

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

METAL FORMING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.774.37

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-79-86



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЛИННООПРАВОЧНОГО ВОЛОЧЕНИЯ КАПИЛЛЯРНЫХ ТРУБ С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ НАТЯГА ПЕРЕД ИЗВЛЕЧЕНИЕМ ОПРАВКИ

Федулов А.А., Каменечки В., Булганина М.Ю.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Для технологии получения холодноотянутых труб капиллярных размеров используется процесс длиннооправочного волочения. После окончания волочения происходит извлечение оправки из трубы. Для эффективного ведения процесса с последующим извлечением необходимо обоснование режимов извлечения длинной оправки после окончания процесса. Выбор параметров настройки известных механизмов извлечения затруднен, так как процесс недостаточно изучен, что приводит к появлению поверхностных дефектов при извлечении оправки из трубы на практике или снижению производительности процесса при настройке. **Цель работы.** Выполнение моделирования процесса длиннооправочного волочения на примере трубы малого размера с учетом упругих и пластических свойств объектов схемы, что позволит оценить распределение напряжений между трубой и оправкой после окончания волочения и уровень нагрузок, необходимый для ослабления натяга при извлечении оправки. **Используемые методы.** Для объемной постановки задачи по определению напряженно-деформированного состояния материала трубы и оправки в очаге деформации используется программный комплекс трехмерного моделирования DEFORM, основанный на применении метода конечных элементов для задач упругопластического течения с пассивной разгрузкой. Для обработки графиков используются методы математической статистики и линейной аппроксимации. **Новизна.** Разработка математической модели процесса волочения труб малых размеров на оправке, которая учитывает геометрические особенности инструмента и заготовки, упругопластические свойства заготовки и упругие свойства оправки, а также позволяет варьировать режимы волочения. **Результат.** Впервые получены данные по распределению остаточных напряжений и нормальных давлений между проволоочной трубой и длинной оправкой. **Практическая значимость.** Модель может быть использована для получения новых данных о процессе обкатки трубы после волочения.

Ключевые слова: холодноотянутые трубы, трубопрокатная установка, обкатная машина, тонкостенные трубы, продольные дефекты

© Федулов А.А., Каменечки В., Булганина М.Ю., 2025

Для цитирования

Федулов А.А., Каменечки В., Булганина М.Ю. Моделирование процесса длиннооправочного волочения капиллярных труб с целью оценки натяга перед извлечением оправки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 79-86. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-79-86>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

MODELING THE PROCESS OF LONG MANDREL DRAWING FOR CAPILLARY TUBES TO ASSESS THE STRESS-STRAIN STATE BEFORE THE MANDREL EXTRACTION

Fedulov A.A., Kamenechki V., Bulganina M.Yu.

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance of the Work). The production of cold-drawn capillary-sized tubes employs the long mandrel drawing process. After drawing, the mandrel is extracted from the tube. To ensure efficient process execution and subsequent extraction, it is necessary to substantiate the extraction parameters for the long mandrel upon completion of the process. Selecting the settings for known extraction mechanisms is challenging due to insufficient research on the process, which in practice leads to surface defects during mandrel extraction or reduced process efficiency during setup. **Objective.** It is to simulate the long mandrel drawing process using a small-sized tube as an example, taking into account the elastic and plastic properties of the components in the system. This will allow for an assessment of the stress distribution between the tube and the mandrel after drawing, as well as the required load levels to reduce interference during mandrel extraction. **Methods Used.** For the volumetric formulation of the problem concerning the stress-strain state of the tube and mandrel material in the deformation zone, the DEFORM 3D simulation software is used. This software is based on the finite element method (FEM) for elastoplastic flow problems with passive unloading. Graph processing employs methods of mathematical statistics and linear approximation. **Novelty.** Development of a mathematical model for the drawing process of small-sized tubes on a mandrel, which accounts for the geometric features of the tool and blank, the elastoplastic properties of the blank, and the elastic properties of the mandrel, and also allows for variation in drawing parameters. **Results.** For the first time, data on the distribution of residual stresses and normal pressures between the drawn tube and the long mandrel have been obtained. **Practical Significance.** The model can be used to acquire new data on the tube rolling process after drawing.

Keywords: cold-drawn tubes, tube rolling mill, reeling machine, thin-walled tubes, longitudinal defects

For citation

Fedulov A.A., Kamenechki V., Bulganina M.Y. Modeling the Process of Long Mandrel Drawing for Capillary Tubes to Assess the Stress-Strain State Before the Mandrel Extraction. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 79-86. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-79-86>

Введение

Капиллярные трубы относятся к классу труб размером менее 5 мм [1] и применяются в различных отраслях промышленности, таких как медицина, ядерная энергетика, приборостроение, теплоэнергетика и химическая промышленность. Для медицины из капиллярных труб изготавливают металлические каналы для катетеров, иглы для шприцов для подкожных инъекций и взятия анализов. Область применения при относительно малых размерах изделий обуславливает особые требования к трубам по точности геометрии и качеству поверхности, а условия работы требуют, чтобы материал капиллярной трубы помимо прочности и гибкости обладал бы еще и пассивностью к воздействию окружающей среды [2].

