А. В. Казанцев¹, И. Э. Келлер²

РАСЧЕТ МНОГОЭТАПНОГО ПРОЦЕССА ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ ТОНКОСТЕННОГО СОСУДА И ЕГО ОЦЕНКА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия

Аннотация. Построена численная модель процесса многоэталного процесса холодной штамповки тонкостенного стального сосуда с учётом технологической наследственности. Использованы соотношения больших пластических деформаций анизотропной оболочки с учетом динамики и контактного взаимодействия с инструментом, реализованные в пакете LS-DYNA. Материальные константы модели Барлата Yld 2000-2d со степенным изотропным деформационным упрочнением для малоуглеродистой листовой стали DC04EK толщиной 0,7 мм определены по данным собственных экспериментов. Кривая предельных деформаций построена по искажению координатной сетки вблизи зон локализации деформации и разрушения сосуда в технологическом процессе, из которого исключен промежуточный отжиг, и по результатам теста на разрушение при одноосном растяжении. Исследованы 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. Оценка качества изделия связывается с остаточным ресурсом пластичности — удалённостью его деформированного состояния от кривой предельных деформаций. Установлено, что операция раздачи заготовки после её вытяжки быстро приближает материал к предельному состоянию и требует предварительного восстановления ресурса пластичности путём отжига. Отмечена 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 расчет, пластичность, предельные деформации, оценка

DOI: 10.37972/chgpu.2020.46.4.004

УДК: 539.374

Введение

Производство стальных эмалированных чайников и кастрюль на АО «Лысьвенский завод эмалированной посуды» (г. Лысьва Пермского края) холодной листовой штамповкой предусматривает ряд последовательных операций вытяжки, раздачи и ссаживания, оптимизированных для предотвращения образования дефектов изделия. Существующая технология не может обойтись без промежуточного восстановления ресурса пластичности заготовки отжигом. Проектирование оптимального с точки зрения себестоимости и качества изделия процесса, исключающего эту операцию, требует численное моделирование, для которого необходимо построение математической модели пластичности и разрушения материала вместе с процедурой идентификации ее констант и разработка методики численного расчета процесса и экспериментального подтверждения его результатов [1,2]. Для численного решения геометрически и физически нелинейной динамической задачи с обширной поверхностью контакта заготовки и инструмента использован пакет программ LS-DYNA, в котором реализован метод конечных элементов в сочетании с явным методом интегрирования дифференциальных уравнений по времени и имеется обширная библиотека моделей материала.

1. Основные операции технологического процесса

Процесс штамповки чайника включает последовательные этапы (рис. 1) I, II, III — вытяжки стакана с формованием дна, IV — раздачи полиуретановым штампом и V — ссаживания горловины. Размеры исходной и промежуточных заготовок приведены на рис. 2. Там же приводится сетка материальных координат, наносимая на недеформированную заготовку лазерной гравировкой, на пересечении которых располагаются контрольные точки для сопоставления результатов численного расчета 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 на этапе IV без предварительного рекристаллизационного отжига. Для прогнозирования возникновения и наследования данных дефектов в технологическом процессе необходим расчет истории изменения состояния материала в контрольных точках боковой поверхности осесимметричного сосуда и их близость к предельным состояниям. Все эти состояния отражаются на диаграмме предельных деформаций — части плоскости главных деформаций оболочки вдоль продольной ($\varepsilon_1 \geq 0$) и окружной ($\varepsilon_2 \leq 0$) координат.

[©] Казанцев А. В., Келлер И. Э., 2020

Казанцев Александр Владимирович

e-mail: alexkazancev@bk.ru, старший преподаватель кафедры динамики и прочности машин, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия. *Келлер Илья Эрнстович*

e-mail: kie@icmm.ru, заведующий лабораторией нелинейной механики деформируемого твердого тела, Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-48-590310-а).

Поступила 01.06.2020



Рис. 1. Этапы технологического процесса производства чайника.



Рис. 2. Размеры заготовок (слева) и сетка материальных координат на недеформированной заготовке (справа).

Для проектирования технологии производства изделия, исключающей отжиг, необходим критерий качества изделия, учитывающий историю изменения состояния материала в ходе многоэтапного процесса деформирования. С этой целью выполняется численный расчет 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 нее промежуточный отжиг.

