

DOI: [10.7242/1999-6691/2020.13.2.10](https://doi.org/10.7242/1999-6691/2020.13.2.10)

УДК 539.374

ОЦЕНКА МНОГОЭТАПНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ ТОНКОСТЕННОГО СОСУДА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

А.В. Казанцев¹, И.Э. Келлер²¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Российская Федерация

Выполнена оценка многоэтапного процесса холодной штамповки тонкостенного стального сосуда с учётом технологической наследственности. Качество изделия связывается с остаточным ресурсом пластичности, то есть с удалённостью его деформированного состояния от кривой предельных деформаций. Для расчёта процесса используется модель больших пластических деформаций анизотропной оболочки, учитывающая динамику и контактное взаимодействие с инструментом, численно реализованная в пакете LS-DYNA®. Используются имеющиеся в библиотеке пакета закон пластического течения анизотропного листа, ассоциированный с функцией текучести Барлата Yld 2000-2d со степенным изотропным деформационным упрочнением, потенциал Пенга–Ландела нелинейно-упругого поведения полиуретанового штампа и закон трения Кулона для описания контактного взаимодействия изделия с инструментом. Материальные константы малоуглеродистой листовой стали DC04ЕК толщиной 0,7 мм и полиуретана SKU-ПФЛ определены ранее по данным экспериментов. Кривая предельных деформаций построена по искажению координатной сетки вблизи зон локализации деформации и разрушения сосуда в технологическом процессе, из которого исключён промежуточный отжиг, и по результатам теста на разрушение при одноосном растяжении. Исследуются особенности траекторий деформации в контрольных точках боковой поверхности изделия на каждом этапе технологического процесса, состоящего из последовательности операций вытяжки, раздачи и ссаживания. Расчёты траекторий подтверждены экспериментом на прессовом оборудовании, используемом в качестве испытательного. Установлено, что операция раздачи заготовки после её вытяжки быстро приближает материал к предельному состоянию и требует предварительного восстановления ресурса пластичности путём отжига. Отмечается перспективность технологий штамповки с меньшими степенями раздачи и с большими степенями ссаживания, способных сохранять ресурс пластичности без промежуточного отжига.

Ключевые слова: многоэтапный технологический процесс, холодная листовая штамповка, численный расчёт, пластичность, предельные деформации, оценка

ULTIMATE STRENGTH EVALUATION OF MULTI-STAGE COLD FORMING TECHNIQUE FOR MANUFACTURE OF THIN-WALLED VESSELS

A.V. Kazantsev¹ and I.E. Keller²¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation²Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russian Federation

The multi-stage process of cold forging of thin-walled steel vessels was evaluated taking into account technological heredity. The quality of the product is evaluated by the degree of deviation of its stress-strain state from the ultimate states of the forming limit diagram. The process is calculated based on the model of large plastic deformations of the anisotropic shell, which takes into account the dynamics and contact interactions of the shell with the tool. The model was numerically implemented in the LS-DYNA® package. Numerical simulation was performed using the simulation tools of the package library, such as the models of plastic flow of an anisotropic sheet with the power law isotropic strain hardening, associated with the Barlat criterion Yld 2000-2d, the Peng–Landel potential of nonlinear elastic behavior of a polyurethane die, and the Coulomb friction law of contact interaction of the product with the tool. The model constants for low-carbon sheet steel DC04EK 0.7 mm and polyurethane SKU-PFL were determined from the experimental data. The forming limit curve was plotted using as the basic data the distortions of the coordinate grid near the zones of strain localization and failure of the vessel during the technological process without intermediate annealing and the results of failure tests under uniaxial tension. The features of the strain paths are studied at the control points of the vessel at each stage of the technological process, including the sequence of drawing, bulging and reducing operations. The calculated strain paths were verified by the experiment, in which pressing equipment was used as the test facility. It was found that the operation of work piece bulging after its rapid drawing leads to the limit state and therefore requires a preliminary recovery of the plasticity resource by annealing. The obtained results demonstrate the advantages of forming the relief of the vessel by smaller degrees of bulging and greater degrees of reducing for eliminating the limit states and intermediate annealing.

Keywords: multi-stage technological process, cold sheet stamping, numerical calculation, plasticity, limit strains, estimation

1. Введение

Производство металлических тонкостенных сосудов холодной листовой штамповкой обычно предусматривает ряд последовательных операций, оптимизированных с целью предотвращения образования дефектов изделия. Однако существующая технология штамповки стального эмалированного чайника в АО «Лысьвенский завод эмалированной посуды» (г. Лысьва Пермского края) не может обойтись без промежуточного восстановления ресурса пластичности заготовки рекристаллизационным отжигом. Данная операция усложняет и удорожает производство изделия, наносит вред экологии из-за необходимости травления кислотой окалины отожжённой заготовки. Разработка альтернативного

технологического процесса, оптимального с точки зрения себестоимости и качества изделия, в современных условиях практически немыслима без численного моделирования. Для этого необходима методика, включающая математическую модель пластичности и разрушения материала вместе с процедурой идентификации её констант, численный расчёт процесса с использованием этой модели и экспериментальную верификацию полученных результатов.

Вопросам разработки подобной методики посвящены монографии [1, 2], обзоры [3–5], оригинальные статьи [6–9]. Для численного решения геометрически и физически нелинейных задач листовой штамповки, с характерными для них протяжёнными поверхностями контакта заготовки и инструмента, подходят универсальные и специализированные коммерческие пакеты программ на основе метода конечных элементов в сочетании с явным методом интегрирования уравнений по времени. Как правило, такие пакеты имеют обширные библиотеки моделей материала, на которые при решении задач стоит рассчитывать в первую очередь.

Исследуемые технологические процессы производства тонкостенных сосудов на Лысьвенских заводах содержат важную операцию ссаживания (редукции диаметра) осесимметричной заготовки обкаткой роликом на оправке. Операция сопровождается высокоскоростным деформированием металла, может порождать динамические моды образования дефектов и потому требует динамической постановки. Всё это определило выбор для численного расчёта исследуемого процесса пакета LS-DYNA®.