На территории РФ капиллярные трубы выпускаются из стальных [3] и медных сплавов [4] мерной, немерной длины и в бунтах. Стальные трубы выпускаются размерами $D_0 \times S_0$ от $0,3 \times 0,1$ до $5,0 \times 1,6$ мм с минимальными предельными отклонениями по наружному диаметру $\pm 0,02$ мм и по толщине стенки

$\begin{pmatrix} +0,02 \\ -0,01 \end{pmatrix}$ мм. Трубы медные и латунные, согласно регламентирующим документам, изготавливаются $\varnothing 1,2 \times 0,3$ до $\varnothing 2,5 \times 1,1$ мм с предельным отклонением по наружному диаметру $\pm 0,05$ мм.

С точки зрения требований к качеству готовой продукции для обоих видов труб можно обобщенно говорить, что наружная поверхность должна быть чистой (свободной от загрязнений), не должна иметь рисков, забоин, вмятин, волосовин, закатов, раковин, плен, трещин, расслоений, надрывов. Внутренняя поверхность трубок также не должна иметь видимых загрязнений, быть проходима и свободна от следов термических или химических процессов.

Для получения труб таких малых размеров необходимо применение многооперационных технологических процессов, включающих множество последовательных и циклических процедур по обработке заготовки давлением, химической и термообработке. Перед окончательными операциями заготовка, сварная (полученная в линии ТЭСА) или бесшовная (путем экструдирования или после ТПА), попадает по-

следовательно в линии холодной периодической прокатки на станах ХПТ и ХПТР и волочения ХВТ. Последние используются в качестве завершающих стадий обработки давлением, так как при сравнительно высокой производительности позволяют гарантировать высокую прецизионную точность размеров, физико-механические свойства материала изделия и гладкую полированную поверхность. В то же время, учитывая малость сечений и необходимость выполнить режимы деформации, чтобы обеспечить заданные размеры наружного и внутреннего диаметров, в стандартах допускаются как цвета побежалости (если не указано иное), так и местные дефекты, не выходящие размеры трубок за пределы минусовых отклонений и следы их удаления механической или иной зачисткой.

Особенности процесса волочения труб малого диаметра (постановка задачи)

Процесс волочения представляет собой процесс холодной деформации, заключающийся в протягивании заготовки через волочильное кольцо с отверстием заданной формы с целью придания ей окончательных геометрических размеров и конфигурации, а также упрочнения ее поверхности [5]. В некоторых случаях перед волочением внутрь трубы закладывается специальный инструмент – оправка, который позволяет стабилизировать процесс и гарантировать заданную разностенность поперечного сечения.

Оправки подразделяются по форме, способу установки и удержания в очаге деформации, но наиболее предпочтительным типом в случае производства прецизионных капиллярных труб является длинная – в виде тонкой струны. Длинная оправка протягивается вдоль всей трубы, фиксируется там перед началом волочения и извлекается после осуществления обжатия в волочильном стане. Предполагаемая последовательность действий приводит к определенным затруднениям при ее вытягивании из-за возникновения натяга между трубой и оправкой. В работе [6] предлагается применение короткой самоустанавливающейся оправки, которая позволит локализовать данный участок и избежать последующей операции по извлечению, однако длиннооправочное волочение до сих пор широко используется в качестве основного способа на территории РФ.

С целью сохранения экономической эффективности удлинение трубы после волочения на длинной оправке должно быть в пределах 1,5–2,5, рекомендуемые обжатия по диаметру 0,5–5 мм и по толщине стенки 0,02–1,5 мм [7]. Это обуславливает различные условия для величины натяга и применение специальных способов извлечения оправки, которые должны быть универсальными в ряде случаев. Один из таких способов реализуется с помощью кассетного оправкоизвлекателя, предложенного в работе [8]. Суть способа заключается в проталкивании трубы после длиннооправочного волочения через несколько

последовательно установленных двухроликовых кассет. Каждая кассета повернута относительно предыдущей на некоторый угол с таким шагом, чтобы суммарный охват роликами труб составлял 360°. Конструкция роликовой кассеты представлена на рис. 1.

