

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС РАЗДАЧИ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК, СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В.С. Петраковский, А.А. Бакиновская

Физико-технический институт НАН Беларуси
г. Минск, Республика Беларусь

Выполнен анализ состояния процесса раздачи трубчатых заготовок в листовой штамповке. Показан недостаточный уровень исследований процесса, что не позволяет рассчитать допустимую степень раздачи трубчатой заготовки. Установлены основные факторы, влияющие на степень раздачи при осуществлении процесса раздачи трубчатых заготовок эластичной средой и импульсными методами штамповки. Исследована степень их влияния на процесс гидроударной раздачи. Разработан инженерный метод расчета предельной степени раздачи.

Ключевые слова: трубчатые заготовки, раздача, степень раздачи, передающая среда, гидроударная штамповка, раздача подвижными средами, инструментальная раздача.

PROCESS OF TUBULAR BILLET EXPANSION, CURRENT STATE AND TRENDS

V.S. Petrakovsky, A.A. Bakinovskaya

Physical-technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus

The analysis of the state of the tubular billet expansion in sheet stamping is performed. The insufficient investigation level of the process is shown, that does not allow calculating the allowable degree of the tubular billet expansion. The main factors that influence the expansion ratio of the tubular billet using stamping with elastic media and pulse methods are established. The degree of factors influence on the process of hydro-impact expansion is investigated. Engineering method of the limiting expansion ratio calculation is developed.

Keywords: tubular billet, expansion, expansion ratio, transmitting media, impact hydroforming, expansion using fluid media, instrumental expansion

E-mail: fizteh11@mail.ru

Введение

В настоящее время листовая штамповка относится к наиболее востребованным и прогрессивным методам обработки металлов и занимает одно из ведущих мест в современном производстве. Ее удельный вес в основных отраслях промышленности за-

нимает от 60 до 95 %. Листовая штамповка получила такое широкое распространение в промышленности, в первую очередь, благодаря таким своим достоинствам как низкая трудоемкость и стоимость выпускаемой продукции, высокая производительность и точность изделий. Листовая штамповка объединяет большое количество разнообразных технологических операций. В.П. Романовский выделяет 21 основную операцию, которые позволяют получить огромное многообразие деталей, как с плоских, так и пространственных заготовок, в том числе трубчатых [1]. Операции штамповки труб занимают существенное место в общем ряду формоизменяющих операций, так как круглая труба при определенном периметре имеет максимальную площадь проходного сечения и жесткость, и поэтому трубы часто применяются в качестве основных силовых элементов и в трубопроводных конструкциях [2]. Операции штамповки труб разделяются фактически на раздачу, обжим и гибку труб [2]. Каждая из этих операций может иметь различные разновидности, например, с осевым сжатием, растяжением, нагревом. Целью нашей работы является исследование свободной раздачи трубчатой заготовки. Что касается терминологии, то эту операцию в разных источниках называют по-разному. Даже классики листовой штамповки обозначают эту операцию по-своему. В.П. Романовский называет ее растяжкой (раздача), М.Е. Зубцов – формовкой, А.Н. Малов – формовкой растяжением, а автор классической монографии «Штамповка резиной и жидкостью» Е.И. Исаченков – формообразованием из пространственной заготовки. И только М.Н. Горбунов эту операцию называет раздачей. Мы в своих исследованиях придерживались этой терминологии, считая ее наиболее правильной, и под термином раздача мы понимаем процесс увеличения поперечных размеров полой заготовки (трубы в данном случае) под действием внутреннего давления путем тангенциального растяжения. Этот процесс является наиболее сложным и трудоемким среди существующих инструментальных операций штамповки. Однако в современном машиностроении существует большой класс деталей, для изготовления которых процесс раздачи является единственно возможным способом их изготовления. Получение таких деталей в инструментальных классических штампах часто затруднено или вообще невозможно из-за плохого качества продукции и экономической нецелесообразности, т.к. для осуществления процесса раздачи традиционными методами необходимы сложнейшие раздвижные лепестковые штампы, которые в 30–40 раз дороже обычных штампов, да и детали получаются с огранкой. Поэтому такой процесс экономически нецелесообразен и в производстве практически не применяется.

