МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-121-132

Баранов Д.С., Хуртасенко А.В., Воронкова М.Н., Дуганов В.Я., Латышев С.С.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
**E-mail: den-3218@yandex.ru*

ПРОБЛЕМА ПРОИЗВОДСТВА КРУТОИЗОГНУТЫХ ОТВОДОВ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

Аннотация. *В статье приведено описание крутоизогнутого отвода, его назначение, технические характеристики и параметры, влияющие на эксплуатационные свойства. Рассмотрены распространенные виды отводов и способы их изготовления. Произведен краткий анализ способов изготовления. Определен оптимальный способ изготовления крутоизогнутых отводов, коим является горячая протяжка по рогообразному сердечнику ввиду высокой производительности и при минимальных отходах материала.*

Описана сущность способа горячей протяжки по рогообразному сердечнику, приведена схема процесса изготовления отвода крутоизогнутого. Приведена обобщенная схема конструкции рогообразного сердечника, состоящего из хвостовика, направляющей, переходной, деформирующей и калибрующей частей.

Обозначена проблема предприятия, возникающая в процессе изготовления отводов крутоизогнутых из жаропрочной стали и приводящая к преждевременному выходу оснастки из строя. Предварительно определены возможные факторы, влияющие на процесс формообразования, к которым относятся: материал заготовки и сердечника, температурно-силовые режимы, конструкция и геометрия сердечника. Сформулированы задачи, комплексное решение которых может способствовать устранению проблемы.

Для частичного решения задачи определения оптимальной конструкции и геометрии рогообразного сердечника был произведен патентный анализ существующей оснастки, прототипов и полезных моделей, приведено краткое описание.

Ключевые слова: *рогообразный сердечник, крутоизогнутый отвод, горячая протяжка, жаропрочные стали, стойкость оснастки*

Введение. Изготовление продукции, не уступающей импортной, является приоритетным направлением в рамках индустриально-инновационной политики импортозамещения. В соответствии с поручением президента от 30 марта 2024 года № Пр-616, п.1 и) к 2030 году необходимо увеличить производство высокотехнологичных товаров, созданных на основе собственных линий разработки [1]. Для успешного решения задач этого направления необходим научно-обоснованный подход, а именно: использование актуальных методов математического и твердотельного моделирования, CAE-анализа [2–4].

К одной из таких задач относится производство соединительных элементов трубопровода, а именно, крутоизогнутых отводов. В соответствии с действующими государственными и отраслевыми стандартами, техническими условиями отвод – это бесшовное или сварное изделие в виде изогнутой на заданный угол и с заданным радиусом трубы. Основным предназначением отводов является перенаправление потока газообразных, жидких или твердых сыпучих веществ в трубопроводах [5]. Наиболее широкое применение крутоизогнутые отводы нашли в крупных отраслях промышленности: нефтегазовой, аэрокосмической, химической, энергетической, а также в коммунальной сфере и быту.

Процесс подготовки производства отводов напрямую зависит от проведения научно-исследовательских и опытно-экспериментальных работ, по результатам которых можно определить основные факторы, степень их влияния, а также предложить рекомендации по оптимизации. Такая необходимость связана с тем, что прогнозирование поведения материала заготовки под действием приложенных сил и возникающих в процессе формообразования нагрузок является сложной задачей [6].

Производство отводов позволяет получать изделия в соответствии с требуемыми параметрами [7, 8], варьирующимися в зависимости от:

- транспортируемой разного рода среды – газа, жидкости, мазута, кислоты, густой и жидкой смазки;
- условного давления перекачиваемого продукта – ниже атмосферного - вакуум, без избыточного давления, низкого – до 10 МПа, высокого – выше 10 МПа;

- рабочей температуры – холодной считается ниже нуля, нормальной – до 50 °С и горячей – свыше 50 °С;
- используемого материала - стали (углеродистой, легированной, высоколегированной), цветных металлов и сплавов (медных, латунных, титановых, свинцовых алюминиевых), чугуна и неметаллических материалов (полиэтилена, поливинилхлорида, фторопласта, стекла);
- территориального признака – внутрицеховые и межцеховые.

В зависимости от способа изготовления отводы делятся на штампосварные, сварные секционные (секторные), точеные, гнутые и крутоизогнутые бесшовные.

Отводы стальные штампосварные изготавливают путем штамповки из листовой стали с последующей сваркой сопрягаемых поверхностей одним или двумя продольными швами [9]. Для отводов с диаметром условного прохода $D_y \geq 1200$ дополнительно рекомендуется использовать поперечный шов.

В соответствии с ОСТ 36-20-77 могут быть изготовлены отводы с диаметром условного прохода D_y $600-1400$ мм, радиусом гиба $R = 1.5D_y$ под углом 30, 45, 60 и 90°. Из условий ОСТ 36-19-77 допустимая рабочая температура стенки отвода должна находиться в диапазоне от -30°С до 300 °С. Условное давление не должно превышать $P_y \leq 2.5$ МПа (≈ 25 кгс/см^2), что соответствует низкому.

Такой способ применим для изготовления малоответственных изделий, т.к. прочность сварного шва, как правило, ниже прочности основного материала детали.

Сварные секционные отводы изготавливают путем сварки вальцованных листов или секторов сложного лекального раскроя. Как правило, заготовки вырезают на станке газоплазменной резки с ЧПУ. Вальцовка осуществляется на четырехвалковой листогибочной машине [10].

В соответствии с ОСТ 36-21-77 могут быть изготовлены отводы с диаметром условного прохода D_y $500-1400$ мм, радиусом гиба $R = 1.5D_y$ под углом 30, 45, 60 и 90°. Из условий ОСТ 36-19-77 допустимая рабочая температура стенки отвода должна находиться в диапазоне от -30°С до 300 °С. Т.к. все сварные швы изделий тщательно контролируются методами радиационной, ультразвуковой, магнитной или электромагнитной дефектоскопии, такие отводы при соблюдении эксплуатационных условий выдерживают низкое условное давление $P_y \leq 2.5$ МПа (≈ 25 кгс/см^2).

Способ изготовления таких отводов является наименее затратным относительно всех остальных способов.

Точеные отводы изготавливают из литой заготовки квадратной формы на промышленном токарном оборудовании высокой точности [11].

В соответствии с ГОСТ 22820-83 могут быть изготовлены отводы с диаметром условного прохода D_y $6-200$ мм, под углом 45 и 90°. Допустимая рабочая температура стенки отвода должна находиться в диапазоне от -50°С до 510 °С. Условное давление в диапазоне $10 \leq P_y \leq 100$ МПа (≈ 1020 кгс/см^2), что соответствует высокому. Для таких отводов характерны: высокая прочность, износостойкость и устойчивость к воздействию агрессивных сред.