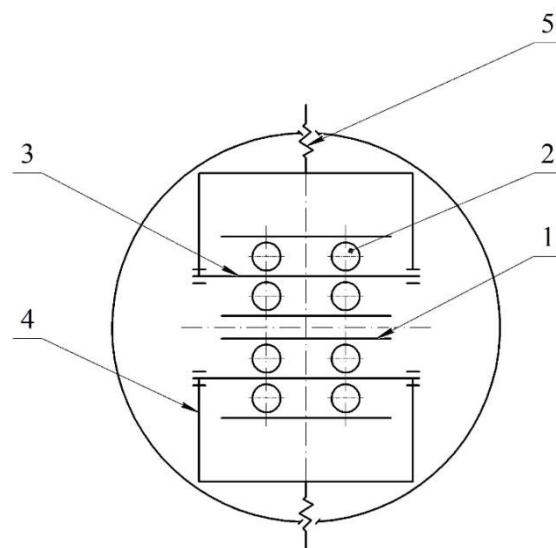


Рис. 1. Роликовая обкатная кассета: 1 – ролик; 2 – подшипник; 3 – ось; 4 – корпус; 5 – пара «винт-гайка»

Fig. 1. Roller reeling cassette: 1 – roller; 2 – bearing; 3 – axle; 4 – body; 5 – screw-nut pair

Ролики 1 являются холостыми и закреплены на подшипниках 2, установленных на осях 3. Оси перемещаются в направляющих корпуса 4 за счет вращения винтов 5, что обеспечивает установку роликов на необходимый размер трубы. При прохождении трубы с оправкой после волочения между сжатыми роликами труба испытывает упругую деформацию. Эта деформация позволяет облегчить посадку в областях, расположенных перпендикулярно направлению сжатия между роликами.

Сложность использования данного механизма заключается в необходимости ручной настройки режимов сжатия между роликами для каждого типоразмера трубы. Ввиду отсутствия научно обоснованных режимов настройки, неполных данных о влиянии смятия роликов, жесткости конструкции, а также зазоров в подшипниках и резьбе винта выполнение операции извлечения оправки становится затруднительным. В условиях производства это приводит к многократным повторным протягиваниям через обкатные кассеты до получения возможности разделения оправки и трубы. В случае сведения роликов до создания упругопластических деформаций трубы на ее поверхности образуется дефект, называемый «граненностью», что приводит к отбраковке трубы из партии. Таким образом, правильно настроенный механизм позволяет получать капиллярные трубы с заданной производительностью и без снижения качества.

С целью получения новых данных о процессе обкатки необходимо выполнить моделирование процесса с получением максимально возможных данных о напряженно-деформированном состоянии всех объектов с учетом последующего варьирования режимов работы установки. В качестве наиболее удобного и имеющего высокую сходимость получаемых результатов с экспериментом следует принять метод конечных элементов. В качестве расчетной схемы принята описанная в [9] схема последовательного сжатия между двумя абсолютно жесткими роликами пластической трубы на абсолютно жесткой оправке. Критерием разделения принималось исчезновение контакта между оправкой и трубой. В связи с этим решенная задача охватывала только пластическое решение, не позволяя учитывать влияние натяга между трубой и оправкой, что ограничивало применимость полученных результатов.

Задача может быть решена за счет введения в качестве начальных условий натяга между трубой и оправкой, полученного с учетом только упругих свойств оправки [10]. В то же время это решение не имеет возможности учитывать упругопластическое поведение материала, появление которого весьма вероятно в условиях всестороннего сжатия, а также остаточных напряжений в самой трубе. Таким образом, для получения наиболее полных корректных данных необходимо выполнить последовательное моделирование процессов длиннооправочного волочения и обкатки трубы. При этом следует рассмотреть вопрос, насколько существенным является влияние различных моделей задания свойств для объектов расчетной схемы на характеристики процесса.

Моделирование процесса длиннооправочного волочения

Расчетная схема исследуемого процесса, которая включает абсолютно жесткие волоку 1 и тягу 2, упругопластическую полую заготовку 3 и упругую оправку в виде стержня 4, представлена на рис. 2.

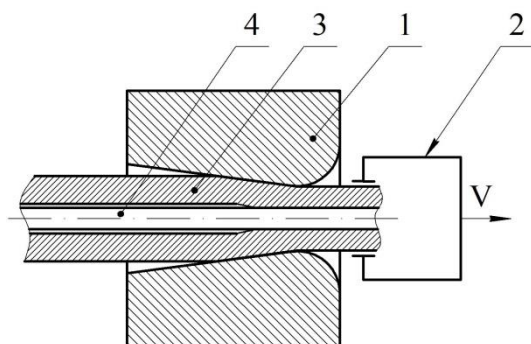


Рис. 2. Расчетная схема волочения: 1 – волока; 2 – тяга; 3 – заготовка; 4 – оправка
Fig. 2. The scheme of a drawing process: 1 – die; 2 – drawbar; 3 – blank; 4 – mandrel

Сеткой КЭ разбивались заготовка (размерами сетки 0,25-0,5 мм) и оправка (размерами сетки 0,2-0,4 мм) со сгущением сетки на наружной поверхности для получения более точных результатов по геометрии. Калибровка волоки построена согласно используемым на производстве инструментам с учетом рекомендаций [7] и имеет следующие размеры: ширина калибрующего пояса не более 1 мм, угол конусности 15°.

