

УДК 539.374

DOI: 10.32326/1814-9146-2020-82-1-75-88

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЭТАПНОЙ ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ ТОНКОСТЕННОГО СОСУДА\*

© 2020 г. Келлер И.Э.<sup>1,2</sup>, Казанцев А.В.<sup>1</sup>, Адамов А.А.<sup>2</sup>,  
Петухов Д.С.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Российская Федерация

kie@icmm.ru

Поступила в редакцию 18.12.2019

Предлагается методика построения и аттестации численной модели холодной штамповки тонкостенных изделий из анизотропного металлического листа для проектирования технологических операций. Используются соотношения ассоциированного закона пластического течения с функцией текучести Барлата и изотропным деформационным упрочнением, для идентификации которых предлагается методика проведения и обработки эксперимента. Кривая предельных деформаций аппроксимируется численно методом Марциньяка – Кучинского, а для ее идентификации предлагается использовать тест на разрушение при одноосном растяжении и прессовое оборудование в качестве экспериментального. Для этого на плоскую заготовку лазерной гравировкой наносится координатная сетка, по искажению которой вблизи зон локализации деформации и разрушения сосуда определяются дополнительные точки кривой предельных деформаций. Для описания упругости полиуретанового штампа при больших деформациях с помощью испытаний на свободное и стесненное сжатие определяются константы потенциала Пенга – Ландела. Все испытания, согласно методике, выполнены для малоуглеродистой листовой стали марки DC04ЕК толщиной 0,7 мм и полиуретана СКУ-ПФЛ. Построена численная модель процесса в пакете LS-DYNA® с использованием моделей материалов из его библиотеки. Расчеты по модели подтверждены экспериментом, для чего по искаженной координатной сетке на заготовке после каждой операции в контрольных точках определялись главные деформации. Выполнен расчет последовательности этапов вытяжки и задачи заготовки при производстве чайника с учетом и без учета промежуточного отжига и определены опасные зоны и закономерности их формирования.

*Ключевые слова:* численный расчет, эксперимент, холодная листовая штамповка, малоуглеродистая сталь, пластичность, анизотропия, предельные деформации, верификация.

---

\* Выполнено при финансовой поддержке грантом совместного конкурса РФФИ и Правительства Пермского края (проект №17-48-590310р-а).

## Введение

Современные средства разработки новых эффективных технологий производства металлических тонкостенных изделий операциями холодной листовой штамповки предусматривают численное моделирование процесса. Для этого необходима методика формулировки математической модели пластичности и разрушения материала, ее экспериментальной идентификации и численной реализации, расчета процесса и его экспериментальной верификации. Этим вопросам посвящен ряд монографий [1, 2], обзоров [3, 4], методологических работ [5]. Укажем несколько оригинальных статей [6–9], использующих указанные этапы решения задачи. Существуют как универсальные, так и специализированные коммерческие пакеты программ, реализующие метод конечных элементов в сочетании с явным методом интегрирования уравнений по времени, приспособленные для решения геометрически и физически нелинейных задач с протяженными поверхностями контакта, к которым относятся задачи листовой штамповки. Как правило, в них внедрены обширные библиотеки моделей материала [10], на которые стоит рассчитывать в первую очередь при решении задач. Для экспериментальной идентификации и верификации модели разработаны соответствующие стандарты [1–4]. Тем не менее, при выборе методики создания и аттестации численной модели технологического процесса листовой штамповки остается довольно большой простор в используемых средствах.

### 1. Постановка задачи

Исследуется технологический процесс штамповки заготовки чайника, основные этапы которого схематически изображены на рис. 1: I, II, III – вытяжка стакана, IV – его раздача полиуретаном.

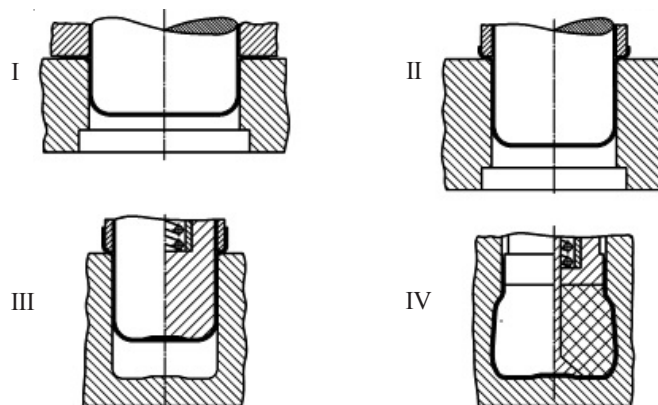


Рис. 1. Основные этапы технологического процесса штамповки

Исходная заготовка – круг диаметром 405 мм. Основные дефекты – полосы сдвига и трещины – образуются в зонах предельных деформаций на боковой поверхности заготовки чайника (рис. 2) на этапе IV без предварительного рекристаллизационного отжига; на этапах I, II, III могут образовываться гофры на краях и в верхней части стаканов.

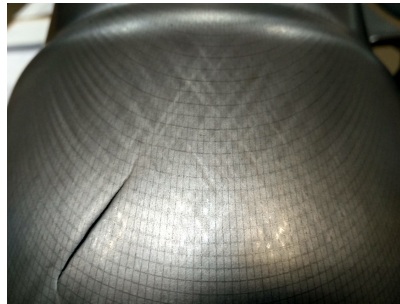


Рис. 2. Деформированная координатная сеть в зоне предельных деформаций

Предметом исследования являются закономерности возникновения и наследования этих дефектов в технологическом процессе. В частности, интересуют условия, при которых можно исключить из последнего промежуточный отжиг. В качестве инструмента разработки и модернизации соответствующих технологий необходима численная модель процесса, поэтому далее здесь предлагается методика ее построения и экспериментальной аттестации.