Способ изготовления таких отводов является наиболее время- и трудозатратным относительно всех остальных способов, а коэффициент использования материала может доходить до 0,2, т.е. до 80% металла в процессе обработки отходит в стружку.

Гнутые отводы изготавливают способом холодной гибки, в документации обозначаются как ГО (холодноизогнутый) по ГОСТ 24950-2019 или способом горячего гнутья, т.е. с разогревом зоны деформации трубы-заготовки, в документации обозначаются как ОГ (горячедеформированный) [12].

При производстве холодноизогнутого отвода используются специализированные установки для гибки труб. Полость заготовок может быть заполнена сыпучим материалом, что позволит нагрузке равномерно распределяться по стенкам в зоне деформации, в таком случае по краям монтируются заглушки.

Горячедеформированные отводы получают в процессе разогрева заготовки в месте деформации индукционным способом или газовоздушной горелкой. В процессе контролируются такие параметры как: подача нагревательного элемента, радиус изгиба, объем подачи охлаждающей жидкости и прочие. После этого обрезаются и разделываются под приварку кромки, производится контроль толщины стенки в зоне изгиба с наружной и внутренней стороны.

В соответствии с ГОСТ 24950-2019 могут быть изготовлены отводы наружного диаметра $D_н$ $57-1420$ мм включительно, радиусом гиба $R = 1.5D_y$ под углом не более 90°. Допустимая рабочая температура стенки отвода должна находиться в диапазоне от -50 °С до 510 °С. Условное давление в диапазоне $10 \leq P_y \leq 100$ МПа (≈ 1020 кгс/см^2), что соответствует высокому. Такой способ применим для изготовления ответственных изделий, а отсутствие сварных швов позволяет использовать отводы с толщиной

стенки меньшей на 15–20 %, чем у штампосварных и сварных отводов.

Отводы крутоизогнутые бесшовные изготавливаются методом штамповки или протяжки по рогообразному сердечнику. В соответствии с ГОСТ 17235-2001 могут быть изготовлены отводы с диаметром условного прохода D_y 15 − 1000 мм, радиусом гиба $R = 1D_y$ под углом 30, 45, 60, 90 и 180° (Рис. 1 1). Из условий ГОСТ 17380-2001 допустимая рабочая температура стенки отвода должна находиться в диапазоне от -70 °С до 450 °С. Условное давление не должно превышать $P_y \leq 16$ МПа (≈ 163 кгс/см^2), что соответствует высокому. Данный способ наиболее производительный и экономичный, т.к. коэффициент использования материала может доходить до 1, т.е. при изготовлении практически не остается отходов [13, 14]. Помимо всего прочего данный способ позволяет изготавливать отводы с относительным радиусом гиба 1–1,5 и относительной толщиной стенки 0,025-0,05.

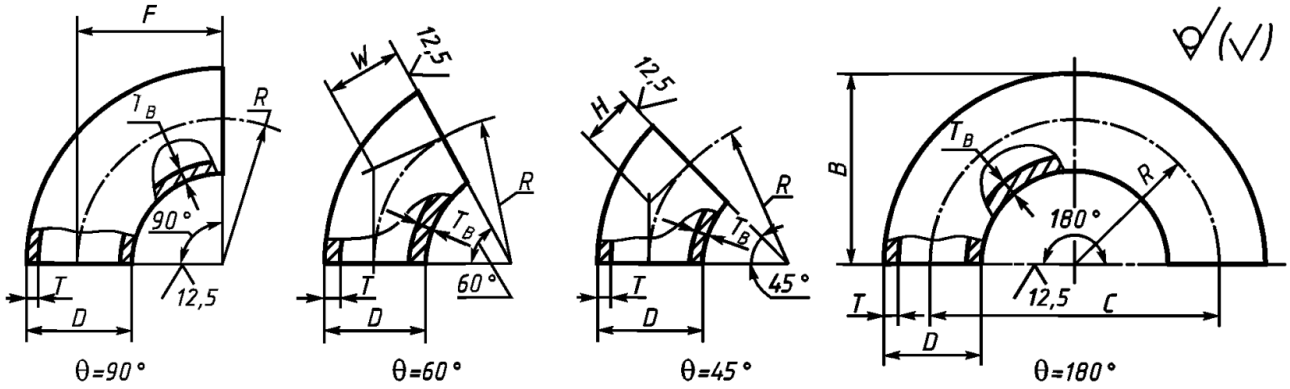

Рис. 1. Отводы крутоизогнутые бесшовные по ГОСТ 17375-2001

Сущность способа протяжки по рогообразному сердечнику заключается в нагреве трубы-заготовки 1 с помощью индуктора 2 до температуры пластической деформации и одновременном с этим скольжении благодаря графитовой смазке по рогообразному сердечнику 3 (рис. 2). Перемещение с заданным усилием Р и скоростью обеспечивается подающим механизмом пресса 4 [15, 16]. Из этого следует, что на процесс формообразования могут оказывать влияние следующие факторы: материал заготовки и сердечника, температурно-силовые режимы, конструкция и геометрия сердечника.

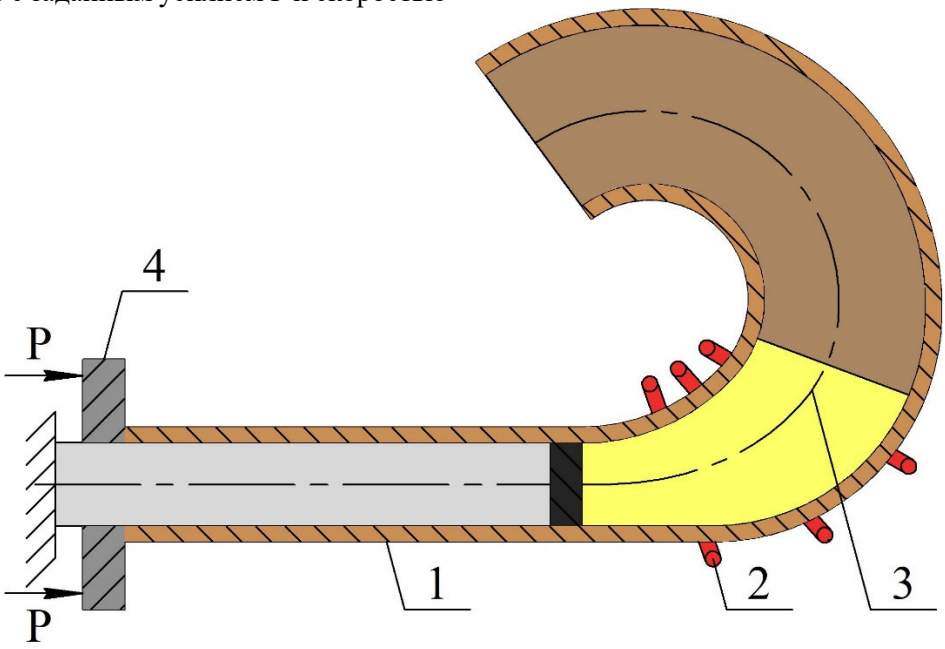

Рис. 2. Схема протяжки по рогообразному сердечнику

Способ горячей протяжки по рогообразному сердечнику в настоящее время внедряется в производственных условиях на предприятии ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ» (рис. 3) для изготовления отводов крутоизогнутых ⌀57х5 мм из труб марки 08Х18Н10Т по ТУ 14-3Р-197-2001 на уста-

