

УДК 621.7

DOI: 10.22213/2413-1172-2024-1-44-54

Анализ технологических параметров процесса редуцирования длинномерных трубных заготовок с фигурными отверстиями

Д. С. Плешаков, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Н. В. Тепин, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

А. В. Щенятский, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Приводится описание заготовки и инструмента, которые применяются для моделирования технологического процесса в программном обеспечении Q-Fort, чтобы в дальнейшем определить режимы процесса редуцирования длинномерных трубных заготовок с фигурными отверстиями. Результаты исследования достигнуты путем моделирования инструмента и заготовок с внешним диаметром 16,0...16,5 мм, применяемых для получения изделий в машиностроении. Приведены графики возникающих усилий и средних напряжений в точках контакта матрицы с заготовкой, образующихся в процессе редуцирования. Рассматриваются три зоны контакта: начало процесса запрессовки заготовки в матрицу, в середине процесса и в конце процесса редуцирования. Рассматривается (оценивается) влияние размера внешнего диаметра заготовки на технологические параметры самого процесса. Выявлено, что при большем внешнем диаметре заготовки в процессе редуцирования происходит ее удлинение. Кроме того, описывается построение математических моделей и определение параметров процесса редуцирования длинномерных трубных заготовок с фигурными отверстиями на основе численных методов, а именно метода конечных элементов, который применяется в проводимом исследовании. В зависимости от особенностей технологического процесса выявлены различные схемы распределения контактного взаимодействия и действия технологических нагрузок. Рассмотрены наиболее широко используемые схемы редуцирования. Реализация методом конечных элементов известного уравнения Лагранжа для инструментов и заготовки, участвующих в технологическом процессе, приводит к необходимости решения пяти связанных систем уравнений, приведенных в данной статье. Деформации в каждом дискретном элементе математической модели определяются уравнением Коши. Решается упругопластическая задача для разработанных граничных условий. Целью исследования является построение математических моделей, результаты которых позволяют провести анализ технологических параметров процесса редуцирования длинномерных трубных заготовок с фигурными отверстиями и сделать вывод о возможности применения рассматриваемой технологии при различных режимах с учетом отклонений геометрических форм для получения качественных фигурных профилей нарезки детали.

Ключевые слова: технологические параметры, длинное фигурное отверстие, трубчатые изделия, объемное редуцирование, математическая модель, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, матрица, оправка.

Введение

Длинномерные трубные заготовки широко применяются в машиностроении для изготовления деталей, например, стволов стрелкового оружия. Стрелковое оружие – это чаще всего огнестрельное оружие, в котором используется сила давления газов, образующихся при сгорании пороха или специальной горючей смеси, для выбрасывания поражающего элемента из канала ствола [1]. На сегодняшний день наиболее распространенными видами являются пневматическое и огнестрельное оружие [2], метаемый предмет которых получает импульс при взрыве заряда в канале ствола или другим способом поднятия давления в канале ствола.

Одним из основных конструктивных элементов стрелкового оружия является ствол, кото-

рый предназначен, в том числе, и для направления полета снаряда, например пули. Внутренний ствол может быть как гладким, так и иметь нарезы, которые могут выполняться на выходном участке или по всей длине. Форма, направление и число нарезов у различных фирм-производителей отличаются своей глубиной, крутизной, а также углом между образующей канала ствола и касательной к боковой поверхности поля резьбы [3, 4]. Вне зависимости от применяемого патрона или пули (пневматическое оружие) особого внимания всегда заслуживает ствол, и до сих пор задача повышения качества ствола и увеличения дальности выстрела при неизменной массе изделия остается актуальной. Наиболее эффективной и часто применяемой технологией изготовления стволов оружия является обжатие заготовки по внешней поверхности, при

этом в отверстие вставляется оправка с нанесенным профилем канала ствола (технология редуцирования) [5].

Цель исследования – построение математических моделей и анализ технологических параметров процесса редуцирования длинномерных трубных заготовок.

Моделирование процесса редуцирования в программной среде Q-Form

В отдельных научных лабораториях и производствах широко применяется метод редуцирования заготовок цилиндрического типа достаточно больших диаметров и малых соотношений длины заготовки к диаметру (Князев С. Н. Совершенствование процесса редуцирования для изготовления деталей типа «корпус» с внутренними спиральными рифлениями : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, 2016). Данный метод оказался очень эффективным и производительным [6]. Однако для деталей малого диаметра D с соотношением к длине $L = 1/7 \dots 1/12$ и более, когда может произойти потеря устойчивости и искривление оси заготовки, исследования не проводились.

Анализ существующих разработок [7–9] показал, что на данный момент известно много способов получения фигурных отверстий в длинномерных трубных заготовках, но технологии и оборудование для производства аналогичных изделий с возможностью применения объемного обжатия для получения фигурных отверстий малых диаметров в таких заготовках не описаны (см., например, Плешаков Д. С., Щенятский А. В. Анализ возможности применения объемного обжатия для получения фигурных отверстий в длинномерных трубных заготовках // Перспективы развития машиностроения : сборник статей 49-й молодежной научно-технической конференции АО «Воткинский завод» (Воткинск, 03–14 апреля 2023 г.). Ижевск : Издательство ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2023. С. 53–58).

Для снижения себестоимости изготовления трубчатых изделий с длинными фигурными отверстиями (ДФО) на основе нового ресурсосберегающего технологического процесса методом редуцирования в ИжГТУ имени М. Т. Калашникова решались задачи анализа существующих технологических процессов получения деталей. Предложена математическая модель, основанная на решении известных уравнений Коши и численной реализации с помощью метода конечных элементов [10]. Граничные условия определяются схемой обработки и конструкцией оснастки. Условия трения в зоне сопряжения

определяются из условия проскальзывания и уровня контактного давления. Для проведения исследования применялся известный программный продукт Q-Form.

Моделирование технологического процесса – это программное решение, предназначенное для анализа процессов обработки металлов давлением, термической и механической обработки, которое позволяет проверить, отработать и улучшать технологические процессы непосредственно за компьютером, а не в ходе экспериментов на производстве. Программное обеспечение Q-Form основано на методе конечных элементов (МКЭ), который позволяет разбивать сетку на заготовке на мелкие элементы для более точного расчета [11].

Для моделирования процесса были выбраны: заготовка (рис. 1), оправка (рис. 2) и матрица (рис. 3).

Геометрические размеры заготовки и их возможные отклонения приведены в таблице 1.