2. О математической модели и её численной реализации

Для численного расчёта процесса, сопровождаемого большими пластическими и малыми упругими деформациями металлов, использована стандартная модель [3] с формулировкой в терминах текущего лагранжева подхода в скоростях. Принята 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, в анализе результатов фигурируют полные деформации, а среда приближенно полагается несжимаемой. Тогда главная деформация по толщине оболочки ε_3 приближенно равна $-\varepsilon_2 - \varepsilon_2$, где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 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 и закон изотропного деформационного упрочнения, константы которых определены экспеиментально в работе [4]. В пакете LS-DYNA данной модели соответствует стандартный материал MAT 133. Нелинейно-упругие свойства литьевого полиуретана СКУ-ПФЛ, используемого в операции раздачи, описываются потенциалом Пенга – Ландела, констранты которого определены в работе [5] и которому отвечает стандартный материал MAT 077 пакета LS-DYNA.

Вычислительный эксперимент проводился в соответствии с рекомендациями разработчиков программного обеспечения 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 толшине оболочечного конечного элемента с формулировкой №16. Использовались контакты *AUTOMATIC SURFACE TO SURFACE с кулоновской моделью статического трения. Обнаружено исчезающе малое влияние трения на напряжённо-деформированное состояние заготовки и значительное влияние на устойчивость процесса технологических зазоров между инструментом и заготовкой. Использование автоматических контактов, повышенного числа точек интегрирования, выбора решателя двойной вещественной точности и явной схемы интегрирования уравнений движения системы, применение нелинейного анизотропного материала и наличие 50-80 тысяч узлов в конечноэлементной сетке, моделирование на персональном компьютере одного этапа вытяжки или раздачи требовало около 10 минут, а динамический расчет операции ссаживания горловины изделия требовал порядка полутора часов.

3. Расчёт операций штамповки

На рис. 3 приведены траектории деформаций двух контрольных точек боковой поверхности изделия, соответствующие расчету этапов I-IV технологического процесса [5]. Рассчитанные кривые практически проходят через экспериментальные точки (отмеченные маркерами). 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. Расчёт прогнозирует, что деформированное состояние сосуда достигает предельного уровня на полосе боковой поверхности вблизи его максимального диаметра (в окрестности маркера \otimes), что подтверждается экспериментом. Деформированное состояние заготовки после этапа IV почти нечувствительно к отжигу, если его моделировать обнулением внутренней переменной накопленной деформации во всем объеме материала [4]. Этот факт, также подтверждаемый экспериментом, не проливает свет на причину фактического разрушения заготовки.



Рис. 3. Траектории деформаций контрольных точек при операциях вытяжки и раздачи (слева) и ссаживания (справа).

Операция ссаживания горловины сосуда, выполняемая обкаткой роликом на специальной оправке (рис. 1, V), моделировалась как с учетом технологической наследственности, так и без него. Для формирования горловины 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 рис. 3 показаны траектории деформаций в контрольных точках боковой поверхности. Расчет обнаруживает большее утонение стенки сосуда в зонах переходов диаметров. Близость этих зон к предельному состоянию подтверждается известными случаями срезания горловины инструментом. Расчёт при условии однородно распределенного деформационного упрочнения дает результаты, практически неотличимые от приведённых на рис. 3, полный учёт технологической наследственности ведет к неустойчивости процесса из-за неравножёсткости заготовки вследствие неоднородности распределения толщин по угловой координате.

4. Траектории деформаций и их близость к предельному состоянию

Качество заготовки в результате выполнения каждого этапа и технологического процесса в целом оценивалось с помощью меры близости состояния материала в контрольных точках боковой поверхности заготовки к предельным деформациям на диаграмме ($\varepsilon_1 \ge 0, \varepsilon_2 \le 0$). 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 работах [3, 4] по данным испытаний (рис. 3), в которых обеспечивались одноосное растяжение и состояние, близкое к плоской деформации. Достижение линии предельных сдвиговых деформаций [1] означает пластическое разрушение по сдвиговой моде. Эта линия также показана на рис. 3. 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, 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 [1,2]. Траектории деформации, характерные для рассматриваемого многоэтапного процесса (рис. 3), являются непропорциональными, поскольку после излома они соответствуют активному нагружению (упругие деформации ввиду своей малости на рисунке неразличимы). Существуют систематические эксперименты Графа и Хосфорда [7], 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 (рис. 3) 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.