2 Постановка задачи

Процесс штамповки чайника включает последовательные этапы (схематически изображенные на Рис. 1): I, II, III — вытяжку стакана с формованием дна, IV — раздачу полиуретановым штампом, V — ссаживание горловины. Размеры исходной и промежуточных заготовок приведены на рисунке 2а. На рисунке 2б показана сетка материальных координат, наносимая на недеформированную заготовку-круг лазерной гравировкой. Контрольные точки располагаются на пересечении координат. Эти же точки

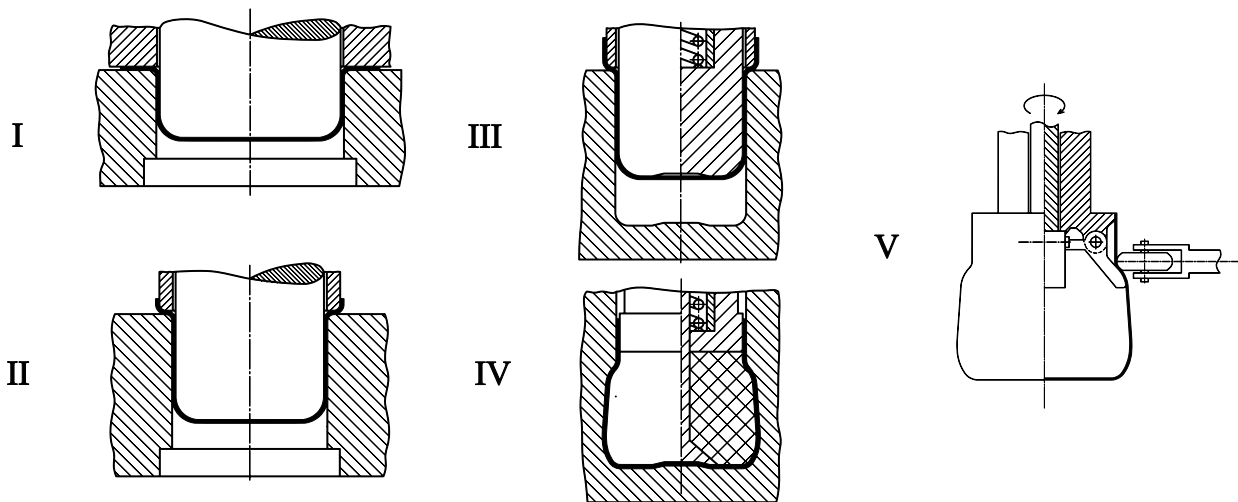


Рис. 1. Этапы технологического процесса производства чайника

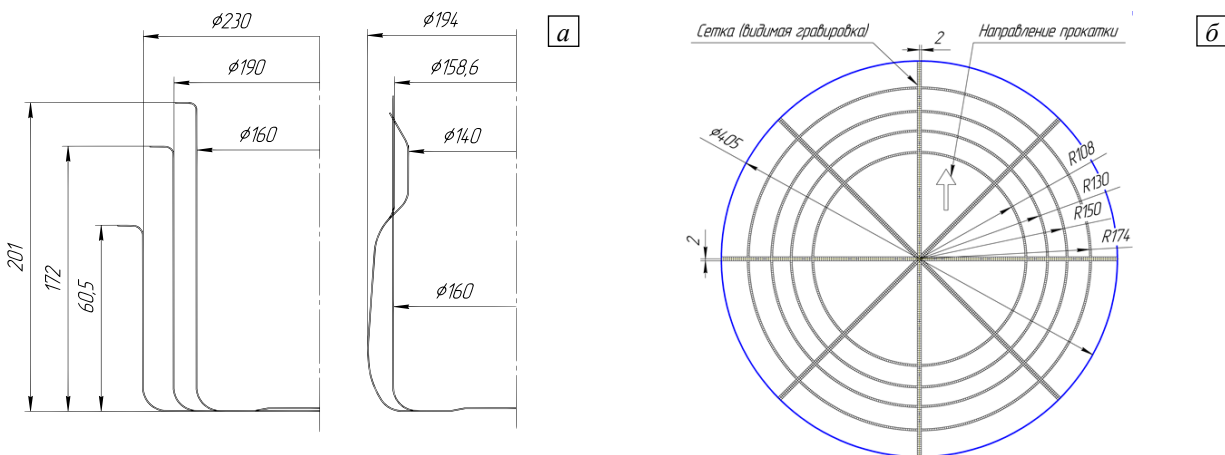


Рис. 2. Размеры заготовок (а) и сетка материальных координат на недеформированной заготовке (б)



Рис. 3. Деформированная координатная сетка в зоне предельных деформаций

рассматриваются в численном расчёте для сопоставления его результатов с экспериментом. На этапах I, II, III могут появляться гофры на краях и в верхней части заготовок-стаканов, а на этапе V — недопустимые утонения стенки в местах перехода диаметров в области горловины. Основные дефекты — полосы сдвига и трещины, образуются в зонах предельных деформаций на боковой поверхности заготовки (Рис. 3) на этапе IV без предварительного рекристаллизационного отжига. Исследуются закономерности возникновения и наследования перечисленных дефектов на каждом из этапов технологического процесса.

История изменения состояния материала в контрольных точках боковой поверхности осесимметричного сосуда и их близость к предельным состояниям отражаются на диаграмме предельных деформаций — части плоскости главных деформаций оболочки вдоль продольной ($\epsilon_1 \geq 0$) и окружной ($\epsilon_2 \leq 0$) координат. Оставшаяся за пределами данной области часть диаграммы предельных деформаций отображает в точках дна сосуда состояния, далекие от предельного.

Для восстановления ресурса пластичности после этапов вытяжки существующий процесс предусматривает промежуточный отжиг. Эта операция усложняет процесс технологически и логистически и сопровождается экологически вредной операцией травления отожжённой заготовки кислотой. Для проектирования альтернативной технологии производства изделия, исключающей отжиг, необходим критерий качества изделия, учитывающий историю изменения состояния материала в ходе многоэтапного процесса деформирования. С этой целью далее выполняется численный расчёт процесса и делается его оценка с точки зрения остаточного ресурса пластичности изделия, в качестве меры которого рассматривается близость деформированного состояния к предельно допустимым. На основе данной оценки даются рекомендации по изменению технологии, позволяющие исключить из неё промежуточный отжиг.

3. Математическая модель и её численная реализация

В численном расчёте процесса для описания больших пластических и малых упругих деформаций металлов используется стандартная модель [10] с формулировкой в терминах текущего лагранжева подхода в скоростях. Принимается аддитивность упругих и пластических тензоров деформаций скорости, при этом упругий тензор связывается линейно с производной Яуманна тензора напряжений Кирхгоффа, а пластический — ассоциированным законом пластического течения с изотропным упрочнением с материальной производной этого тензора. Поскольку пластические деформации в точках боковой поверхности сосуда на любом этапе технологического процесса на три порядка превосходят упругие, далее в анализе результатов будут фигурировать полные деформации, а среда приближённо полагается несжимаемой. Тогда главная деформация по толщине оболочки ϵ_3 приближенно равна $-\epsilon_1 - \epsilon_2$, где $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ — главные значения левой логарифмической меры деформации (индекс 1 отвечает продольному, 2 — окружному, а 3 — радиальному направлению цилиндрической системы координат).