В качестве исследуемых параметров выбраны: напряжено-деформированное состояние (НДС) [12], заполняемость профиля оправки, сила и время запрессовки. Факторами, влияющими на процесс редуцирования на данной стадии исследования, выбраны отклонения величин геометрических размеров заготовки, которые назначены в соответствии с существующей конструкторской документацией на реальные изделия, находящиеся в открытом доступе. Геометрические параметры матрицы, такие как параметры заходной части, ширина пояса, угол выходной фаски, внешний диаметр на данной стадии исследования выбраны с учетом рекомендаций (Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки / А. В. Власов, С. А. Стебунов, С. А. Евсюков [и др.]. Москва : Издательство МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2019), однако в данном исследовании не варьировались. Помимо этого начальная вязкость смазки и температура заготовки в процессе редуцирования были неизменными. На матрицу воздействует помимо заготовки еще и упор, который также может оказывать влияние на НДС в очаге деформации [13–15]. Учет упругой деформации инструмента требует значительных вычислительных мощностей компьютера. На данной стадии исследования моделирование проводилось без учета упругопластической деформации инструмента, который находится в состоянии объемного сжатия, величина которого очень мала, следовательно, ошибка вычислений будет незначительной.

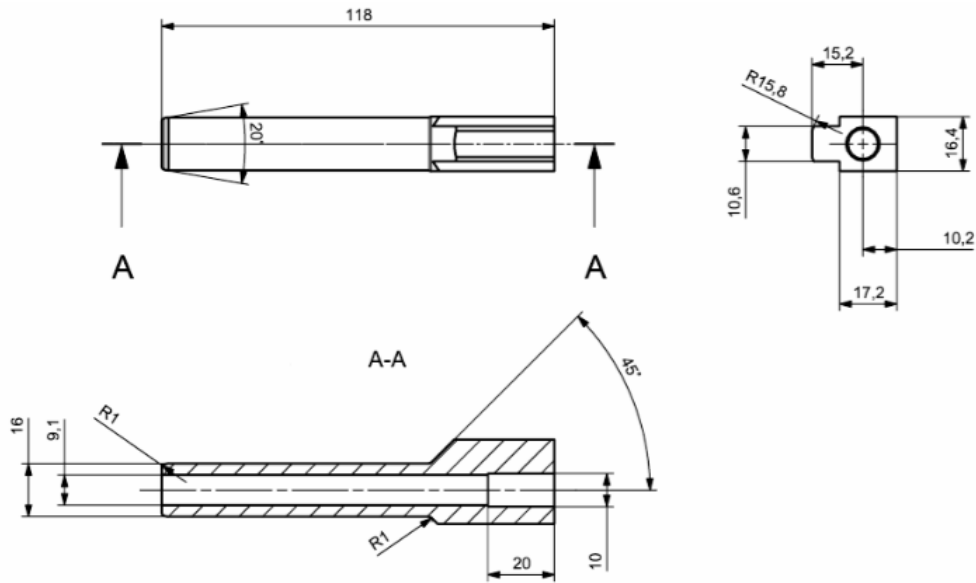


Рис. 1. Исходная заготовка

Fig. 1. The initial blank

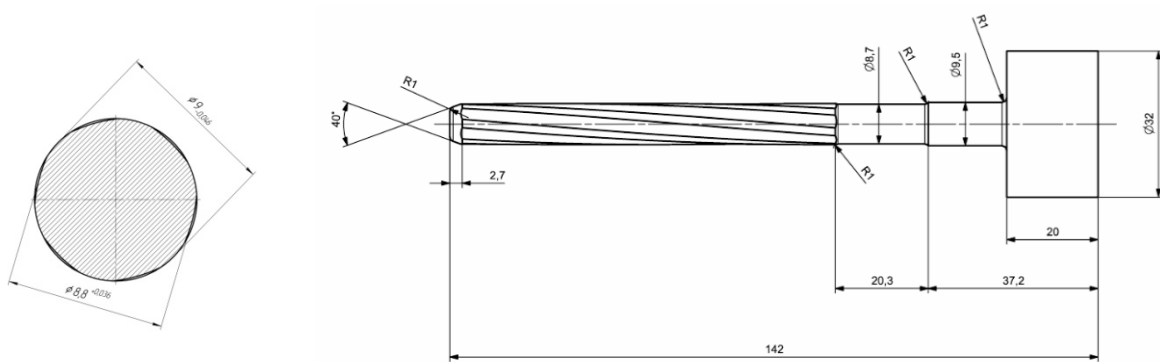


Рис. 2. Оправка

Fig. 2. Mandrel

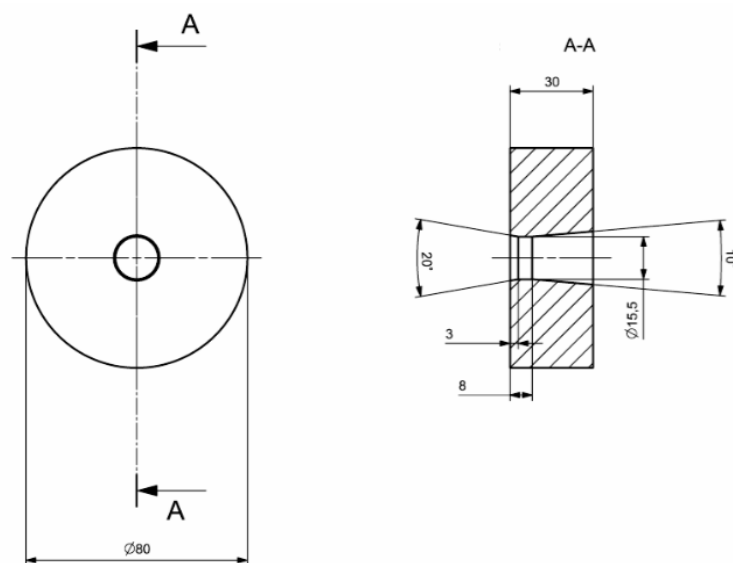


Рис. 3. Матрица

Fig. 3. The matrix

Таблица 1. Геометрические размеры заготовки

Table 1. Geometric dimensions of the blank

№	<i>D</i>	<i>d</i>	<i>L</i>
1	16,0 ± 0,2	9,1 + 0,4	118,0 ± 0,4
2	16,1 ± 0,2	9,1 + 0,4	118,0 ± 0,4
3	16,2 ± 0,2	9,1 + 0,4	118,0 ± 0,4
4	16,3 ± 0,2	9,1 + 0,4	118,0 ± 0,4
5	16,4 ± 0,2	9,1 + 0,4	118,0 ± 0,4
6	16,5 ± 0,2	9,1 + 0,4	118,0 ± 0,4

Для исключения влияния масштабного фактора на данном этапе исследований применяются соотношения геометрических размеров к диаметру отверстия заготовки *D/d* и *L/d* соответственно, а также δ/d , где $\delta = D_{\text{заг}} - d_{\text{матр}}$. Пределы изменений факторов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Соотношение геометрических размеров заготовки

