

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-2-101-108>

УДК 621.7.043

Пластическое формообразование наконечника концентратора-волновода для ультразвуковой эндоваскулярной абляции

Асп. Дай Вэньци¹⁾,
кандидаты техн. наук, доценты Ю. Г. Алексеев¹⁾, А. Ю. Королёв¹⁾,
инж. А. С. Будницкий¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Одним из наиболее эффективных методов лечения внутрисосудистых образований в настоящее время является применение ступенчатых ультразвуковых волноводных систем трубчатого типа (концентраторов-волноводов) с полым сферическим наконечником. Его наличие обеспечивает возможность подачи жидких сред в зону дислокации внутрисосудистого образования с целью дополнительного кавитационного воздействия, а также максимально эффективное разрушение внутрисосудистых образований за счет виброударного воздействия. При существующих особенностях методов формообразования для получения полого сферического наконечника концентратора-волновода целесообразно использовать методы пластического деформирования – раздачу и обжим. В статье представлены результаты предварительного расчета, численного моделирования и экспериментальных исследований процессов формообразования наконечника концентратора-волновода раздачей и обжимом. На основе метода конечных элементов в среде программного комплекса ABAQUS выполнено моделирование операций раздачи и обжима трубной заготовки, позволившее: оценить напряженно-деформированное состояние деформируемого конического участка заготовки, изменение толщины стенки в процессе формоизменения и рассчитать длину заготовки для оформления конического участка; установить закономерности влияния геометрических параметров на силовые режимы процесса раздачи; установить параметры режимов формообразования наконечника концентратора-волновода методом раздачи и обжима, обеспечивающие формирование требуемой геометрии. Полученные результаты предварительного расчета, численного моделирования и экспериментальных исследований процессов формообразования наконечника концентратора-волновода раздачей и обжимом имеют схожие значения, что подтверждает корректность использования как метода предварительного расчета, так и численного моделирования при разработке технологии изготовления концентратора-волновода.

Ключевые слова: трубчатый концентратор-волновод, внутрисосудистые образования, сферический наконечник, пластическая деформация, формообразование раздачей и обжимом

Для цитирования: Пластическое формообразование наконечника концентратора-волновода для ультразвуковой эндоваскулярной абляции / Дай Вэньци [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 2. С. 101–108. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-2-101-108>

Plastic Shaping of Concentrator-Waveguide Tip for Ultrasound Endovascular Ablation

Dai Wenqi¹⁾, Yu. G. Aliakseyeu¹⁾, A. Yu. Korolyov¹⁾, A. S. Budnitskiy¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. One of the most effective methods of treating intravascular formations at present is the use of stepped ultrasonic waveguide systems of a tubular type (concentrators-waveguides) with a hollow spherical tip, the presence of which makes

Адрес для переписки

Будницкий Алексей Сергеевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 24,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-76-78
budnitskiy@park.bntu.by

Address for correspondence

Budnitskiy Alexey S.
Belarusian National Technical University
24, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-76-78
budnitskiy@park.bntu.by

it possible to supply liquid media to the dislocation zone of an intravascular formation with the aim of additional cavitation effect and as efficiently as possible. destroy intravascular formations due to vibration impact. Based on the results of the analysis on the features of the existing shaping methods for obtaining a hollow spherical tip of the concentrator-waveguide, it is advisable to use methods of plastic deformation – expansion and crimping. The paper presents results of preliminary calculations, numerical modeling and experimental studies of tip shaping processes of the concentrator-waveguide by distribution and crimping. On the basis of the finite element method in the environment of the ABAQUS software package, modeling of the expansion and crimping of a pipe billet was carried out, which has made it possible to: evaluate the stress-strain state of the deformable conical section of the billet, the change in wall thickness during the forming process and calculate the length of the billet for the design of the conical section; to establish the patterns of the influence of geometric parameters on the power modes of the distribution process; to set the parameters of the modes of forming the tip of the concentrator-waveguide by the method of distribution and crimping, which ensure the formation of the required geometry. The obtained results of preliminary calculation, numerical modeling and experimental studies of tip shaping processes of the concentrator-waveguide by distribution and crimping have similar values, which confirms the correctness of using both the method of preliminary calculation and numerical modeling in the development of the technology for manufacturing the concentrator-waveguide.