Но с появлением методов штамповки жидкостной и эластичной средами, особенно импульсных методов (штамповка взрывом, электрогидравлическая, магнитно-импульсная, газодинамическая штамповка и особенно гидроударная штамповка) технология раздачи значительно упростилась, ее технологические возможности значительно расширились. Однако процесс раздачи практически не изучен и даже основной показатель процесса раздачи – увеличение диаметра трубной заготовки называют по-разному. М.Н. Горбунов этот показатель называет коэффициентом раздачи (отношение диаметра трубчатой заготовки к максимальному диаметру детали), В.П. Романовский этот показатель также называет коэффициентом растяжки (раздачи), но это уже обратное отношение, другие авторы оперируют только максимальными тангенциальными деформациями. А значения этих коэффициентов даются как приближенные и обобщенные для алюминиевых сплавов или сталей. Опираясь на эти данные технологический процесс раздачи, не спроектируешь, т.к. они не отражают всего многообразия факторов, влияющих на процесс раздачи. Описания этих факторов и тем более исследований их влияния на процесс раздачи в доступных информационных источниках практически нет. Поэтому определение основных факторов, влияющих на процесс

раздачи и степень их влияния на показатели раздачи, является актуальной задачей и представляет практический интерес.

Целью настоящего исследования являлось выявление основных факторов, влияющих на процесс свободной гидроударной раздачи трубчатых заготовок и определение величины этого влияния на основной показатель раздачи – степень раздачи $K_p = D_{дет} / D_{тр}$ и на этой основе создание методологии проектирования процесса раздачи трубчатых заготовок импульсными методами, в частности гидроударным методом штамповки.

Методика и результаты исследований

Многообразие факторов, влияющих на процесс гидроударной раздачи, сложность их одновременной оценки накладывают определенные трудности в выборе единого критерия, по которому можно было бы оценить процесс раздачи в целом. Для процесса гидроударной вытяжки такая методика существует, где в качестве критерия штампуемости используется значение предельной степени вытяжки $K_{пр} = D_{заг.мах} / d$, где $D_{заг.мах}$ – максимальный диаметр заготовки, которую можно вытянуть за одно нагружение без разрушения, d – диаметр вытягиваемой детали [3]. И если предположить, что процесс раздачи трубчатой заготовки является вытяжкой пространственной заготовки, где в качестве фланца выступают свободные концы трубы, а диаметром матрицы является ширина рифта трубы, то разработанную для вытяжки методику можно применить для раздачи труб. Таким образом, для оценки процесса свободной гидроударной раздачи трубчатых заготовок наиболее удобным является степень раздачи $K_p = D_{дет} / D_{тр}$, где $D_{дет}$ – максимальный диаметр рифта, $D_{тр}$ – исходный диаметр трубы. Степень раздачи, при которой тангенциальные деформации достигают своего максимума, является предельной степенью раздачи $K_{р.пр}$ и выражает собой предельное значение диаметра детали, которую можно получить с заданного диаметра трубы.

Анализ процесса гидроударной раздачи труб (свободная раздача) и предварительные эксперименты показывают, что величина предельной степени раздачи $K_{р.пр}$, главным образом, зависит от следующих факторов: 1 – материала трубы; 2 – относительной длины трубчатой заготовки $L_{тр} / B$ ($L_{тр}$ – длина трубчатой заготовки, B – ширина получаемого рифта или зоны деформирования); 3 – относительной толщины стенки трубчатой заготовки $S_0 / D_{тр}$ (S_0 – исходная толщина стенки трубчатой заготовки, $D_{тр}$ – диаметр трубы); 4 – относительной ширины рифта B / S_0 ; 5 – скорости нагружения заготовки (относительной массы бойка $m_{ж} / m_б$), где $m_{ж}$ – масса жидкости в рабочей камере гидроударного пресса, $m_б$ – масса бойка.