Рассматривались несколько случаев волочения с упругой оправкой и упругопластической заготовкой (условие пластичности соответствует критерию Губера-Мизеса и упругой разгрузке при пассивной деформации [11]), а также без оправки. Взаимодействие между объектами расчетной схемы осуществляется по закону трения Зибеля (со значением показателя трения 0,06) [7]. Расчет выполнен для перехода $\varnothing 7,0 \rightarrow \varnothing 5,0 \times 1,6$. Для заготовки варьировалась величина исходной толщины стенки в диапазоне 1,9–1,65 мм. В качестве материала заготовки использовалась сталь марки AISI 321 (аналог 08X18H12T), оправки – AISI 431 (аналог 14X17H2). Процесс рассматривался с момента задачи редуцированного конца трубы в волоку до выхода тестового отрезка трубы из волочильного стана после окончания волочения (рис. 3).

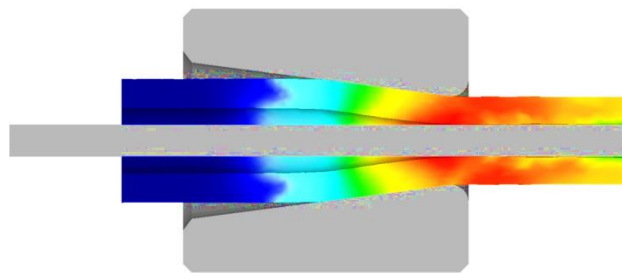


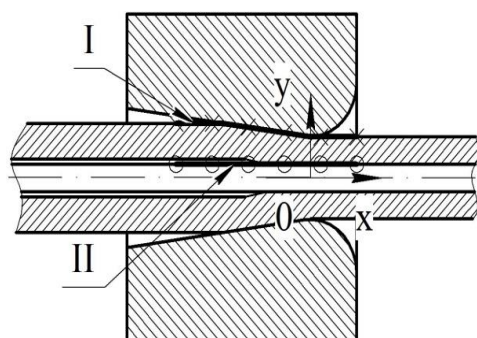
Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений в продольном сечении очага деформации на стационарной стадии волочения

Fig. 3. Distribution of equivalent stresses in the longitudinal section of the deformation zone during the steady-state stage of drawing

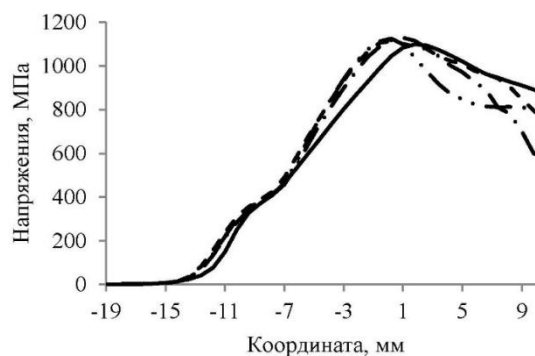
Результаты и их обсуждение

Рассмотрим распределение эквивалентных напряжений в очаге деформации. Выберем две продольные линии замера (рис. 4, а): по контактной поверхности заготовки трубой и по контактной поверхности между трубой и оправкой. При анализе допускаем, что задача является осесимметричной.

В качестве точки отсчета координат для графиков, показанных на рис. 4, б, принимается вершина калибровочного пояса канала волоки (линия перехода от конического участка к скруглению).



а



б

Рис. 4. Измерение эквивалентных напряжений в очаге деформации: а – линии замера напряжений:

I – по контакту трубы и волоки; II – по контакту трубы и оправки; б – графики замеров:

— — по линии I; по линии II: — — — — переход $\varnothing 7 \times 1,65 \rightarrow \varnothing 5 \times 1,6$ мм;- - - - - переход $\varnothing 7 \times 1,78 \rightarrow \varnothing 5 \times 1,6$ мм; — . — . — — — — переход $\varnothing 7 \times 1,9 \rightarrow \varnothing 5 \times 1,6$ мм

Fig. 4. Measurement of equivalent stresses in the deformation zone: а is stress measurement lines:

I – at the tube/die contact interface; II – at the tube/mandrel contact interface; б is measurement graphs:

solid line (—) along Line I; along line II: dashed (— — —) is $\varnothing 7 \times 1,65 \rightarrow \varnothing 5 \times 1,6$ mm;dotted (- - -) is $\varnothing 7 \times 1,78 \rightarrow \varnothing 5 \times 1,6$ mm; dash-dot (— . — . —) is $\varnothing 7 \times 1,9 \rightarrow \varnothing 5 \times 1,6$ mm

Как видно, зависимости во всех случаях имеют одинаковый характер: рост напряжений до установления промежуточной площадки (около 400 МПа), дальнейшее увеличение напряжений до пиковой нагрузки (около 1100 МПа за «нулевой» координатой), после чего плавное снижение величин эквивалентных напряжений. На внутренней поверхности трубы после достижения максимальных значений эквивалентные напряжения в случае перехода $1,65 \rightarrow 1,6$ мм показывают уменьшение напряжений по мере выхода трубы из волоки. С увеличением обжатия это отклонение от замеров по наружной поверхности возрастает, в частности, для перехода $1,9 \rightarrow 1,6$ мм имеет место резкое снижение уровня напряжений на 20% с дальнейшим монотонным снижением.

На рис. 5 представлены графики измерений нормальных давлений в очаге деформации по наружной поверхности. Как видно из графиков, во всех случаях наблюдается два пика значений по границам очага деформации. Соотношение значений первого и второго пика изменяются с изменением величин обжатия по толщине стенки. Чем больше обжатие, тем меньше значения входного пика и, наоборот, выше значения выходного. Максимальное значение нормальных давлений 1534 МПа. Для перехода $1,65 \rightarrow 1,6$ мм превышение значений входного пика над выходным составляет 20%. В то же время для переходов $1,78 \rightarrow 1,6$ и $1,9 \rightarrow 1,6$ мм превышение выходного пика над входным составляет соответственно 65,6 и 85,0%.

Для расчета напряженно-деформированного состояния оправки в трубе после окончания волочения выполнялись замеры по образующим цилиндрических поверхностей наружной и внутренней поверхности полученной трубы от точки выхода из волоки до точки приложения усилия волочения (рис. 6, 7).

На рис. 7 представлены результирующие графики измерения эквивалентных напряжений после упругой разгрузки. Для оценки параметров использовались усредненные показатели, полученные для аналогичных значений в точках с одинаковой осевой координатой.

Максимальные значения остаточных напряжений имеют место при безоправочном волочении. Стоит отметить, что распределение напряжений для всех случаев безоправочного волочения приблизительно одинаково. При волочении на оправке на наружной поверхности трубы возникает относительно постоянный уровень остаточных напряжений, находящийся в интервале значений от 200 до 450 МПа. На внутренней поверхности при безоправочном волочении возникает куполообразный график с плоской центральной частью, достигающей уровня напряжений 1100 МПа. На концевых участках с обеих сторон уровень напряжений снижается до 500 МПа. Добавление в расчетную схему длинной оправки приводит к снижению уровня остаточных напряжений и их постепенному выравниванию до уровня 600 МПа. Перепады уровней остаточных напряжений проявляются на концевых участках, а также в местах слабой посадки трубы на оправку.

Неравномерное распределение остаточных напряжений говорит также о неравномерности распределения нормальных давлений, возникающих между оправкой и трубой после волочения. Для оценки уровня нормальных давлений принята величина среднего уровня давлений на поверхности оправки с дальнейшей аппроксимацией полученных значений для расширенного диапазона значений обжатия стенки трубы при постоянном переходе $\varnothing 7 \rightarrow \varnothing 5$ мм. Результирующий график представлен на рис. 6.

