изотермическая штамповка алюминевых и магниевых сплавов: моделирование технологических процессов // Матер. Междунар. науч.-техн. конф. «Автомобиле- и тракторостроение в России», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ». М.: Изд-во МАМИ, 2010. С. 107—113.
 11. ANSYS Theory Reference. 11-th ed. ANSYS Release 10.0. Canonsburg, PA. USA, ANSYS inc., 2005.
 12. Nowak J., Madej L., Ziolkiewicz S., Plewinski A., Grosman F., Pietrzyk M. Recent development in orbital forging technology // Int. J. Mater. Forming. 2008. Vol. 1. Suppl. 1. P. 387—390.
 13. Bartnicki Ja. The theoretical and experimental research of rolling-extrusion process. Lublin: Lublin University of Technology, 2009.
 14. Кункин С.Н., Аксенов Л.Б. Торцевая раскатка с выдавливанием утолщенных полых фланцев // Альманах современной науки и образования. No. 7 (97). Тамбов: Грамота, 2015. С. 84—87.
 15. Басалаев Д.Э., Басалаев Э.П., Нгуен К.Х. Теоретическое исследование процессов формирования фланцев на торце и стенке внутренних полых цилиндрических заготовок // Изв. ТулГУ. Техн. науки. 2013. Вып. 1. С. 109—115.
 16. Кононов П.В., Кононова И.Е., Востров В.Н. Применение атомно-силовой микроскопии для анализа напряженного и деформированного состояния детали с фланцем из латуни // Изв. СПбГТУ «ЛЭТИ». 2014. No. 6. С. 7—11.
 17. Кононов П.В., Востров В.Н. Конечно-элементное моделирование процесса раскатки фланца на трубчатой заготовке // Молодой ученый. 2013. No. 9. С. 46—49.
 18. Востров В.Н., Кононов П.В. Способ раскатки фланцев трубчатых заготовок: Пат. 2499648 C1 (РФ). 2013.
 19. Рыбин Ю.И., Рудской А.И., Золотов А.М. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением. СПб.: Наука, 2004.
 20. Hallquist J.O. LS-DYNA. Theoretical manual. Livermore: Livermore Software Technology Corp., 1998.
 21. Боровков А.И. Возможности системы конечно-элементного моделирования ANSYS/LS-DYNA // Первая междунар. конф. пользователей программного обеспечения ANSYS (г. Москва, 22—23 окт. 2003). М.: EMT—ANSYS-центр, 2003. С. 128—136.
 22. Голенков В.А., Зыкова З.П., Кондрашов В.И. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением на персональном компьютере. М.: Машиностроение, 1994.
 23. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: Изд-во УГТУ—УПИ, 2001.
 24. Бернштейн М.Л. Механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1979.

References

1. Withers P.J., Bhadeshia H.K.D.H. Residual stress. Part 1. Measurement techniques. *Mater. Sci. Technol.* 2001. Vol. 17. No. 4. P. 355—365.
2. Vasil'kov S.D., Aleksandrov A.S., Afanas'ev I.V. Opredelenie ostatochnykh napryazhenii v poverkhnostnom sloe detalei iz alyuminievogo splava posle mekhanicheskoi obrabotki [Determination of residual stresses in the surface layer of the aluminum alloy part after machining]. *Instrument i tekhnologii.* 2010. No. 27. P. 26—29.
3. Pesin A., Salganik V., Trahtengertz E., Cherniahevsky M., Rudakov V. Mathematical modelling of the stress—strain state in asymmetric flattening of metal band. *J. Mater. Process. Technol.* 2002. Vol. 125—126. P. 689—694.
4. Han X., Hua L. 3D FE modelling of contact pressure response in cold rotary forging. *Tribol. Int.* 2013. Vol. 57. P. 115—123.
5. Siddique M., Abid Muhammad, Junejo H.F., Mufti R.A. 3-D finite element simulation of welding residual stresses in pipe-flange joints: effect of welding parameters. *Mater. Sci. Forum.* 2005. Vol. 490—491. P. 79—84.
6. Govik A., Nilsson L., Moshfegh R. Finite element simulation of the manufacturing process chain of a sheet metal assembly. *J. Mater. Process. Technol.* 2012. Vol. 212. No. 7. P. 1453—1462.
7. Gao M., Krishnamurthy R., Tandon S., Arumugam U. Critical strain based ductile damage criterion and its application to mechanical damage in pipelines. In: *13-th Intern. conf. on fracture.* Beijing, China. 2013. Vol. 5. P. 3723.
8. Shaban Ghazani M., Vajd A., Mosadeg B. 3D finite element study of temperature variations during equal channel angular pressing. *J. Adv. Mater. Process.* 2014. Vol. 2. No. 1. P. 47—54.
9. Gorbunov I.V., Efremkov I.V., Leont'ev V.L., Gismetulin A.R. Osobennosti modelirovaniya protsessov mekhanicheskoi obrabotki v SAE-sistemakh [Features simulation of machining processes in the CAE-systems]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk.* 2013. Vol. 15. No. 4(4). P. 846—853.
10. Petrov P.A. Izotermicheskaya shtampovka alyuminievyykh i magnievyykh spлавov: modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov [Isothermal forging aluminum and magnesium alloys: modeling of technological processes]. In: *Materialy*

- mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Avto-mobile- i traktorostroenie v Rossii», posvyashchennoi 145-letiyu MGTU «MAMI» [Materials of the international scientific and technical conferences «The car- and tractor construction in Russia», devoted to the 145 anniversary of MGTU «MAMI»]. Moscow: MAMI, 2010. P. 107—113.*
11. ANSYS Theory Reference. 11-th ed. ANSYS Release 10.0. Canonsburg, PA. USA, ANSYS inc., 2005.
 12. Nowak J., Madej L., Ziolkiewicz S., Plewinski A., Grosman F., Pietrzyk M. Recent development in orbital forging technology. *Int. J. Mater. Forming*. 2008. Vol. 1. Suppl. 1. P. 387—390.
 13. Bartnicki Ja. The theoretical and experimental research of rolling-extrusion process. Lublin: Lublin University of Technology, 2009.
 14. Kunkin S.N., Aksenov L.B. Tortsevaya raskatka s vydavlivaniem utolshchennykh polykh flantsev [Face rolling with thickened hollow extruded flange]. In: *Al'manakh sovremennoi nauki i obrazovaniya [Almanac of modern science and education]*. No. 7 (97). Tambov: Gramota, 2015. P. 84—87.
 15. Basalaev D.E., Basalaev E.P., Nguen K.H. Teoreticheskoe issledovanie protsessov formirovaniya flantsev na tortse i stenke vnutrennikh polykh tsilindricheskikh zagotovok [Theoretical study of the formation of the flange on the end wall and the inner hollow cylindrical workpieces]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*. 2013. No. 1. P. 109—115.
 16. Kononov P.V., Kononova I.E., Vostrov V.N. Primenenie atomno-silovoi mikroskopii dlya analiza napryazhenno-go i deformirovannogo sostoyaniya detali s flantsem iz latuni [Application of atomic force microscopy for analysis of stress and strain state with the flange parts of brass]. *Izvestiya SPbGTU «LETI»*. 2014. No. 6. P. 7—11.
 17. Kononov P.V., Vostrov V.N. Konechno-elementnoe modelirovanie protsessa raskatki flantsa na trubchatoy zagotovke [Finite element modeling of the rolling flange on tubular billet]. *Molodoi uchenyi*. 2013. No. 9. P. 46—49.
 18. Vostrov V.N., Kononov P.V. Sposob raskatki flantsev trubchatykh zagotovok [Method of rolling tube blanks flanges]: Pat. 2499648 C1 (RF). 2013.
 19. Ribin Yu.I., Rudskoi A.I., Zolotov A.M. Matematicheskoe modelirovanie i proektirovanie tekhnologicheskikh protsessov obrabotki metallov davleniem [Mathematical modeling and design process of metal forming processes]. Saint-Petersburg: Nauka, 2004.
 20. Hallquist J.O. LS—DYNA. Theoretical manual. Livermore: Livermore Software Technology Corp., 1998.
 21. Borovkov A.I. Vozmozhnosti sistemy konechno-elementnogo modelirovaniya ANSYS/LS-DYNA [Features of the finite element simulation ANSYS / LS-DYNA]. In: *I mezhdunarodnaya konferentsiya polzovatelei programm-nogo obespecheniya ANSYS [First Int. Conf. of users of the software ANSYS]* (Moscow, 22—23 Oct., 2003). Moscow: EMT—ANSYS-Centre, 2003. P. 128—136.
 22. Golenkov V.A., Zykova Z.P., Kondrashov V.I. Matematicheskoe modelirovanie protsessov obrabotki metallov davleniem na personal'nom komp'yutere [Mathematical modeling of metal forming processes on a PC]. Moscow: Mashinostroenie, 1994.
 23. Kolmogorov V.L. Mekhanika obrabotki metallov davleniem [Mechanic treatment of metals by pressure]. Ekaterinburg: UGTU—UPI, 2001.
 24. Bernshtein M.L. Mekhanicheskie svoystva metallov [Mechanical properties of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1979.