новке УПО-100. Эти отводы используются в трубопроводах котлов атомных электростанций. В качестве оснастки применяется рогообразный сердечник, выполненный из жаропрочной стали марки 1Х14Н75Ю5Т3Л в соответствии с ТУ 1-812-0055-81.

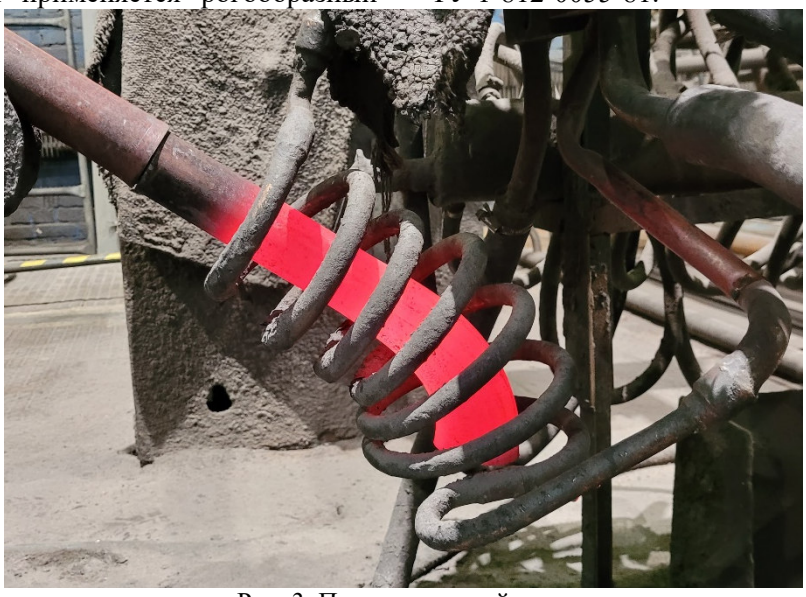

Рис. 3. Процесс горячей протяжки

Методика. Проблема заключается в том, что в процессе изготовления крутоизогнутых отводов из жаропрочной стали марки 08Х18Н10Т происходит разрыв сердечника, как правило, в начале деформирующей зоны.

Для определения основных причин были проведены эксперименты.

Из труб ⌀45х6 марки 08Х18Н10Т и стали 20 производилась протяжка отводов ⌀57х5 по рогообразному сердечнику из жаропрочной стали 1Х14Н75Ю5Т3Л. Использовалась оснастка от нескольких поставщиков.

При протяжке заготовки из аустенитной стали произошел разрыв сердечника №1 через 50 мм от начала деформирующей зоны (рис. 4). Давление пресса в момент разрыва составило 40–45 атм, температура нагрева заготовки была в районе 1000-1060 °С, скорость протяжки колебалась от 8 до 9 мм/с.

Сердечник №2 повел себя аналогичным образом: при заходе заготовки из аустенитной стали на калибрующую часть, произошел разрыв оснастки в начале деформирующей части. В момент разрыва давление пресса достигло 40 атм, а температура нагрева заготовки не превышала 950 °С.

Процесс формообразования отвода из углеродистой стали прошел стабильно при давлении пресса 30-40 атм и температуре нагрева заготовки 900–950 °С.

Во время осмотра вышедшей из строя оснастки были обнаружены многочисленные трещины на цилиндрической и деформирующей частях сердечника, вероятно, являющиеся концентраторами напряжения, вследствие чего мог произойти разрыв.

Рис. 4. Разрыв сердечника

Проблема разрыва сердечника может быть устранена решением комплекса задач:

- Определения оптимального материала сердечника;
- Нахождения оптимальной конструкции и геометрии сердечника при заданных условиях;
- Определения оптимальных температурно-силовых режимов.

В соответствии с этими задачами необходимо определить механические и технологические свойства материала, обеспечивающие требуемые режимы формообразования. А также провести сравнительный анализ возможных вариантов подобранных материалов для работы в условиях рассматриваемого технологического процесса. При этом наиболее целесообразным будет использование методов имитационного моделирования напряженно-деформированных состояний конструкций сердечника из различных материалов.

Для решения задачи нахождения оптимальной конструкции и геометрических параметров сердечника необходимо выполнить анализ конструкций, методик расчетов их геометрических параметров на основе патентных исследований и литературного обзора в том числе справочных и научно-технических источников.

Для определения оптимальных силовых и температурных режимов, реализуемых в ходе процесса формообразования необходимо провести анализ фактических температур в зоне формообразования. Особенность процесса является необходимость периодической дозагрузки заготовок в подающее устройство с прерыванием рабочей подачи. В связи с этим требуется анализ изменений температур в различных участках в зоне деформирования, которые проявляются в силу инертности процесса нагрева заготовок.

Основная часть.

Известно, что глубина прогрева аустенитных сталей в холодном и горячем состоянии отличается незначительно [17], из этого следует, что рогообразный сердечник при протяжке заготовок из аустенитной стали нагревается в большей степени (с поверхностных слоев к центру), т.к. отсутствует температурный перепад между заготовкой и оснасткой, это приводит к значительному сокращению стойкости оснастки.

Существуют сердечники разной конструкции и геометрии [1818], в первом приближении – это изогнутый стержень (рис. 5), состоящий из следующих частей:

1. Хвостовик предназначен для крепления к штанге, по которой подаются заготовки к сердечнику;
2. Направляющая часть является продолжением штанги;
3. Переходная часть служит для правильного позиционирования заготовки при наталкивании на сердечник;
4. Деформирующая (формообразующая) часть предназначена для постепенного придания заготовке основной геометрии и размеров будущего отвода;
5. Калибрующая часть необходима для придания отводу правильной (спиралевидной) и точной формы.