Отсюда вытекают задачи экспериментального определения предельных степеней раздачи для различных материалов труб и качественного и количественного характера их изменения в зависимости от вышеперечисленных факторов. Разноплановость и различное количественное влияние этих факторов на процесс, и предельную степень раздачи делает невозможным создание общей методики оценки штампуемости труб, одновременно учитывающей влияние этих параметров. Поэтому целесообразно экспериментальное построение графика штампуемости трубчатой заготовки в зависимости от одного параметра, который оказывает наибольшее влияние на степень раздачи, а полученные значения предельных степеней раздачи корректировать с помощью поправочных коэффициентов, учитывающих изменение других параметров, подобно тому, что разработано для гидроударной вытяжки [4]. Ввиду этого, оценку штампуемости проводили путем построения экспериментальных кривых штампуемости, представляющих собой взаимосвязь удельной энергии удара $E_{уд}$, величины относительной длины трубчатой заготовки $L_{тр} / B$ и результатом раздачи. А по резуль-

татам эксперимента строились зависимости предельной степени раздачи $Kp. пр$ от величины $L_{тр}/B$.

Экспериментальная работа по построению кривых штампуемости проводилась на гидроударном прессе СФТ- 510 на матрицах с радиусом закругления $R_m = 2S_0$ и диаметрами равными диаметрам исходных трубчатых заготовок (25–50 мм). Величина относительной длины трубчатой заготовки $L_{тр}/B$ изменялась от 2 до 12. Ширина зоны деформирования была равной $10 S_0$. Диапазон энергий удара 1 – 5 кДж. Штамповка трубчатых заготовок из различных материалов производилась по схеме свободной раздачи за одно нагружение симметрично расположенного по высоте заготовки рифта (рис. 1).

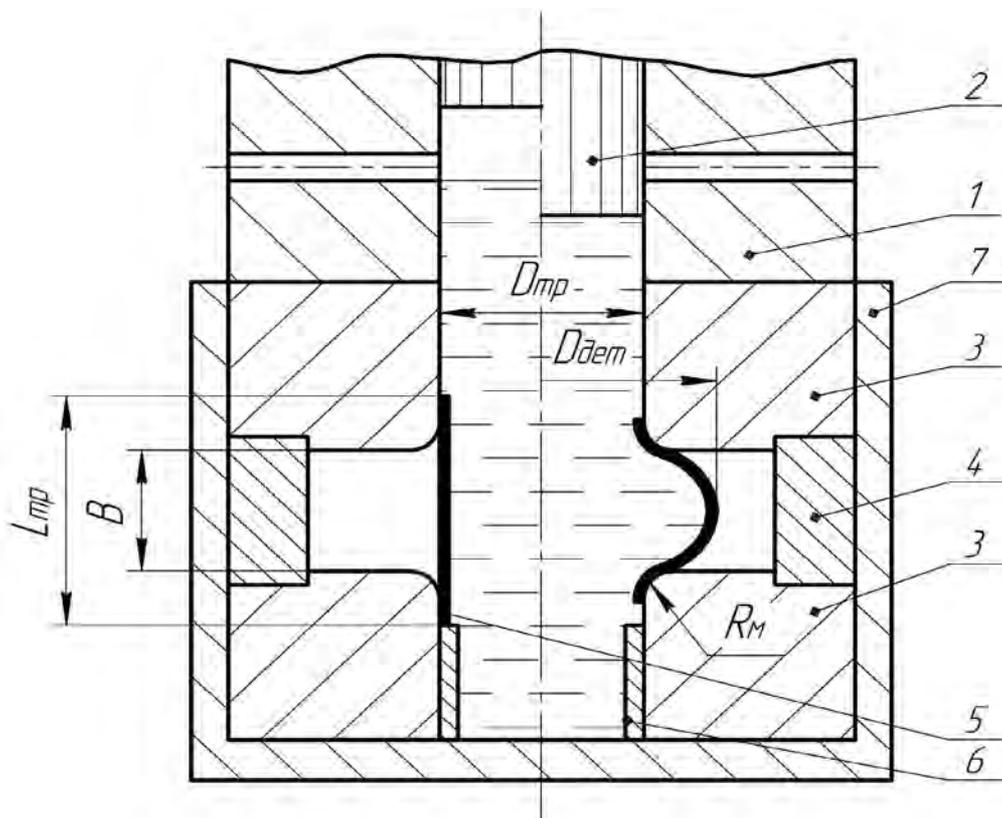


Рис. 1. Схема экспериментов:
1 – рабочая камера; 2 – боек; 3 – полуматрицы; 4 – опорное кольцо;
5 – заготовка; 6 – центрирующая втулка; 7 – обойма

Партии заготовок различных длин, начиная с наименьшей подвергали раздаче. В процессе эксперимента фиксировалась энергия удара, при которой происходят раздача с полной утяжкой фланцев в зону деформирования рифта, с неполной утяжкой фланцев и разрушение рифта. Пример построения графика штампуемости трубы из материала 12X18H10T Ø40 мм и толщиной стенки 0,5 мм показан на рис. 2.