Для описания холодного пластического деформирования анизотропной листовой стали используется функция текучести Барлата Yld 2000-2d [11]

$$\begin{aligned} \phi &= \phi' + \phi'' = 2\sigma_0^m, \\ \phi' &= |\chi'_+ - \chi'_-|^m, \quad \phi'' = |2\chi''_- + \chi''_+|^m + |2\chi''_+ + \chi''_-|^m, \\ \chi'_\pm &= (1/2) \left(\chi'_{11} + \chi'_{22} \pm \sqrt{(\chi'_{11} - \chi'_{22})^2 + 4\chi'^2_{12}} \right), \quad \chi''_\pm = (1/2) \left(\chi''_{11} + \chi''_{22} \pm \sqrt{(\chi''_{11} - \chi''_{22})^2 + 4\chi''^2_{12}} \right), \\ \begin{Bmatrix} \chi'_{11} \\ \chi'_{22} \\ \chi'_{12} \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_7 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} s_{zz} \\ s_{\phi\phi} \\ s_{\phi c} \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} \chi''_{11} \\ \chi''_{22} \\ \chi''_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} (1/3)(4\alpha_5 - \alpha_3) & (2/3)(\alpha_6 - \alpha_4) & 0 \\ (2/3)(\alpha_3 - \alpha_5) & (1/3)(4\alpha_4 - \alpha_6) & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_8 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} s_{zz} \\ s_{\phi\phi} \\ s_{\phi c} \end{Bmatrix}. \end{aligned}$$

Здесь: $\sigma_0 = 141$ МПа — предел текучести в направлении прокатки; $m = 6$; s_{ij} — компоненты девiatorа

тензора напряжений Кирхгоффа; $\alpha_1, \dots, \alpha_8$ — материальные константы функции текучести для холоднокатаной малоуглеродистой листовой стали марки DC04ЕК толщиной 0,7 мм, приведенные в таблице 1, определены в [12]; там же для этой стали найдены константы $\varepsilon_0 = 0,00264$, $n = 0,226$ закона изотропного деформационного упрочнения

$$s_u = \sigma_0 (\varepsilon_u / \varepsilon_0)^n,$$

где $s_u = \sqrt{3s_{ij}s_{ij}/2}$, $\varepsilon_u = \int_0^t \sqrt{2d_{ij}d_{ij}/3} dt$ — интенсивности напряжений и деформаций, накопленные за время деформирования t , d_{ij} — компоненты тензора деформаций скорости. В пакете LS-DYNA® данной модели соответствует стандартный материал MAT_133 [13].

Таблица 1. Значения констант функции текучести Барлата Yld 2000-2d

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8
1,04	0,997	0,906	0,936	0,959	0,915	0,950	0,956

Нелинейно-упругие свойства литьевого полиуретана СКУ-ПФЛ, необходимые для моделирования операции раздачи, описываются потенциалом Пенга–Ландела

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

где I_1, I_3 — инварианты меры деформаций Фингера, константы $\mu = 4,44$ МПа, $B = 2,44$ ГПа, найденные в [14]. Этой модели отвечает стандартный материал MAT_077 пакета LS-DYNA® [13].

Численное решение контактной динамической задачи пластического деформирования оболочки выполнено в пакете LS-DYNA®, в котором реализован метод конечных элементов с учётом геометрической нелинейности и в сочетании с явной схемой интегрирования уравнений динамики по времени. Вычислительный эксперимент проводился в соответствии с рекомендациями разработчиков программного обеспечения [15, 16] по снижению времени счёта путём искусственного увеличения плотности материала заготовки и подбора коэффициентов диссипации кинетической энергии системы для устранения возникающих динамических эффектов. Взято 10 точек интегрирования по толщине оболочечного конечного элемента с формулировкой № 16 [17]. Использовались контакты *AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE с кулоновской моделью статического трения с коэффициентом: 0% для контакта металлической заготовки с металлической матрицей, 12% для контакта металла с полиуретаном, 8–15% металлической заготовки с металлическим пуансоном. Это соответствует применяемым на производстве смазочным жидкостям для контактов металлических поверхностей.

Численные эксперименты показали, что в указанных границах трение практически не влияет на напряжённо-деформированное состояние заготовки. В то же время на устойчивость численного счёта при моделировании процесса глубокой вытяжки значительное влияние оказывают технологические зазоры между инструментом и заготовкой. Последние выбирались в диапазоне от 1,25 до 3 толщин заготовки. Несмотря на использование автоматических контактов, затратных с точки зрения вычислительных ресурсов, повышенного числа точек интегрирования, на выбор решателя двойной вещественной точности и явной схемы интегрирования уравнений движения системы, на применение нелинейного анизотропного материала и наличие 50–80 тысяч узлов в конечно-элементной сетке, моделирование на персональном компьютере одного этапа вытяжки или раздачи длилось около 10 минут, а расчёт операции ссаживания требовал порядка полутора часов.

4. Расчёт операций штамповки изделия и анализ его состояния

На рисунках 4–7 приведены данные численного расчёта этапов I–IV рассматриваемого технологического процесса, причём в четвёртом этапе не учитывался промежуточный отжиг. В правой части рисунков приводится конфигурация изделия после соответствующего этапа с полем толщин стенки. В левой части рисунков представлено деформированное состояние боковой стенки изделия в контрольных точках, как вычисленное, так и определённое в эксперименте (в шкале логарифмических деформаций: ε_1 — продольной, и ε_2 — окружной).

Для экспериментального нахождения деформаций в контрольных точках четыре круговых исходных заготовки с помощью лазерной гравировки покрывались сеткой координат (Рис. 2). При этом радиальные полосы с шагом 45° относительно направления прокатки и окружные полосы с шагом 20–24 мм наносились так, чтобы после любого этапа, как минимум, три полосы располагались на боковой

поверхности изделия. Размер координатной ячейки составлял 2 мм. Далее первая заготовка подвергалась технологической операции I из последовательности рисунка 1, вторая — операциям I и II, третья — операциям I–III, четвертая — I–IV. По деформированной сетке в контрольных точках (точках пересечения координатных полос) для каждой из заготовок определялись главные логарифмические деформации.