Keywords: tubular concentrator-waveguide, intravascular formations, spherical tip, plastic deformation, shaping by distribution and crimping

For citation: Dai Wenqi, Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Budnitskiy A. S. (2021) Plastic Shaping of Concentrator-Waveguide Tip for Ultrasound Endovascular Ablation. *Science and Technique*. 20 (2), 101–108. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-2-101-108> (in Russian)

Введение

Тромбозы кровеносных сосудов являются одной из главных причин смертности и инвалидизации населения всего мира [1]. От тромбозов ежегодно умирает один из 250 человек, живущих на земле, несмотря на большое количество лекарственных препаратов, созданных для лечения этого заболевания [2, 3]. В Белорусском национальном техническом университете разработана принципиально новая конструкция ультразвуковой волноводно-катетерной системы для устранения непроходимости кровеносных сосудов, основанная на использовании в ней концентратора-волновода нового поколения, а именно – ступенчатого концентратора-волновода трубчатого типа (далее – концентратора-волновода). Эффект разрушения тромбов/бляшек осуществляется за счет применения кавитационной струи жидкости, которая формируется путем инфузионной подачи через внутреннюю полость концентратора-волновода на его дистальную часть одновременно с ультразвуковым воздействием [4].

Для обеспечения максимального эффекта разрушения внутрисосудистых образований путем виброударного воздействия при ультразвуковых колебаниях на дистальной части концентратора-волновода [5] сформирован рабочий сферический наконечник, имеющий три поперечных и центральное осевое отверстия (рис. 1).

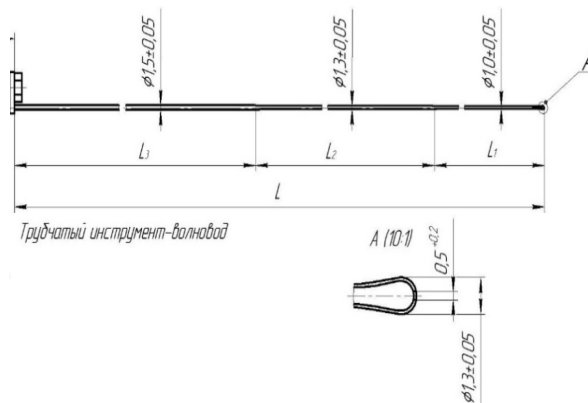


Рис. 1. Проксимальная, дистальная части и рабочий наконечник концентратора-волновода

Fig. 1. Proximal, distal parts and working tip of concentrator-waveguide

Статья посвящена исследованию процесса формообразования сферического наконечника концентратора-волновода на основе методов пластического деформирования: с раздачей конца дистальной части трубчатой ступенчатой заготовки в форму на длину будущего сферического наконечника и дальнейшим обжимом для придания ему сферической формы. В [6] проведен анализ существующих методов изготовления подобных концентраторов-волноводов, в том числе и формообразование методами пластического деформирования.

Предварительный расчет промежуточных диаметров при раздаче и обжиме

Раздача – формоизменяющая операция для увеличения периметра трубной заготовки рас-

тяжением изнутри в радиальном направлении пуансоном. Обжим – сужение поперечного сечения концевой части трубной заготовки в радиальном направлении в матрице путем обжатия материала снаружи и уменьшения диаметра (рис. 2).

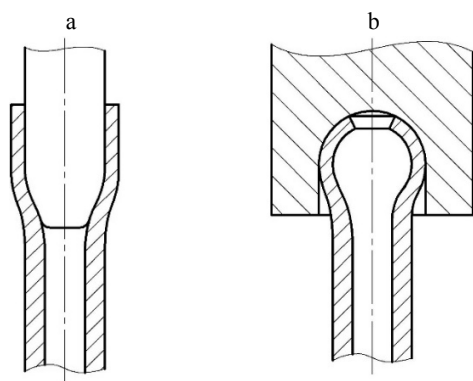


Рис. 2. Схема формообразования рабочего наконечника концентратора-волновода: а – раздача трубки на требуемые диаметр и длину; б – обжим в сферу

Fig. 2. Scheme of working tip shaping of concentrator-waveguide: a – distribution of tube to the required diameter and length; b – crimp into a sphere

Возможность деформирования заготовки за одну операцию определяется коэффициентом раздачи K_p

$$D_p = K_p D, \quad (1)$$

где D_p – наибольший диаметр после раздачи; D – исходный диаметр заготовки.