## 2. Модели материалов и их идентификация

Для описания пластического течения и деформационного упрочнения анизотропной малоуглеродистой листовой стали марки DC04ЕК толщиной 0,7 мм принята модель Барлата [11]. Сама модель и процедура ее экспериментальной аттестации для исследуемого материала подробно описана в [12]. В пакете LS-DYNA® данная модель соответствует стандартному материалу 133 [10].

Предельные свойства листового металла принято описывать кривой в области  $\epsilon_1 \geq 0$  плоскости главных деформаций  $\epsilon_1, \epsilon_2$ . Для стали DC04ЕК в литературе имеются данные лишь для листа толщиной 0,77 мм [13] с другой историей изготовления. Кривую предельных деформаций определяют с помощью испытаний по вдавливанию в образцы специальной геометрии, вырубленные из листа, пуансонов со сферическим или цилиндрическим наконечником, требующих специальной оснастки [14]. При отсутствии этой оснастки кривая предельных деформаций в [12] была построена теоретически с использованием метода Марциньяка – Кучинского [15] и вышеупомянутой модели пластичности. Однако для этого метода все равно требуются какие-либо экспериментальные данные по предельным состояниям для идентификации модели.

В настоящей работе для определения предельных свойств был использован нестандартный метод. На исследуемом объекте локальные деформированные состояния, наиболее близкие к предельным, находятся на выпуклой части боковой поверхности. Им отвечают точки подобласти  $\epsilon_1 \geq 0, \epsilon_2 \leq 0$  диаграммы главных деформаций. Часть кривой предельных деформаций в этой области с приемлемой точностью аппроксимируется прямой [1–4, 12], для чего необходимы две экспериментальные точки. Одна из этих точек получена в [12] из испытаний на разрушение образцов при одноосном растяжении. Для определения второй точки на исходную заготовку-круг лазерным гравером была нанесена сетка ортогональных декартовых координат вдоль направления прокатки и в поперечном направлении с шагом 2 мм. Далее эта заготовка была пропущена через все технологические операции согласно рис. 1 (без отжига), и по искаженной сетке вблизи границ зоны локализации дефор-

мации (см. рис. 2) были определены предельные деформации. Для этого изделие помещалось под объектив цифрового оптического микроскопа Nirox КН-7700 и выполнялись необходимые измерения сетки на поверхности. Наиболее опасное предельное состояние, соответствующее плоскому деформированному состоянию, обнаружено в области максимального диаметра изделия и было учтено при построении кривой предельных деформаций.

Определение нелинейно-упругих свойств литьевого полиуретана СКУ-ПФЛ для листовой штамповки проводилось на универсальной испытательной машине Zwick Z100/SN5A. Испытания реализованы при свободном и стесненном сжатии на цилиндрических образцах диаметром 20 и высотой 20 мм при комнатной температуре. Из предварительных оценок напряженно-деформированного состояния штампа были определены максимальные продольные деформации при свободном сжатии 30% и максимальные продольные напряжения при стесненном сжатии 60 МПа. Минимизация трения на торцах образца обеспечивалась тремя слоями пленки Ф-4 толщиной 50 мкм и смазкой ЦИАТИМ 221F. Для испытания использовались самодельные приспособления (рис. 3), обеспечивающие измерение продольной деформации образца на базе однородного деформирования экстензометром Multisens.

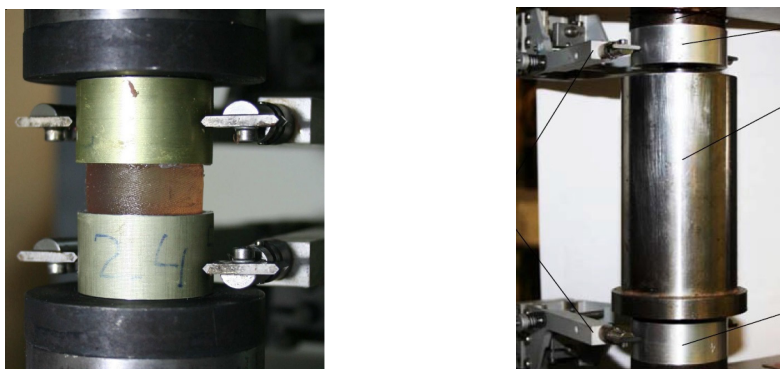


Рис. 3. Оснастка и образцы в ходе испытаний на свободное и стесненное сжатие

Данные испытаний позволили найти константы  $\mu = 4,44$  МПа,  $B = 2,44$  ГПа потенциала Пенга – Ландела

$$\Phi = \frac{1}{2}\mu(I_1 I_3^{-1/3} - 3) + \frac{1}{2}B\theta^2, \quad \theta = I_3^{1/2} - 1, \quad I_1 = \lambda^2 + 2\lambda_{\perp}^2, \quad I_3 = \lambda^2 \lambda_{\perp}^4,$$

где  $\lambda, \lambda_{\perp}$  – кратности удлинений образца в продольном и поперечном направлениях. Методика эксперимента и процедуры идентификации модели подробно описаны в [16–18]. Данная модель соответствует стандартному материалу 077 пакета LS-DYNA® [10]. В последующих расчетах величины главных деформаций и среднего напряжения полиуретана преимущественно находились в диапазоне, в котором выполнены испытания материала.

Вычислительный эксперимент по многостадийной листовой штамповке проводился в соответствии с рекомендациями разработчиков программного обеспечения [19, 20], в том числе использовалась рекомендация применять снижение времени счета при использовании явной схемы интегрирования путем увеличения плотности материала заготовки и подбора коэффициентов диссипации кинетической энер-

гии системы для устранения возникающих побочных динамических эффектов. Принималось 10 точек интегрирования по толщине оболочечного конечного элемента с формулировкой №16. Использовались контакты \*AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE с кулоновской моделью статического трения со следующими коэффициентами: 0% для контакта металлической заготовки с металлической матрицей, 12% для контакта металла с полиуретаном, 8–15% – металлической заготовки с металлическим пуансоном, что соответствует применяемому на производстве смазочным жидкостям между металлическими поверхностями.