Table 2. The ratio of the geometric dimensions of the blank

№	<i>D/d</i> , мм		<i>L/d</i> , мм		δ/d , мм	
	min	max	min	max	min	max
1	1,67	1,78	12,43	13,01	0,05	0,053
2	1,68	1,79	12,43	13,01	0,05	0,053
3	1,69	1,8	12,43	13,01	0,05	0,053
4	1,7	1,81	12,43	13,01	0,05	0,053
5	1,71	1,83	12,43	13,01	0,05	0,053
6	1,72	1,84	12,43	13,01	0,05	0,053

Суть моделируемого технологического процесса [16] заключается в обжатии заготовки путем прохождения ее через матрицу с определенной скоростью. Внутри заготовки вставлена оправка, имеющая многозаходные спиральные выступы, выполненные по чертежу готового изделия. Подвижная матрица перемещается поступательно вдоль оси заготовки и обжимает заготовку по форме оправки. В случае с равномерной цилиндрической заготовкой последняя пропрессовывается полностью через матрицу, после чего оправка, выполненная с цилиндрической поверхностью или с незначительным конусом, выпрессовывается. В случае когда заготовка имеет ступень цилиндрической формы в казенной части, заготовка запрессовывается в матрицу до упора, после чего происходит выпрессовка заготовки из матрицы и затем оправки из заготовки. Расчеты проводились для случая запрессовки, когда матрица при движении вдоль оси заготовки создает в зоне сопряжения очаг деформации. Процесс распрессовки в данной статье не рассматривается. Расчет может производиться при изменении температуры [17], но в данном исследовании температура

составляет 20 °С и рассчитывается без учета тепловых процессов в заготовке. На оправку наносится вязкая консистентная смазка на основе графита, заготовка покрыта фосфатом и мыльным раствором.

В процессе деформирования заготовки [18] условия контактного взаимодействия с матрицей и оправкой, а также с оснасткой прессового оборудования можно разделить на несколько возможных схем [19]. Для решения связанных между собой систем уравнений рассмотрим условия контактного взаимодействия и деформирования для возможных комбинаций взаимодействия (рис. 4.)

Исходя из представленных зон взаимодействия можно отметить, что число контактирующих между собой тел варьируется от 3 до 5. Возможные схемы распределения контактного взаимодействия при процессе редуцирования длинномерной трубной заготовки с фигурными отверстиями представлены в таблице 3.

С учетом контактного взаимодействия проводим расчеты НДС, силы и времени редуцирования для различных соотношений геометрических величин, представленных в таблице 1.

Построение математических моделей и определение параметров процесса редуцирования длинномерных трубных заготовок с фигурными отверстиями на основе численных методов, а именно метода конечных элементов [20, 21], является необходимым этапом проводимого исследования. Это наиболее применяемый метод в моделировании деформируемого твердого тела. При разработке математической модели учитываются граничные и контактные условия взаимодействия заготовки с матрицей, оправкой, оснасткой и матрицы с оснасткой в условиях динамического объемного сжатия. Математическая модель процесса редуцирования построена последовательно, начиная с математической модели напряженно-деформированного состояния (НДС) каждой детали и заканчивая построением обобщенной модели.

НДС заготовки, матрицы, оправки и оснастки описывается уравнением Лагранжа

$$\int_{V_i} \delta\{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dV_i - \int_{V_i} \delta\{U\}^T \{F\}_V dV_i - \int_{S_i} \delta\{U\}^T \{F\}_S dS_i = 0.$$

Реализация методом конечных элементов известного уравнения Лагранжа для всех деталей инструмента и заготовки, участвующих в технологическом процессе, приводит к необходимости решения систем уравнений, имеющих вид

$$[K_i]\{X_i\} + [H_i]\{\dot{X}_i\} + [M_i]\{\ddot{X}_i\} + \{R_i\} + \{F_i\} = 0,$$

где $i = 1$ – соответствует матрице, $i = 2$ – заготовке, $i = 3$ – оправке. $i = 4$ – верхней оснастке прессы, $i = 5$ – нижней оснастке прессы; R_i – ре-

акция в опорах; F_i – внешние силы, действующие в зонах контакта; $[K_i]$ – матрица жесткости; $[H_i]$ – матрица сопротивления; $[M_i]$ – матрица масс.

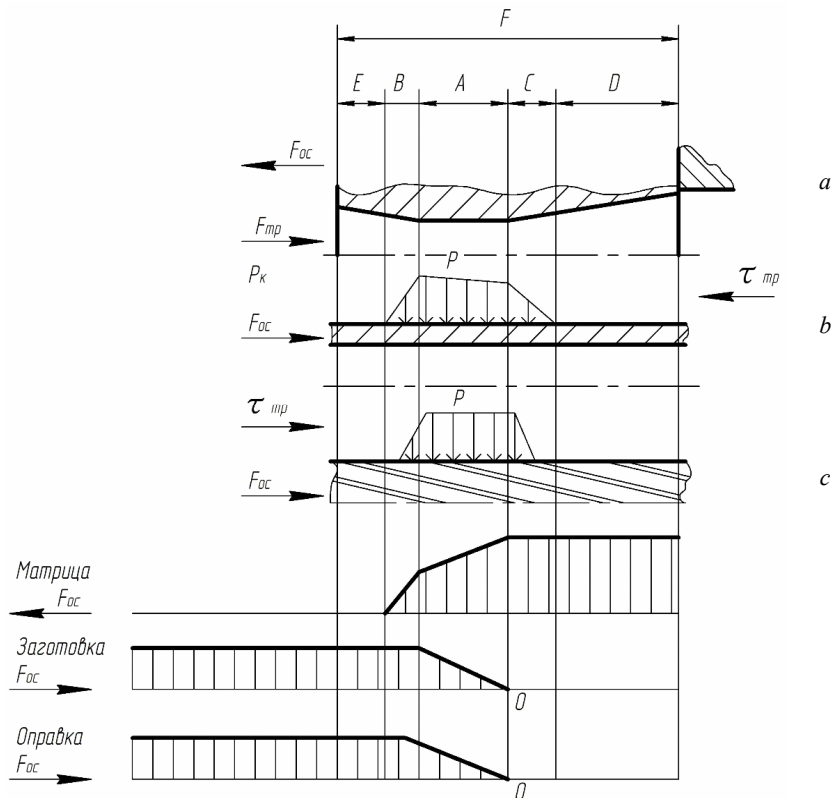


Рис. 4. Распределение зон контактного взаимодействия: a – у матрицы; b – у внешней поверхности заготовки; c – у оправки; A – зона рабочего контактного давления, условия трения зависят от параметров смазки и степени деформирования и других параметров, задаются в соответствии с экспериментальными данными; B – зона действия переменного контактного давления и силы запрессовки заготовки; C – зона действия переменного контактного давления на выходном конусе, условия трения связаны с условиями контактного взаимодействия в зоне A ; D – свободная зона матрицы, зона разгрузки заготовки; E – зона заходного конуса, контакт с деталью отсутствует, возможно наличие смазки; F – зона контактного взаимодействия с оправкой, условия трения управляемые