Предельный коэффициент раздачи регламентируется одним из двух видов потери устойчивости – складкообразованием в основании заготовки или появлением шейки в одном или одновременно нескольких участках кромки деформированной части заготовки, приводящей к образованию трещины [7]. Рекомендуемый коэффициент раздачи для стали составляет 1,05–1,15 [8].

Деформированное состояние при раздаче неоднородно по очагу деформации и изменяется в зависимости от соотношения радиального и окружного нормальных напряжений. Зона утолщения стенки мала по сравнению с зоной утонения. Поэтому с некоторым приближением можно считать, что в очаге деформации при раздаче стенка только утоняется. Наименьшая толщина стенки формируется на ее кромке и определяется по формуле [7]

$$s_p = s \sqrt{\frac{1}{K_p}}, \quad (2)$$

где s_p – толщина стенки после раздачи; s – толщина стенки исходной заготовки.

Для формирования сферического наконечника из трубки диаметром 1,0 мм требуется предварительная раздача заготовки до диаметра 1,35–1,37 мм (с учетом припуска под последующие операции финишной обработки). Для выполнения этой операции необходимо использование пуансонов нескольких типоразмеров. Обжим заготовки после раздачи в выпуклую сферическую форму необходимо производить в матрице с радиусом закругления 0,65–0,70 мм. При этом осевое перемещение матрицы выполняется с таким условием, чтобы в сферическом наконечнике оставалось центральное отверстие диаметром 0,5 мм.

Количество переходов, необходимых для раздачи трубчатой заготовки диаметром 1,00 мм до диаметра 1,36 мм, оценивалось с использованием коэффициента раздачи K_p по формуле (1). Для расчетов принимали значения $K_p = 1,11–1,12$. Расчет толщины стенки выполняли по (2). Диаметры пуансонов определяли как разность диаметра D_p и толщины стенки s_p . Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета диаметров пуансонов и толщины стенки
Calculation results of punch diameters and wall thickness

Переход	Коэффициент раздачи K_p	Диаметр D_p , мм	Толщина стенки s_p , мм	Наружный диаметр $D_{нар}$, мм	Внутренний диаметр (диаметр пуансона) $d_{п}$, мм
Исходный	–	0,750	0,250	1,000	0,500
1	1,11	0,833	0,237	1,070	0,596
2	1,12	0,932	0,224	1,156	0,708
3	1,11	1,035	0,213	1,248	0,822
4	1,12	1,159	0,201	1,360	0,958

Второй этап формирования сферического наконечника заключался в обжиме с помощью сферического пуансона. Предельная деформация при обжиме труб ограничивается потерей устойчивости заготовки, что имеет место при $s_p/D_p \leq 0,025$ [8]. При $s_p = 0,201$ мм и $D_p = 1,159$ мм – $s_p/D_p = 0,173$; соответственно обжим можно проводить за один проход с использованием сферического пуансона необходимого радиуса закругления.

Моделирование процессов формообразования наконечника концентратора-волновода

Для оценки размерных параметров трубной заготовки при раздаче на разных этапах и при формировании сферической части обжимом выполнено численное моделирование процессов формообразования. Использована упруго-пластическая модель деформации материала в формулировке конечно-элементной схемы решения задачи в виде метода перемещений, где искомыми считаются упругие перемещения деформированного тела [9].

Расчет выполнен с использованием программного комплекса ABAQUS 6.14 (модуль ABAQUS/STANDARD), предназначенного для решения инженерных задач конечно-элемент-

ного анализа (статика, динамика, теплопередача) в совокупности с контактными взаимодействиями и нелинейными свойствами материалов, основанного на неявной схеме интегрирования в статической постановке для плоской осесимметричной модели (смоделировано продольное сечение концентратора-волновода). При моделировании этапов раздачи учтено, что трубная заготовка подвергается отжигу перед каждым этапом деформирования. Для каждого последующего этапа раздачи принята геометрия, полученная при расчете предыдущего этапа. Для учета обратного пружинения после этапа формообразования пуансон извлекается из трубной заготовки, затем проводится фиксация толщин и диаметров. В качестве примера на рис. 3 приведены результаты моделирования первого этапа раздачи.

