



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Границы применимости метода разрывных решений в исследовании процессов волочения труб

Александр Удалов

Вятский государственный университет, ул. Московская, 36, г. Киров, 610000, Россия

<https://orcid.org/0000-0003-0210-5423>, a.v.udalov1960@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.04

История статьи:

Поступила: 11 июня 2020
 Рецензирование: 22 июня 2020
 Принята к печати: 01 октября 2020
 Доступно онлайн: 15 декабря 2020

Ключевые слова:

Труба
 Разрывное решение
 Сдвиг
 Изгибающий момент
 Напряжения
 Работа
 Волочение
 Коническая матрица

АННОТАЦИЯ

Введение. Внеконтактная деформация материала заготовки, возникающая по границам очага деформации, является одним из основных факторов, определяющих энергосиловые параметры процессов редуцирования труб. Наибольшее распространение в практике проектирования процессов обработки металлов давлением получил метод разрывных решений, позволяющий достаточно просто учесть внеконтактную деформацию при численном моделировании процессов. Однако для большинства процессов в технической литературе отсутствуют системные практические рекомендации по применению данного метода, что неизбежно приводит к несоответствию теоретических положений и практики. **Целью работы** является определение границ применимости метода разрывных решений для процессов безоправочного волочения труб через коническую матрицу, в зависимости от геометрических параметров заготовки, инструмента, а также степени деформации и упрочнения обрабатываемого материала. **Методы исследования.** Модель очага деформации для процесса безоправочного волочения рассматривалась в двух вариантах: по методу разрывных решений и с учетом внеконтактных изгибов стенки трубы. Из условия баланса работ сил сдвига, действующих по условной поверхности среза, и изгибающих моментов, вызванных изгибом стенки трубы, при различных деформационных условиях определены граничные значения параметра толстостенности, при которых численное моделирование процессов волочения целесообразно выполнять с использованием метода разрывных решений. Расчеты выполнялись отдельно для двух участков очага деформации, соответствующих изгибу стенки трубы на входе в матрицу и на выходе из нее. **Результаты и обсуждения.** Численная реализация полученных зависимостей показала, что на входе в очаг деформации граничное значение параметра толстостенности увеличивается с ростом угла конусности матрицы и вытяжки за переход, но уменьшается с ростом напряжения противонапряжения и параметра толстостенности исходной заготовки. На выходе из очага деформации граничное значение параметра толстостенности увеличивается с ростом угла конусности матрицы и уменьшается с ростом коэффициента вытяжки за переход и параметра толстостенности исходной заготовки. Если параметр толстостенности исходной заготовки превышает граничное значение, то при численном моделировании целесообразно использовать метод разрывных решений. Если не превышает, то необходимо применять другие методы и модели. Результаты теоретического исследования могут быть использованы при проектировании процессов волочения труб.

Для цитирования: Удалов А.В. Границы применимости метода разрывных решений в исследовании процессов волочения труб // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 18–30. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-18-30.

Введение

Точность определения параметров напряженно-деформированного состояния при разработке процессов обжима [1–4] и волочения труб [5–9] во многом определяет соответствие

качества готовой продукции требованиям заказчика. Энергосиловые параметры процесса волочения и геометрическая точность труб в значительной степени зависят от внеконтактной деформации материала заготовки, возникающей в процессе редуцирования [10–14], так как ее доля в суммарном влиянии всех факторов может составлять более 25 % [10–12]. Несмотря на значительное количество теоретических и экспериментальных работ, посвященных данному вопросу, отсутствуют системные практические

*Адрес для переписки

Удалов Александр Викторович, к.т.н., доцент
 Вятский государственный университет,
 ул. Московская, 36,
 610000, г. Киров, Россия
 Тел.: +7 (922) 930-72-455, e-mail: a.v.udalov1960@gmail.com

рекомендации, позволяющие в зависимости от деформационных условий назначать метод расчета параметров внеконтактной деформации для процессов редуцирования труб. Использование метода конечных элементов (МКЭ) для описания формоизменения материала [15–19] и распределения остаточных напряжений [20–23] в процессе волочения позволяет в значительной степени решить эту проблему. Экспериментальную проверку точности таких теоретических моделей целесообразно выполнять методом индентирования [24, 25], позволяющим с высокой точностью определять распределение напряжений в пределах очага деформации.

