

УДК 621.981.011

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ КРУТОИЗОГНУТЫХ ОТВОДОВ

© 2017 К.А. Николенко

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 30.15.2017

Представлены результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований процесса формообразования крутоизогнутых отводов. Способ формообразования – проталкивание в гарантированный зазор инструментальной оснастки. Доказана удовлетворительная сходимость результатов.

Ключевые слова: крутоизогнутый отвод, компьютерная модель, ANSYS/LS-DYNA, механизм формообразования, напряжения, деформации, толщина, экспериментальные исследования.

С развитием компьютерной техники и программного обеспечения появляется возможность выполнить предварительные исследования процессов с применением САЕ систем. Подобные исследования позволяют значительно сократить время затрачиваемое на апробацию и внедрение новых технологических процессов в производство. Информационная база, сформированная в результате компьютерного моделирования, позволяет не только определить принципиальную возможность реализации разработанного нового способа и технологии, но и интенсифицировать технологию, оптимизировать процесс формообразования, упростить выполнение технологических расчетов, проектирование штамповой оснастки и формирование чертежно-графической документации.

В работе представлены результаты компьютерного моделирования процесса формообразования крутоизогнутых отводов в холодном состоянии из стали 12Х18Н10Т. Моделирование выполнено с применением программного продукта ANSYS/LS-DYNA. Для проверки результатов моделирования и апробации на практике разработанного способа формообразования выполнены экспериментальные исследования.

Исследуемый способ формообразования и разработанное устройство для его осуществления представлен на рис. 1. Устройство состоит из пуансона, составной жесткой оправки, один из торцов которой помещен на ось вращения, двух полуматриц, одна из которых выполнена неподвижной, а другая помещена на ту же ось и имеет возможность откidyваться при вращении, и замка, запирающего составную оправку в рабочем положении. На верхнем основании устройства расположен противоотжим, запирающий при рабочем ходе устройства подвижную полуматрицу в рабочем положении. Нижняя

Николенко Кирилл Анатольевич, аспирант кафедры «Обработка металлов давлением».

E-mail: Nik_Kin_86@mail.ru

плоскость противоотжима расположена ниже рабочую горизонтальную плоскости пуансона на величину Δh , равную 3 – 5 % от длины пуансона. Пуансон снабжен фиксатором, захватывающим замок при обратном ходе устройства. Использование предлагаемой конструкции позволяет в 2 раза повысить производительность по сравнению с вариантом без противоотжима. Повышение производительности достигается за счет сокращения времени на настройки устройства, а также времени на извлечение готового изделия.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

Моделируется процесс формообразования крутоизогнутого отвода проталкиванием подготовленной трубной заготовки в гарантированный зазор образованный жесткой инструментальной оснасткой. Цель моделирования: определить напряженно-деформированное состояние и выявить особенности процесса формообразования крутоизогнутых отводов. Моделируется заготовка с размерами, наиболее часто используемыми при производстве отводов и востребованная рынком. Геометрия заготовки и оснастки представлена на рис. 2 г, а. Геометрические размеры детали: толщина стенки - 1,5 мм, наружный диаметр заготовки - 53 мм; относительный радиусгиба (отношение радиусагиба по средней поверхности к диаметру) – 1,3. Оснастка и заготовка моделируется с учетом геометрической симметрии. Плоскость симметрии определена максимальным и минимальным радиусомгиба.

Для решения задачи был выбран элемент с формулировкой Thin Shell 163 - оболочечный элемент с 4 узлами и возможностью изгиба. Элемент имеет 12 степеней свободы в каждом узле. Поведение материала заготовки описывается билинейной кривой упрочнения. Модель материала заготовки – Bilinear Kinematic. Экс-

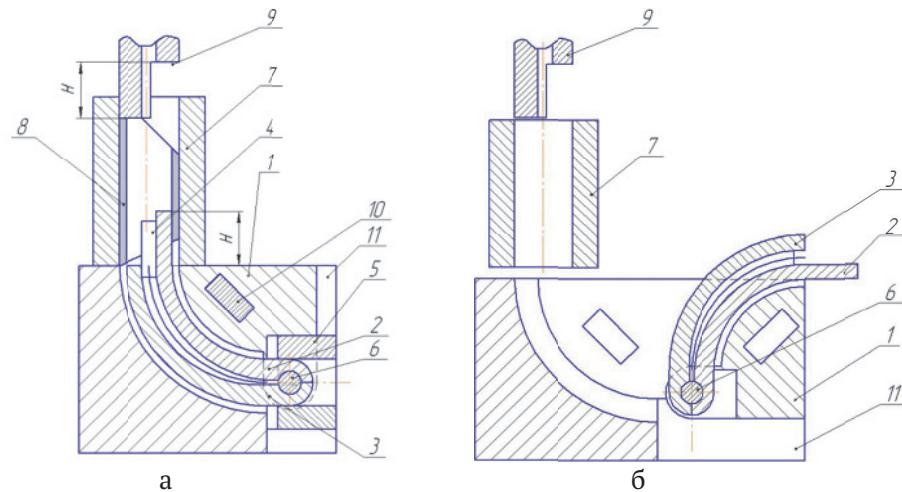


Рис. 1. Устройство для формообразования крутоизогнутых отводов с применением жесткой составной внутренней оправки и противоотжима, повышающего производительность изготовления изделия:

1 – верхняя часть полуматрицы; 2 – верхняя часть внутренней оправки; 3 – нижняя часть внутренней оправки; 4 – противоотжим; 5 – обойма; 6 – ось вращения составной оправки; 7 – контейнер; 8 – заготовка; 9 – пuhanсон; 10 – фиксатор верхней части матрицы; 11 – боковая плита;

а – исходное положение устройства перед формообразованием;

б – устройство после завершения процесса формообразования и извлечения детали

периметрально установлено, что данная модель удовлетворительно описывает деформации большинства металлов. Модель материала оснастки (пуансона, внутренней оправки и матрицы) – Rigid Material (твёрдое тело). Для задания свойств материала и характеристик процесса используется система единиц – СИ: плотность – кг/м³; линейные размеры – м; напряжение – Па; время – с; сила – Н. Материал заготовки – сталь 12Х18Н10Т. Свойства материала: плотность – 7900кг/м³; модуль упругости – 195e9 Па; Коэффициент Пуансона – 0,3; предел текучести – 210e6 Па; тангенциальный модуль – 709e6 Па.

Особенностью ANSYS/LS-DYNA является необходимость разбиения на конечные элементы даже абсолютно твёрдых тел. Для сокращения количества конечных элементов, жёсткие тела (оснастку) удобно представлять в виде поверхностей (оболочек), непосредственно контактирующих с заготовкой. Каждая оболочка имеет толщину и все расчёты производятся относительно серединной поверхности. В расчёте толщина оболочек оснастки принималась равной 1 мм (в общем случае она может быть любой). При аппроксимации геометрии конечно-элементной сеткой использовалось упорядоченное разбиение на четырёхугольные элементы (рис. 2 б).

Одним из важных этапов подготовки к проведению расчёта и получению удовлетворительных результатов является определение внешних воздействий на объект исследования. В задаче использовался один тип внешних нагрузок – кинематическая (движение толкателя с заданной скоростью). В программе LS-DYNA следует избегать ступенчатого изменения нагрузки, поэтому

был принят график изменения скорости толкателя, изображённый на рис. 2 г.

Для задания контактных взаимодействий в LS-DYNA предусмотрено множество опций. Как правило, задача не требует переопределения значений параметров, которые выставляются «по умолчанию», кроме коэффициента трения. Для построения задачи использовался следующая модель контактных условий – Surface to Surf, Automatic (поверхность об поверхность, автоматический). Этот тип трения позволяет учитывать толщины оболочек. Коэффициенты трения на всех контактных парах одинаковый – 0,1. В качестве контактирующих поверхностей были выбраны следующие основные компоненты: заготовка – толкатель; заготовка – матрица; заготовка – наполнитель. Отметим, толщина заготовки во время процесса изменяется, соответственно были установлены дополнительные опции, учитывающие эти изменения.

Результаты моделирования представлены в виде эпюр контактных поверхностей (рис. 3), эпюр интенсивности напряжений, деформаций и изменения толщины (рис. 4), а также графиков логарифмической деформации (рис. 2). Эпюры представлены на 3-х характерных стадиях процесса формообразования: начальная стадия – уголгиба $\approx 15^\circ$; промежуточная стадия (стадия максимального роста усилия) – уголгиба $\approx 60...70^\circ$; завершающая стадия – уголгиба 90° .

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

На первой стадии (рис. 3а) подготовленная цилиндрическая заготовка проталкивается на уголгиба, равный 15–20 градусам. В начальный момент