Изображения продольных сечений заготовок после четырех проходов раздачи представлены на рис. 4. На сечениях указаны смоделированные численные значения толщины стенки по длине заготовки. В табл. 2 приведены величины толщины стенки и наружного диаметра возле кромки заготовки после переходов раздачи, полученные по результатам моделирования.

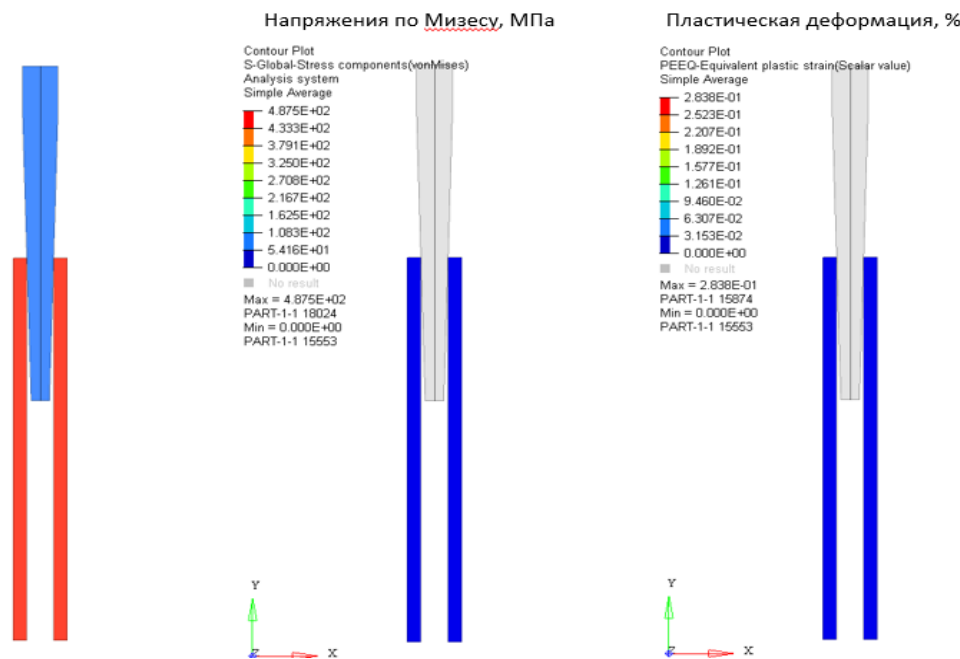


Рис. 3. Результаты моделирования первого этапа раздачи

Fig. 3. Results of modeling the first stage of distribution

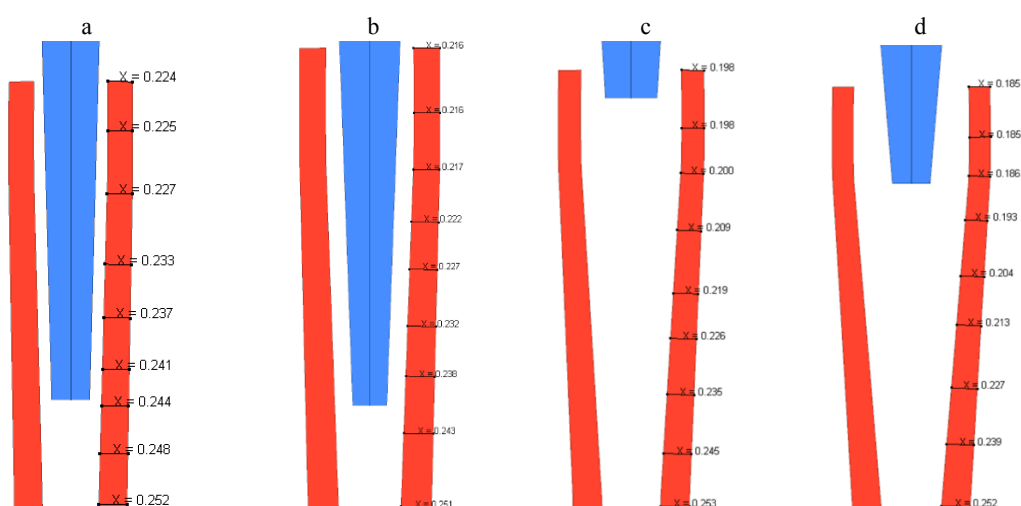


Рис. 4. Изменение размеров заготовки в процессе раздачи для переходов: а – 1; б – 2; с – 3; д – 4
 Fig. 4. Changing workpiece size in the process of distribution for the transition: a – 1; b – 2; c – 3; d – 4