Численные эксперименты показали, что в указанных границах трение практически не влияет на напряженно-деформированное состояние заготовки. В то же время на устойчивость численного счета при моделировании процесса глубокой вытяжки в значительной степени оказывают влияние технологические зазоры между инструментом и заготовкой. Последние выбирались в диапазоне от 1,25 до 3 толщин заготовки.

Несмотря на использование затратных по времени вычислений автоматических контактов, большого числа точек интегрирования, двойной вещественной точности и явной схемы интегрирования уравнения движения системы, применение нелинейного анизотропного материала и наличие 50–80 тыс. узлов в конечно-элементной сетке, моделирование одного этапа вытяжки стакана или раздачи чайника на персональном компьютере с одноядерным процессором занимало порядка 30 минут, а на многоядерном процессоре численный расчет этапа длился менее 10 минут. Такой эффект достигнут в основном благодаря изменению плотности материала заготовки в рамках используемой явной схемы интегрирования.

### 3. Вычислительный эксперимент и его подтверждение

На рис. 4–8 приведены данные численных расчетов всех четырех последовательных этапов рассматриваемого технологического процесса, причем этап IV без отжига иллюстрирует рис. 7, а тот же этап с отжигом – рис. 8.

В правой части рисунков приводится конфигурация изделия после указанного этапа с полем толщин стенки (в мм). В левой части рисунков приводится деформированное состояние боковой стенки изделия в контрольных точках в сравнении с экспериментом (в шкале логарифмических деформаций:  $\epsilon_1$  – продольной и  $\epsilon_2$  – окружной). Для получения этой информации пять круговых исходных заготовок покрывались лазерной гравировкой сетью координат (рис. 9), образующих радиальные полосы с шагом  $45^\circ$  относительно направления прокатки и окружные полосы с шагом 20–24 мм так, чтобы как минимум какие-то три из них располагались на боковой поверхности изделия после любого этапа. Размер координатной ячейки составлял 2 мм. Далее первая заготовка подвергалась технологической операции I из последовательности рис. 1, вторая – операциям I и II, третья – операциям I, II и III, четвертая и пятая – всей технологической цепочке без отжига и с отжигом соответственно. По деформированной сети координат в контрольных точках (точках пересечения координатных полос) для каждой из заготовок определены главные логарифмические деформации, которые вместе с данными численного расчета для тех же точек материала нанесены на диаграммы рис. 4–8.