Однако разработка программ для проектирования процессов обработки давлением с использованием метода конечных элементов (МКЭ), обладающего высокой точностью, характеризуется и значительной трудоемкостью, а использование готового лицензионного программного продукта обходится очень дорого. Поэтому в инженерной практике по причине экономической целесообразности при определении энергосиловых параметров (напряжения и силы процесса волочения) наибольшее применение получили более простые модели, использующие, например, метод разрывных решений [1, 11–14]. При этом в результате принимаемых в инженерных методах допущений точность расчетов снижается, и результаты теоретических исследований не всегда соответствуют экспериментальным. В связи с этим в теоретических исследованиях процессов пластического обжима и волочения [11–14] установлено, что целесообразность использования метода разрывных решений определяется конкретными деформационными условиями процесса. Разработанная методика [11] может быть использована в теоретических исследованиях любых процессов обработки трубных заготовок, что позволит в конечном итоге повысить точность расчетов с использованием инженерных методов.

Целью данной статьи является определение границ применимости метода разрывных решений для процессов безправочного волочения труб через коническую матрицу в зависимости от геометрических параметров заготовки, инструмента, а также степени деформации и упрочнения обрабатываемого материала.

Методика проведения экспериментального исследования

Исследование выполнено для процесса безправочного волочения с учетом противонапряжения. Модель очага деформации при исследовании процессов волочения труб представляется в одном из двух вариантов, показанных на рис. 1 и 2. В модели по методу разрывных решений (рис. 1) внеконтактные пластические изгибы стенки трубы на входе в конический участок матрицы и на выходе из него заменены условными поверхностями среза $I-I$ и $II-II$, в которых осевое напряжение процесса получает приращения $\Delta\sigma_{Z1}$ и $\Delta\sigma_{Z2}$ соответственно. По условным поверхностям среза в радиальном направлении действуют касательные напряжения τ_p .

Модель очага деформации, построенная с учетом внеконтактных изгибов стенки трубы на входе в конус матрицы и на выходе из него, показана на рис. 2. Участок внеконтактного изгиба на выходе из конуса матрицы условно не показан, а радиус свободного изгиба стенки трубы равен радиусу скругления кромки инструмента r . На входе в матрицу металл трубы испытывает действие осевых растягивающих напряжений противонапряжения σ_0 . На выходе из матрицы металл испытывает действие осевых растягивающих напряжений волочения σ_Z . На входе в матрицу и на выходе из нее в сечениях резкого изменения кривизны срединной поверхности стенки трубы (например, точки A и B) возникают моменты M , действующие в осевых сечениях [11].

На практике в расчетах реализуется модель формоизменения металла, при которой деформация протекает с меньшими затратами энергии. Исходя из этого, граница применимости метода разрывных решений определяется из условия баланса работ [11] сил сдвига, вызванных касательными напряжениями τ_p (рис. 1), и изгибающих моментов M , вызванных изменением кривизны срединной поверхности стенки трубы на входе в коническую матрицу и на выходе из нее (рис. 2). Данное условие баланса работ необходимо рассматривать для каждого участка внеконтактной деформации в отдельности.