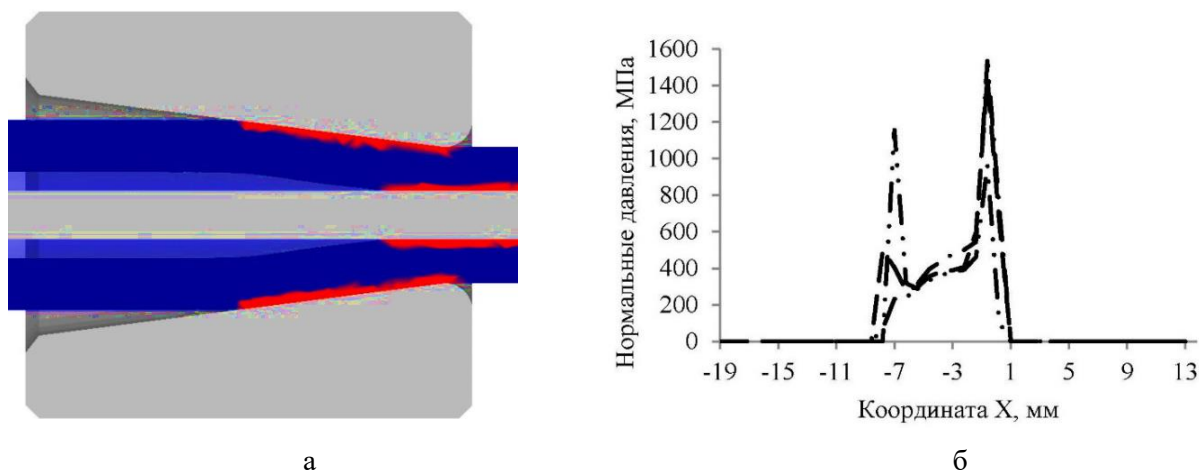


Рис. 5. Измерение нормальных давлений в очаге деформации при волочении: а – продольный разрез; б – по линии I: —.—.— — переход $\varnothing 7 \times 1,65 \rightarrow \varnothing 5 \times 1,6$ мм; — — — — переход $\varnothing 7 \times 1,775 \rightarrow \varnothing 5 \times 1,6$ мм; ····· — переход $\varnothing 7 \times 1,9 \rightarrow \varnothing 5 \times 1,6$ мм

Fig. 5. Measurement of normal pressures in the deformation zone during drawing: a is longitudinal cross-section; б is along Line I: dash-dot (—.—.—) is $\varnothing 7 \times 1,65 \rightarrow \varnothing 5 \times 1,6$ mm; solid line (— — —) is $\varnothing 7 \times 1,775 \rightarrow \varnothing 5 \times 1,6$ mm; dotted (·····) is $\varnothing 7 \times 1,9 \rightarrow \varnothing 5 \times 1,6$ mm

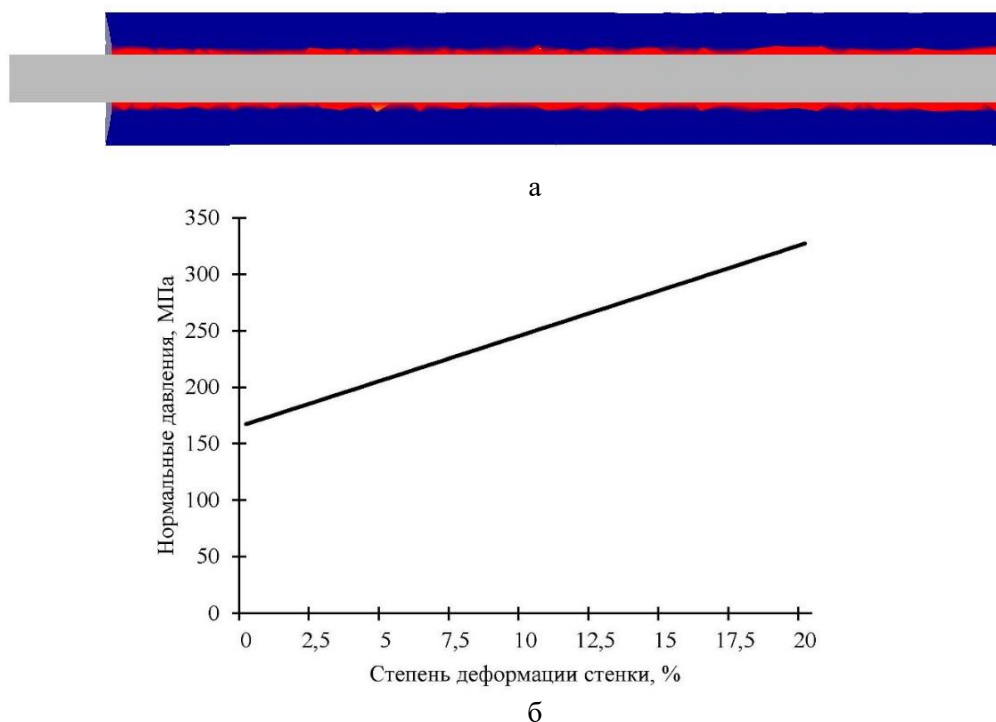


Рис. 6. Измерение нормальных давлений после окончания волочения: а – продольный разрез; б – зависимость средних значений нормальных давлений на поверхности оправки от величины обжатия стенки трубы после волочения

Fig. 6. Measurement of normal pressures after drawing: a is longitudinal cross-section; б is dependence of average normal pressures on the mandrel surface on the tube wall reduction after drawing