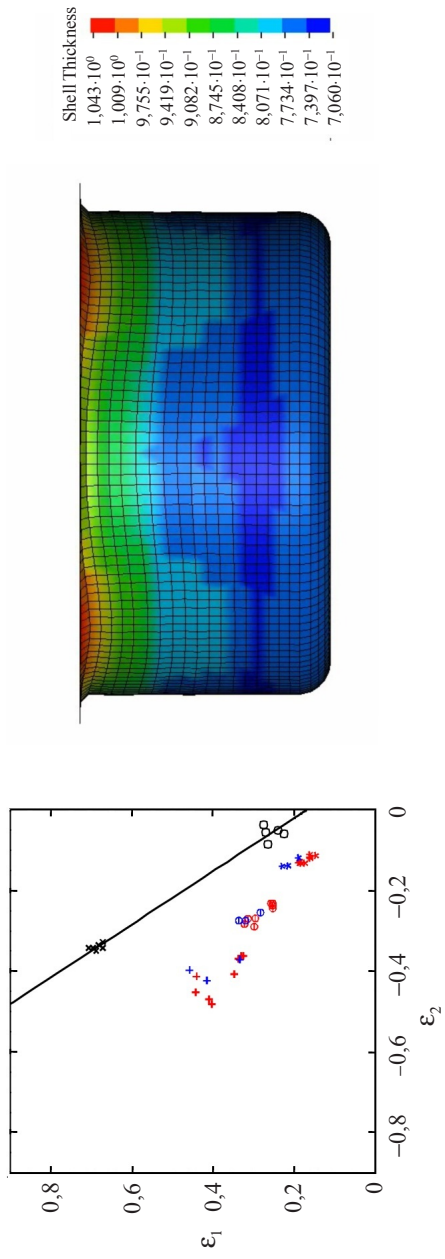


Рис. 4. Деформированное состояние и поле толщин стакана после этапа I

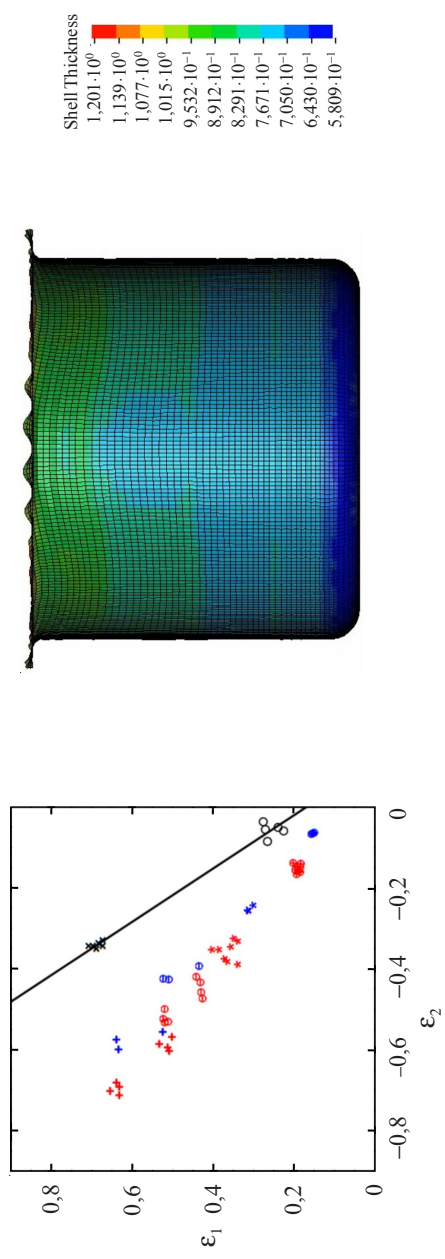


Рис. 5. Деформированное состояние и поле толщин стакана после этапа II



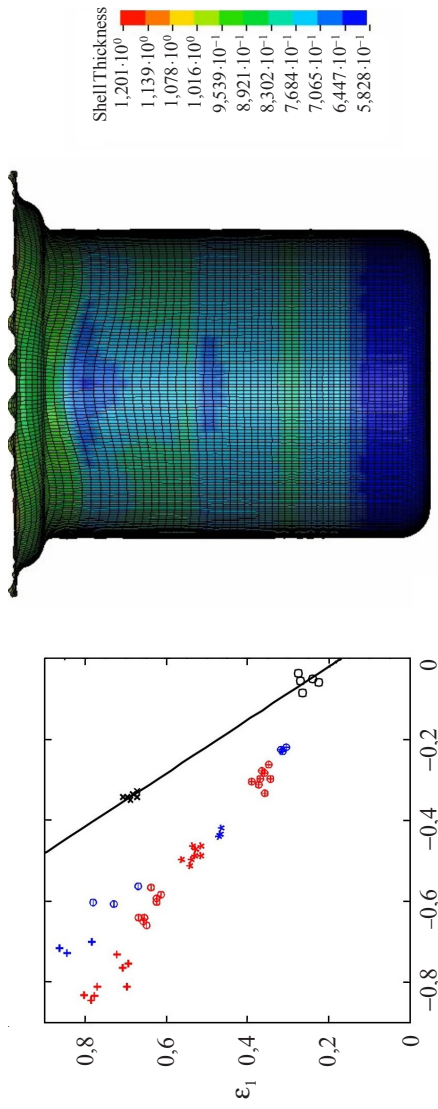


Рис. 6. Деформированное состояние и поле толщин стакана после этапа III

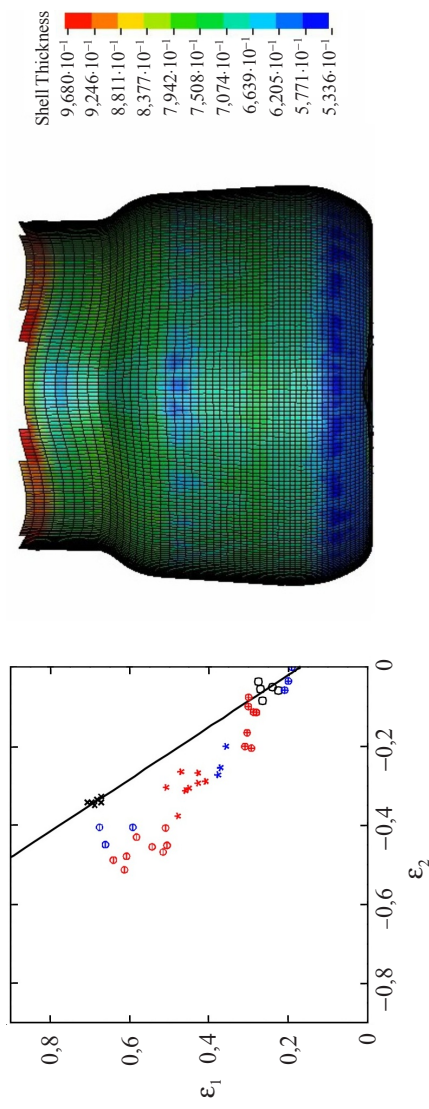


Рис. 7. Деформированное состояние и поле толщин изделия после раздачи без промежуточного отжига

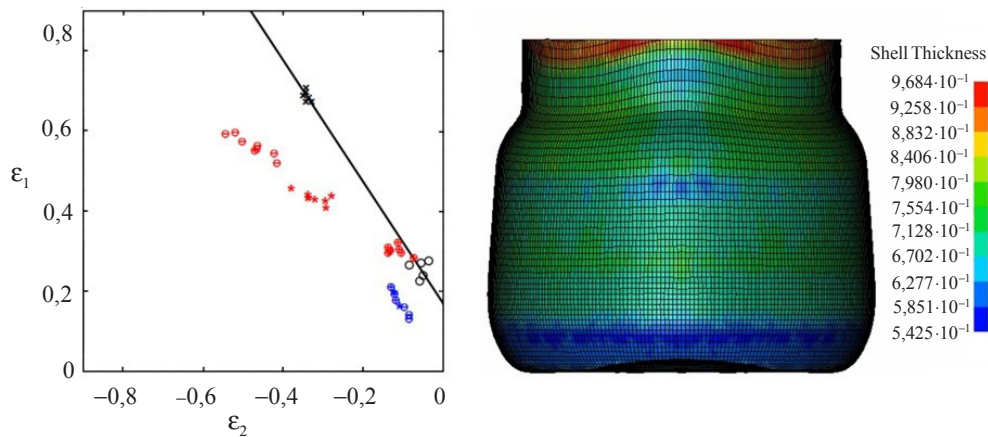


Рис. 8. Деформированное состояние и поле толщин изделия после раздачи с промежуточным отжигом

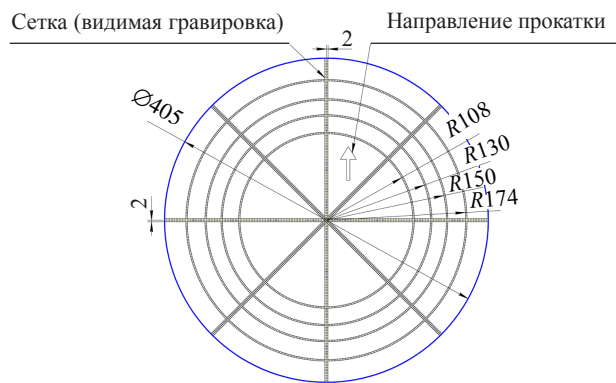


Рис. 9. Схема сети материальных координат на недеформированной заготовке

В таблице 1 приводятся средние расстояния  $\delta$  от плоскости, на которой располагается дно сосуда, до деформированных круговых координатных линий (данные для этапа IV с отжигом и без отжига совпали).