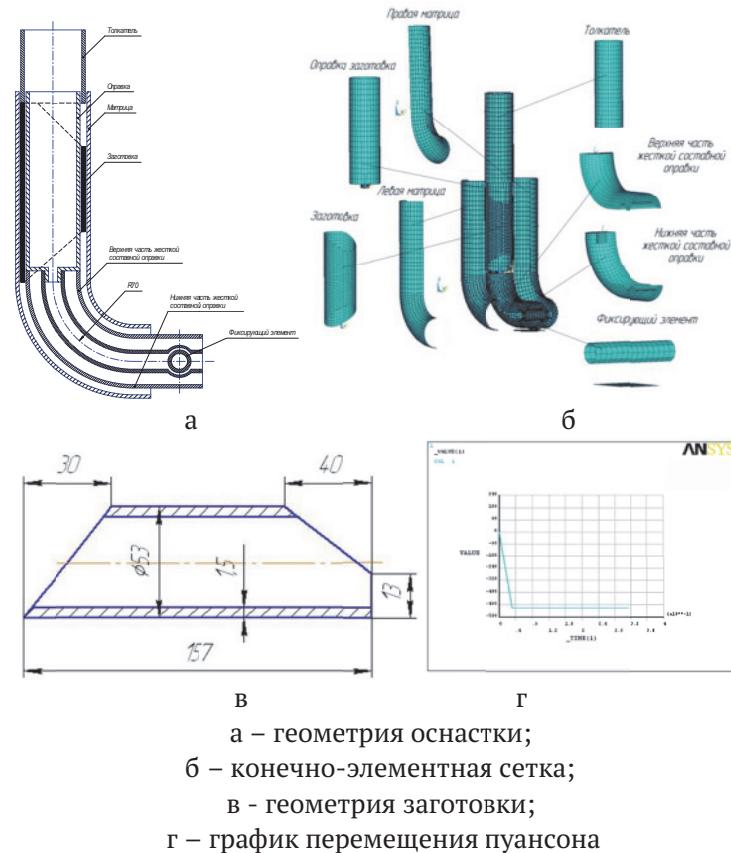


Рис. 2. Параметры моделируемой задачи

формообразования под действием изгибающего момента происходит изгиб выходного торца по максимальному радиусу гиба. Стадия завершается в момент искривления выходного торца по минимальному радиусу. Следует отметить, что формообразование заготовки по максимальному радиусу гиба происходит за счет воздействия на нее формующей поверхности матрицы, а формообразование по минимальному радиусу – за счет воздействия верхней части пуансона.

Вторая стадия (рис. 3б) характеризуется формообразованием на угол от 15-20 градусов до 65-70 градусов гиба. Стадия завершается в момент достижения максимального усилия процесса. При формообразовании наблюдается следующее воздействие формующих поверхностей. В очаге деформации поверхность по минимальному радиусу гиба в средней части формируется матрицей, а в области кромок – пуансоном. Иная картина наблюдается при формообразовании образующих поверхностей по максимальному радиусу гиба. Кромки и средняя часть образующих поверхностей формируются матрицей.

Третья стадия (рис. 3в) формообразования характеризуется падением деформирующего усилия. Это объясняется изменением механизма формообразования. Если на предшествующих стадиях основным механизмом являлся сдвиг боковой поверхности (поверхностей по среднему радиусу гиба), то на третьей стадии этот механизм сменяется изгибом. При этом

металл, находящийся в интервале от 65 до 90 градусов гиба практически не деформируется. Также наблюдается уменьшение площади контакта толкателя с торцом, передающим усилие. Это объясняется тем, что часть торца по минимальному радиусу гиба еще не коснулась толкателя, а по максимальному радиусу гиба уже отошла от толкателя. Таким образом, воздействие толкателя на заготовку наблюдается только по срединной части торца передающего усилие. На заключительной части формообразования происходит формовка торцов заготовки в поперечном сечении до цилиндрической формы. При этом необходимо исключить давление толкателя на торец заготовки по минимальному радиусу гиба, так как это приводит к возникновению гофр на боковой поверхности заготовки.

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И РАЗНОТОЛЩИННОСТЬ ИЗДЕЛИЯ

Из приведенных эпюров интенсивности напряжений и деформаций (рис. 4) можно сделать выводы: в начальный момент деформация наблюдается на выходном торце и торце передающем усилие, и в дальнейшем охватывает всю заготовку. Максимальная интенсивность напряжений наблюдается в области выходного торца на начальной стадии процесса. В дальнейшем происходит перераспределение напряжений и

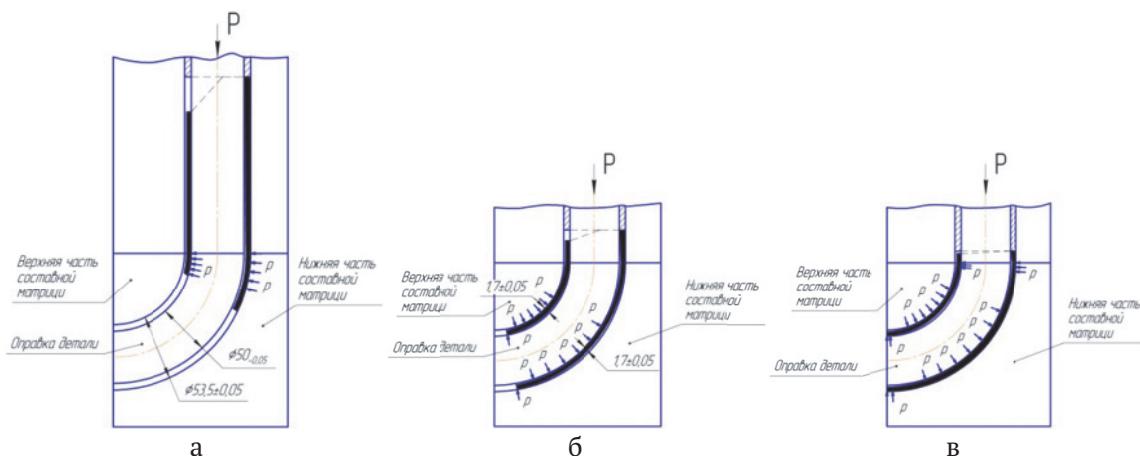


Рис. 3. Характерные стадии процесса формообразования:
а – начальная стадия процесса формообразования – угол гиба $\approx 15^{\circ}$;
б – промежуточная стадия процесса формообразования – угол гиба $\approx 60^{\circ}$;
в – завершающая стадия процесса формообразования – угол гиба 90°

на заключительной стадии процесса максимум наблюдается по минимальному радиусугиба на выходном торце и торце передающем усилие.