Таблица 2 содержит значения δ — среднего расстояния от плоскости, на которой располагается дно сосуда, до деформированных круговых координатных полос. Численная информация о деформированном состоянии на каждом из этапов находилась в 8 контрольных точках соответствующего круга. На диаграммах деформаций (Рис. 4–7) результатам эксперимента отвечают маркеры в кружках, численному расчёту — маркеры без кружков. Там же изображена прямая линия предельных деформаций, аппроксимирующая экспериментальные данные одноосного растяжения (маркер \star) и плоской деформации (маркер \circ), полученные ранее в [12, 14].

Таблица 2. Координаты маркеров контрольных точек на исходной заготовке

Координата (Рис. 2), мм		108	130	150	174
Эксперимент	маркер (Рис. 4–8)	\otimes	\ominus	\odot	\oplus
Расчёт		\times	—	•	+
δ , мм	этап I	—	26	52	85
	этап II	24	53	84	126
	этап III	44	78	115	163
	этап IV	30	62	96	—

Расчёт этапа I с увеличенным зазором между краями заготовки и прижимом (условия плоского напряженного состояния) демонстрирует образование четырех фестонов на краях стакана и гофр на всей его верхней части, что подтверждается экспериментом. Расчёт с нулевым зазором обеспечивает плоское деформированное состояние, полностью подавляет гофрообразование и уменьшает размер фестонов, но ведёт к неоднородности распределения толщины листа и главных деформаций по окружной координате в верхней части стакана (Рис. 4). Количество фестонов и их ориентация вдоль осей анизотропии