Таблица 2

Толщина стенки и наружный диаметр возле кромки заготовки после переходов раздачи, полученные по результатам моделирования

Values of wall thickness and outer diameter near the edge of the workpiece after transitions of expansion, obtained from the results of modeling

Переход	Толщина стенки s , мм	Наружный диаметр $D_{нар}$, мм
Исходный	0,252	1,00
1	0,224	1,13
2	0,216	1,15
3	0,198	1,27
4	0,185	1,38

Далее представлены результаты численного моделирования процесса формирования обжимом сферического наконечника концентратора-волновода. Расчетная схема с указанием гео-

метрических параметров конструкции показана на рис. 5.

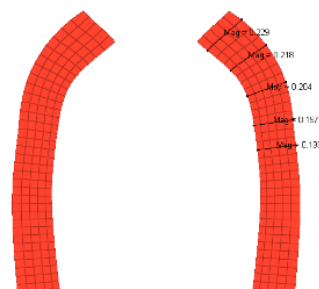


Рис. 5. Расчетная схема моделирования процесса формирования сферического наконечника концентратора-волновода с указанием толщины стенки

Fig. 5. Calculation scheme for modeling the process of forming a spherical tip of a concentrator-waveguide with an indication of wall thickness

В табл. 3 приведены основные параметры процесса формирования наконечника трубчатого волновода на различных этапах деформации.

Таблица 3

Основные параметры процесса формирования наконечника трубчатого концентратора-волновода
 Main parameters of the process for forming tip of the tubular concentrator-waveguide

Переход	Длина, мм		Изменение длины, мм	Максимальное усилие, Н	Диаметр, мм	
	исходная	конечная			исходный	конечный
1	8,000	7,872	0,128	35,8	1,00	1,13
2	7,872	7,830	0,052	40,3	1,13	1,15
3	7,830	7,676	0,154	78,2	1,15	1,27
4	7,676	7,506	0,170	98,4	1,27	1,38
Обжим	7,506	6,496	1,010	311,5	1,38	1,38

Материалы, оборудование и методы проведения экспериментальных исследований

Заготовками для изготовления экспериментальных образцов раздаточных пуансонов служили прутки из быстрорежущей стали Р6М5 ($d_{n1} = 0,63$ мм; $d_{n2} = 0,72$ мм; $d_{n3} = 0,86$ мм; $d_{n4} = 0,99$ мм).

Раздачу и обжим проводили на настольном микропрессе МР 120 Ргоххон. В качестве смазки использовали натриевое мыло. Раздача трубчатой заготовки происходила на глубину 3 мм с предварительным отжигом при температуре нагрева перед каждым переходом до 1100 °С с охлаждением на воздухе. Диаметр участка раздачи контролировали с помощью микрометра. Для получения сферического наконечника выполняли обжим трубчатой заготовки с использованием специальной матрицы с закругленным обжимным отверстием.

Для контроля формирующегося профиля после раздачи трубчатые заготовки ориентировались в горизонтальной плоскости. Затем образцы запрессовывались в термопластичную полимерную форму на электрогидравлическом прессе ЕСОРЕSS 100. Запрессованные образцы шлифовались на программируемом шлифовально-полировальном станке. Контроль размеров продольного и поперечного профилей

образцов проводили на металлографическом микроскопе «Альтами МЕТ 1Т».

Результаты экспериментальных исследований

Для измерения диаметра и толщины стенки заготовки после каждого из переходов раздачи были сделаны микрофотографии сечений исходного и деформированных образцов (рис. 6), а также продольного сечения сферического наконечника после обжима (рис. 7).

В табл. 4 представлены результаты измерения толщины стенки и диаметров полученных заготовок после каждого перехода раздачи.

По результатам измерения толщины стенки в зоне обжима установлено уменьшение ее толщины с 0,181 до 0,135 мм.