Анализируя полученные графики логарифмической деформации, можно сделать следующие выводы (рис. 5):

В образующих по минимальному максимальному и среднему радиусугиба происходит неравномерное изменение длины. Образующая по максимальному радиусугиба растягивается, по минимальному и среднему сжимается.

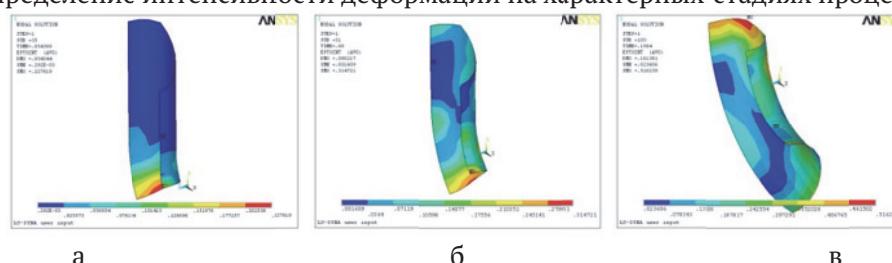
Аналогичная картина наблюдается на торцах и в среднем сечении по диаметру детали. Торец передающий усилие и выходной торец растягиваются в области по минимальному радиусугиба и сжимается в области по среднему

максимальному радиусугиба. Напротив среднее торцевое сечение сжимается в области по минимальному радиусугиба и растягивается в области по максимальному радиусугиба.

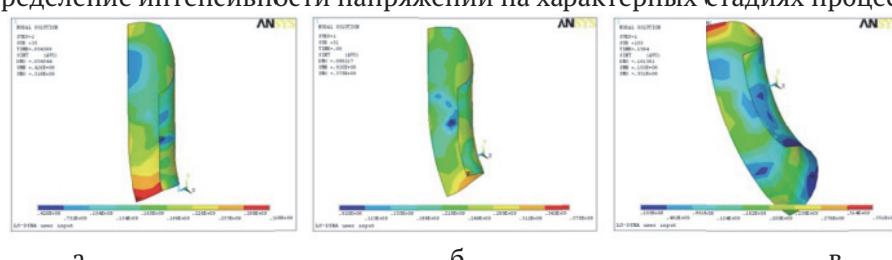
При анализе сдвиговой деформации (рис. 6) можно выделить область где сдвиг практически отсутствует. В данном случае это образующая по максимальному и минимальному радиусугиба. В сечении по среднему радиусугиба наблюдается одинаковая по значению, но разная по знаку сдвиговая деформация, обращающаяся в ноль в средней части детали.

Важным параметром в листовой штамповке является разнотолщинность полученного материала. Ниже представлены эпюры и графики распределения толщины на различных стадиях

Распределение интенсивности деформаций на характерных стадиях процесса, %



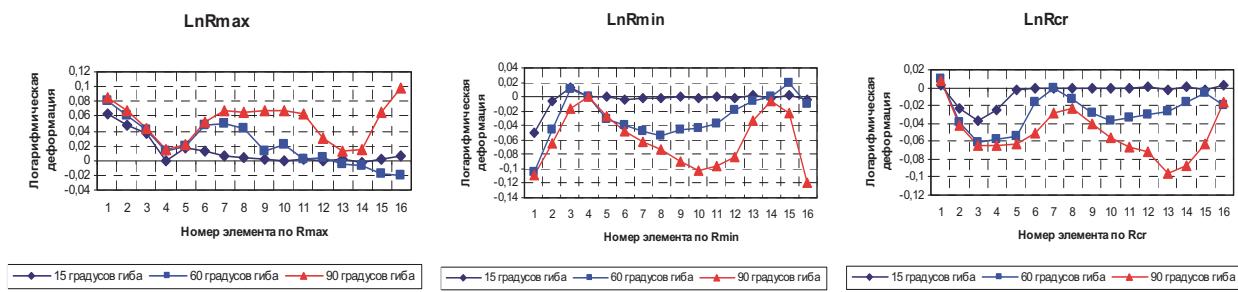
Распределение интенсивности напряжений на характерных стадиях процесса, Па



а – начальная стадия процесса формообразования – угол гиба $\approx 15^{\circ}$;
б – промежуточная стадия процесса формообразования – угол гиба $\approx 60^{\circ}$;
в – завершающая стадия процесса формообразования – угол гиба 90°

Рис. 4. Эпюры интенсивности напряжений и деформаций на характерных стадиях процесса формообразования

Распределение логарифмической деформации в меридиональном направлении (по радиусу гиба), %