Fig. 4. The distribution of contact interaction zones: a - at the matrix; b - at the outer surface of the blank; c - at the mandrel; A - the zone of working contact pressure, friction conditions depend on the lubrication parameters and the degree of deformation and other parameters, are set in accordance with experimental data; B - the zone of action of variable contact pressure and the pressing force of the blank; C - the zone of action of the variable contact pressure on the outlet con the friction conditions are related to the conditions of contact interaction in zone A ; D - the free zone of the matrix, the unloading zone of the blank; E - the zone of the inlet cone, there is no contact with the part, there may be lubrication; F - the zone of contact interaction with the mandrel friction conditions are controlled

Таблица 3. Возможные схемы распределения контактного взаимодействия при процессе редуцирования длинномерной трубной заготовки с фигурными отверстиями

Table 3. Possible schemes for the distribution of contact interaction during the reduction of a long-length pipe billet with shaped holes

Схема редуцирования	Матрица	Заготовка	Оправка (пуансон)
Матрица подвижная, заготовка и оправка неподвижны, длины совпадают	A, B, C, E	A, B, C, E, D, F	F
Матрица подвижная, заготовка неподвижна, оправка подвижна	A, B, C, D, E	A, B, C, D, E, F	F
Матрица подвижная, заготовка неподвижна, оправка неподвижна, но выступает за заготовку	A, B, C, D, E	A, B, C, D, E, F	F

Для проведения математического моделирования процесса образования спиралей в полости трубной заготовки в программное обеспечение Q-Form были импортированы трехмерные модели матрицы, оправки и заготовки, созданные в КОМПАС-3D v21, и заданы параметры процесса. На рисунке 5 представлены заготовки с зонами среднего напряжения в разгруженном состоянии. При последовательном увеличении внешнего диаметра в процессе редуцирования удлинение заготовки растет нелинейно (табл. 4).

С помощью программного обеспечения Q-Form были построены графики зависимости среднего напряжения от времени процесса в трех различных точках контакта на внешней

части заготовки и графики зависимости технологических усилий от времени процесса. Графики зависимости для заготовок различного диаметра представлены на рисунках 6–9.

Таблица 4. Увеличение длины заготовки после редуцирования

Table 4. Increasing the length of the blank after reduction

Внешний диаметр заготовки, мм	Длина заготовки, мм
16,0	124,0
16,1	125,3
16,2	125,8
16,3	128,9
16,4	130,6
16,5	132,2

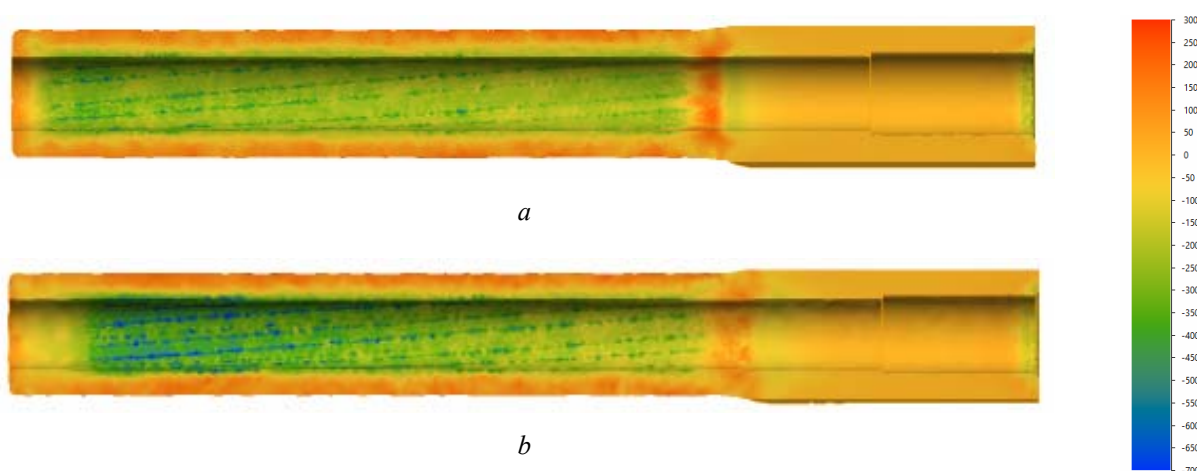


Рис. 5. Поле распределения средних напряжений в заготовке после разгрузки: *a* – заготовка $D = 16,0$ мм; *b* – заготовка $D = 16,5$ мм

Fig. 5. The field of distribution of average stresses in the blank after unloading: *a* - blank $D = 16.0$ mm; *b* - blank $D = 16.5$ mm

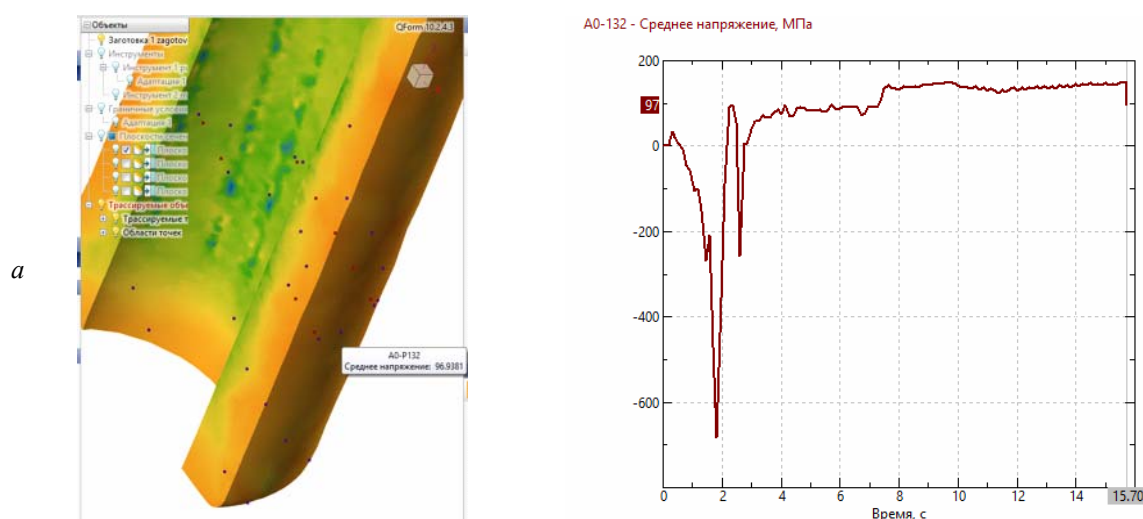


Рис. 6. Графики зависимости среднего напряжения от времени процесса в трех различных точках контакта на внешней части заготовки $D = 16,0$ мм: *a* – в начале процесса