Таблица 1

Координата, мм (рис. 9)	Маркер (рис. 4–8)	$\delta$ , мм			
		I этап	II этап	III этап	IV этап
108	+	–	24	44	30
130	⊖	26	53	78	62
150	*	52	84	115	96
174	⊕	85	126	163	–

Результаты численного расчета по деформированным состояниям для сравнения с экспериментом для каждого из этапов взяты для восьми контрольных точек по соответствующему кругу. На диаграммах деформированного состояния (см. рис. 4–8) экспериментальным данным соответствует синий цвет, а данным численного расчета – красный цвет. Там же приводится линия предельных деформаций, аппроксимированная прямой, проходящей через экспериментальные точки, полученные при одноосном растяжении (маркер  $\times$ ) и плоском деформированном состоянии (маркер  $\circ$ ).



Расчет этапа I с увеличенным зазором между краями заготовки и прижимом, при котором реализуется плоское напряженное состояние, демонстрирует образование четырех фестонов на краях стакана и гофр на всей его верхней части, что подтверждается экспериментом. Прижим краев заготовки, обеспечивающий плоское деформированное состояние, полностью подавляет гофрообразование и уменьшает размер фестонов, но ведет к неоднородности распределения толщины листа и главных деформаций по окружной координате в верхней части стакана (см. рис. 4). Количество фестонов и их ориентация вдоль осей анизотропии в обоих случаях соответствует оценкам [21–23] с учетом характера анизотропии  $r_0/r_{90} < 1$ ,  $\sigma_0/\sigma_{90} < 1$  используемого материала [12]. Неоднородность распределения деформации по кругу в верхней части стакана после операции I и ее эволюция в операциях II–III демонстрируется разбросом маркеров + (а также  $\ominus$ ) на рис. 4–6 для данных расчета и эксперимента по отдельности. Эта неоднородность сначала увеличивается, затем слегка уменьшается по мере вытяжки.

На рис. 7, 8 показано состояние сосуда после раздачи. В первом случае в качестве заготовки рассматривался стакан III с наследованным с предыдущих этапов деформированным состоянием; во втором в данной заготовке сохранена конфигурация, но обнулены накопленные пластические деформации в законе упрочнения. Эти условия имитируют рекристаллизационный отжиг между этапами III и IV, после которого (как предполагается) достигается полное восстановление ресурса пластичности. Расчет (см. рис. 7) прогнозирует, что деформированное состояние сосуда без отжига достигает предельного уровня на полосе боковой поверхности вблизи его максимального диаметра (в окрестности маркера  $\oplus$ ). Расчет операции с учетом отжига (см. рис. 8) показывает, что деформированное состояние не достигает предельного уровня ни в одной точке сосуда, что подтверждается данными существующего технологического процесса. Следует отметить, что рассчитанные поля толщин стенки сосуда без промежуточного отжига и с отжигом (см. рис. 7, 8) оказываются близкими друг другу. Диаграммы на тех же рисунках демонстрируют близость экспериментально определенных деформированных состояний после раздачи без промежуточного отжига и с ним. Поскольку отжиг увеличивает ресурс пластичности материала, эти данные косвенно свидетельствуют об эволюции кривой предельных деформаций при отжиге материала, что может быть проверено непосредственно.

На рис. 10 приведены сплайн-аппроксимации траекторий деформирования контрольных материальных элементов боковой поверхности сосуда для процесса без промежуточного отжига.

Расчет и эксперимент показывают, что этапы вытяжки стакана соответствуют пропорциональному изменению компонент деформаций («простому нагружению»), а этап раздачи сопровождается изломом траектории приблизительно на  $150^\circ$ . Эта особенность может выводить принятую модель пластичности и разрушения листовой стали за пределы области ее применимости, что также может быть проверено независимо. Измеренные по деформированной координатной сетке деформации в центре дна стакана не превышали 0,01, однако в расчете после третьего и четвертого этапов, сопровождаемых формовкой дна, они достигали значения 0,10. Это измерение может служить важным индикатором полноценности учета трения в численной модели, которое, как говорилось в п. 2, несущественно влияет на деформированное состояние боковой поверхности изделия.

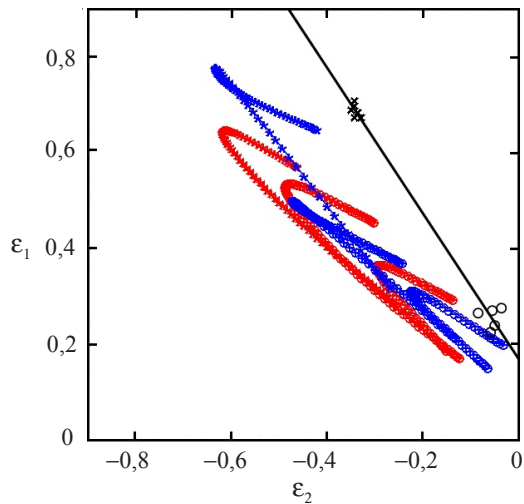


Рис. 10. Траектории деформаций трех материальных элементов боковой поверхности изделия

На рис. 11 приведены данные расчета напряженно-деформированного состояния полиуретанового штампа при максимальной нагрузке.