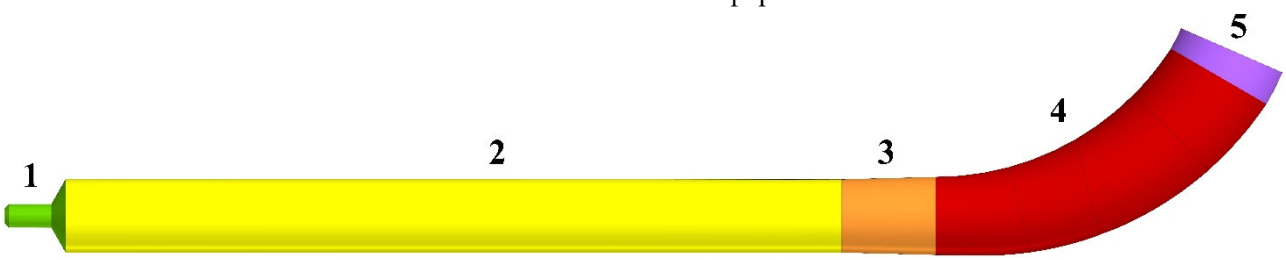

Рис. 5. Обобщённая схема рогообразного сердечника

В процессе патентного анализа были обозначены работы, посвященные вопросам геометрии сердечника. Так для устранения эллипсности, спиральности геометрической оси, утяжки переднего конца и повышенного расхода материала было предложено формообразующую часть разделить на три зоны: предварительной деформации, окончания деформации и калибрующей, что позволит улучшить качество получаемых отводов и снизить расход металла на 8–15 % [19].

Проблема искажения формы отвода ввиду повышенного усилия протяжки затрагивается в работе [20]. Исправление формы можно достигнуть выполнением наружной образующей сердечника по дуге, сопрягаемой с дугой на участке за рабочим профилем, эквидистантной внутренней дуги на том же участке.

Для повышения качества получаемых отводов калибрующую часть можно выполнить сечениями разных диаметров, при этом диаметр калибрующей части, прилегающей к формообразующей, выполнен большим диаметра другого участка [21].

Тот же эффект можно достичь выполнением калибрующей части с переменным по форме сечением, круглым на стыке с деформирующей ча-

стью и постепенно переходящим в овал с сохранением периметра по всей длине и расположением оси овала в плоскости изгиба сердечника. При этом меньшая ось овала не должна превышать внутреннего диаметра готового отвода [22].

В случае отхода заготовки от поверхности сердечника, происходит искажение формы концов отвода. В работе [23] деформирующую часть предложено выполнить по синусоидальному закону (1), что обеспечит плавные соединения между переходной, деформирующей и калибрующей частями сердечника.

$$\Delta d = \frac{D_0 - d_0}{2}\left[sin\pi \cdot \left(\frac{l}{L} - \frac{1}{2}\right) + 1\right] \qquad (1)$$

Похожий результат можно получить благодаря приданию формы эллипса деформирующей части [24], причем наибольшая разница между полуосями эллипса определяется соотношением (2):

$$\frac{D-d_0}{4} \le b - a \le 2 \cdot \frac{D-d_0}{3} \qquad (2)$$

Цель получения равнонапряженных отводов может быть достигнута изменением формы деформирующей части сердечника 3, выполненной в виде симметричного овала, который очерчен с выпуклой и вогнутой сторон двумя окружностями разных радиусов (Рис. 6). Радиусы плавно увеличиваются от начала до конца участка. К окружностям проведены две касательные прямые. Окружность большего радиуса располагается на вогнутой части участка [25].

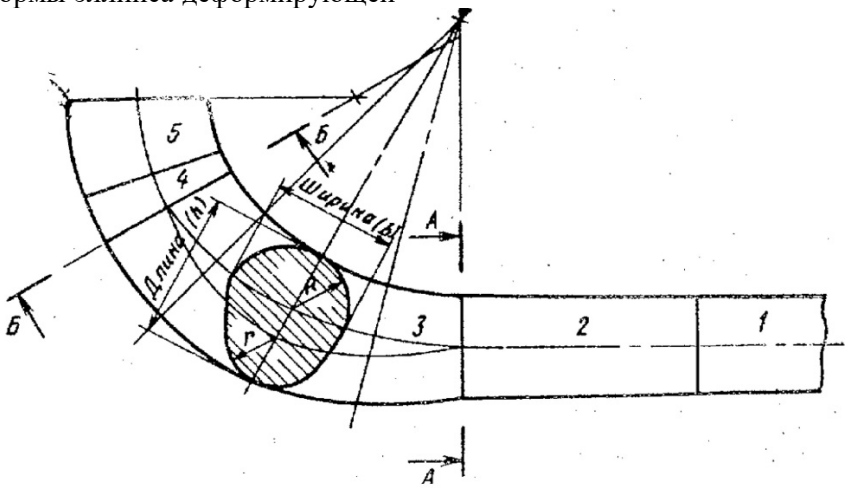

Рис. 6. Деформирующая часть сердечника в виде симметричного овала

Повышение прочности сердечника возможно за счет увеличения жесткости на изгиб участка, имеющего наименьший момент сопротивления изгибу в круглом сечении $W_к$ и овальном $W_о$:

$$W_к = 0{,}1 \times d^3 \qquad (3)$$

$$W_о = \frac{b \times h^2}{6} \qquad (4)$$

Конструктивным особенностям сердечника, посвящены следующие работы. Так для повышения жесткости полого сердечника [26] продольную полость рекомендуется выполнить с поперечным сечением в виде эллипса, большая ось которого расположена в плоскости симметрии сердечника [27]. Замкнутая полость заполнена средой, передающей давление (вода или пар). При нагреве в замкнутой полости за счет парообразования создается давление, величина которого регулируется настройкой предохранительного клапана. Причем для большей жесткости продольную полость для подачи жидкости можно сместить относительно оси [2828]. Принципиально отличающаяся конструкция представлена в работах [29–32].

Тот же эффект достигается выполнением деформирующей части сердечника с выступами по внешней образующей [33], скругленными по радиусам на половине периметра поперечного сечения и впадинами, причем размеры выступов и впадин определяются по зависимостям (5–7):

$$H_i = \frac{A_i}{20} \qquad (5)$$

$$R_i = \frac{D_i}{2} \qquad (6)$$

$$r = (0.3 - 0.5) \cdot D_i \qquad (7)$$

Получение отводов требуемого качества без необходимости в объемной правке можно достичь выполнением стабилизирующего участка в виде части тора, ограниченного углом не менее 90° с диаметром сечения, как у калибрующего участка. Такая конструкция позволяет увеличить производительность процесса горячей протяжки и повысить качество отводов благодаря снятию внутренних напряжений в материале отвода [34]. Тот же эффект можно достичь выполнением дополнительного калибрующего участка [35].