Для сопоставления данных, полученных в результате предварительного расчета, численного моделирования и экспериментальных исследований процесса раздачи, построены зависимости, характеризующие изменение толщины стенки заготовки от ее наружного диаметра (рис. 8). Представленные зависимости имеют схожий характер, что подтверждает корректность использования как метода предварительного расчета, так и численного моделирования при разработке технологии изготовления сферического наконечника концентратора-волновода методом раздачи и обжима.

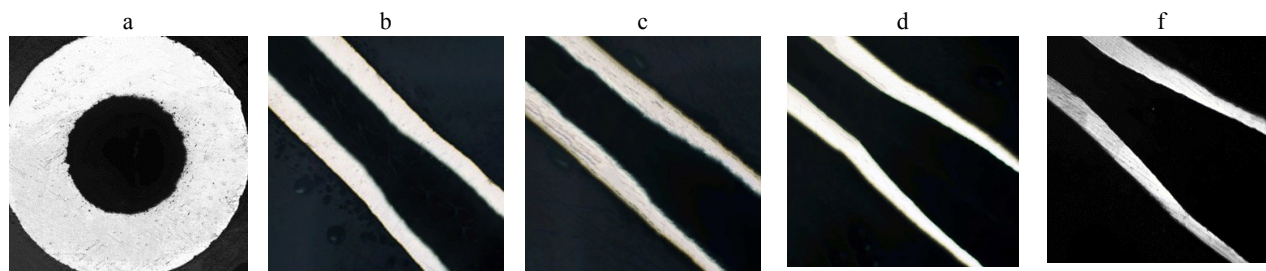


Рис. 6. Сечения исходного образца и образцов после каждого из переходов (×40): а – поперечное сечение исходного образца; б, с, d, f – переходы 1, 2, 3, 4 соответственно

Fig. 6. Sections of original sample and samples after each transition (×40): а – cross section of original sample; б, с, d, f – transitions 1, 2, 3, 4 respectively

Таблица 4

Результаты измерений профиля продольного сечения образцов
Measurements results of sample longitudinal section profile

Переход	Внутренний диаметр (диаметр пуансона) $d_{п2}$, мм	Толщина стенки s_p , мм	Наружный диаметр $D_{нар}$, мм	Коэффициент раздачи K_p
Исходный	0,494	0,248	0,990	–
1	0,632	0,231	1,094	1,16
2	0,722	0,224	1,170	1,10
3	0,863	0,206	1,275	1,13
4	0,989	0,181	1,351	1,09

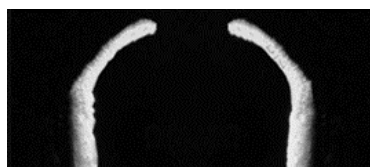


Рис. 7. Продольное сечение сферического наконечника ($\times 40$)

Fig. 7. Longitudinal section of spherical tip ($\times 40$)

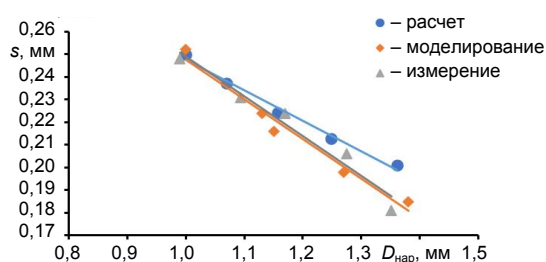


Рис. 8. Зависимости изменения толщины стенки заготовки от ее наружного диаметра в процессе раздачи, полученные в результате расчета, численного моделирования и экспериментальных исследований

Fig. 8. Dependences of change in wall thickness of workpiece on its outer diameter in the process of expansion, obtained as a result of calculation, numerical modeling and experimental research

Результаты экспериментальных исследований процессов раздачи и обжима с вращением пуансона и матрицы

В качестве альтернативного способа получения наконечника концентратора-волновода рассмотрена схема раздачи с вращением пуансона и обжима с вращением матрицы. Недостаток такой схемы – невозможность достижения требуемого класса шероховатости и точности [10]. При этом преимуществом является простота технологической оснастки для его реализации.