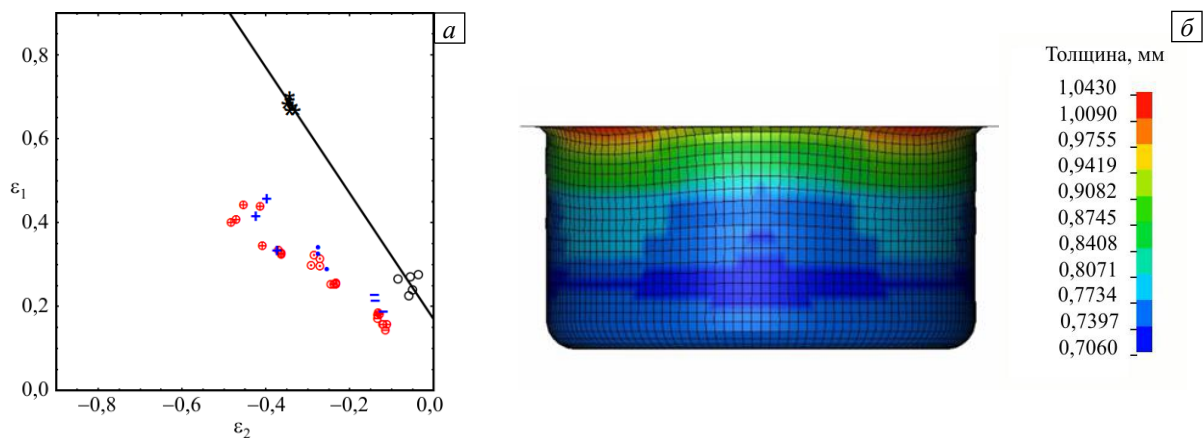


Рис. 4. Деформированное состояние (a) и поле толщин (б) стакана после этапа I

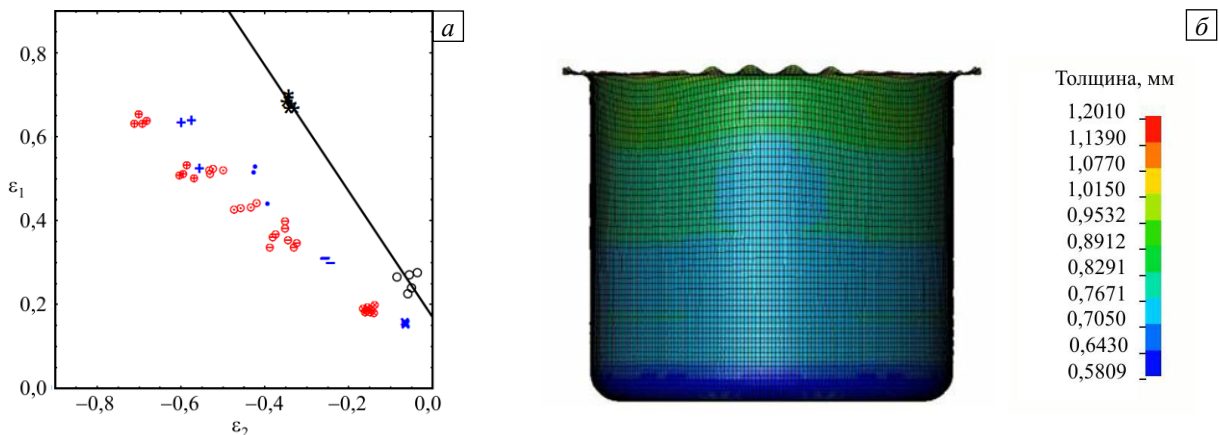


Рис. 5. Деформированное состояние (a) и поле толщин (б) стакана после этапа II

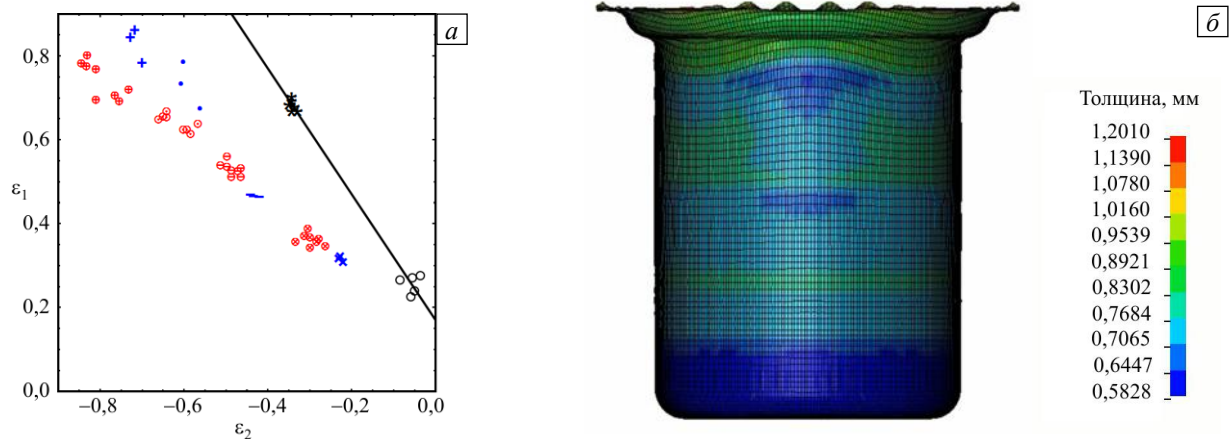


Рис. 6. Деформированное состояние (а) и поле толщин (б) стакана после этапа III

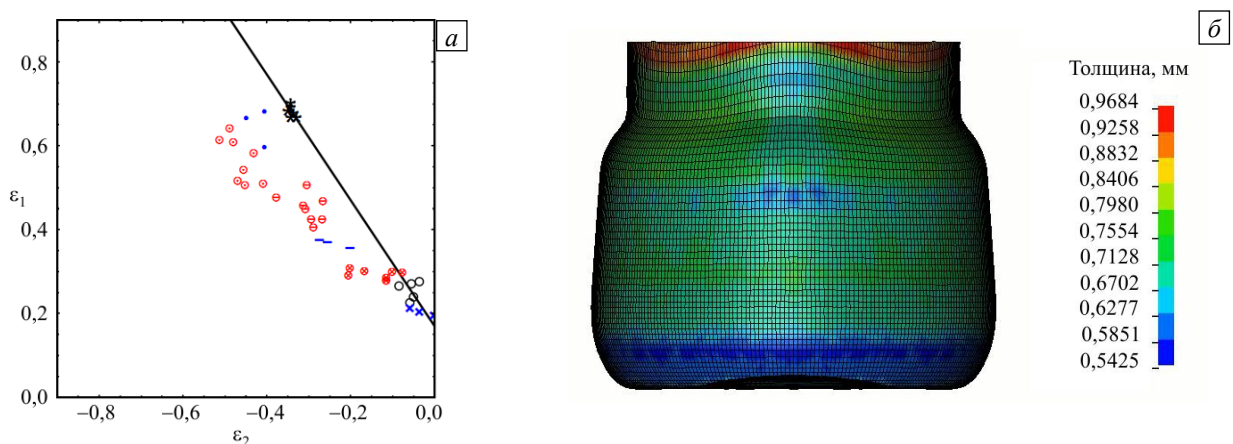


Рис. 7. Деформированное состояние (а) и поле толщин (б) изделия после раздачи без промежуточного отжига

в обоих случаях совпадает с оценками работ [18–20] с учётом характера анизотропии $r_0/r_{90} < 1$, $\sigma_0/\sigma_{90} < 1$ материала [12]. Неоднородность распределения деформации по кругу в верхней части стакана после операции I и её эволюция в операциях II, III демонстрируется на рисунках 4–6 разбросом данных расчёта и эксперимента (см. маркеры \times и \otimes соответственно). Эта неоднородность сначала увеличивается, затем, по мере вытяжки, слегка уменьшается.

На рисунке 7 показано состояние сосуда после этапа раздачи без предварительного отжига. Некоторое расхождение расчётных и экспериментальных данных о деформированном состоянии в контрольных точках наследуется с предыдущего этапа. Расчёт прогнозирует, что деформированное состояние сосуда достигает предельного уровня на полосе боковой поверхности вблизи его максимального диаметра (в окрестности маркера \oplus), что соотносится с экспериментом (Рис. 3). В предыдущей работе [14] рассчитывалось ссаживание стакана после предварительного отжига, который задавался обнулением внутренней переменной накопленной деформации во всём объёме материала. Деформированное состояние заготовки после завершения этого этапа слабо отличалось от результата без отжига, что подтверждается экспериментом. Причина фактического разрушения заготовки, сопровождающего операцию без отжига, будет обсуждаться в следующем разделе.

На рисунке 8 приведены траектории деформирования в контрольных точках боковой поверхности сосуда. Данные на диаграммах (а)–(в) соответствуют направлению прокатки, а на (г) — направлениям относительно направления прокатки 0° (тонкая линия) и 45° (толстая линия). Рассчитанные кривые практически проходят через экспериментальные точки (отмечены, соответственно, разноразмерными маркерами \oplus и \otimes). Различие данных на рисунке 8г демонстрирует степень развития неоднородности деформации, вызванной пластической анизотропией. Состояние материала в контрольных точках с маркером \oplus оказывается довольно близко к линии предельных сдвиговых деформаций, но на этапе раздачи эти точки располагаются в области горловины, которая практически не деформируется. Расчёт и эксперимент показывают, что каждому этапу вытяжки стакана отвечает почти пропорциональное изменение компонент деформаций (простое нагружение), а этап раздачи сопровождается изломом траектории приблизительно на 150° . Эта особенность может выводить принятые модели пластичности и разрушения листовой стали за пределы областей их применимости.