Для возможности гибки труб на малые радиусы без потери устойчивости стенки заготовки на

вогнутой стороне сердечника необходимо выполнить паз, в котором установлена система вращающихся роликов, центр кривизны образующих которых совпадает с центром кривизны поперечных сечений сердечника, проходящих через оси вращения роликов [36].

Получение отводов разного радиуса гиба или диаметра возможно при использовании модульных конструкций: дополнительного формоизменяющего (деформирующего) участка в виде съемной секторной части тора с радиусом гиба отвода [37] или в виде съемной втулки направляющего участка [38].

Образование задиров и рисок на внутренней части отводов вследствие налипания металла трубы на рабочую поверхность калибрующей части сердечника можно предотвратить. Для этого предложено использовать съемную калибрующую часть, выполненную из материала с низкой магнитной проницаемостью (12Х18Н10Т или ВНЛ-3) [39].

Повышенные технологические усилия, пониженный срок службы пресса, невозможность изготовления тонкостенных отводов возможно устранить путем выполнения восьми симметричных относительно плоскости гиба канавок вдоль всей формоизменяющей (деформирующей) и в начале калибрующей частей сердечника [40]. Такая конструкция приводит к уменьшению площади контакта на 40–50 %. Выполнение канавок винтовой формы предложено для устранения формирования продольных выступов, копирующих канавки формоизменяющего (деформирующего) участка [41].

Выводы

1. Проведен анализ основных способов изготовления крутоизогнутых отводов, определен оптимальный вариант, коим является горячая протяжка по рогообразному сердечнику.

2. Проведен анализ способа горячей протяжки и схемы процесса формообразования отвода крутоизогнутого. Выдвинуто предположение, что такие факторы как: материал заготовки и сердечника, температурно-силовые режимы, конструкция и геометрия сердечника, могут оказывать влияние на процесс формообразования.

3. Проведен анализ проблемы предприятия, из-за которой оснастка, применяемая для изготовления крутоизогнутых отводов из жаропрочной стали, преждевременно выходит из строя. Сформулирован комплекс задач, решение которых может привести к устранению проблемы.

4. Выполнен краткий анализ конструкций, методик расчетов их геометрических параметров на основе патентных исследований и литературного обзора в том числе справочных и научно-технических источников.

Источник финансирования. *Исследование выполнено в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поручения президента // Президент России URL: http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders/73759#assignment-8 (дата обращения: 02.10.2024).

2. Халевицкий Ю.В., Коновалов А.В. Методы решения СЛАУ в конечно-элементных программных комплексах, моделирующих деформации твёрдых тел // Фундаментальные исследования. 2015. № 8–2. С. 338–344.

3. Тимофеев С.П., Гринек А.В., Хуртасенко А.В., Бойчук И.П. Технология механической обработки, цифровое моделирование и реализация устройства для контроля формы крупногабаритных деталей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2022. Т. 24, № 2. С. 6–24. DOI 10.17212/1994-6309-2022-24.2-6-24.

4. Хуртасенко В.А., Шрубченко А.В. Математическая модель для оптимизации параметров обработки поверхностей качения технологических агрегатов мобильным оборудованием // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 4. С. 144–150. DOI 10.34031/article_5cb1e65b635e41.79569989

5. Марьин Б.Н., Иванов Ю.Л., Макаров К.А., Муравьев В.И., Одинокое В.И. Изготовление трубопроводов гидрогазовых систем ЛА. М.: Машиностроение, 1998. 400 с.

6. Марьин Б.Н., Феоктистов С.И., Колыхалов Д.Г., Куриный В.В., Иванов И.Н. Исследование совмещенных процессов при изготовлении деталей летательных аппаратов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2016. Т.1, № 2(26). С. 34–41.

7. Тавастшерна Р.И. Изготовление и монтаж технологических трубопроводов. М.: Стройиздат, 1986. 286 с.

8. Братухин, А.Г. Иванов Ю.Л. Современные технологии авиастроения: учебное пособие. М.: Машиностроение, 1999. 832 с.

9. Отводы штампосварные // ПКФ URL: https://www.metelement.ru/catalog/otvody/shtampo svarnye-otvody/ (дата обращения: 02.10.2024).

10.Отводы секционные сварные // РЕММАШГРУПП URL: https://remmg.ru/service/otvody-sekcionnye-svarnye/ (дата обращения: 02.10.2024).

11.Отводы точеные (угольники) // Серебряный мир 2000 URL:

https://www.sm2000.ru/katalog-detaley-truboprovodov/detali-truboprovodov/otvodi/otvodi-tochenie-ugolyniki (дата обращения: 02.10.2024).

12.Гнутые отводы - все что нужно знать // Авангард URL: https://www.polycoat.ru/about/articles/gnutye-otvody-vse-chto-nuzhno-znat.html (дата обращения: 02.10.2024).

13.Гальперин А.И. Машины и оборудование для гнутья труб. М.: МАШГИЗ, 1963. 156 с.

14.Шувалов, Ю.Б. Горячая протяжка крутоизогнутых отводов на полых рогообразных сердечниках // Химическое и нефтяное машиностроение. 1991. № 2. С. 36-37.

15.Альбов И.Н. Гнутье труб с индукционным нагревом // Кузнечно-штамповочное производство. 1963. № 4. С. 21–27.

16.Феоктистов С.И., Марьин Б.Н., Марьин С.Б., Колыхалов Д.Г. Теория и практика изготовления элементов трубопроводов летательных аппаратов. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2013. 88 с.

17.Гуляев А.П. Металловедение. Учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1986. 544 с.

18.Макаров К.А., Марьин Б.Н., Петров А.М. Исследование процесса тибки-раздачи трубных заготовок по рогообразному сердечнику с нагревом // Кузнечно-штамповочное производство. 1992. №5. С. 4–6.

19.А. с. 165640, СССР, МПК B21D 9/12. Рогообразный сердечник для изготовления отводов из трубных заготовок / А.С. Витенберг, В.Е. Леонтович; В.Е. Леонтович. № 748582/25-8; заявл. 18.10.1961; опубл. 12.10.1964, Бюл. № 3. 2 с.

20.А. с. 172262, СССР, МПК B21D 9/12. Рогообразный сердечник / А.С. Витенберг, Г.А. Грозин; заявитель и патентообладатель государственный комитет по делам изобретений и открытий. № 750771/25-27; заявл. 30.10.1961; опубл. 29.06.1965, Бюл. № 13. 2 с.