а

б

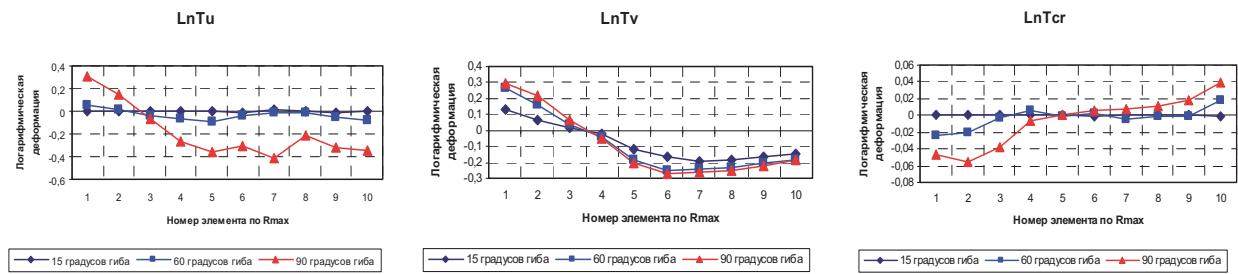
в

а - образующая по максимальному радиусу гиба – Rmax;

б - образующая по минимальному радиусу гиба – Rmin;

в - образующая по среднему радиусу гиба – Rcp

Распределение логарифмической деформации в тангенциальном направлении (по диаметру детали), %



а

б

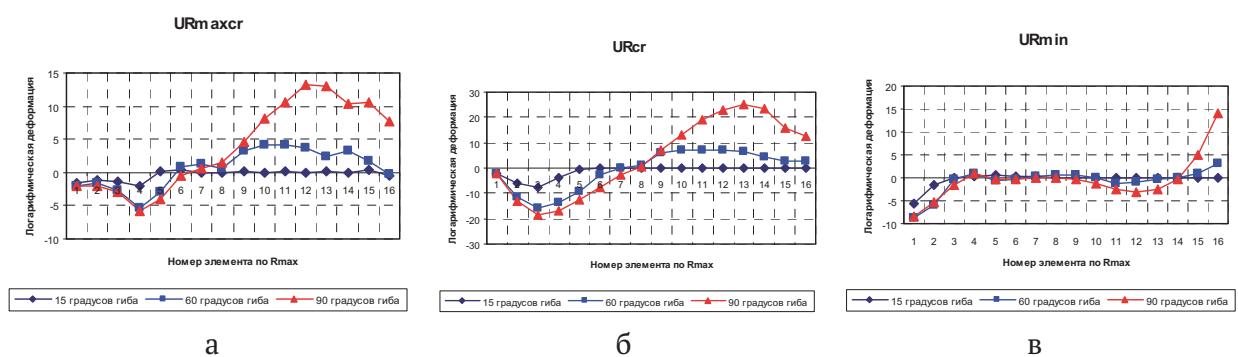
в

а - образующая на торце передающем усилие – Tu;

б - образующая на выходном торце – Tv;

в - образующая в среднем торцевом сечении - Tcr

Рис. 5. Графики распределения логарифмической деформации в меридиональном и тангенциальном направлениях, на 3-х характерных стадиях процесса в образующих по максимальному – Rmax, минимальному – Rmin и среднему – Rcp радиусу гиба



а

б

в

Рис. 6. Графики распределения сдвиговой деформации в образующих (Rmax, Rcr, Rmin) в меридиональном направлении на 3-х характерных стадиях процесса:

а – образующая по максимальному радиусу гиба – Rmax;

б – образующая по среднему радиусу гиба – Rcp;

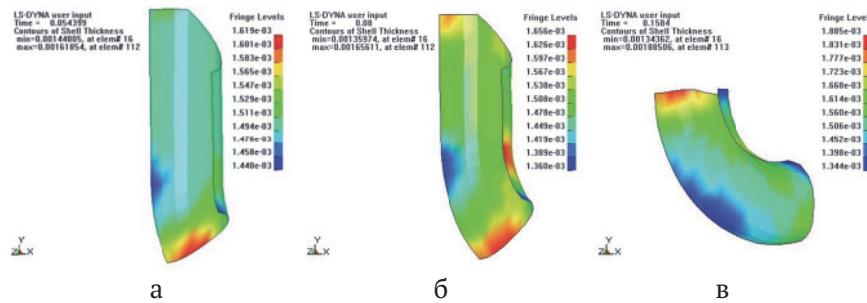
в – образующая по минимальному радиусу гиба – Rmin

процесса формообразования. Значения деформации по толщине (рисунок 7) имеет максимальное утонение в средней части по максимальному радиусу гиба и на торце передающем усилие и выходном торце по минимальному радиусу гиба. Максимальное утолщение наблю-

дается в средней части образующей по минимальному радиусу гиба и на торце передающем усилие в образующих по максимальному и среднему радиусу гиба.