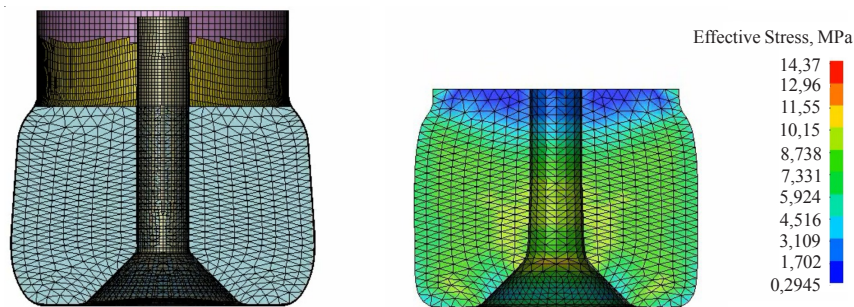


Рис. 11. Деформированная конфигурация полиуретанового штампа в штамповой оснастке и поле интенсивности напряжений в полиуретане

При практически однородной деформации интенсивность напряжений не превышала 10 МПа, среднее напряжение и продольная деформация (не приведенные здесь) – 60 МПа и 30% соответственно, что отвечает условиям проведения эксперимента, описанным в п. 2.

### Заключение

Изложена методика построения численной модели процесса многоэтапной холодной тонколистовой штамповки металлических изделий средствами пакета LS-DYNA®, описана организация необходимых экспериментов для идентификации модели пластичности и разрушения листового металла и процедура подтверждения расчета экспериментом. Выполнен расчет четырех последовательных этапов штамповки заготовки чайника, при этом достигнуто приемлемое соответствие расчетных и экспериментальных результатов.

Установлено индуцированное пластической анизотропией развитие неоднород-

ности распределения деформации по кругу в верхней части стакана, которое в исследуемом процессе прекратилось во время ссаживания горловины изделия. Однако в других технологических процессах продолжающийся рост локализации деформации может вести к достижению предельного состояния. Смягчение условий, вызывающих локализацию деформации, путем ослабления прижима краев заготовки на этапе штамповки может привести к образованию гофров, поэтому при разработке технологического процесса необходимо балансировать между указанными ограничениями.

При анализе расчетных и экспериментальных данных обнаружено свидетельство эволюции кривой предельных деформаций при отжиге материала, которая может быть исследована независимо. Также выяснено, что операция раздачи после вытяжки стакана сопровождается значительным изломом траектории деформаций, что требует выбора модели пластичности и разрушения листовой стали, работающей в данных условиях. Предложено исследовать деформацию в центре дна стакана в качестве индикатора учета трения в численной модели рассматриваемого процесса.

Авторы признательны Н.Л. Русановой (ООО УК «Лысьвенские заводы») за организацию совместных исследований, А.Н. Оборину (АО «Лысьвенский завод эмалированной посуды») и С.Б.Чугайнову (ООО «Лысьвенский завод бытовой техники») за подготовку и проведение экспериментов на прессовом оборудовании.

#### Список литературы

1. Banabic D. *Sheet Metal Forming Processes. Constitutive Modelling and Numerical Simulation*. Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. 301 p. DOI: 10.1007/978-3-540-88113-1.
2. Hu P., Ma N., Liu L., Zhu Y. *Theories, Methods and Numerical Technology of Sheet Metal Cold and Hot Forming. Analysis, Simulation and Engineering Applications*. London: Springer-Verlag, 2013. 210 p. DOI: 10.1007/978-1-4471-4099-3.
3. Bruschi S., Altan T., Banabic D., Bariani P.F., Brosius A., Cao J., Ghiotti A., Khraisheh M., Merklein M., Tekkaya A.E. Testing and modelling of material behaviour and formability in sheet metal forming. *CIRP Annals*. 2014. Vol. 63. No 2. P. 727–749. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.005.
4. Келлер И.Э., Петухов Д.С., Казанцев А.В., Трофимов В.Н. Диаграмма предельных деформаций при горячей листовой штамповке металлов. Обзор моделей материала, критериев вязкого разрушения и стандартных испытаний. *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки*. 2018. Т. 22. №3. С. 447–486. DOI: 10.14498/vsgtu1608.
5. Bariani P.F., Dal Negro T., Bruschi S. Testing and modelling of material response to deformation in bulk metal forming. *CIRP Annals*. 2004. Vol. 53. No. 2. P. 573–595. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60030-4.
6. Kim B.J., Van Tyne C.J., Lee M.Y., Moon Y.H. Finite element analysis and experimental confirmation of warm hydroforming process for aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007. Vol. 187–188. P. 296–299. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.201.
7. Shafaat M.A., Abbasi M., Ketabchi M. Investigation into wall wrinkling in deep drawing process of conical cups. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011. Vol. 211. No 11. P. 1783–1795. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.05.026.
8. Andrade F.X.C., Feucht M., Haufe A., Neukamm F. An incremental stress state dependent damage model for ductile failure prediction. *International Journal of Fracture*. 2016. Vol. 200. No 1–2. P. 127–150. DOI: 10.1007/s10704-016-0081-2.
9. Neto D.M., Oliveira M.C., Dick R.E., Barros P.D., Alves J.L., Menezes L.F. Numerical and experimental analysis of wrinkling during the cup drawing of an AA5042 aluminium alloy. *International Journal of Material Forming*. 2017. Vol. 10. No 1. P. 125–138. DOI: 10.1007/s12289-015-1265-4.

10. LS-DYNA® *Keyword User's Manual. Volume II. Material Models*. Version R10.0. Livermore Software Technology Corporation. 2017. 1577 p. URL: <https://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna-manual-r10.0-vol-ii>.