Из представленного графика штампуемости видно, что кривые являются границами трех характерных областей. Область I определяет такие соотношения удельных энергий $E_{уд}$ и величины относительной длины трубчатой заготовки $L_{тр}/B$, при которых можно получить раздачу с неполной утяжкой фланцев заготовки в зону рифта. Область II определяет эти соотношения, при которых происходит полная утяжка фланцев в зону рифта. Она весьма мала и для получения таких деталей требуется очень точная дозировка энергии удара. Область III определяет такие соотношения $E_{уд}$ и $L_{тр}/B$, при ко-

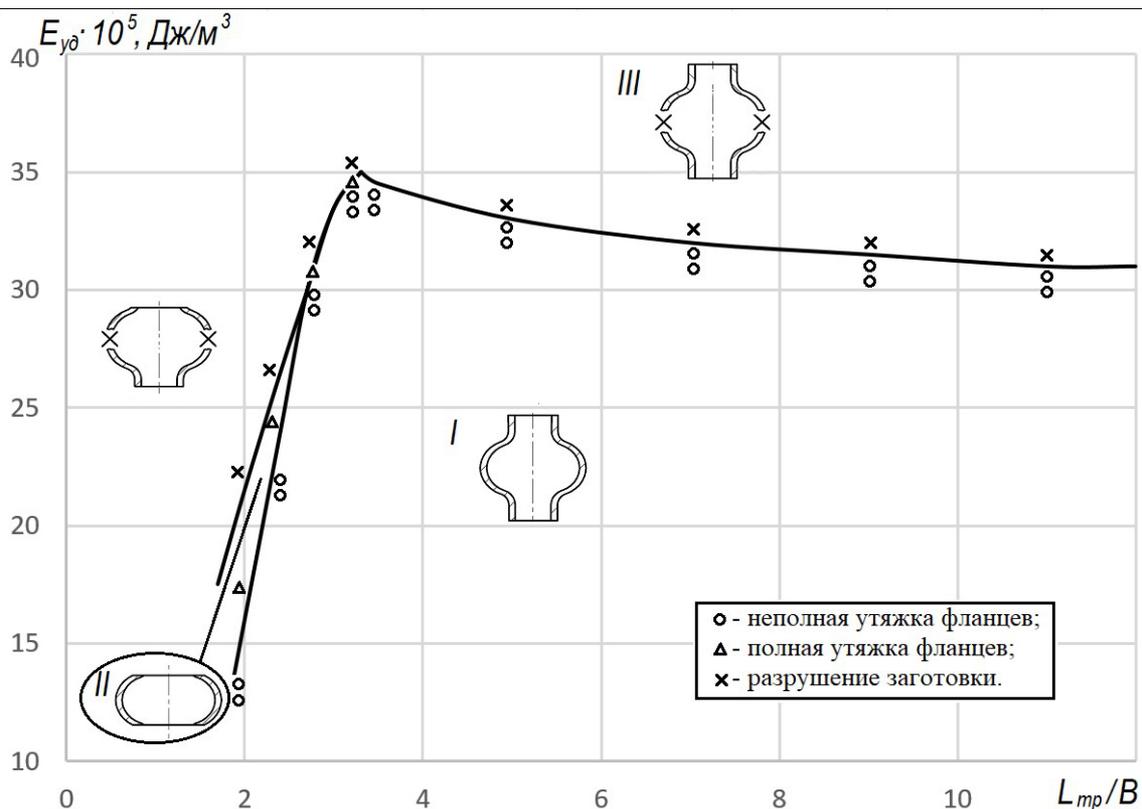


Рис. 2. График штампуемости для трубы из материала 12X18H10T

торых всегда происходит разрушение рифта. Общая для всех трех областей точка на кривых, соответствует величине $L_{тр}/B$, при которой достигается максимальная степень раздачи K_p . Такие графики были построены для широкого ряда материалов, применяемых в листовой штамповке. Полученные в процессе экспериментов образцы из различных материалов и с различной величиной $L_{тр}/B$ использовались для определения степени раздачи K_p в зависимости от $L_{тр}/B$. Результаты этого определения приведены на рис. 3. Точки, лежащие на кривой, соответствуют критическому состоянию образцов, предшествующему разрушению, т.е. представляют собой предельные степени раздачи для различных соотношений $L_{тр}/B$. Зона, находящаяся под предельной кривой, является зоной качественных изделий, а зона, находящаяся над кривой – зоной разрушения трубчатой заготовки. Как видно из графиков, все кривые имеют максимум при значениях $L_{тр}/B$, лежащих в диапазоне от 2,5 до 3, а характер влияния $L_{тр}/B$ одинаков для всех исследуемых материалов и при значениях $L_{тр}/B$ более 6 относительная длина трубы уже практически не влияет на предельную степень раздачи.