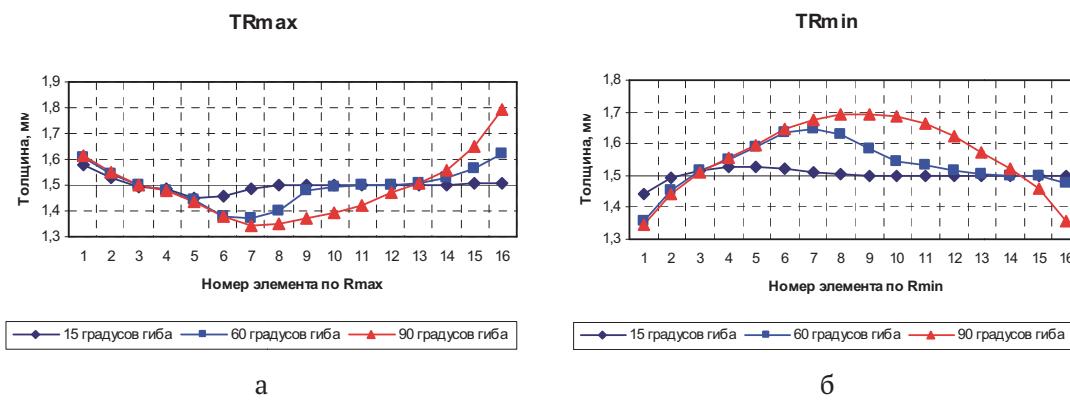
Следовательно, опасное сечение может возникнуть в области максимального утонения с

Эпюры распределения толщины на характерных стадиях процесса формообразования, мм^{*}10³



а - начальная стадия процесса формообразования - угол гиба $\approx 15^\circ$;
б - промежуточная стадия процесса формообразования - угол гиба $\approx 60^\circ$;
в - завершающая стадия процесса формообразования - угол гиба 90°

Графики распределение толщины в меридиональном направлении (по радиусу гиба), мм



а - образующая по максимальному радиусу гиба – Rmax;
б - образующая по минимальному радиусу гиба – Rmin

Рис. 7. Эпюры и графики распределения значений толщины на 3-х характерных стадиях процесса формообразования

учетом концентрации интенсивности напряжений. В данном случае это торец передающий усилие и выходной торец по минимальному радиусу гиба.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях. Основными задачами исследования являются: отработать конструкцию штамповой оснастки для формообразования крутоизогнутых отводов; проверить результаты компьютерного моделирования;

В лабораторных исследованиях использовался универсальный пресс ЦДМПУ-30 с силоизмерителем (цена деления шкалы – 10 кгс) (рис. 8 в). Для проведения экспериментальных исследований выполнены чертежи по которым была изготовлена экспериментальная штамповка оснастка (рисунок 8 а, б). Данная оснастка позволяющая осуществлять процесс формообразования способом проталкивания заготовки

через торOIDальный канал разъемной матрицы с внутренней жесткой составной оправкой.

Экспериментальный штамп состоит из нижней плиты (1) к которой болтом (9) крепится жесткая оправка (4), имитирующая составную оправку. С этой целью по срединной поверхности жесткой оправки выполнен пропил толщиной 1 мм. По внешней и внутренней частям оправки располагается внешняя (2) и внутренняя (3) части составной матрицы. Разъем составной матрицы осуществляется по срединной линии оправки. Зазор между рабочей поверхностью матрицы и рабочей поверхностью оправки соответствует толщине заготовки. Крепление матрицы к нижней плите (1) с одновременной фиксацией относительно оправки осуществляется штифтами (10). Для вывода внутренней матрицы на нужный уровень используется подставка (6). На сборную матрицу помещается оправка заготовки (5), ориентированная на составную оправку (4).

Для облегчения сборки и разборки штампа оправка заготовки (5) приваривается к внутренней части составной матрицы (3). С целью предот-

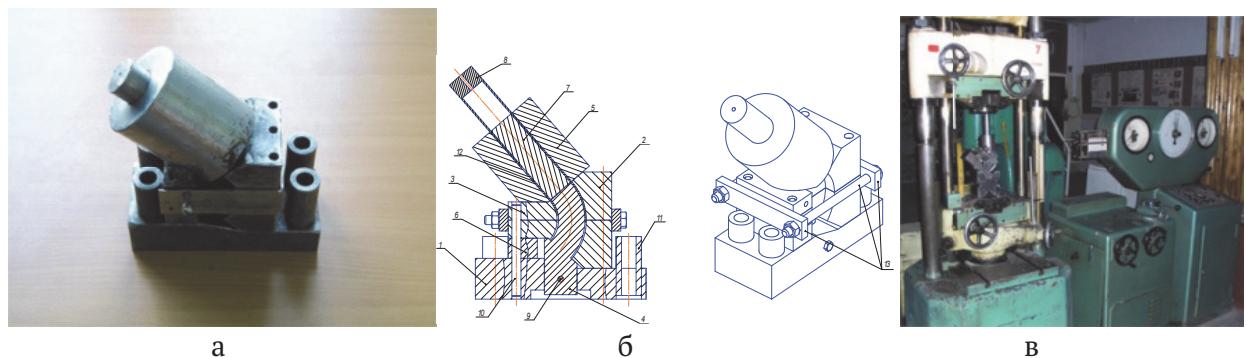


Рис. 8. Экспериментальная штамповая оснастка:

а – экспериментальная оснастка в сборе, б – общий вид штамповой оснастки, в – оборудование

вращения размыкания элементов матрицы при формообразовании в нижней плите штампа (1) запрессованы подпоры (11). Для предотвращения потери устойчивости заготовки (12) в процессе деформации, в оправку заготовки (5) помещают подпоры заготовки (7). Передача деформирующего усилия осуществляется через пuhanсон (8).