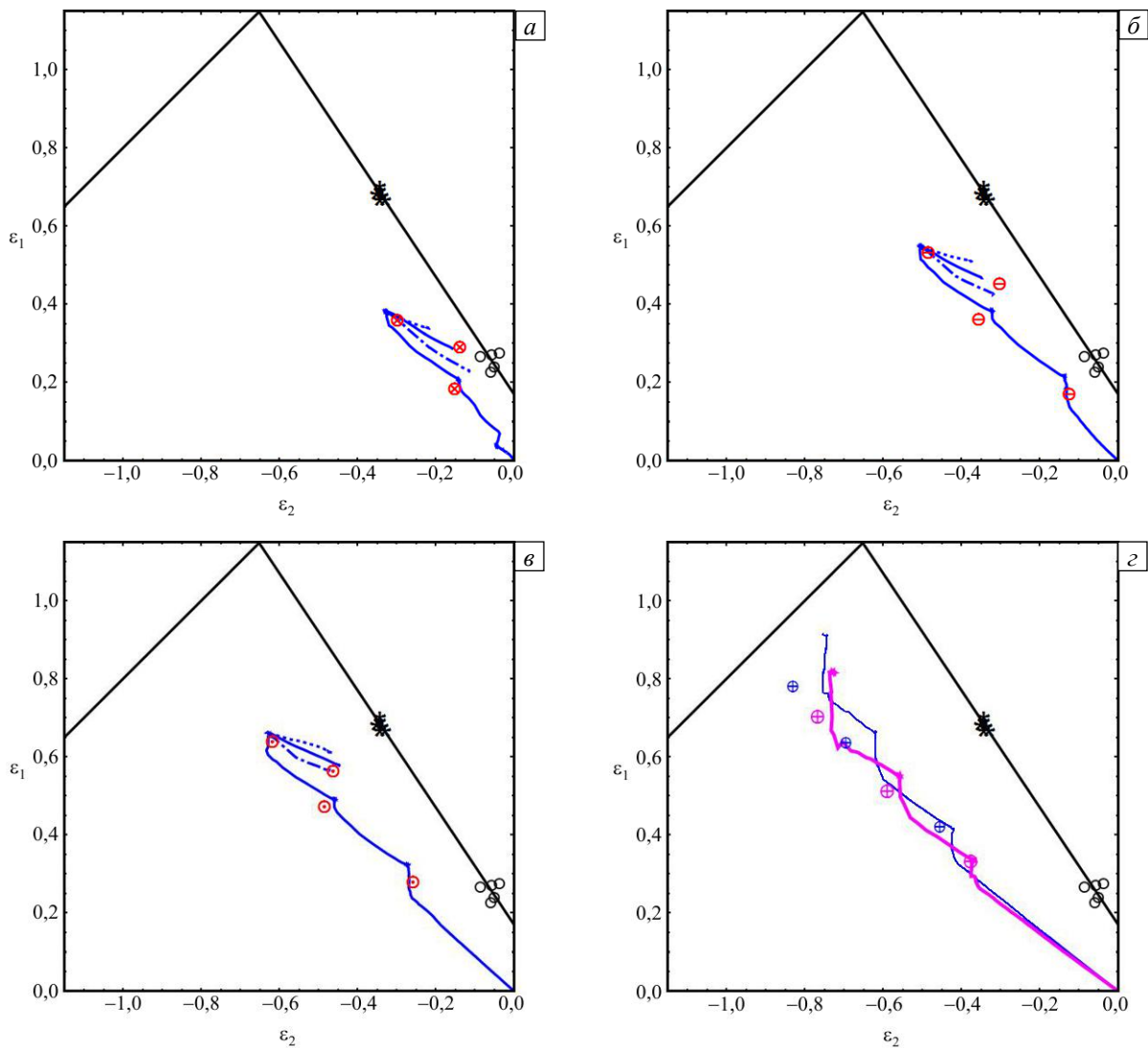


Рис. 8. Траектории деформирования в контрольных точках во время этапов I–IV технологического процесса

На рисунке 8 также приведены траектории деформаций, соответствующие альтернативным технологиям, применяемым на этапе IV штамповки чайника: раздаче полиуретаном с вертикальным подавливанием кромки стакана (см. штрихпунктирные линии) и гидроформовке (пунктирные линии). В первом случае контролировалась скорость вертикального движения кромки относительно поверхности штампа, во втором — гидростатическое давление. На состоянии материала обе технологии сказываются скорее благоприятно, но экспериментальное подтверждение этого отсутствует.

Операция ссаживания горловины сосуда, выполняемая обкаткой роликом на специальной оправке (Рис. 1), моделировалась как с учётом технологической наследственности, так и без неё. Для формирования горловины (Рис. 2) задавалась программа обкатки, включающая четыре вертикальных прохода вдоль горловины, первые три из которых сопровождаются двадцатью, а последний — десятью оборотами ролика вокруг горловины за один проход. На рисунке 9 приведены схема конечно-элементной дискретизации оболочки и технологической оснастки и поле толщин горловины сосуда, образовавшееся в результате выполнения операции (показан результат упрощённого расчёта без учёта пластической анизотропии, накопленных деформаций и толщин оболочки, сформированных предыдущими этапами (расчёт проведён с целью анализа траекторий деформаций и устойчивости процесса к образованию дефектов геометрии). Рисунок 10 содержит траектории деформаций в контрольных точках боковой поверхности (а), а также финальные толщины оболочки в этих точках (в), показывающие большее утонение стенки сосуда в зонах переходов диаметров в операции ссаживания. Близость этих зон к предельному состоянию подтверждается известными случаями срезания горловины инструментом. Расчёт при условии однородно распределённого деформационного упрочнения даёт результаты, практически неотличимые от приведённых на рисунке 10. Расчёт с полным учётом технологической наследственности оказывается неустойчивым из-за неравножесткости заготовки вследствие неоднородности распределения толщин по угловой координате.

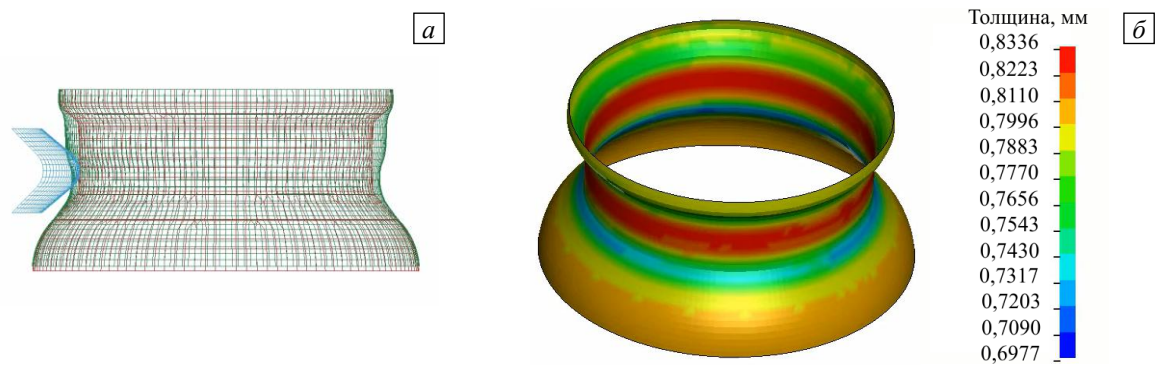


Рис. 9. Ссаживание горловины на оправке: текущая конечно-элементная сетка (а) и поле толщин в финальном состоянии (б)

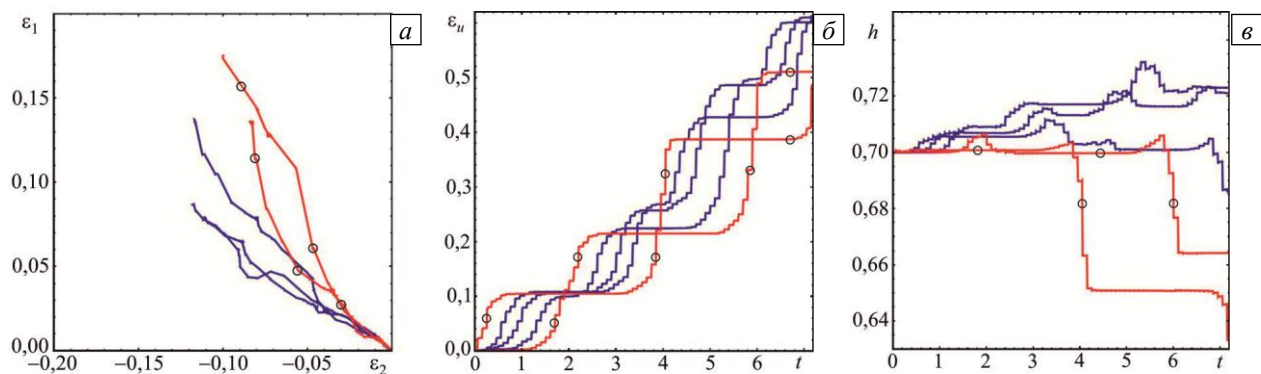


Рис. 10. Ссаживание горловины на оправке: траектории деформирования (а), изменение накопленной деформации (б), толщины в мм (в) в контрольных точках горловины: в середине (немаркированные кривые) и вблизи краёв (кривые с маркерами)