21.А. с. 515550, СССР, МПК B21D 9/12. Рогообразный сердечник для гибки труб / А.Д. Игнатьев; заявитель и патентообладатель государственный комитет по делам изобретений и открытий. № 1784595; заявл. 16.05.1972; опубл. 30.05.1976, Бюл. № 20. 2 с.

22.А. с. 904836, СССР, МПК B21D 9/12. Рогообразный сердечник / Н.М. Белкин, В.С. Толстых; заявитель и патентообладатель ново-синеглазовский комбинат строительных конструкций. № 2825180; заявл. 08.10.1973; опубл. 15.02.1982, Бюл. № 6. 2 с.

23.А. с. 995980, СССР, МПК B21D 9/12. Рогообразный сердечник / В.А. Соловейчик; заявитель и патентообладатель всесоюзный научно-исследовательский институт по монтажным и специальным строительным работам. № 2956079; заявл. 11.07.1980; опубл. 15.02.1983, Бюл. № 6. 4 с.

24.А. с. 1391770, СССР, МПК B21D 9/12. Рогообразный сердечник / Ю.Б. Шувалов, В.А. Куренков, Р.И. Тавастшерна, Е.Г. Колеватов, И.Л. Рева; заявитель и патентообладатель всесоюзный научно-исследовательский институт по монтажным и специальным строительным работам. № 4122021; заявл. 26.06.1986; опубл. 30.04.1988, Бюл. № 16. 3 с.

25.А. с. 963611, СССР, МПК B21D 9/12. Рогообразный сердечник / В.И. Назаров, С.В. Баранов, В.Д. Нохрин, А.А. Шатров, А.М. Кабуренков; заявитель и патентообладатель челябинский филиал специального проектно-конструкторского бюро "проектнефтегазспецмонтаж" министерства строительства предприятий нефтяной и газовой промышленности СССР, новосинеглазовский комбинат строительных конструкций. № 3284389; заявл. 07.05.1981; опубл. 07.10.1982, Бюл. № 37. 3 с.

26.А. с. 871890, СССР, МПК B21D 9/12. Рогообразный сердечник / Г.П. Ким, Ю. И. Рубенчик, А. Х. Акмухаметов, О.Ф. Фролов, Р.М. Фельдман; заявитель и патентообладатель всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт технологии химического и нефтяного аппаратостроения. № 2849993; заявл. 13.12.1979; опубл. 15.10.1981, Бюл. № 38. 3 с.

27.А. с. 564906, СССР, МПК B21D 9/12. Рогообразный сердечник / А.В. Слезовский; заявитель и патентообладатель государственный комитет по делам изобретений и открытий. № 2002768; заявл. 11.13.1974; опубл. 15.07.1977, Бюл. № 26. 2 с.

28.А. с. 515551, СССР, МПК B21D 9/12. Рогообразный сердечник для гибки труб / А.В. Слезовский; заявитель и патентообладатель государственный комитет по делам изобретений и открытий. № 2023610; заявл. 13.05.1974; опубл. 30.05.1976, Бюл. № 20. 2 с.

29.А. с. 880560, СССР, МПК B21D 9/12. Рогообразный сердечник для гибки труб / В.И. Павлов, Ю.С. Сурин, В.А. Куренков, Р.И. Тавастшерна; заявитель и патентообладатель специальное конструкторское бюро всесоюзного научно-исследоватеьского института по монтажным и специальным строительным работам. № 2895322; заявл. 18.03.1980; опубл. 15.11.1981, Бюл. № 42. 3 с.

30.А. с. 856615, СССР, МПК B21D 9/12. Полый рогообразный сердечник для изготовления отводов из трубных заготовок / В.А. Куренков, Р.И. Тавастшерна, Ю.С. Летников, И.Л. Рева; заявитель и патентообладатель всесоюзный

научно-исследовательский институт по монтажным и специальным строительным работам. № 2689472; заявл. 29.11.1978; опубл. 23.08.1981, Бюл. № 31. 3 с.

31.А. с. 584931, СССР, МПК B21D 9/12. Рогообразный сердечник / М.А. Гаскель, И.Г. Шехриладзе; заявитель и патентообладатель государственный комитет по делам изобретений и открытий. № 2384471; заявл. 07.07.1969; опубл. 25.12.1977, Бюл. № 47. 3 с.

32.А. с. 631237, СССР, МПК B21D 9/12. Рогообразный сердечник для гибки труб / В.Л. Гудков, Ю.С. Летников, В.П. Абросов, А.П. Уфимцев; заявитель и патентообладатель всесоюзный государственный проектно-конструкторский институт по индустриализации монтажных работ "гипромонтажиндустрия". № 2469089; заявл. 30.03.1977; опубл. 05.11.1978, Бюл. № 41. 2 с.

33.А. с. 1224042, СССР, МПК B21D 9/12. Рогообразный сердечник / Б. Н. Марьин, заявитель и патентообладатель предприятие п/я м-5873. № 3658718; заявл. 12.09.1983: опубл. 15.04.1986, Бюл. №14. 2 с.

34.А. с. 566649, СССР, МПК B21D 9/12. Рогообразный сердечник для изготовления из трубных заготовок отводов с центральным углом не более 90° / А.М. Киямов; заявитель и патентообладатель строительно-монтажная сварочная лаборатория треста "востокметаллургмонтаж". № 2047654; заявл. 29.07.1974; опубл. 30.07.1977, Бюл. № 28. 2 с.

35.А. с. 642047, СССР, МПК B21D 9/12. Рогообразный сердечник / В.И. Голенкин, А.В. Соков, В.И., Ваулин, П.А. Лазарев, А.П. Уфимцев; заявитель и патентообладатель уральский завод монтажных изделий. № 2495517; заявл. 06.06.1977; опубл. 15.01.1979, Бюл. № 2. 2 с.

36.А. с. 698695, СССР, МПК B21D 9/12. Рогообразный сердечник для изготовления крутоизогнутых патрубков / М.Н. Горбунов, В.И. Ершов, М.Ф. Каширин, М.В. Кондратьев, В.А. Половцев; заявитель и патентообладатель Московский авиационный технологический институт им. К.Э. Циолковского. № 2622476; заявл. 02.06.1978; опубл. 25.11.1979, Бюл. № 43. 2 с.

37.А. с. 741988, СССР, МПК B21D 9/12. Рогообразный сердечник для изготовления отводов из трубных заготовок / Б.Н. Марьин; заявитель и патентообладатель предприятие п/я м-5873. № 2715377; заявл. 22.01.1979; опубл. 25.06.1980, Бюл. № 23. 3 с.

38.А. с. 863069, СССР, МПК B21D 9/12. Рогообразный сердечник для изготовления отводов из трубных заготовок / Б.Н. Марьин; заявитель и патентообладатель предприятие п/я м-5873. № 2829538; заявл. 19.10.1979; опубл. 15.09.1981, Бюл. № 34. 3 с.