11. Barlat F., Brem J.C., Yoon J.W. et al. Plane stress yield function for aluminum alloy sheets. Part 1: Theory. *International Journal of Plasticity*. 2003. Vol. 19. No 9. P. 1297–1319. DOI: 10.1016/S0749-6419(02)00019-0.

12. Адамов А.А., Келлер И.Э., Петухов Д.С. Экспериментальная идентификация законов пластичности и разрушения малоуглеродистой листовой стали для моделирования холодной штамповки. *Проблемы прочности и пластичности*. 2019. Т. 81. №2. С. 202–211. DOI: 10.32326/1814-9146-2019-81-2-202-211.

13. Janssens K., Lambert F., Vanrostenberghe S., Vermeulen M. Statistical evaluation of the uncertainty of experimentally characterised forming limits of sheet steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001. Vol. 112. No 2-3. P. 174–184. DOI: 10.1016/S0924-0136(00)00890-6.

14. ISO 12004-2:2008. *Metallic Materials – Sheet and Strip – Determination of Forming-Limit Curves – Part 2: Determination of Forming Limit Curves in the Laboratory*. International Organization for Standardization, 2008. 27 p.

15. Marciniak Z., Kuczyński K. Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1967. Vol. 9. No 9. P. 609–620. DOI: 10.1016/0020-7403(67)90066-5.

16. Адамов А.А. Сравнительный анализ двухконстантных обобщений закона Гука для изотропных упругих материалов при конечных деформациях. *Прикладная механика и техническая физика*. 2001. Т. 42. №5. С. 183–192.

17. Адамов А.А., Матвеев В.П., Труфанов Н.А. *Методы прикладной вязкоупругости*. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 411 с.

18. Адамов А.А. Экспериментальное обеспечение и идентификация модели изотропно-го тела с упругой объемной сжимаемостью дисперсно-наполненных композитов на основе фторопласта и сверхвысокомолекулярного полиэтилена. *Конструкции из композиционных материалов*. 2013. №2. С. 28–37.

19. Maker B.N., Zhu X. Input parameters for springback simulation using LS-DYNA. *6<sup>th</sup> International LS-DYNA Conference*. April 2000. Detroit. 2000. 12 p. URL: [www.dynalook.com/conferences/international-conf-2000/session12-1.pdf/view](http://www.dynalook.com/conferences/international-conf-2000/session12-1.pdf/view).

20. Maker B.N., Zhu X. Input parameters for metal forming simulation using LS-DYNA. *3<sup>th</sup> European LS-DYNA Conference*. June 2001. Paris. 2001. 10 p. URL: <https://www.dynalook.com/conferences/european-conf-2001/58.pdf/view>.

21. Hill R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1948. Vol. 193. No 1033. P. 281–297. DOI: 10.1098/rspa.1948.0045.

22. Yoon J.W., Dick R.E., Barlat F. A new analytical theory for earing generated from anisotropic plasticity. *International Journal of Plasticity*. 2011. Vol. 27. No 8. P. 1165–1184. DOI: 10.1016/j.ijplas.2011.01.002.

23. Chung K., Kim D., Park T. Analytical derivation of earing in circular cup drawing based on simple tension properties. *European Journal of Mechanics – A/Solids*. 2011. Vol. 30. No 3. P. 275–280. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2011.01.006.

#### References

1. Banabic D. *Sheet Metal Forming Processes. Constitutive Modelling and Numerical Simulation*. Berlin. Heidelberg. Springer-Verlag. 2010. 301 p. DOI: 10.1007/978-3-540-88113-1.

2. Hu P., Ma N., Liu L., Zhu Y. *Theories, Methods and Numerical Technology of Sheet Metal Cold and Hot Forming. Analysis, Simulation and Engineering Applications*. London. Springer-Verlag. 2013. 210 p. DOI: 10.1007/978-1-4471-4099-3.

3. Bruschi S., Altan T., Banabic D., Bariani P.F., Brosius A., Cao J., Ghiotti A., Khraisheh M., Merklein M., Tekkaya A.E. Testing and modelling of material behaviour and formability in sheet metal forming. *CIRP Annals*. 2014. Vol. 63. No 2. P. 727–749. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.005.

4. Keller I.E., Petukhov D.S., Kazantsev A.V., Trofimov V.N. Diagramma predelnykh defor-

matsiy pri goryachey listovoy shtampovke metallov. Obzor modeley materiala, kriteriev vyazkogo razrusheniya i standartnykh ispytaniy [The limit diagram under hot sheet metal forming. A review of constitutive models of material, viscous failure criteria and standard tests]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya Fiziko-matematicheskie nauki* [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. Math. Sci.]. 2018. Vol. 22. No 3. P. 447–486. DOI: 10.14498/vsgtu1608 (In Russian).

6. Kim B.J., Van Tyne C.J., Lee M.Y., Moon Y.H. Finite element analysis and experimental confirmation of warm hydroforming process for aluminum alloy. *J. Mater. Process. Tech.* 2007. Vol. 187-188. P. 296–299. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.201.

7. Shafaat M.A., Abbasi M., Ketabchi M. Investigation into wall wrinkling in deep drawing process of conical cups. *J. Mater Process Tech.* 2011. Vol. 211. No 11. P. 1783–1795. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.05.026.

8. Andrade F.X.C., Feucht M., Haufe A., Neukamm F. An incremental stress state dependent damage model for ductile failure prediction. *Int. J. Frac.* 2016. Vol. 200. No 1-2. P. 127–150. DOI: 10.1007/s10704-016-0081-2.

9. Neto D.M., Oliveira M.C., Dick R.E., Barros P.D., Alves J.L., Menezes L.F. Numerical and experimental analysis of wrinkling during the cup drawing of an AA5042 aluminium alloy. *Int. J. Mater. Form.* 2017. Vol. 10. No 1. P. 125–138. DOI: 10.1007/s12289-015-1265-4.