Таким образом, построение таких предельных кривых штампуемости позволило определить величины предельных степеней свободной раздачи, которые являются основным показателем при проектировании процесса гидроударной раздачи. Зная величину предельной степени раздачи материала трубы, используемого для изготовления заданной детали и рассчитав по чертежу детали необходимую степень раздачи, можно сделать заключение о возможности ее изготовления гидроударной раздачей. В табл. 1 представлены предельные значения степеней раздачи для исследуемых материалов при относительной длине трубчатой заготовки $L_{тр}/B$ равной 6 и относительной ширине рифта B/S_0 равной $10 S_0$.

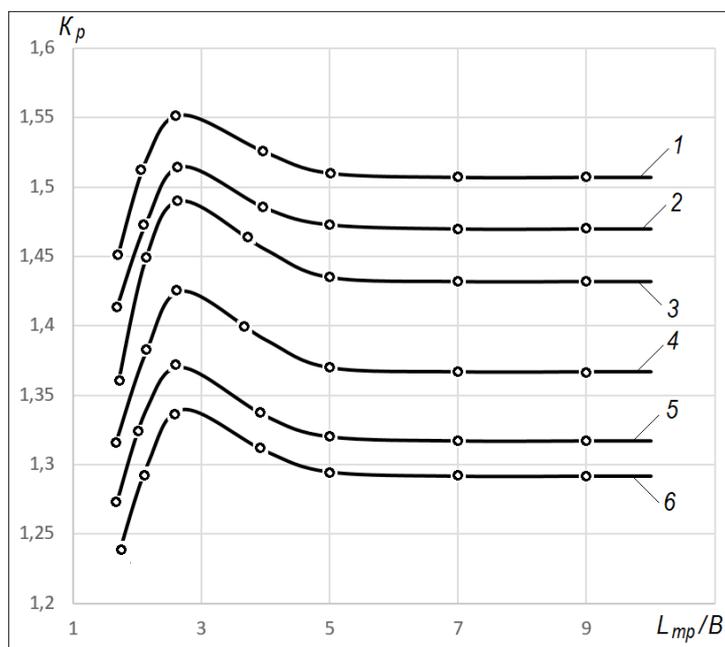


Рис. 3. Зависимость предельной степени раздачи от относительной длины трубчатой заготовки для материалов: 1 – медь М1М; 2 – нержавеющая сталь 12Х18Н10Т; 3 – латунь Л63; 4 – алюминий А0; 5 – алюминиевый сплав АМцМ; 6 – сталь 10

Табл. 1

Предельные значения степеней раздачи для различных материалов

Материал трубчатой заготовки	Предельные степени раздачи K_p .
Сталь 10	1,29
Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т	1,47
Алюминий А0	1,38
Алюминиевый сплав АМцМ	1,31
Медь М1М	1,5
Латунь Л62, Л68	1,43

Полученные при определенных условиях процесса значения предельных степеней раздачи, при конкретных условиях процесса штамповки будут изменяться в зависимости от приведенных ранее факторов, которые главным образом влияют на K_p . Изменяя каждый из этих факторов и строя кривые штампуемости для них, можно определить характер и величину этого влияния на степень раздачи трубчатой заготовки. Проведенные таким образом исследования показали, что все факторы однотипно влияют на предельную степень раздачи трубчатой заготовки для всех исследуемых материалов. А это значит, что значения предельных степеней раздачи, полученные при определенных условиях можно успешно корректировать с помощью поправочных коэффициентов. Учитывая, что мы подробно рассмотрели влияние относительной длины трубчатой заготовки $L_{тр}/B$ на предельную степень раздачи K_p , то и приведем первыми значения поправочных коэффициентов K_L , с помощью которых можно скорректировать предельную степень раздачи для конкретной длины трубчатой заготовки. Численные значения этих коэффициентов приведены в табл. 2.