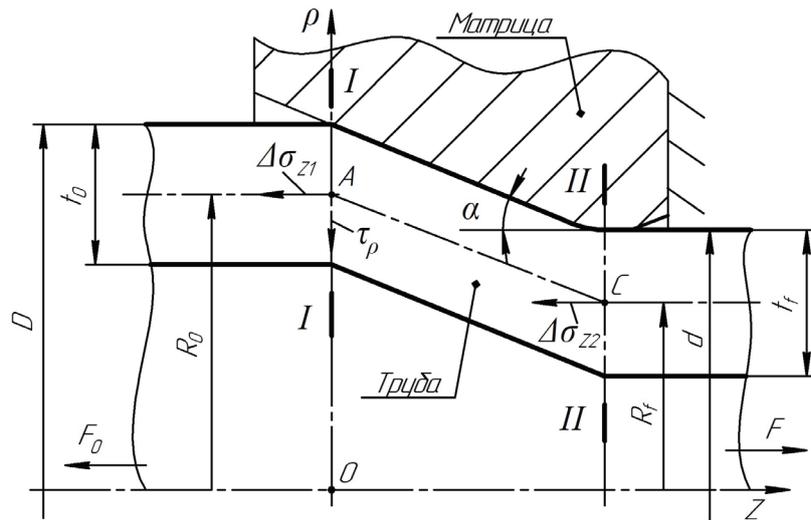


Рис. 1. Схема очага деформации процесса по методу разрывных решений:

t_0 , D , R_0 – соответственно толщина стенки, наружный диаметр и радиус срединной поверхности исходной трубы; t_f , d , R_f – соответственно толщина стенки, наружный диаметр и радиус срединной поверхности трубы на выходе из конического участка матрицы; α – угол конусности матрицы; F – сила процесса волочения; F_0 – сила противонатяжения

Fig. 1. Diagram of the deformation zone of the process by the method of discontinuous solutions:

t_0 , D , R_0 – the wall thickness, outer diameter and radius of the middle surface of the original pipe respectively; t_f , d , R_f – the wall thickness, outer diameter and radius of the middle surface of the pipe at the exit from the conical section of the matrix respectively; α – matrix taper angle; F – force of the drawing process; F_0 – anti-tension force

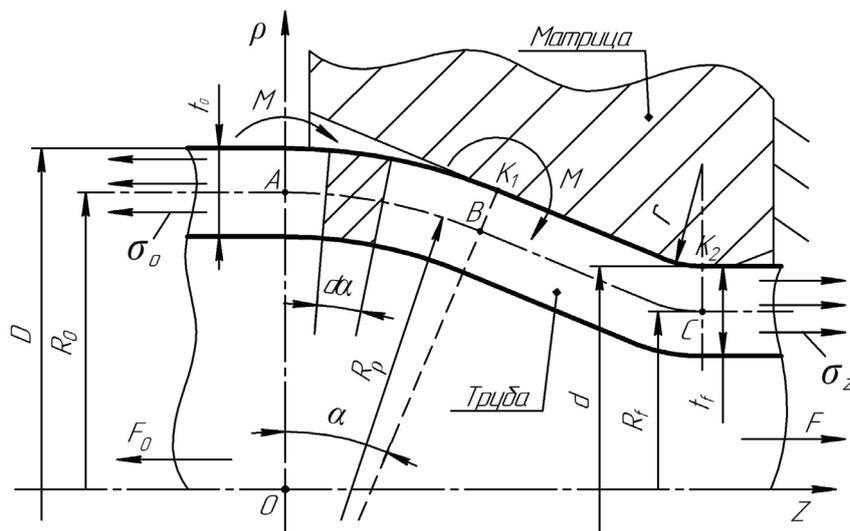


Рис. 2. Схема очага деформации с учетом внеконтактного изгиба стенки трубы:

R_p – радиус свободного изгиба стенки трубы; σ_z – полное напряжение волочения трубы; σ_0 – напряжение противонатяжения

Fig. 2. Diagram of the deformation zone taking into account non-contact bending of the pipe wall:

R_p – pipe bend radius; σ_z – full pipe drawing stress; σ_0 – anti-tension stress

В решении используется цилиндрическая система координат φ, ρ, z , в которой ось z совпадает с осью деформируемой трубы, ось ρ перпендикулярна оси трубы, φ – это угловая координата, откладываемая в плоскости, перпендикулярной оси деформируемой трубы. Условия равенства работ составляются для элемента полоски единичной ширины на пути перемещения элемента стенки трубы в пределах элементарного угла $d\alpha$ участка внеконтактной деформации (рис. 2). Данный метод решения использовался, например, в работе [11]. При волочении без оправки принимается постоянство толщины стенки трубы, т. е. $t_f = t_0$.