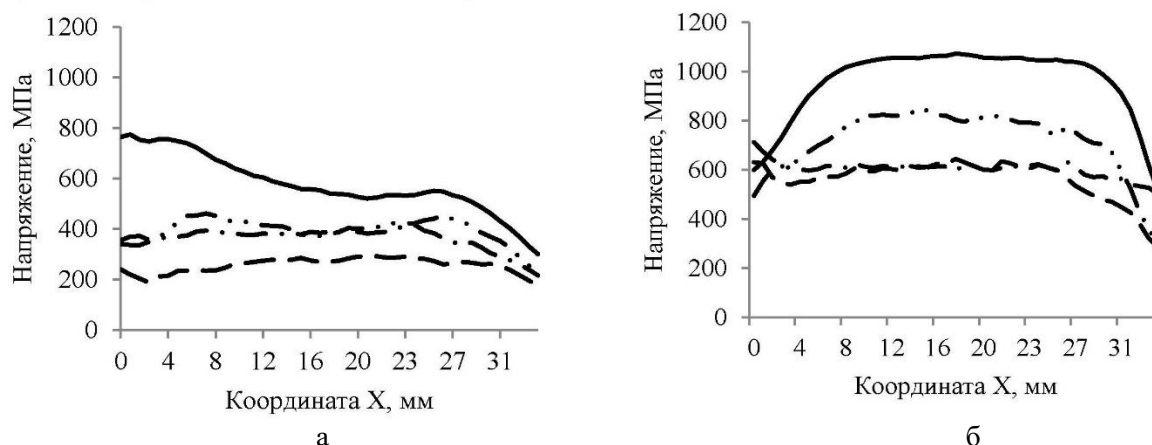


Рис. 7. Измерение остаточных эквивалентных напряжений в трубе после волочения:

а – по наружной поверхности трубы; б – по внутренней поверхности; — — безоправочное волочение (усредненное значение); — · — — переход $\text{Ø}7 \times 1,65 \rightarrow \text{Ø}5 \times 1,6$ мм; — — — — переход $\text{Ø}7 \times 1,775 \rightarrow \text{Ø}5 \times 1,6$ мм; - · - · - — — переход $\text{Ø}7 \times 1,9 \rightarrow \text{Ø}5 \times 1,6$ мм)

Fig. 7. Measurement of residual equivalent stresses in the tube after drawing: а is along the outer tube surface; б is along the inner tube surface: solid line (—) is mandrel-free drawing (averaged value); dash-dot (— · —) is $\text{Ø}7 \times 1,65 \rightarrow \text{Ø}5 \times 1,6$ mm; dashed (— — —) is $\text{Ø}7 \times 1,775 \rightarrow \text{Ø}5 \times 1,6$ mm; dotted (— · - · —) is $\text{Ø}7 \times 1,9 \rightarrow \text{Ø}5 \times 1,6$ mm.

Линейная аппроксимация данных демонстрирует рост нормальных давлений по мере увеличения степени деформации. При незначительных обжатиях нормальные давления составляют до 200 МПа. Верхний порог рекомендованных обжатий по толщине стенки (до 0,3 мм) показывает уровень нормальных давлений 300–350 МПа. Данные величины свидетельствуют об уровне исходного натяга между оправкой и проволоченной трубой при моделировании процессов извлечения оправки из трубы.

Выводы

Для решения задачи выбора режимов настройки механизма извлечения длинной оправки из труб малых (в том числе капиллярных) размеров выполнено моделирование процесса волочения. Особенностью модели является учет упругопластических свойств объектов при задании объектов модели. Результаты моделирования позволяют оценить уровень остаточных напряжений между трубой и оправкой, а также величины натяга, возникающих между проволоченной трубой и оправкой, чтобы в дальнейшем подготовить теоретические данные для моделирования извлечения оправки без брака продукции.

Список источников

1. Технология и оборудование трубного производства: учеб. пособие / В.Я. Осадчий и др.; под ред. В.Я. Осадчего. М.: Интермет Инжиниринг, 2007. 560 с.
2. Junmo Kang. High-speed Internal Finishing of Capillary Tubes by Magnetic Abrasive Finishing Finishing /a, Andrew Georgea, Hitomi Yamaguchia // 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012. Procedia CIRP 1. 2012, pp. 414–418.