Исследовали силовые характеристики процесса раздачи и обжима с вращением пуансона и матрицы. Раздачу и обжим выполняли с применением настольного вертикально-сверлильного станка PROMA E-1516B/230. Трубчатую заготовку фиксировали в приспособлении, которое устанавливали на настольные весы на столике вертикально-сверлильного станка. Пуансоны для раздачи и матрицу обжима закрепляли в трехкулачковом патроне станка. Усилие раздачи оценивалось по максимальному значению показания весов в процессе раздачи и обжима. Для определения оптимальных режимов раздачи и обжима производили контроль усилия раздачи при различных значениях частоты вращения шпинделя станка ω . Частота ω регу-

лировалась с помощью коробки скоростей станка, где изменялось передаточное отношение редуктора. Результаты измерения усилий раздачи и обжима представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты измерения усилий раздачи и обжима
Results of measuring forces of distribution and crimping

Режим	Усилие, Н, при частоте вращения пуансона ω , об/мин				
	580	970	1280	1410	2270
Раздача, переход 1	29,02	29,31	20,69	26,72	29,02
Раздача, переход 2	27,87	28,16	22,98	31,32	27,29
Раздача, переход 3	29,31	29,31	24,13	30,45	25,28
Раздача, переход 4	29,59	31,89	28,16	36,20	31,32
Обжим	27,58	24,71	24,42	23,85	25,28

При частоте вращения пуансона менее 580 об/мин происходит потеря устойчивости трубчатой заготовки из-за превышения предельного усилия раздачи, более 2270 об/мин – интенсивный износ и нагрев трубчатой заготовки, в результате чего происходят значительное утонение стенки и разрыв при небольших усилиях раздачи.

На рис. 9 представлены зависимости изменения усилия раздачи трубчатой заготовки от частоты вращения пуансона с диаметра 1,00 мм на диаметр 1,36 мм при раздаче и дальнейшем обжиме. Как видно из зависимости, при раздаче трубчатой заготовки наиболее приемлемым является режим с частотой вращения 1280 об/мин, при котором достигаются наименьшие значения усилия раздачи на всех переходах. Оптимальный режим обжима трубчатой заготовки обеспечивается при частоте вращения матрицы 1410 об/мин.

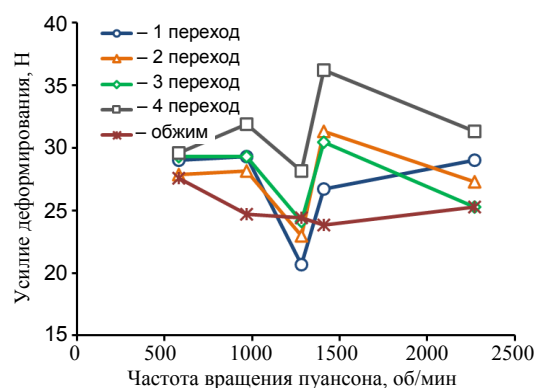


Рис. 9. Изменение усилия деформирования трубчатой заготовки при раздаче (1–4 переходы) и обжиме

Fig. 9. Change in deformation force of tubular billet during expansion (1–4 transitions) and crimping

ВЫВОДЫ

1. На основе метода конечных элементов в среде программного комплекса ABAQUS выполнено моделирование операций раздачи и обжима трубной заготовки, позволившее: оценить напряженно-деформированное состояние деформируемого конического участка заготовки, изменение толщины стенки в процессе формоизменения и рассчитать длину заготовки для оформления конического участка; установить закономерности влияния геометрических параметров на силовые режимы процесса раздачи; установить параметры режимов формообразования наконечника концентратора-волновода методом раздачи и обжима, обеспечивающие формирование требуемой геометрии.