Определение границ применимости метода разрывных решений для внеконтактного участка стенки трубы на входе в конический участок матрицы при безоправочном волочении с противонапряжением

При волочении с противонапряжением на входе в конический участок матрицы стенка трубы совершает изгиб совместно с действием осевых растягивающих напряжений σ_0 , создаваемых силой противонапряжения F_0 (рис. 2). В соответствии с разработанной методикой [11] условие баланса работ сил сдвига и изгибающих моментов по условной поверхности среза $I-I$ на входе в матрицу запишется в виде

$$A_\tau = A_M + A_Z, \quad (1)$$

где A_τ – работа сил сдвига, вызванных касательными напряжениями τ_ρ , действующих по условной поверхности среза $I-I$ (рис. 1); A_M – работа изгибающих моментов M (рис. 2), вызванных свободным изгибом стенки трубы на входе в конический участок матрицы при отсутствии осевых напряжений; A_Z – работа момента от сил, вызванных осевыми напряжениями противонапряжения σ_0 относительно точки B внеконтактного участка (рис. 2).

Работа сил сдвига определяется по формуле [11]

$$A_\tau = \Delta\sigma_{Z1} t_0 R_p d\alpha. \quad (2)$$

Радиус свободного изгиба R_p стенки трубы на входе в конический участок матрицы равен [10, 11]

$$R_p = \frac{\sqrt{R_0 t_0}}{\sqrt{2} \sin \alpha}. \quad (3)$$

Приращение осевого напряжения $\Delta\sigma_{Z1}$, вызванное действием сил сдвига на входе трубы в конический участок матрицы [11]:

$$\Delta\sigma_{Z1} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{S0} \sin^2 \alpha, \quad (4)$$

где σ_{S0} – предел текучести материала исходной заготовки.

С учетом выражений (3) и (4) формула (2) представляется в виде

$$A_\tau = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{S0} \sin^2 \alpha \cdot t_0 \frac{\sqrt{R_0 t_0}}{\sqrt{2} \sin \alpha} d\alpha. \quad (5)$$

Работа изгибающих моментов M , вызванных двойным изгибом стенки трубы на входе в конус матрицы (рис. 2), равна

$$A_M = 2M d\alpha. \quad (6)$$

Здесь $M = \frac{\sigma_{S1} t_0^2}{4}$ – изгибающий момент, вызванный изменением кривизны срединной линии стенки трубы при ее свободном изгибе [10, 11], где σ_{S1} – среднее значение сопротивления деформации материала в пределах внеконтактного участка на входе в конус матрицы.

Работа момента сил от действия напряжения противонапряжения σ_0 относительно точки B внеконтактного участка определяется по формуле

$$A_Z = \frac{1}{2} \sigma_0 t_0 R_p \cdot (1 - \cos \alpha) d\alpha. \quad (7)$$

Сопротивление деформации σ_{S1} определяется по степенной зависимости

$$\sigma_{S1} = \sigma_{S0} + g\Lambda^b. \quad (8)$$

Здесь g и b – эмпирические коэффициенты упрочнения материала; Λ – интенсивность деформаций сдвига; интенсивность деформаций сдвига определяется по формуле

$$\Lambda = \sqrt{2/3} \times \sqrt{(\varepsilon_\rho - \varepsilon_Z)^2 + (\varepsilon_Z - \varepsilon_\varphi)^2 + (\varepsilon_\varphi - \varepsilon_\rho)^2}, \quad (9)$$

где $\varepsilon_\varphi = \frac{1 - \cos \alpha}{\sqrt{2} \sin \alpha} \cdot \sqrt{\frac{\bar{t}_D}{1 - \bar{t}_D}}$ – степень деформации

материала внеконтактной зоны на входе в очаг деформации в окружном направлении [11]; $\varepsilon_\rho = 0$ – степень деформации металла внеконтактной зоны на входе в очаг деформации в радиальном направлении; $\varepsilon_Z = -\varepsilon_\varphi$ – степень деформации металла внеконтактной зоны на входе в очаг деформации в осевом направлении.