Табл. 2

Коэффициенты влияния относительной длины трубчатой заготовки на предельную степень раздачи

Относительная длина трубчатой заготовки L_{TP}/B	2–2,2	2,2–2,5	3 – 42 2,5–3	3–4	4–5	5–6	св. 6
Коэффициент K_L	0,96–0,99	0,99–1,03	1,03–1,042	1,04–1,022	1,022–1,01	1,01–1	1

Влияние относительной толщины стенки трубчатой заготовки S_0/D_{TP} определяли аналогичным способом. Для экспериментов использовались трубы из материала АМцМ диаметром 60 мм с толщинами стенок 1; 1,5; 2; 2,5 мм и трубы диаметром 25 мм с толщинами 1,0 ÷ 2,0 мм, что позволило получить диапазон варьирования относительной толщины от 0,01 до 0,08. Полученные коэффициенты влияния S_0/D_{TP} на предельную степень раздачи K_S приведены в табл. 3.

Табл. 3

Коэффициенты влияния относительной толщины заготовки на предельную степень раздачи

Относительная толщина стенки заготовки $S_0/D_{TP} \cdot 100\%$	Коэффициент K_S
1–2	0,91–0,97
2–2,5	0,97–1,00
2,5–3,0	1,0–1,03
3–4	1,03–1,095
4–5	1,095–1,15
5–6	1,15–1,19
6–7	1,19–1,21
7–8	1,21–1,24

По этой же методике определяли коэффициенты влияния относительной ширины рифта B/S_0 и скорости нагружения заготовок K_α (относительной массы бойка α) на предельную степень раздачи. Полученные коэффициенты приведены, соответственно, в табл. 4 и 5.

Табл. 4

Коэффициенты влияния относительной ширины рифта B/S_0 на предельную степень раздачи

Относительная ширина рифта B/S_0	K_B
3–5	1,12–1,07
5–7	1,07–1,03
7–10	1,03–1,0
10–12	1–0,98
12–15	0,98–0,97
15–20	0,97–0,96
св. 20	0,96

**Коэффициенты влияния относительной массы бойка
α на предельную степень раздачи**

$\alpha = m_{ж}/m_{\sigma}$	0,1	0,2	0,35	0,5	1,5
K_{α}	1,0	1,015	1,026	1,03	1,033

Полученные экспериментальные данные позволили разработать инженерный метод определения предельных степеней раздачи при гидроударной штамповке, основного показателя при проектировании процесса раздачи. Значение предельной степени раздачи зависит от геометрических параметров трубчатой заготовки и деформационных свойств материала трубы, конструктивных характеристик импульсного оборудования и технологической оснастки. Поэтому для определения истинной предельной степени раздачи $K_{p \text{ ист}}$ необходимо знать величину и характер влияния этих факторов на предельную степень раздачи, что и было экспериментально установлено в настоящем исследовании. В итоге, зная значения предельных степеней раздачи различных материалов труб в определенных условиях – K_p , можно определить истинную степень раздачи $K_{p \text{ ист}}$ для любого материала в любых условиях, а это значит, что можно легко спроектировать технологический процесс без предварительных экспериментов.

Изложенные рассуждения можно выразить в виде параметрического уравнения:

$$K_{p \text{ ист}} = K_p \cdot K_L \cdot K_S \cdot K_B \cdot K_{\alpha},$$

где K_p – предельная степень раздачи, полученная экспериментальным путем (табл. 2);

$K_L, K_S, K_B, K_{\alpha}$ – коэффициенты, учитывающие влияние относительной длины трубчатой заготовки, относительной толщины стенки заготовки, относительной ширины рифта, скорости нагружения заготовки на степень вытяжки, значения которых приведено в табл. 2–5.