5. Оценка технологического процесса по близости к предельному состоянию

Качество заготовки в результате выполнения каждого этапа и технологического процесса штамповки тонкостенного сосуда в целом оценивается с помощью меры близости состояния материала в контрольных точках боковой поверхности заготовки к предельным деформациям на диаграмме $\{\epsilon_1 \geq 0, \epsilon_2 \leq 0\}$. На этой диаграмме выделяют линию предельных деформаций [1], при достижении которой недопустимо развивается утонение стенки (на плоском образце образуется шейка). Положение этой линии для используемой стали определено в предыдущих работах [12, 14] по данным испытаний (см. Рис. 4–8), в которых обеспечивались одноосное растяжение и состояние, близкое к плоской деформации. Достижение линии предельных сдвиговых деформаций, введенной авторами работы [20], означает пластическое разрушение по сдвиговой моде. Эта линия также показана схематически на рисунке 8. Следует отметить, что вблизи оси ϵ_2 на диаграмме деформаций находятся состояния, опасные с точки зрения гофрообразования [1], в которых сжимающая главная деформация критически превосходит растягивающую. Дефекты, возникающие в рассматриваемой технологии производства чайника без промежуточного отжига, представляют собой полосы утонения вдоль линий максимальных касательных напряжений (Рис. 3), то есть образуют картину, характерную для состояний, отвечающих области предельных деформаций.

Необходимо сказать, что экспериментальные точки для построения кривой предельных деформаций получаются в результате панч-тестов и подобных испытаний, в которых реализуется простое нагружение [1, 4, 22]. Траектории деформации, характерные для рассматриваемого многоэтапного процесса (Рис. 8), являются непропорциональными, поскольку после излома они соответствуют активному нагружению (упругие деформации ввиду своей малости на рисунке неразличимы). Существуют систематические эксперименты Графа и Хосфорда [23, 24], свидетельствующие об эволюции кривой предельного деформирования в процессе простого нагружения, в ходе которого граница смещается внутрь безопасной области. В многоэтапных процессах это указывает на возможность проблем при раздаче, следующей после вытяжки осесимметричного сосуда. В то же время ссаживание после вытяжки практически продолжает пропорциональное нагружение и не приближает материал боковой поверхности сосуда к предельному состоянию.

Наглядное изображение изменения деформированного состояния изделия и его близости к предельному состоянию позволяют сделать общие выводы о предпочтительных технологиях получения качественного изделия (в том числе и о возможности исключения промежуточного отжига). Менее опасной выглядит

технология с последовательными этапами раздачи и ссаживания стакана большего диаметра после вытяжки. Диаметр стакана определяется степенью раздачи, не требующей восстановления ресурса пластичности предварительным отжигом. Повышение степени ссаживания горловины может быть достигнуто за счёт увеличения числа проходов обкатки роликом. Меньшая степень вытяжки стакана сохраняет его равножесткость по окружной координате и, следовательно, устойчивость процесса ссаживания.

6. Заключение

С использованием численного расчёта последовательных этапов вытяжки, раздачи и ссаживания тонкостенного осесимметричного сосуда построены траектории деформации его боковой поверхности в контрольных точках. Установлено, что траектории деформаций материала приближаются к предельному состоянию в основном во время раздачи заготовки, следующей после вытяжки. Такая смена операций ведёт к резкому излому траекторий деформаций и к смещению предельных деформаций внутрь безопасной зоны, что было показано в эксперименте Графа и Хосфорда. Отмечено, что операция ссаживания (редукции диаметра осесимметричного сосуда) после вытяжки практически соответствует продолжению траектории деформирования точки материала в прежнем направлении. Поскольку этими операциями достигается получение заданной формы сосуда, обеспечить его можно сочетанием меньшей степени раздачи и большей степени ссаживания заготовки с увеличенным диаметром. Позволит ли оптимальный подбор параметров альтернативной технологии исключить операцию отжига — вопрос, требующий обязательного подтверждения натурными испытаниями. Сказанное является общим рассуждением, основывающимся на анализе эволюции деформированного состояния изделия в ходе каждой из последовательных операций многоэтапного процесса штамповки и, безусловно, нуждается в самостоятельном исследовании.

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.

Работа выполнена в рамках госзадания (Госрегистрация № АААА-А20-120022590044-7) при финансовой поддержке гранта совместного конкурса РФФИ и правительства Пермского края (проект № 17-48-590310).

Литература

1. Banabic D. Sheet metal forming processes. Constitutive modelling and numerical simulation. Springer, 2010. 301 p. <https://doi.org/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. Springer, 2013. 210 p. <https://doi.org/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. P. 727-749. <https://doi.org/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 // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2018. Т. 22, № 3. С. 447-486. <https://doi.org/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. P. 573-595. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60030-4](https://doi.org/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 // J. Mater. Process. Tech. 2007. Vol. 187-188. P. 296-299. <https://doi.org/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. P. 1783-1795. <https://doi.org/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. Fract. 2016. Vol. 200. P. 127-150. <https://doi.org/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. P. 125-138. <https://doi.org/10.1007/s12289-015-1265-4>
10. Khan A.S., Huang S. Continuum theory of plasticity. John Wiley & Sons, 1995. 421 p.
11. Barlat F., Brem J.C., Yoon J.W., Chung K., Dick R.E., Lege D.J., Pourboghrat F., Choi S.-H., Chu E. Plane stress yield function for aluminum alloy sheets – part 1: theory // Int. J. Plast. 2003. Vol. 19. P. 1297-1319. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(02\)00019-0](https://doi.org/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 // ППП. 2019. Т. 81, № 2. С. 202-211. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2019-81-2-202-211>