После подстановки (5), (6) и (7) в (1) и соответствующих преобразований определяется граничное значение параметра толстостенности труб $\bar{t}_0 = \frac{t_0}{2R_0}$ для участка внеконтактной деформации на входе в матрицу

$$\bar{t}_0 = \left(\frac{\sigma_{S0}}{\sigma_{S1}} \cdot \frac{2 \sin \alpha}{\sqrt{3}} - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S1}} \cdot \frac{1 - \cos \alpha}{2 \sin \alpha} \right)^2. \quad (10)$$

Если параметр толстостенности исходной трубы $\frac{t_0}{2R_0}$ превышает значение \bar{t}_0 , определяемое формулой (10), то в теоретическом исследовании процесса безоправочного волочения целесообразно применять метод разрывных решений и использовать модель очага деформации, представленную на рис. 1.

Определение границ применимости метода разрывных решений для внеконтактного участка стенки трубы на выходе из конического участка матрицы при волочении без оправки

На выходе из конического участка матрицы стенка трубы совершает изгиб совместно с действием осевых растягивающих напряжений σ_Z , создаваемых силой волочения F .

Условие баланса работ сил сдвига и изгибающих моментов по условной поверхности среза II-II на выходе из матрицы запишется в виде

$$A_\tau = A_M + A_Z, \quad (11)$$

где A_τ – работа сил сдвига, вызванных касательными напряжениями τ_ρ , действующих по условной поверхности среза II-II (рис. 1); A_M – работа изгибающих моментов M (рис. 2), вызванных свободным изгибом стенки трубы на

выходе из конического участка матрицы при отсутствии осевых напряжений; A_Z – работа момента от сил, вызванных осевыми напряжениями σ_Z относительно точки K_2 контакта трубы с матрицей (рис. 2).

С учетом принятых допущений и основных положений формулы (5) работа сил сдвига по условной поверхности среза в плоскости II-II будет равна

$$A_\tau = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{Sf} \cdot \sin^2 \alpha \cdot t_0 \frac{\sqrt{R_f t_0}}{\sqrt{2} \sin \alpha} d\alpha. \quad (12)$$

Здесь $\sigma_{Sf} = \sigma_{S0} + g\Lambda^b$ – сопротивление деформации материала на выходе из матрицы, где $\Lambda = \sqrt{3} \cdot \varepsilon$ – интенсивность деформаций сдвига материала заготовки; $\varepsilon = \ln K_D$ – степень деформации; $K_D = D/d$ – коэффициент редуцирования трубы.

Исходным параметром при расчете сопротивления деформации металла на выходе из матрицы является вытяжка трубы за переход μ_D , которая определяется по формуле

$$\mu_D = \frac{R_0}{R_f} = \frac{D - t_0}{d - t_f} = \frac{(1 - \bar{t}_D) K_D}{1 - \bar{t}_D K_D}, \quad (13)$$

где $\bar{t}_D = t_0 / D$ – параметр толстостенности трубы по наружному диаметру.

Из формулы (13) выражается коэффициент редуцирования трубы

$$K_D = \frac{\mu_D}{1 - \bar{t}_D + \mu_D \bar{t}_D}. \quad (14)$$

Затем K_D используется в формуле (12) при определении σ_{Sf} , что позволяет в расчетах учесть параметр толстостенности \bar{t}_D и вытяжку μ_D .

Работа изгибающих моментов M , вызванных двойным изгибом стенки трубы на выходе из конического участка матрицы, равна

$$A_M = 2 \frac{\sigma_{Sf} t_0^2}{4} d\alpha. \quad (15)$$

Работа момента сил от действия напряжения волочения σ_Z (рис. 2) запишется в виде

$$A_Z = \frac{1}{2} \sigma_Z t_0 \cdot \frac{t_0}{2} d\alpha. \quad (16)$$

После подстановки (12), (15) и (16) в (11) и соответствующих преобразований определяется граничное значение параметра толстостенности труб $t_0/2R_f$ на выходе из конического участка матрицы, выраженное через размеры t_0 и R_f :

$$\frac{t_0}{2R_f} = \frac{4}{3} \sin^2 \alpha \cdot \left(\frac{1}{1 - 0,5\sigma_Z / \sigma_{Sf}} \right)^2. \quad (17)$$