Fig. 6. Graphs of the dependence of the average voltage on the process time at three different contact points on the outer part of the blank $D = 16.0$ mm: *a* - at the beginning of the process

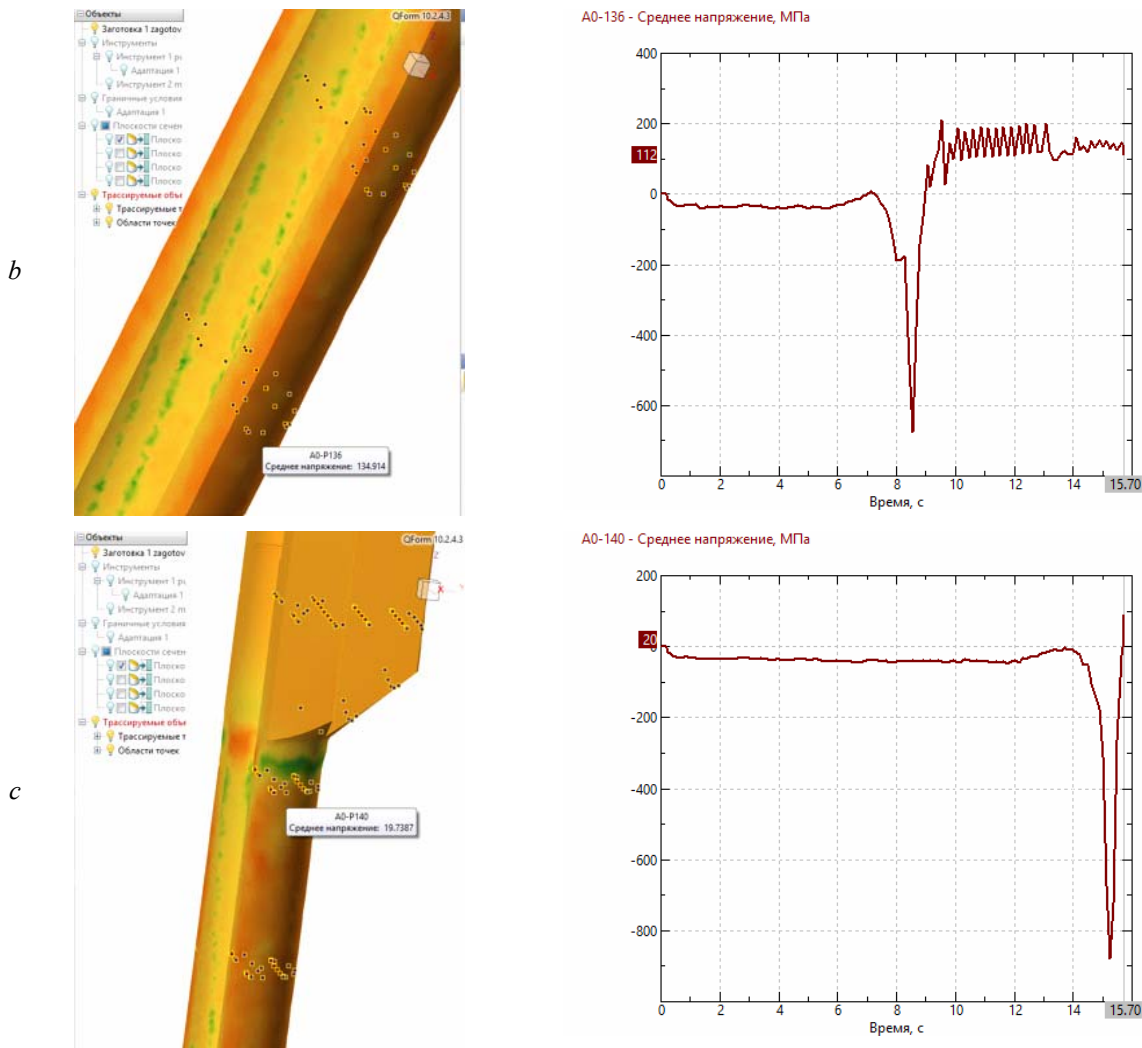


Рис. 6 (окончание, начало на с. 49): *b* – в середине процесса; *c* – в конце процесса

Fig. 6 (continued from p. 49): *b* - in the middle of the process; *c* - at the end of the process

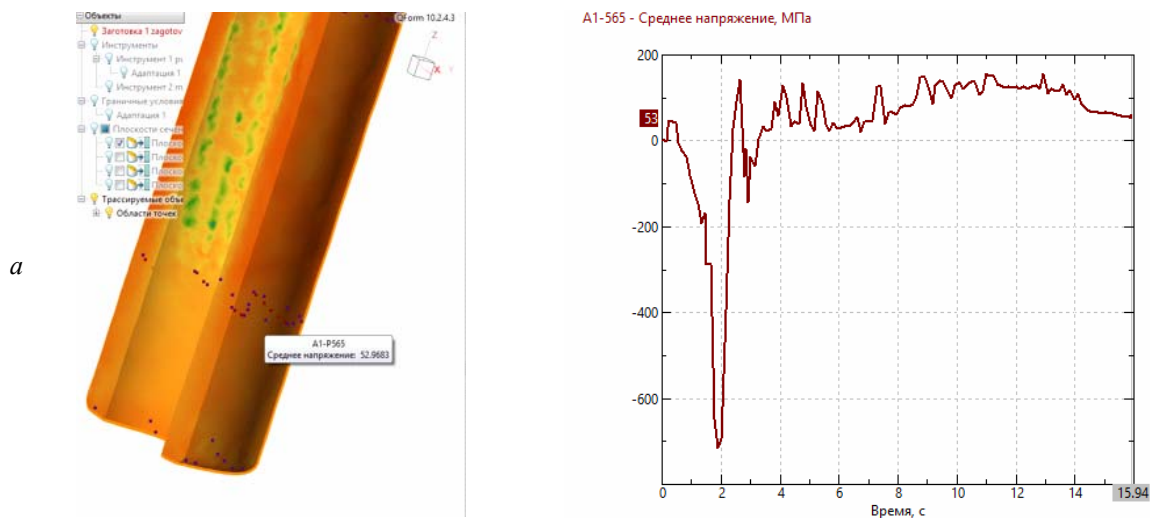


Рис. 7. Графики зависимости среднего напряжения от времени процесса в трех различных точках контакта на внешней части заготовки $D = 16,5$ мм: *a* – в начале процесса

Fig. 7. Graphs of the dependence of the average voltage on the process time at three different contact points on the outer part of the blank $D = 16.5$ mm: *a* - at the beginning of the process