Разработанная методология исследований может быть использована для изучения процесса раздачи другими импульсными методами (штамповка взрывом, электрогидравлическая и магнитно-импульсная штамповка), использующими в качестве передающей среды жидкость, газ или силовое магнитное поле. Для каждого из этих методов необходимо провести свой цикл исследований, полностью повторяющих исследования процесса гидроударной раздачи с учетом их специфики. При этом все факторы, влияющие на величину предельной степени раздачи, остаются точно такими. Единственный фактор, который будет разным для каждого из этих импульсных методов, это скорость нагружения заготовки. И если для гидроударной штамповки это относительная масса бойка, то для штамповки взрывом это может быть удельный вес заряда ВВ., а для электрогидравлической и магнитно-импульсной раздачи это будет емкостно-индуктивная характеристика разрядного контура, т.е. характеристика от которой зависит скорость выделения энергии в рабочей зоне этих устройств. Что касается раздачи эластичной средой, то данную методологию нужно применять с большой осторожностью в силу того, что в этом процессе огромную роль играют силы внешнего трения между инструментом и эластичной средой, достигая в некоторых случаях 100 % величины усилия деформирования.

Заключение

1. Проведен анализ современного состояния процесса раздачи трубчатых заготовок при его осуществлении, как в инструментальных штампах, так и при штамповке подвижными средами, показано, что степень раздачи наиболее полно характеризует этот процесс.

2. Показано, что гидроударный метод раздачи трубчатых заготовок является эффективным методом получения сложнопрофильных изделий из трубчатых заготовок.

3. Выявлены основные факторы процесса гидроударной раздачи, влияющие на главный показатель процесса – предельную степень раздачи, и установлены характер и численные значения этого влияния, их величины приведены в табл. 2–5.

4. Разработана методология исследования процесса раздачи на основе построения графиков штампуемости, позволившая установить численные значения предельных степеней раздачи трубчатых заготовок из меди М1М – 1,5, латуни – 1,43, нержавеющей стали 12Х18Н10Т – 1,47, алюминия АО – 1,38, алюминиевого сплава АМцМ – 1,31, стали 10 – 1,29.

5. Разработан инженерный метод расчета процесса гидроударной раздачи трубчатых заготовок, позволяющий проектировать такие процессы без предварительных экспериментов.

6. Показано, что разработанная методология исследования процесса гидроударной раздачи может быть успешно использована для других импульсных методов, использующих в качестве передающей среды жидкость, газ, силовое магнитное поле. Проведение таких исследований заметно расширят сферу использования этих методов в современной машиностроении как перспективных средств осуществления процесса раздачи полых заготовок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке / В.П. Романовский. – 6-е изд. М.; Л.; 1979. – 518с.
2. Горбунов, М.Н. Штамповка деталей из трубчатых заготовок / М.Н. Горбунов. – Машгиз. М.; 1960. . – 187с.
3. Петраковский, В.С. Оценка штампуемости листового металла при гидроударной вытяжке / В.С. Петраковский // Импульсные методы обработки материалов — Минск: Наука и техника, 1979. — С. 77–81.
4. Петраковский, В.С. Инженерный метод расчета процесса импульсной вытяжки листовых материалов / В.С. Петраковский // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: VI Международная научно-техническая конференция (Минск, 13–15 сентября 2011 г.) — Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2011, № 3 (3). — С. 126–130.

REFERENCES

1. Romanovskiy V.P. Spravochnik po kholodnoiy shtampovke [Reference cold forming]. 6th ed. M.; L.; 1979. — 518 p. (in Russian)
2. Gorbunov M.N. Shtampovka detaleiy iz trubchatykh zagotovok [Stamping parts using tubular blanks]. Mashgiz. Moscow, 1960, 187 p. (in Russian)
3. Petrakovskiy V.S. Otsenka shtampuyemosti listovogo metalla pri gidroudarnoy vytyazhke [Estimation of sheet metal formability at impact hydroforming] / Impul'snyye metody obrabotki materialov Minsk, Nauka i tekhnika, 1979; pp. 77–81. (in Russian)
4. Petrakovskiy V.S. Inzhenernyy metod rascheta protsessya impul'snoy vytyazhki listovykh materialov. [Engineering method of the process calculating of impact drawing of sheet materials] Sovremennyye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov: VI Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya (Minsk, September 13–15, 2011) — Minsk: PHTI NAS of Belarus, 2011; iss. 3 (3), pp. 126–130. (in Russian)

Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 03.05.18