Используя соотношение $R_f = R_0 / \mu_D$ в (17), получаем окончательное выражение для граничного значения параметра толстостенности исходной трубы $\bar{t}_0 = t_0 / 2R_0$ с учетом вытяжки за переход μ_D

$$\bar{t}_0 = \frac{4}{3} \frac{\sin^2 \alpha}{\mu_D} \cdot \left(\frac{1}{1 + 0,5\sigma_Z / \sigma_{Sf}} \right)^2. \quad (18)$$

Если параметр толстостенности исходной трубы $t_0/2R_0$ превышает значение \bar{t}_0 , определяемое формулой (18), то в теоретическом исследовании процесса безоправочного волочения целесообразно применять метод разрывных решений и использовать модель очага деформации, представленную на рис. 1.

Между напряжением волочения σ_Z и сопротивлением деформации σ_{Sf} существует строгая функциональная зависимость, которую необходимо учитывать при численной реализации формулы (18).

Связь между параметрами σ_Z и σ_{Sf} устанавливается с помощью упрощенной формулы И.Л. Перлина [26] для определения напряжения безоправочного волочения

$$\sigma_Z = \ln \mu_D \cdot [1,15\sigma_S + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_f \times \\ \times (1,15\sigma_S - \Delta\sigma_Z / 2)] + \Delta\sigma_Z, \quad (19)$$

где f – коэффициент трения между металлом заготовки и конусом матрицы (в расчетах принимается $f = 0,1$); α_f – приведенный угол конуса матрицы; $\sigma_S = \frac{\sigma_{S0} + \sigma_{Sf}}{2}$ – среднее значение сопротивления деформации материала заготовки в пределах очага деформации.

Приведенный угол α_f определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \alpha_f = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{1 + 2m \frac{d}{D-d} \cdot \operatorname{tg} \alpha}, \quad (20)$$

где m – отношение длины калибрующей зоны матрицы к ее диаметру (в расчетах принимается $m = 0,1$).

В формуле (19) слагаемые, учитывающие напряжения на границе упругой и пластической зон, представлены в виде приращения осевого напряжения $\Delta\sigma_Z$, определяемого выражением [11]

$$\Delta\sigma_Z = \Delta\sigma_{Z\tau} + \Delta\sigma_{ZM}, \quad (21)$$

где $\Delta\sigma_{Z\tau}$ – суммарное приращение осевого напряжения, вызванное действием сил сдвига на входе трубы в конический участок матрицы и на выходе из него; $\Delta\sigma_{ZM}$ – суммарное приращение осевого напряжения, вызванное свободным изгибом стенки трубы на входе в конический участок матрицы и на выходе из него.

Суммарное приращение осевого напряжения $\Delta\sigma_{Z\tau}$ определяется в соответствии с формулой (4)

$$\Delta\sigma_{Z\tau} = 2 \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_S \cdot \sin^2 \alpha. \quad (22)$$

Суммарное приращение осевого напряжения $\Delta\sigma_{ZM}$ определяется по формуле [11]

$$\Delta\sigma_{ZM} = \sigma_S \sin \alpha \cdot \sqrt{\frac{\bar{t}_D}{1 - \bar{t}_D}}. \quad (23)$$

Аргумент натурального логарифма в формуле (19), являющийся вытяжкой за переход μ_D при безоправочном волочении, определяется по формуле (13), что позволяет учесть влияние изменения толстостенности трубы.

Результаты и обсуждение

Численная реализация зависимости (10) для стали 10 показала, что на входе в матрицу параметр \bar{t}_0 увеличивается с ростом угла конусности α (рис. 3), но уменьшается с ростом напряжения противонапряжения (рис. 3 и 4) и параметра толстостенности \bar{t}_0 (рис. 4). Анализ