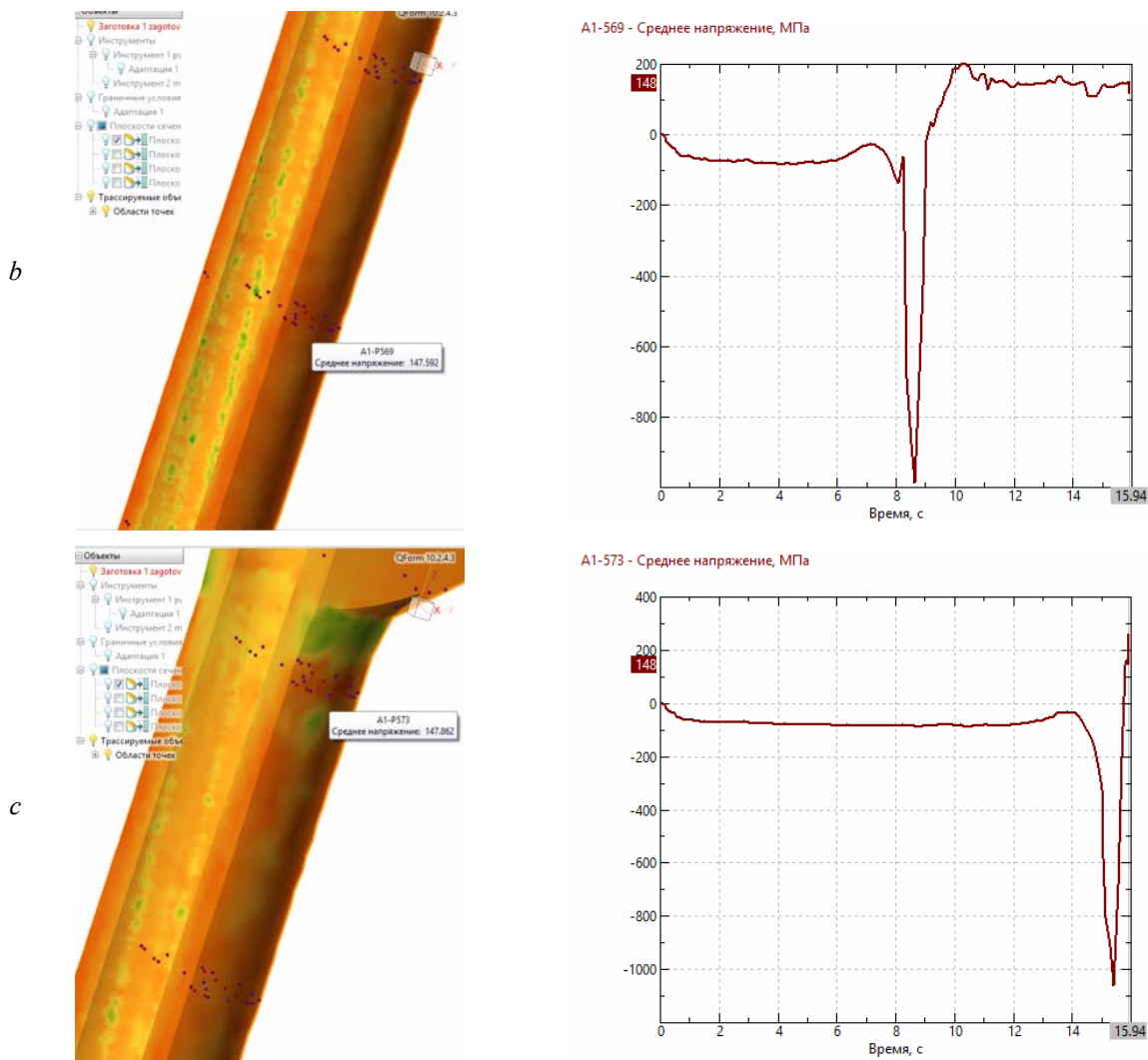


Рис. 7 (окончание, начало на с. 50): *b* – в середине процесса; *c* – в конце процесса
 Fig. 7 (continued from p. 50): *b* - in the middle of the process; *c* - at the end of the process

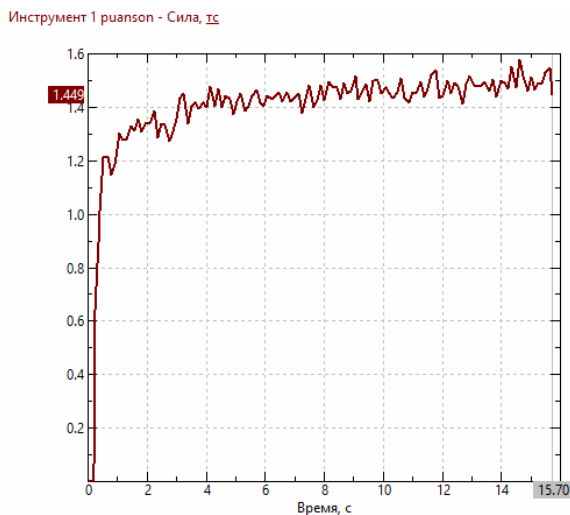


Рис. 8. График зависимости технологического усилия от времени при редуцировании заготовки $D = 16,0$ мм
 Fig. 8. Graph of the dependence of technological effort on time when reducing the blank $D = 16.0$ mm

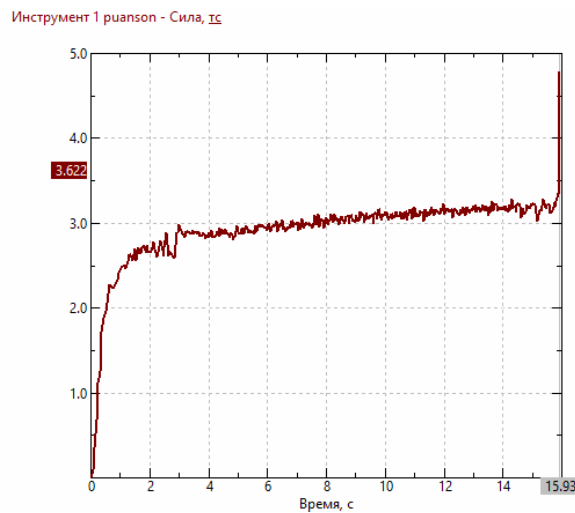


Рис. 9. График зависимости технологического усилия от времени при редуцировании заготовки $D = 16,5$ мм
 Fig. 9. Graph of the dependence of technological effort on time when reducing the blank $D = 16.5$ mm

Выводы

Проведенное исследование показало, что технологические параметры процесса редуцирования длинномерной трубной заготовки с фигурными отверстиями оказывают влияние на величины технологического усилия, НДС и заполняемость макропрофиля оправки. Для деталей малого диаметра D с соотношением к длине $L = 1/7...1/12$ не наблюдается потеря устойчивости заготовки. Как видно из представленных графиков, среднее сжимающее напряжение в точках контакта между матрицей и заготовкой выше при большем внешнем диаметре редуцируемой заготовки и достигает 1050 МПа. Усилие, требуемое для процесса редуцирования, также становится выше при увеличении диаметра и достигает 3,6 тс.