39.А. с. 1061882, СССР, МПК B21D 9/12. Рогообразный сердечник для изготовления отводов из трубных заготовок / Б.Н. Марьин, В.Ф. Баженов, П.В. Фролов; заявитель и патентообладатель предприятие п/я м-5873, научно-исследовательский отдел -8320 предприятия п/я р-6115. № 3499259; заявл. 14.10.1982; опубл. 23.12.1983, Бюл. № 47. 2 с.

40.А. с. 1393496, СССР, МПК B21D 9/12. Рогообразный сердечник для изготовления отводов / Ю.Б. Шувалов, В.А. Кочнов, Т.В. Розавнова, А.В. Эльцин; заявитель и патентообладатель государственный комитет по делам изобретений и открытий. № 3993861; заявл. 23.12.1985; опубл. 07.05.1988, Бюл. № 17. 2 с.

41.Пат. 213440, Российская федерация, МПК B21D 9/12. Рогообразный сердечник / В.Я. Дуганов, Н.А. Архипова; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова". № 2022113231; заявл. 17.05.2022; опубл. 12.09.2022, Бюл. № 26. 6 с.

Информация об авторах:

Баранов Денис Сергеевич, ассистент кафедры технологии машиностроения. E-mail: den-3218@yandex.ru Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Хуртасенко Андрей Владимирович, к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения. E-mail: hurtintbel@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Воронкова Марина Николаевна, к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения. E-mail: mkuzko@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дуганов Владимир Яковлевич, к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения. E-mail: dvybgtu@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Латышев Сергей Сергеевич, к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения. E-mail: latser10@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 03.10.2024 г.
© Баранов Д.С., Хуртасенко А.В., Воронкова М.Н., Дуганов В.Я., Латышев С.С., 2025

Baranov D.S., Khurtasenko A.V., Voronkova M.N., Duganov V.YA., Latyshev S.S.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
**E-mail: den-3218@yandex.ru*

THE PROBLEM OF PRODUCING SHARPLY BENT ELBOWS FROM HEAT-RESISTANT STEELS

Abstract. *The article describes a sharp-bent elbow, its purpose, technical characteristics and parameters affecting the operational properties. Common types of elbows and methods of their manufacture are considered. A brief analysis of manufacturing methods is made. The optimal method for manufacturing sharp-bent elbows is determined, which is hot drawing on a horn-shaped core due to high productivity and minimal material waste.*

The essence of the hot drawing method on a horn-shaped core is described, a diagram of the process of manufacturing a sharp-bent elbow is given. A generalized diagram of the design of a horn-shaped core consisting of a shank, a guide, a transition, a deforming and a calibrating part is given.

The problem of an enterprise that arises in the process of manufacturing sharp-bent elbows from heat-resistant steel and leads to premature failure of the equipment is described. Possible factors influencing the shaping process have been preliminarily determined, including: the material of the workpiece and core, temperature and force conditions, and the design and geometry of the core. The tasks have been formulated, the comprehensive solution of which can help eliminate the problem.

To partially solve the problem of determining the optimal design and geometry of the horn-shaped core, a patent analysis of the existing tooling, prototypes, and utility models was performed, and a brief description is provided.

Keywords: *horn core, sharp bend, hot drawing, heat-resistant steels, tooling durability*

REFERENCES

1. Presidential instructions. President of Russia. [Porucheniya prezidenta. Prezident Rossii]. URL: http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders/73759#assignment-8 (date accessed: 02.10.2024). (rus)

2. Khalevitsky Yu.V., Konovalov A.V. Methods for solving SLAE in finite element software packages modeling deformations of solids. Fundamental research. [Metody resheniya SLAU v konechno-elementnyh programmnyh kompleksah, modeliruyushchih deformacii tvyordyh tel. Fundamental'nye issledovaniya]. 2015. No. 8-2. Pp. 338–344. (rus)

3. Timofeev S.P., Grinek A.V., Khurtasenko A.V., Boychuk I.P. Technology of mechanical processing, digital modeling and implementation of a device for controlling the shape of large-sized parts. Metal processing (technology, equipment, tools). [Tekhnologiya mekhanicheskoj obrabotki, cifrovoe modelirovanie i realizaciya ustrojstva dlya kontrolya formy krupnogabaritnyh detalej. Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)]. 2022. Vol. 24, No. 2. Pp. 6–24. (rus)

4. Khurtasenko V.A., Shrubchenko A.V. Mathematical model for optimization of parameters of processing of rolling surfaces of technological units by mobile equipment. [Matematicheskaya model' dlya optimizacii parametrov obrabotki poverhnostej kacheniya tekhnologicheskih agregatov mobil'nym oborudovaniem]. Bulletin of the BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 4. Pp. 144–150. DOI 10.34031/article_5cb1e65b635e41.79569989 (rus)

5. Maryin B.N., Ivanov Yu.L., Makarov K.A., Muravyov V.I., Odinokoe V.I. Manufacturing of pipelines for hydraulic gas systems of aircraft. [Izgotovlenie truboprovodov gidrogazovyh sistem LA]. Moscow: Mechanical Engineering, 1998. 400 p. (rus)

6. Maryin B.N., Feoktistov S.I., Kolykhalov D.G., Kuriny V.V., Ivanov I.N. Study of combined processes in the manufacture of aircraft parts. Scientific notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University. [Issledovanie sovmeshchennyh processov pri izgotovlenii detalej letatel'nyh apparatov. Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta]. 2016. Vol.1, No. 2(26). Pp. 34–41. (rus)

7. Tavastsherna R.I. Manufacturing and installation of process pipelines. [Izgotovlenie i montazh tekhnologicheskih truboprovodov]. Moscow: Stroyizdat, 1986. 286 p. (rus)

8. Bratukhin, A.G. Ivanov Yu.L. Modern technologies of aircraft construction: a textbook. [Sovremennye tekhnologii aviastroeniya: uchebnoe posobie]. Moscow: Mechanical Engineering, 1999. 832 p. (rus)

9. Stamped-welded bends. [Otvody shtamposvarnye. PCF]. URL: https://www.metelement.ru/catalog/otvody/shtamposvarnye-otvody/ (date of access: 02.10.2024). (rus)

10.Sectional welded bends. [Otvody sekcionnye svarnye. REMMASHGRUPP]. URL: https://remmg.ru/service/otvody-sekcionnye-svarnye/ (date accessed: 02.10.2024). (rus)