3. ГОСТ 14162–79. Трубки стальные малых размеров (капиллярные). Технические условия: межгосударственный стандарт: дата введения 1981–01–01. М.: Изд-во стандартов, 1981. 9 с.
4. ГОСТ 2624–2016. Трубки медные и латунные капиллярные. Технические условия: межгосударственный стандарт: дата введения 2017–04–01. М.: Стандартинформ, 2017. 16 с.
5. Рудской А.И., Лунев В.А., Шаболдо О.П. Волочение: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 125 с.
6. Analysis of the Drawing Process of Small-Sized Seam Tubes / Alexander Schrek, Alena Brusilová, Pavol Švec, Zuzana Gábrišová and Ján Moravec // Metals. 2020, vol. 10, no. 6, p. 709.
7. Орлов Г.А. Основы теории прокатки и волочения труб: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. 204 с.
8. Пат. 76259 Рос. Федерация, МПК В21С 3/00. Механизм обработки труб: № 2006105113/22: заявл. 2006.02.20; опубл. 20.09.2008/ Буркин С.П., Серебряков А.В., Серебряков А.В., Прилуков С.Б., Ладыгин С.А. Марков Д.В.; заявитель и патентообладатель ОАО «Первоуральский новотрубный завод». 6 с.
9. Modeling Reeling Process of Capillary Tubes Following Mandrel Drawing / Parshin, S. V., Khlebnikov, P. S., Fedulov, A. A., Semenova, N. V., & Parshina, A. A. // Metallurgist. 2024, no. 67(9-10), pp. 1532–1537.
10. Шинкин В.Н. Сопротивление материалов для металлургов: учебник. М.: Изд. Дом МИСиС, 2013. 655 с.
11. Кожаринова Л.В. Основы теории упругости и пластичности: учеб. пособие. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2010. 136 с.

References

1. Osadchiy V.Ya., et al. *Tekhnologiya i oborudovanie trubnogo proizvodstva* [Theory and equipment of pipe production]. Moscow: Internet Inzhiniring, 2007, 560 p. (In Russ.)
2. Junmo Kang, Andrew Georgea, Hitomi Yamaguchia. High-speed Internal Finishing of Capillary Tubes by Magnetic Abrasive Finishing. 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012. Procedia CIRP 1. 2012:414-418.
3. State standard GOST 14162-79. Steel tubes of small dimensions (capillary). Specifications. Moscow: Standards Publishing House, 1981, 9 p. (In Russ.)
4. State standard GOST 2624-2016. Capillary copper and brass tubes. Specifications. Moscow: Standartinform, 2017, 16 p. (In Russ.)
5. Rudskoy A.I., Lunev V.A., Shaboldo O.P. *Volocheniye: ucheb. posobiye* [Drawing: a study guide]. Saint Petersburg: Publishing House of Polytechnic University, 2011, 125 p. (In Russ.)
6. Alexander Schrek, Alena Brusilová, Pavol Švec, Zuzana Gábríšová, Ján Moravec. Analysis of the Drawing Process of Small-Sized Seam Tubes. *Metals*. 2020;10(6):709.
7. Orlov G.A. *Osnovy teorii prokatki i volocheniya trub: uchebnoye posobiye* [Foundations of pipes rolling and drawing theory: a study guide]. Yekaterinburg: Publishing House of the Ural Federal University, 2016, 204 p. (In Russ.)
8. Burkin S.P., Serebryakov A.V., Serebryakov A.V., Prilukov S.B., Ladygin S.A., Markov D.V. *Mekhanizm obrabotki trub* [Pipes processing mechanism]. Patent RU, no. 2006105113/22, 2008.
9. Parshin S.V., Khlebnikov P.S., Fedulov A.A., Semenova N.V., Parshina A.A. Modeling Reeling Process of Capillary Tubes Following Mandrel Drawing. *Metalurgist*. 2024;67(9-10):1532-1537.
10. Shinkin V.N. *Soprotivleniye materialov dlya metallurgov: ucheb.* [Strength of materials for metallurgists: a textbook]. Moscow: Publishing House of MISiS, 2013, 655 p. (In Russ.)
11. Kozharinova L.V. *Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti. Uchebnoye posobiye* [Foundations of elasticity and plasticity theory. Study guide]. Moscow: Publishing House of the Association of Civil Engineering Universities, 2010, 136 p. (In Russ.)

Поступила 20.01.2025; принята к публикации 01.04.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 20/01/2025; revised 01/04/2025; published 30/09/2025

Федулов Артем Анатольевич – кандидат технических наук, доцент,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия.
Email: a.a.fedulov@urfu.ru. ORCID 0000-0002-5271-5310

Каменечки Владимир – аспирант,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия.
Email: a.a.fedulov@urfu.ru.

Булганина Марина Юрьевна – кандидат технических наук, доцент,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия.
Email: marina.bulganina@urfu.ru. ORCID 0009-0009-7833-7846

Artem A. Fedulov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Email: a.a.fedulov@urfu.ru. ORCID 0000-0002-5271-5310

Vladimir Kamenechki – Postgraduate Student,
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Email: a.a.fedulov@urfu.ru.

Marina Yu. Bulganina – PhD (Eng.), Associate Professor,
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Email: marina.bulganina@urfu.ru. ORCID 0009-0009-7833-7846