При степени деформации 0,06...0,12 происходит полное заполнение заготовки. Неполное заполнение будет происходить при степени деформации менее 0,04. При изменении степени обжатия 0,06...0,12 среднее напряженное состояние увеличивается с 850 до 1050 МПа, а сила запрессовки увеличивается в 2,5 раза – до 3,6 тс. Увеличение внешнего диаметра заготовки вызывает ее нелинейное удлинение после редуцирования. При диаметре 16,0 мм длина заготовки составляет 124 мм, а при диаметре 16,5 – 132,2 мм, что на 6,6 % больше. Установлено, что предложенный технологический подход позволяет получить внутренний диаметр заготовки необходимого размера и профиля. Учитывая данные, представленные в таблице 2, и результаты моделирования, можно сделать вывод, что наиболее оптимальным соотношением средних величин D/d является величина 1,78, так как при получении заготовок с указанными допусками по диаметру $\pm 0,215$ будет достигнуто полное заполнение профиля оправки при минимальных уровнях НДС и удлинения заготовки.

Оценивая полученные при деформации заготовки напряжения, можно сделать вывод, что данная технология подходит для рассматриваемых целей и требует дальнейшего экспериментального исследования.

Библиографические ссылки

1. Жук А. Б. Энциклопедия стрелкового оружия: Революеры. Пистолеты. Винтовки. Пистолеты-пулеметы. Автоматы. М. : Воениздат, 1997. 782 с. ISBN 5-203-01808-1
2. Шунков В. Н. Газовое и пневматическое оружие. Минск : Попурри, 2004. 511 с. ISBN 985-483-105-1
3. Водорезов Ю. Г. Теория и практика стрельбы из нарезного длинноствольного стрелкового оружия :

монография. В 2 ч. М. : Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, 2017. Ч. 1. 544 с.

4. Шведчиков С. В., Щенятский А. В., Пахомов Р. В. Подходы к определению параметров динамических процессов, напряженно деформированного состояния и прочности элементов систем автоматического оружия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 1. С. 105–113.

5. Митин О. Н., Иванов Ю. А. Анализ существующих технологий получения цилиндрических заготовок с рифлением // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 1. С. 150–156.

6. Митин О. Н., Иванов Ю. А. Напряженно-деформированное состояние материала при редуцировании цилиндрического стакана пуансоном с рифлями // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 4. С. 111–116.

7. Кондаков Д. И. Исследование напряженного и деформированного состояния при холодном выдавливании // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 4. С. 360–362. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-360-362

8. Кухарь В. Д., Киреева А. Е. Влияние редуцирования на напряженно-деформированное состояние материала стальных осесимметричных изделий с внутренними спиральными рифлениями // Черные металлы. 2020. № 3. С. 48–52.

9. Анализ способов изготовления разнонаправленных внутренних винтовых пазов трубных корпусных деталей и выбор инструмента для его реализации / К. С. Вахрушев, В. Б. Дементьев, А. Э. Пушкарев, А. П. Блинков // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 1-2(51). С. 79–86. DOI: 10.37220/МИТ.2021.51.1.029

10. Конечно-элементное моделирование процессов ротационной вытяжки / О. И. Быля, Б. Кришнамурти, Р. А. Васин [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2019. № 10. С. 17–25.

11. Элингхаузен Т., Стебунов С. А. QForm 7 – новое слово в моделировании процессов обработки металлов давлением // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2014. № 2. С. 31–34.

12. Алексеев С. А. Математическая модель напряженно-деформированного состояния гильзы при выстреле из оружия со свободным затвором // Интеллектуальные системы в производстве. 2018. Т. 16, № 3. С. 4–11. DOI: 10.22213/2410-9304-2018-3-4-11

13. Дементьев В. Б., Макаров С. С., Альес М. Ю. Численное моделирование термоупругопластического деформирования при высокотемпературной термомеханической обработке осесимметричной металлической заготовки // Прикладная физика и математика. 2023. № 4. С. 18–25. DOI: 10.25791/pfim.04.2023.1265

14. Устюжанова А. В. О применении метода конечных элементов к задаче определения напряженного состояния в упругопластической области // МАК: Математики – Алтайскому краю. 2023. № 5. С. 102–105.

15. Зайдес С. А., Нго К. Повышение напряженно-го состояния в очаге деформации при поверхностном пластическом деформировании цилиндрических деталей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 5(686). С. 52–59. DOI: 10.18698/0536-1044-2017-5-52-59

16. Выдрин А. В., Космацкий Я. И., Баричко Б. В. Математическое моделирование процесса прессования труб переменного сечения // Вестник ЮУрГУ. Серия: Metallurgiya. 2012. № 15 (274). С. 122–125.

17. Алексеев А. В. Исследование напряжений и деформаций получения детали методами объемной штамповки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 1. С. 531–534. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-1-531-534

18. Логинов Ю. Н., Костюсова Н. Ф. Перемещение и деформации при прессовании трубной заготовки // Вестник ЮУрГУ. Серия: Metallurgiya. 2016. Т. 16, № 1. С. 78–81.

19. Теория и технология гидропрессовых соединений : монография / А. В. Щенятский, И. В. Абрамов, Э. В. Соснович, К. А. Глухова. Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2012. 496 с.

20. Зенкевич О. К. Метод конечных элементов в технике : пер. с англ. / под ред. Б. Е. Победри. М. : Мир, 1975. 541 с. 21.

21. Соколовский В. В. Теория пластичности. 2-е изд., перераб. и доп. М. ; Ленинград : Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1950. 396 с.

References

1. Zhuk A.B. (1997) *Jenciklopedija strelkovogo oruzhija: Revol'very. Pistolety. Vintovki. Pistolety-pulemety. Avtomaty* [Encyclopedia of small arms: Revolvers. Pistols. Rifles. Submachine guns. Vending machines]. Moscow, Voenizdat Publ., 782 p. (in Russ.). ISBN 5-203-01808-1

2. Shunkov V.N. (2004) *Gazovoe i pnevmaticheskoe oruzhie* [Gas and pneumatic weapons]. Minsk, Popurri Publ., 511 p. (in Russ.). ISBN 985-483-105-1.

3. Vodorezov Yu.G. (2017) *Teorija i praktika strel'by iz nareznogo dlinnostvol'nogo strelkovogo oruzhija* [Theory and practice of shooting from rifled long-barreled small arms]. Bauman Moscow State Technical University, 544 p. (in Russ.).