13. LS-DYNA[®] Keyword user's manual. Volume II. Material models. Version R11.0. LSTC, 2019. 1613 p. <https://www.lstc.com/download/manuals>
14. Келлер И.Э., Казанцев А.В., Адамов А.А., Петухов Д.С. Моделирование многоэтапной холодной штамповки тонкостенного сосуда // ППП. 2020. Т. 82, № 1. С. 75-88. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2020-82-1-75-88>
15. Maker B.N., Zhu X. Input parameters for springback simulation using LS-DYNA // 6th Int. LS-DYNA Conf. Detroit, USA, April, 2000. 12 p. <https://www.dynalook.com/conferences/international-conf-2000/session12-1.pdf/view>
16. Maker B.N., Zhu X. Input parameters for metal forming simulation using LS-DYNA // 3rd European LS-DYNA Conf. Paris, France, June, 2001. 10 p. <https://www.dynalook.com/conferences/european-conf-2001/58.pdf/view>
17. LS-DYNA[®] Keyword user's manual. Volume I. Version R11.0. LSTC, 2018. 3186 p. <https://www.lstc.com/download/manuals>
18. Hill R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals // Proc. R. Soc. Lond. A. 1948. Vol. 193. P. 281-297. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0045>
19. Yoon J.W., Dick R.E., Barlat F. A new analytical theory for earing generated from anisotropic plasticity // Int. J. Plast. 2011. Vol. 27. P. 1165-1184. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2011.01.002>
20. Chung K., Kim D., Park T. Analytical derivation of earing in circular cup drawing based on simple tension properties // Eur. J. Mech. Solid. 2011. Vol. 30. P. 275-280. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2011.01.006>
21. Isik K., Silva M.B., Tekkaya A.E., Martins P.A.F. Formability limits by fracture in sheet metal forming // J. Mater. Process. Tech. 2014. Vol. 214. P. 1557-1565. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.02.026>
22. 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. <https://www.iso.org/standard/43621.html>
23. Graf A., Hosford W.F. Effect of changing strain paths on forming limit diagrams of Al 2008-T4 // MTA. 1993. Vol. 24. P. 2503-2512. <https://doi.org/10.1007/BF02646529>
24. Graf A., Hosford W.F. The influence of strain-path changes on forming limit diagrams of Al 6111 T4 // Int. J. Mech. Sci. 1994. Vol. 36. P. 897-910. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(94\)90053-1](https://doi.org/10.1016/0020-7403(94)90053-1)

References

1. Banabic D. *Sheet metal forming processes. Constitutive modelling and numerical simulation*. Springer, 2010. 301 p. <https://doi.org/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*. Springer, 2013. 210 p. <https://doi.org/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, pp. 727-749. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.005>
4. Keller I.E., Petukhov D.S., Kazantsev A.V., Trofimov V.N. The limit diagram under hot sheet metal forming. A review of constitutive models of material, viscous failure criteria and standard tests. *Vestn. Sam. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki – Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences*, 2018, vol. 22, no. 3, pp. 447-486. <https://doi.org/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, pp. 573-595. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60030-4](https://doi.org/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. *J. Mater. Process. Tech.*, 2007, vol. 187-188, pp. 296-299. <https://doi.org/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, pp. 1783-1795. <https://doi.org/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. Fract.*, 2016, vol. 200, pp. 127-150. <https://doi.org/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, pp. 125-138. <https://doi.org/10.1007/s12289-015-1265-4>
10. Khan A.S., Huang S. *Continuum theory of plasticity*. John Wiley & Sons, 1995. 421 p.
11. Barlat F., Brem J.C., Yoon J.W., Chung K., Dick R.E., Lege D.J., Pourboghraat F., Choi S.-H., Chu E. Plane stress yield function for aluminum alloy sheets – part 1: theory. *Int. J. Plast.*, 2003, vol. 19, pp. 1297-1319. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(02\)00019-0](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(02)00019-0)
12. Adamov A.A., Keller I.E., Petukhov D.S. Experimental identification of plasticity and failure laws of anisotropic low-carbon sheet steel for cold forming modeling. *PPP – Problems of strength and plasticity*, 2019, vol. 81, no. 2, pp. 202-211. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2019-81-2-202-211>
13. LS-DYNA[®] Keyword user's manual. Volume II. Material models. Version R11.0. LSTC, 2019. 1613 p. <https://www.lstc.com/download/manuals>
14. Keller I.E., Kazantsev A.V., Adamov A.A., Petukhov D.S. Simulation of multi-stage cold forming of a thin-walled vessel. *PPP – Problems of strength and plasticity*, 2020, vol. 82, no. 1, pp. 75-88. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2020-82-1-75-88>
15. Maker B.N., Zhu X. *6th Int. LS-DYNA Conf. Detroit, USA, April, 2000. 12 p.* <https://www.dynalook.com/conferences/international-conf-2000/session12-1.pdf/view>
16. Maker B.N., Zhu X. *3rd European LS-DYNA Conf. Paris, France, June, 2001. 10 p.* <https://www.dynalook.com/conferences/european-conf-2001/58.pdf/view>

17. LS-DYNA® Keyword user's manual. Volume I. Version R11.0. LSTC, 2018. 3186 p. <https://www.lstc.com/download/manuals>
18. Hill R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. Proc. R. Soc. Lond. A, 1948, vol. 193, pp. 281-297. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0045>
19. Yoon J.W., Dick R.E., Barlat F. A new analytical theory for earing generated from anisotropic plasticity. *Int. J. Plast.*, 2011, vol. 27, pp. 1165-1184. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2011.01.002>
20. Chung K., Kim D., Park T. Analytical derivation of earing in circular cup drawing based on simple tension properties. *Eur. J. Mech. Solid*, 2011, vol. 30, pp. 275-280. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2011.01.006>
21. Isik K., Silva M.B., Tekkaya A.E., Martins P.A.F. Formability limits by fracture in sheet metal forming. *J. Mater. Process. Tech.*, 2014, vol. 214, pp. 1557-1565. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.02.026>
22. 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. <https://www.iso.org/standard/43621.html>
23. Graf A., Hosford W.F. Effect of changing strain paths on forming limit diagrams of Al 2008-T4. *MTA*, 1993, vol. 24, pp. 2503-2512. <https://doi.org/10.1007/BF02646529>
24. Graf A., Hosford W.F. The influence of strain-path changes on forming limit diagrams of Al 6111 T4. *Int. J. Mech. Sci.*, 1994, vol. 36, pp. 897-910. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(94\)90053-1](https://doi.org/10.1016/0020-7403(94)90053-1)

Поступила в редакцию 20.05.2020; после доработки 05.06.2020; принята к опубликованию 06.06.2020

Сведения об авторах

Казанцев Александр Владимирович, асс., Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29; e-mail: alexkazancev@bk.ru

Келлер Илья Эрнстович, зав.лаб., Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614018, г. Пермь, ул. Академика Королёва, д. 1; e-mail: kie@icmm.ru