11.Turned bends (elbows) Silver World 2000. [Otvody tochenye (ugol'niki). Serebryanyj mir 2000]. URL: https://www.sm2000.ru/katalog-detaley-truboprovodov/detali-truboprovodov/otvodi/otvodi-tochenie-ugolyniki (date of access: 02.10.2024). (rus)

12.Bent bends p everything you need to know. Avangard. [Gnutye otvody - vse chto nuzhno znat'. Avangard] URL: https://www.polycoat.ru/about/articles/gnutye-otvody-vse-chto-nuzhno-znat.html (date accessed: 02.10.2024). (rus)

13.Galperin A.I. Machines and equipment for pipe bending. [Mashiny i oborudovanie dlya gnut'ya trub]. Moscow: MASHGIZ, 1963. 156 p. (rus)

14.Shuvalov Yu.B. Hot drawing of sharply curved bends on hollow horn-shaped coresю Chemical and oil engineering. [Goryachaya protyazhka krutoizognutyh otvodov na polyh rogoobraznyh serdechnikah. Himicheskoe i neftyanoe mashinostroenie]. 1991. No. 2. Pp. 36–37. (rus)

15.Albov I.N. Bending of pipes with induction heating. Forging and stamping production. [Gnut'e trub s indukcionnym nagrevom. Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo]. 1963. No. 4. Pp. 21–27. (rus)

16.Feoktistov S.I., Maryin B.N., Maryin S.B., Kolykhalov D.G. Theory and practice of manufacturing elements of aircraft pipelines. [Teoriya i praktika izgotovleniya elementov truboprovodov letatel'nyh apparatov]. Komsomolsk-on-Amur: FGBOU VPO "KnAGTU", 2013. 88 p. (rus)

17.Gulyaev A.P. Metal Science. Textbook for Universities. 6th ed., revised and enlarged. [Metallovedenie. Uchebnik dlya vuzov. 6-e izd., pererab. i dop]. Moscow: Metallurgy, 1986. 544 p. (rus)

18.Makarov K.A., Maryin B.N., Petrov A.M. Study of the process of tapping and expanding tubular blanks on a horn-shaped core with heating. Forging and stamping production. [Issledovanie processa tibki-razdachi trubnyh zagotovok po rogoobraznomu serdechniku s nagrevom. Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo]. 1992. No. 5. Pp. 4–6. (rus)

19. Vitenberg A.S., Leontovich V.E. Horn-shaped core for manufacturing bends from tubular blanks. Patent RF, no. 748582/25-8, 1964.

20.Vitenberg A.S., Grozin G.A. Horn-shaped core. Patent RF, no. 750771/25-27, 1965.

21.Ignatiev A.D. Horn-shaped core for bending pipes. Patent RF, no. 1784595, 1976.

22.Belkin N.M., Tolstykh V.S. Horn-shaped core. Patent RF, no. 2825180, 1982.

23.Soloveichik V.A. Horn-shaped core. Patent RF, no. 2956079, 1983.

24.Shuvalov Yu.B., Kurenkov V.A., Tavastsherna R.I., Kolevatov E.G., Reva I.L. Horn-shaped core. Patent RF, no. 4122021, 1988.

25.Nazarov V.I., Baranov S.V., Nokhrin V.D., Shatrov A.A., Kaburenkov A.M. Horn-shaped core. Patent RF, no. 3284389, 1982.

26.Kim G.P., Rubenchik Yu. I., Akmukhametov A.Kh., Frolov O.F., Feldman R.M. Horn-shaped core. Patent RF, no. 2849993, 1981.

27.Slezovsky A.V. Horn-shaped core. Patent RF, no. 2002768, 1977.

28.Slezovsky A.V. Horn-shaped core for bending pipes. Patent RF, no. 202361, 1976.

29.Pavlov V.I., Surin Yu.S., Kurenkov V.A., Tavastsherna R.I. Horn-shaped core for bending pipes. Patent RF, no. 2895322, 1981.

30.Kurenkov V.A., Tavastsherna R.I., Letnikov Yu.S., Reva I.L. Hollow horn-shaped core for manufacturing bends from tubular blanks. Patent RF, no. 2689472, 1981.

31.Gaskel M.A., Shekhriladze I.G. Horn-shaped core. Patent RF, no. 2384471, 1977.

32.Gudkov V.L., Letnikov Yu.S., Abrosov V.P., Ufimtsev A.P. Horn-shaped core for bending pipes. Patent RF, no. 2469089, 1978.

33.Maryin B.N. Horn-shaped core. Patent RF, no. 3658718, 1986.

34.Kiyamov A.M. Horn-shaped core for manufacturing bends with a central angle of no more than 90° from pipe blanks. Patent RF, no. 2047654, 1977.

35.Golenkin V.I., Sokov A.V., Vaulin V.I., Lazarev P.A., Ufimtsev A.P. Horn-shaped core. Patent RF, no. 2495517, 1979.

36.Gorbunov M.N., Ershov V.I., Kashirin M.F., Kondratyev M.V., Polovtsev V.A. Horn-shaped core for the manufacture of steeply curved pipes. Patent RF, no. 2622476, 1979.

37.Maryin B.N. Horn-shaped core for manufacturing bends from tubular blanks. Patent RF, no. 2715377, 1980.

38.Maryin B.N. Horn-shaped core for manufacturing bends from tubular blanks. Patent RF, no. 2829538, 1981.

39.Maryin B.N., Bazhenov V.F., Frolov P.V. Horn-shaped core for manufacturing bends from tubular blanks. Patent RF, no. 3499259, 1983.

40.Shuvalov Yu.B., Kochnov V.A., Rozavnova T.V., Eltsin A.V. Horn-shaped core for manufacturing bends. Patent RF, no. 3993861, 1988.

41.Duganov V.Ya., Arkhipova N.A. Horn-shaped core. Patent RF, no. 2022113231, 2022.

Information about the authors

Baranov, Denis S, Assistant. E-mail: den-3218@yandex.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova, 46.

Khurtasenko, Andrey V, PhD. E-mail: hurtintbel@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

Voronkova Marina N, PhD. E-mail: mkuzko@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

Duganov Vladimir YA, PhD. E-mail: dvybgtu@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

Latyshev Sergey S, PhD. E-mail: latser10@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

Received 03.10.2024

Для цитирования:

Баранов Д.С., Хуртасенко А.В., Воронкова М.Н., Дуганов В.Я., Латышев С.С. Проблема производства крутоизогнутых отводов из жаропрочных сталей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 4. С. 121–132. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-121-132

For citation:

Baranov D.S., Khurtasenko A.V., Voronkova M.N., Duganov V.YA., Latyshev S.S. The problem of producing sharply bent elbows from heat-resistant steels. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 4. Pp. 121–132. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-121-132