Перед формообразованием рабочую поверхность штампа покрывается лаком. Заготовку также покрывают лаком после чего смазывают машинным маслом или графитовой смазкой.

Для замера величины деформации при экспериментальных исследованиях применялись приборы механического типа: бинокулярный микроскоп БМИ-1; стойка с индикатором часового типа. В качестве заготовок для экспериментальных исследований использовались подготовленные отрезки трубных заготовок. Для определения свойств материалов проводились стандартные испытания на растяжения. Для определения деформированного состояния использовался метод координатной сетки. На трубную заготовку предварительно методом царапания наносилась делительная сетка (рис. 9), состоящая из квадратных ячеек. Глубина царапания в данном случае не превышала 5 мкм и не оказывала влияние на напряженно-деформированное состояние заготовки. Отсчет прямолинейных сечений делительной сетки начинается с сечения по максимальному радиусу гиба, по часовой стрелке. Кольцевые се-

чения считаются начиная с кромки воспринимающей деформирующее усилие. Компоненты нормальных деформаций, в пределах, ограниченных ячейкой делительной сетки определяются путем сопоставления размеров делительной сетки до и после деформации.

Для нахождении распределений логарифмических деформаций применялась делительная сетка с длиной стороны ячейки, равной 10 мм (в соответствии с размерами сетки применяемыми в компьютерных расчетах).

Абсолютная погрешность (доверительный интервал) определялась зависимостью:

$$\Delta = \frac{t_a \cdot \Delta S_n}{\sqrt{n}}$$

Результаты исследований представлены в виде графиков распределения доверительного интервала деформаций в образующих в сравнение с результатами компьютерного моделирования (рис. 10).

Отклонение результатов компьютерного моделирования в средних сечениях от данных эксперимента не превышает 23%. Это говорит о достоверности построенной модели. Полученная компьютерная модель значительно сократит время необходимое для проектирования и отработки конструкции промышленной штамповой оснастки, а также упростит составление методики проектирования технологического процесса.

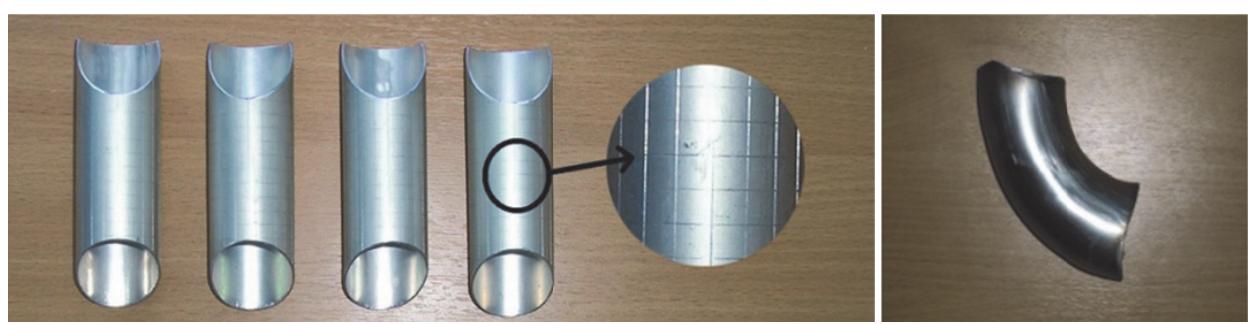
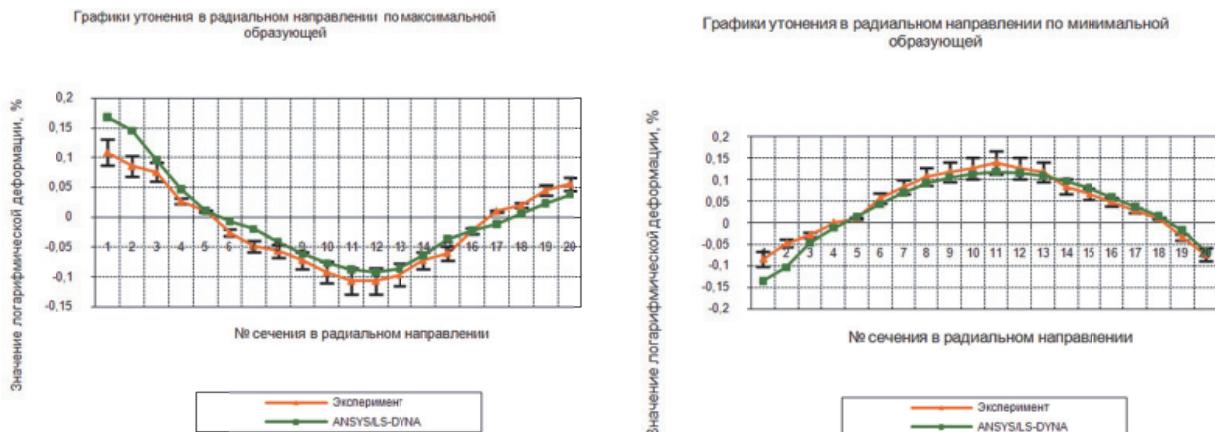