Заключение

С использованием численного расчета 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 экспериментах Графа и Хосфорда. Отмечено, что операция ссаживания 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.

ЛИТЕРАТУРА

- Banabic D. Sheet metal forming processes. Constitutive modelling and numerical simulation. Springer, 2010. 301 p.
- [2] 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.
- [3] Khan A. S., Huang S. Continuum theory of plasticity. John Wiley and Sons, 1995. 421 p.
- [4] 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.
- [5] Келлер И. Э., Казанцев А. В., Адамов А. А., Петухов Д. С. Моделирование многоэтапной холодной штамповки тонкостенного сосуда. Проблемы прочности и пластичности. 2020. Т. 82. № 1. С. 75-88.
- [6] Казанцев А. В., Келлер И. Э. Оценка многоэтапного технологического процесса холодной листовой штамповки тонкостенного сосуда с точки зрения предельных деформаций. Вычисл. мех. сплош. сред. 2020. Т. 13. № 2. С. 123-133.
- [7] 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.

A. V. Kazantsev, I. E. Keller

THE LIMIT FORMING ESTIMATION OF MULTI-STAGE THIN-WALLED VESSEL FORMING PROCESS

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science, Perm, Russia

Abstract. A numerical model of multi-stage technological process of cold stamping of a thinwalled vessel made of sheet steel was built taking into account technological heredity. Relations of large plastic deformations of the anisotropic shell is used, taking into account the dynamics and contact interactions with the tool, which was implemented in the LS-DYNA package. Barlat' plasticity model Yld 2000-2d with the power law of isotropic strain hardening is used with material constants identified from experimental data for low-carbon sheet steel DC04EK 0.7 mm. The forming limit curve was built on the distortion of the coordinate grid near the zones of strain localization and failure of the vessel in the technological process without intermediate annealing and in the failure test under uniaxial tension. The features of the strain paths in the control points of the vessel at each stage of the technological process, including the sequence of operations of drawing, distributing and reduction, are studied. The path calculation was confirmed by an experiment using pressing equipment as a test. The quality estimation of the product is evaluated by the distance of its deformed state from the limit states on the strain diagram. It is established that the operation of distributing the workpiece after its drawing quickly leads to the limit state and therefore requires a preliminary recovering the plasticity resource by annealing. There is a preference for forming the relief of the vessel by smaller degrees of distribution and greater degrees of reduction for elimination of the limit states and the operation of intermediate annealing.

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

REFERENCES

- Banabic D. Sheet metal forming processes. Constitutive modeling and numerical simulation. Springer, 2010.301 p.
- [2] Keller I. E., Petukhov D. S., Kazantsev A. V., Trofimov V. N. Diagram of ultimate deformations during hot sheet stamping of metals. Review of material models, ductile fracture criteria and standard tests. Vestn. Himself. state tech. un-that. Ser. Phys.-mat. science. 2018.Vol. 22. No. 3. P. 447-486.
- [3] Khan A. S., Huang S. Continuum theory of plasticity. John Wiley and Sons, 1995.421 p.
- [4] Adamov A. A., Keller I. E., Petukhov D. S. Experimental identification of the laws of plasticity and fracture of low-carbon steel sheet for cold forming simulation. Strength and ductility problems. 2019.Vol. 81, no. 2. P. 202-211.
- [5] Keller I. E., Kazantsev A. V., Adamov A. A., Petukhov D. S. Modeling of multistage cold stamping of a thin-walled vessel. Strength and ductility problems. 2020.Vol. 82. No. 1. P. 75-88.

Keller, Ilya Ernstovich Head of laboratory, Laboratory of Nonlinear Mechanics of Deformable Solids, Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science, Perm, Russia.

Kazantsev, Alexander Vladimirovich Senior lecturer, Department of Dynamics and Strength of Machines, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia.

- [6] Kazantsev A. V., Keller I. E. Evaluation of the multistage technological process of cold sheet stamping of a thin-walled vessel from the point of view of ultimate deformations. Calculated fur. solid. Wednesday 2020.Vol. 13. No. 2. P. 123-133.
- [7] 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.