4. Shvedchikov S.V. Schenyatsky A.V., Pakhomov R.V. (2023) [Approaches to determining the parameters of dynamic processes, stress-strain state and strength of elements of automatic weapons systems]. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehniceskie nauki*, no. 1, pp. 105-113 (in Russ.).

5. Mitin O.N., Ivanov Yu.A. (2013) [Analysis of existing technologies for producing cylindrical blanks with corrugation]. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehniceskie nauki*, no. 1, pp. 150-156 (in Russ.).

6. Mitin O.N. Ivanov Yu.A. (2013) [Stress-strain state of the material during reduction of a cylindrical cup with a punch with ruffles]. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehniceskie nauki*, no. 4, pp. 111-116 (in Russ.).

7. Kondakov D.I. (2023) [Investigation of the stressed and deformed state during cold extrusion]. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehniceskie nauki*, no. 4, pp. 360-362. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-360-362

8. Kukhar' V.D., Kireeva A.E. (2020) [The effect of reduction on the stress-strain state of the material of axisymmetric steel products with internal spiral corrugations]. *Chernye metally*, no. 3, pp. 48-52 (in Russ.).

9. Vakhrushev K.S., Dementiev V.B., Pushkarev A.E., Blinkov A.P. (2021) [Analysis of manufacturing methods for multidirectional internal screw grooves of pipe body parts and the choice of tools for its implementation]. *Morskie intellektual'nye tehnologii*, no. 1-2(51), pp. 79-86. DOI: 10.37220/MIT.2021.51.1.029

10. Bylya O.I., Krishnamurti B., Vasin R.A. (2019) [Finite element modeling of rotary extraction processes]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*, no. 10, pp. 17-25 (in Russ.).

11. Elingkhauzen T., Elingkhauzen T., Stebunov S.A. (2014) [QForm 7 - a new word in modeling metalworking processes by pressure]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*, no. 2, pp. 31-34 (in Russ.).

12. Alekseev S.A. (2018) [Mathematical model of the stress-strain state of a sleeve when fired from a weapon with a free bolt]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, vol. 16, no. 3, pp. 4-11. DOI: 10.22213/2410-9304-2018-3-4-11

13. Dementiev V.B., Makarov S.S., Ales M.Yu. (2023) [Numerical modeling of thermoelastic plastic deformation during high-temperature thermomechanical processing of an axisymmetric metal billet]. *Prikladnaja fizika i matematika*, no. 4, pp. 18-25. DOI: 10.25791/pfim.04.2023.1265

14. Ustyuzhanova A.V. (2023) [On the application of the finite element method to the problem of determining the stress state in the elastic-plastic region]. *MAK: Matematiki - Altajskomu kraju*, no. 5, pp. 102-105 (in Russ.).

15. Zaides S.A., Ngo K. (2017) [Increase in the stress state in the deformation site during surface plastic deformation of cylindrical parts]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie*, no. 5, pp. 52-59 (in Russ.). DOI: 10.18698/0536-1044-2017-5-52-59

16. Vydrin A.V., Kosmatskii Ya.I., Barichko B.V. (2012) [Mathematical modeling of the process of pressing pipes of variable cross-section]. *Vestnik JuUrGU. Serija: Metallurgija*, no 15, pp. 122-125 (in Russ.).

17. Alekseev A.V. (2023) [Investigation of stresses and deformations of obtaining parts by volumetric stamping methods]. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehniceskie nauki*, no. 1, pp. 531-534 (in Russ.). DOI: 10.24412/2071-6168-2023-1-531-534

18. Loginov Yu.N., Kostousova N.F. (2016) [Displacement and deformation during pressing of a pipe billet]. *Vestnik JuUrGU. Serija: Metallurgija*, vol. 16, no. 1, pp. 78-81 (in Russ.).

19. Shchenyatskii A.V., Abramov I.V., Sosnovich E.V., Glukhova K.A. (2012) *Teorija i tehnologija gidro-pressovyh soedinenij* [Theory and technology of hydro-press compounds]. *Izhevsk, Kalashnikov ISTU Publ.*, 496 p. (in Russ.).

20. Zenkevich O.K. (1975) *Metod konechnyh jelementov v tehnike* [The finite element method in engineering]. Moscow, Mir Publ., 541 p. (in Russ.).

21. Sokolovskii V.V. (1950) *Teorija plastichnosti* [Theory of plasticity]. Moscow, Leningrad, State Publishing House of Technology, theoretical lit., 396 p. (in Russ.).

Technological Parameter Analysis of the Reducing Long-Length Pipe Blanks with a Shaped Holes

D.S. Pleshakov, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

N.V. Tepin, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

A.V. Schenyatsky, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

The description of the billet and the tool, being used to simulate the technological process by means of the Q-Form software, is given in order to further mode determination of reducing long-length pipe blanks with shaped holes. The results of the study were achieved by modeling tools and billets with an external diameter of 16.0...16.5 mm, used to produce products in mechanical engineering. Diagrams of emerging forces and average stresses at matrix and billet contact points, formed during the reduction process, are presented. Three contact zones: the beginning of pressing the billet into the matrix, in the middle and at the end of the reduction process are considered. The influence of the billet outer diameter value on the technological parameter of the process is considered (evaluated). It was revealed that larger billet outer diameter causes elongation during the reduction process. In addition, the construction of mathematical models and the determination of process parameters of reducing long-length pipe blanks with shaped holes is described based on numerical methods, namely the finite element method, which is used in the ongoing study. Depending on the technological process features, various schemes of contact interaction and the action of technological load distribution has been identified. The most widely used reduction schemes are considered. The implementation of the well-known Lagrange equation by the finite element method for tools and billets involved in the technological process requires the need to solve five related systems of equations given in this article. Strains in each discrete element of the mathematical model are determined by the Cauchy equation. The elastoplastic problem is solved for the developed boundary conditions. The purpose of the study is to build mathematical models, providing results to analyze the technological parameters of reducing long-length pipe blanks with shaped holes and conclude that the technology in question can be used in various modes, taking into account deviations in geometry to obtain high-quality shaped profiles of the rifling parts.

Keywords: technological parameters, long shaped hole, tubular products, volumetric reduction, mathematical model, finite element method, stress-strain state, matrix, mandrel.

Получено 07.02.2024

Образец цитирования

Плешаков Д. С., Тепин Н. В., Щенятский А. В. Анализ технологических параметров процесса редуцирования длинномерных трубных заготовок с фигурными отверстиями // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27, № 1. С. 44–54. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-1-44-54

For Citation

Pleshakov D.S., Tepin N.V., Schenyatsky A.V. (2024) [Technological Parameter Analysis of the Reducing Long-Length Pipe Blanks with a Shaped Holes]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2024, vol. 27, no. 1, pp. 44-54 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2024-1-44-54