Рис. 9. Делительная сетка на заготовке и детали:

а – заготовка с нанесенной делительной сеткой;

б – деталь на заключительной стадии процесса формообразования

Графики сравнения логарифмическая деформация по толщине, %



Графики сравнения логарифмическая деформация в меридиональном направлении, %

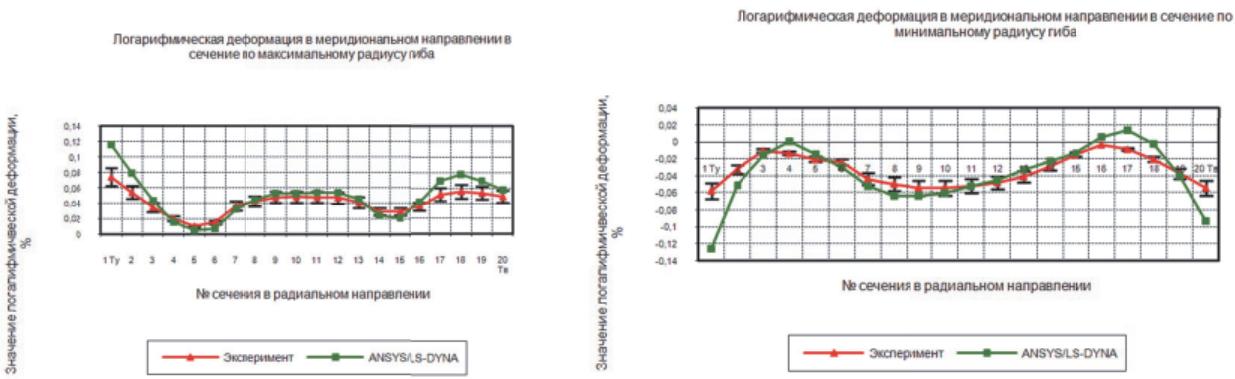


Рис. 10. Графики сравнения результатов компьютерного моделирования в программном продукте ANSYS/LS-DYNA с результатами экспериментальных исследований

ВЫВОДЫ

1. Выполнен анализ механизма формообразования. Установлено, основным механизмом формообразования является сдвиг поперечных сечений заготовки. Такой механизм преобладает до момента перемещения заготовки на угол гиба в 60–70°. При завершении данной стадии формообразования наблюдается падением деформирующего усилия. Отметим, расчет усилия необходимо выполнять с учетом выявленных особенностей процесса.

2. Получены эпюры распределения интенсивности напряжений, деформаций и толщины изделия и выполнен анализ напряженно деформированного состояния. Установлена область наибольшего утонения и возможного разрушения заготовки. Полученные данные необходимы для проектирования штамповой оснастки, расчета размера заготовки, определения усилия процесса, а также подбора материала для штамповки без дефектов.

3. Выполнено проектирование и изготовление штамповой оснастки. Проведены экспериментальные исследования. Подтверждена достоверность построенной компьютерной модели, а следовательно возможность исполь-

зования ее для разработки методики проектирования технологического процесса и отработки конструкции промышленной штамповой оснастки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Попов И.П., Маслов В.Д., Николенко К.А., Брусин В.Д., Михеев В.А., Хритин А.А. Устройство для формообразования крутоизогнутых отводов: Пат. RU 2294807 С1 (РФ). 2007.
- Маслов В.Д., Попов И.П., Николенко К.А., Попов А.Д. Устройство для формообразования крутоизогнутых отводов: Пат. RU 72649 U1 (РФ). 2008.
- Хаймович И.Н., Хаймович А.И. Проектирование и реализация системы автоматизированного проектирования штамповки компрессорных лопаток из титановых сплавов // Известия высших учебных заведений // Цветная металлургия. 2015. № 2. С. 37–43.
- Попов И.П., Маслов В.Д., Николенко К.А. Формообразование тонкостенных крутоизогнутых отводов в жестких инструментальных штампах // Заготовительное производство в машиностроении. 2007. № 1. С. 23–26.
- Маслов В.Д., Николенко К.А. Моделирование процессов листовой штамповки в программном ком-

- плексе ANSYS/LS-DYNA; Учебное пособие. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. 80 с.
6. CADFEM [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cadfec-cis.ru> (дата обращения 27.03. 2017).

COMPUTER MODELING AND EXPERIMENTAL STUDIES OF THE FORMATION PROCESS OF THE PIPE

© 2017 K.A. Nikolenko

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

The results of computer modeling and experimental research of the formation process of the pipe. Method of shaping – pushing into the guaranteed gap tooling. Satisfactory convergence of the results is proved.

Keywords: computer model, ANSYS / LS-DYNA, mechanism of formation, stress, deformation, thickness, experimental studies.