2. Полученные результаты предварительного расчета, численного моделирования и экспериментальных исследований процессов формообразования наконечника концентратора-волновода раздачей и обжимом имеют схожие значения, что подтверждает корректность использования как метода предварительного расчета, так и численного моделирования при разработке технологии изготовления концентратора-волновода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Advanced Imaging in Acute and chronic Deep Vein Thrombosis / G. Y. Karande [et al.] // *Cardiovascular Diagnosis and Therapy*. 2016. Vol. 6, No 6. P. 493–507. <https://doi.org/10.21037/cdt.2016.12.06>.
2. Birchall, M. Internal Ultrasonic Pipe & Tube Inspection – IRIS [Electronic Resource] / M. Birchall, N. Sevcic, C. Madureira // IV Conferencia Panamericana de END. Buenos Aires, Octubre 2007. Mode of access: <https://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/149.pdf>.
3. Бокарев, И. Н. Современные проблемы тромбозов артерий и вен / И. Н. Бокарев, Л. В. Попова // *Практическая медицина*. 2014. Т. 9, № 6. С. 13–17.
4. Минченя, В. Т. Применение ультразвуковых концентраторов-волноводов трубчатого типа для устранения непроходимости кровеносных сосудов / В. Т. Минченя, И. Э. Адзерихо, А. Ю. Королёв // *Доклады БГУИР*. 2016. № 7. С. 300–303.
5. Способ разрушения венозных и артериальных тромбозов: пат. 3808 С1 Респ. Беларусь: МПК А61В17/22, А61В17/32 / А. Г. Мрочек, И. Э. Адзерихо. Опубл. 2001.03.30.
6. Пластическое деформирование и электрофизикохимическая обработка трубчатых медицинских концентраторов-волноводов / Дай Вэньци [и др.] // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 6. С. 499–506. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-6-499-506>.

7. Аверкиев, Ю. А. Технология холодной штамповки: учебник для вузов по специальностям «Машины и технология обработки металлов давлением» и «Обработка металлов давлением» / Ю. А. Аверкиев, А. Ю. Аверкиев. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
8. Романовский, В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. 6-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.
9. Фокин, В. Г. Метод конечных элементов в механике деформируемого твердого тела: учеб. пособие / В. Г. Фокин. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. 131 с.
10. Теория и практика изготовления элементов трубопроводов летательных аппаратов / С. И. Феоктистов [и др.]. Комсомольск-на-Амуре, КнАГТУ, 2013. 92 с.

Поступила 27.01.2021

Подписана в печать 23.03.2021

Опубликована онлайн 30.03.2021

REFERENCES

1. Karande G. Y., Hedgire S. S., Sanchez Y., Baliyan V., Mishra V., Ganguli S., Prabhakar A. M. (2016) Advanced Imaging in Acute and Chronic Deep Vein Thrombosis. *Cardiovascular Diagnosis and Therapy*, 6 (6), 493–507. <https://doi.org/10.21037/cdt.2016.12.06>.
2. Birchall M., Sevcic N., Madureira C. (2007, October) Internal Ultrasonic Pipe & Tube Inspection – IRIS. *IV Conferencia Panamericana de END*. Available at: <http://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/149.pdf>.
3. Bokarev I. N., Popova L. V. (2014) Modern Problems of Arterial and Venous Thrombosis. *Prakticheskaya Meditsina = Practical Medicine*, 9 (6), 13–17 (in Russian).
4. Minchenya V. T., Adzerikho I. E., Korolyov A. Yu. (2016) Application of Tube-Type Ultrasonic Concentrators-Waveguides to Eliminate Obstruction of Blood Vessels. *Doklady Belorusskogo Gosudarstvennogo Universiteta Informatiki i Radioelektroniki = Doklady BGUIR*, (7), 300–303 (in Russian).
5. Mrochek A. G., Adzerikho I. E. (2001) *Method of Destruction of Venous and Arterial Thromboemboli*. Patent No 3808 C1 Republic of Belarus (in Russian).
6. Dai Wenqi, Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Budnitskiy A. S. (2020) Plastic Deformation and Electrophysicochemical Treatment of Tubular Medical Concentrator Waveguides. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 19 (6), 499–506. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-6-499-506> (in Russian).
7. Averkiev Yu. A., Averkiev A. Yu. (1989) *Cold Stamping Technology*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 304 (in Russian).
8. Romanovskii V. P. (1979) *Handbook of Cold Stamping*. 6th ed. Leningrad, Mashinostroenie Publ. 520 (in Russian).
9. Fokin V. G. (2010) *Finite Element Method in Solid Mechanics*. Samara, Publishing House of Samara State Technical University. 131 (in Russian).
10. Feoktistov S. I., Maryin B. N., Maryin S. B., Kolykhalov D. G. (2013) *Theory and Practice of Manufacturing Elements of Aircraft Pipelines*. Komsomolsk-on-Amur, Publishing House of Komsomolsk-on-Amur State Technical University. 92 (in Russian).

Received: 27.01.2021

Accepted: 23.03.2021

Published online: 30.03.2021