10. *LS-DYNA® Keyword User's Manual. Volume II. Material Models.* Version R10.0. Livermore Software Technology Corporation. 2017. 1577 p. URL: <https://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna-manual-r10.0-vol-ii>.

11. Barlat F., Brem J.C., Yoon J.W. et al. Plane stress yield function for aluminum alloy sheets. Part 1: Theory. *Int. J. Plasticity.* 2003. Vol. 19. No 9. P. 1297–1319. DOI: 10.1016/S0749-6419(02)00019-0.

12. Adamov A.A., Keller I.E., Petukhov D.S. Eksperimentalnaya identifikatsiya zakonov plastichnosti i razrusheniya malouglerodistykh listovoy stali dlya modelirovaniya kholodnoy shtampovki [Experimental identification of plasticity and failure laws of anisotropic low-carbon sheet steel for cold forming modeling]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2019. Vol. 81. No 2. P. 202–211 DOI: 10.32326/1814-9146-2019-81-2-202-211 (In Russian).

13. Janssens K., Lambert F., Vanrostenberghe S., Vermeulen M. Statistical evaluation of the uncertainty of experimentally characterised forming limits of sheet steel. *J. Mater. Process. Tech.* 2001. Vol. 112. No 2-3. P. 174–184. DOI: 10.1016/S0924-0136(00)00890-6.

14. ISO 12004-2:2008. *Metallic Materials – Sheet and Strip – Determination of Forming-Limit Curves – Part 2: Determination of Forming Limit Curves in the Laboratory.* International Organization for Standardization. 2008. 27 p.

15. Marciniak Z., Kuczyński K. Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal. *International Journal of Mechanical Sciences.* 1967. Vol. 9. No 9. P. 609–620. DOI: 10.1016/0020-7403(67)90066-5.

16. Adamov A.A. Comparative analysis of the two-constant generalizations of Hooke's law for isotropic elastic materials at finite strains. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2001. Vol. 42. No 5. P. 890–897. DOI: 10.1023/A:1017969215735.

17. Adamov A.A., Matveenko V.P., Trufanov N.A. *Metody prikladnoy vyazkouprugosti* [Methods of Applied Viscoelasticity]. Ekaterinburg. Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ. 2003. 411 p. (In Russian).

18. Adamov A.A. Eksperimentalnoe obespechenie i identifikatsiya modeli izotropnogo tela s uprugoy ob'emnoy szhimaemostyu dispersno-napolnennykh kompozitov na osnove fluoroplasta i sverkhvysokomolekulyarnogo polietilena [Experimental support and identification of an isotropic body model with elastic volumetric compressibility of dispersion-filled composites based on fluoroplastic and ultra-high molecular weight polyethylene]. *Konstrukcii iz kompozitsionnykh materialov* [Composite Materials Constructions]. 2013. No 2. P. 28–37 (In Russian).

19. Maker B.N., Zhu X. Input parameters for springback simulation using LS-DYNA. *6<sup>th</sup> International LS-DYNA Conference.* April 2000. Detroit. 2000. 12 p. URL: [www.dynalook.com/conferences/international-conf-2000/session12-1.pdf/view](http://www.dynalook.com/conferences/international-conf-2000/session12-1.pdf/view).

20. Maker B.N., Zhu X. Input parameters for metal forming simulation using LS-DYNA.



3<sup>th</sup> *European LS-DYNA Conference*. June 2001. Paris, 2001. 10 p. URL: <https://www.dynalook.com/conferences/european-conf-2001/58.pdf/view>.

21. Hill R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1948. Vol. 193. No 1033. P. 281–297. DOI: 10.1098/rspa.1948.0045.

22. Yoon J.W., Dick R.E., Barlat F. A new analytical theory for earing generated from anisotropic plasticity. *Int. J. Plasticity*. 2011. Vol. 27. No 8. P. 1165–1184. DOI: 10.1016/j.ijplas.2011.01.002.

23. Chung K., Kim D., Park T. Analytical derivation of earing in circular cup drawing based on simple tension properties. *European Journal of Mechanics – A/Solids*. 2011. Vol. 30. No 3. P. 275–280. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2011.01.006.

## **SIMULATION OF MULTI-STAGE COLD FORMING OF A THIN-WALLED VESSEL**

**Keller I.E.<sup>1,2</sup>, Kazantsev A.V.<sup>1</sup>, Adamov A.A.<sup>2</sup>, Petukhov D.S.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science, Perm, Russian Federation*

The method of construction and attestation of a numerical model of cold stamping of thin-walled products made of anisotropic metal sheet for the design of technological operations is proposed. The relations of the associated law of plastic flow with the Barlat flow function and isotropic strain hardening are used. The method of design and processing the experiment is proposed for their identification. The forming limit curve is approximated numerically by the Marciniak – Kuczyński method, and for its identification it is proposed to use a failure test under uniaxial tension and press equipment as an experimental. To do this, a coordinate grid is applied to a flat blank by laser engraving, whose distortions near the zones of strain localization and failure of the vessel give additional points of the forming limit curve. The constants of the Peng – Landel potential are found to describe the elasticity of a polyurethane die under large deformations using tests for free and constrained compression. All tests according to the method were performed for low-carbon sheet steel DC04EK 0.7 mm and SKU-PFL polyurethane. A numerical model of the process in the LS-DYNA package is designed using material models from its library. The calculations according to the model were confirmed by experiment, for which the main deformations were determined by the distorted coordinate grid on the workpiece after each operation at the control points. The calculation of the sequence of stages of stamping, drawing and bulging of the workpiece in the production of the vessel with and without intermediate annealing is performed and the dangerous zones and mechanisms of their formation are determined.

*Keywords:* numerical calculation, experiment, cold sheet stamping, low-carbon steel, plasticity, strain anisotropy, limit strains, verification.