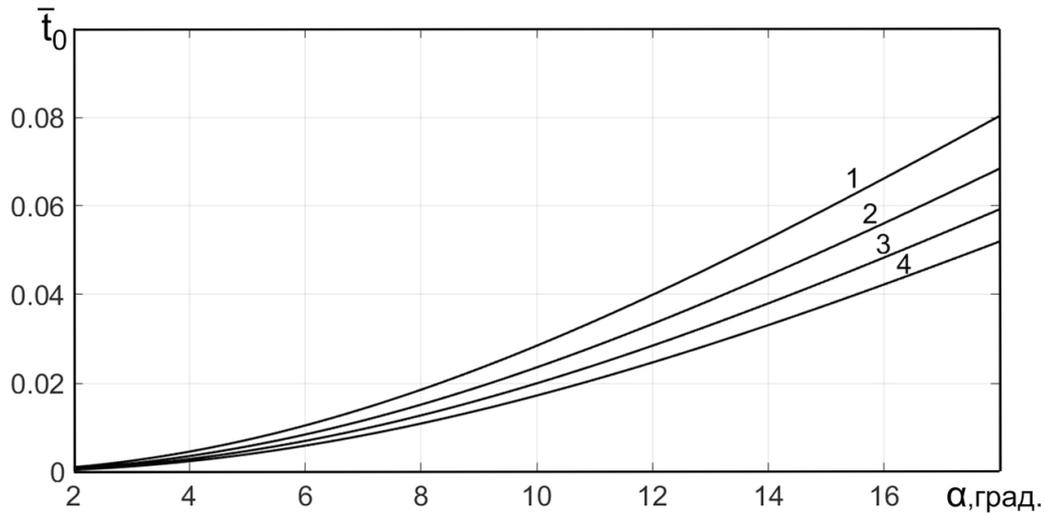


Рис. 3. Граничное значение параметра \bar{t}_0 на входе в конический участок матрицы при $\bar{t}_D = 0,05$:

$$1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0; \quad 2 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0,3; \quad 3 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0,6; \quad 4 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0,9$$

Fig. 3. The boundary value of the parameter \bar{t}_0 at the entrance to the conical section of the matrix at $\bar{t}_D = 0,05$:

$$1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0; \quad 2 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0,3; \quad 3 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0,6; \quad 4 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0,9$$

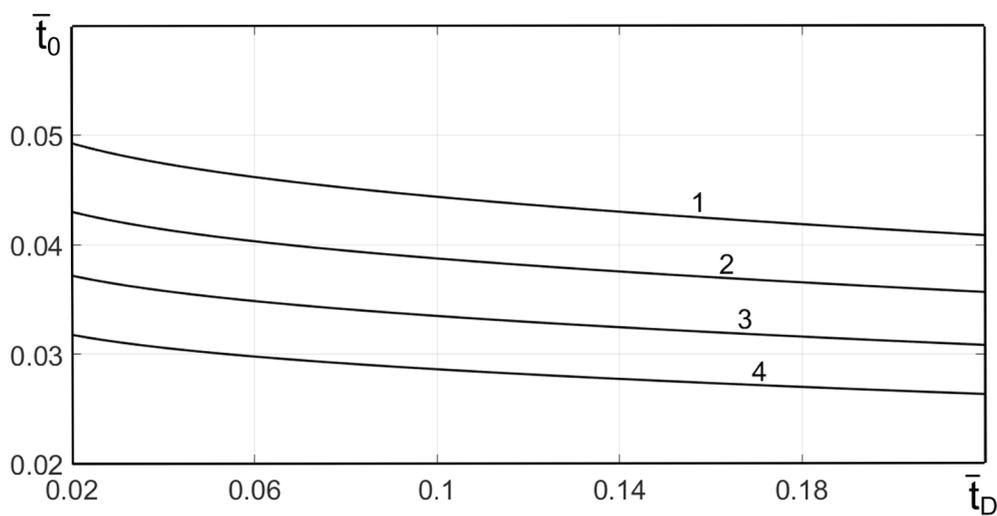


Рис. 4. Граничное значение параметра \bar{t}_0 на входе в конический участок матрицы при $\alpha = 12^\circ$:

$$1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0; \quad 2 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0,3; \quad 3 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0,6; \quad 4 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0,9$$

Fig. 4. The boundary value of the parameter \bar{t}_0 at the entrance to the conical section of the matrix at $\alpha = 12^\circ$:

$$1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0; \quad 2 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0,3; \quad 3 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0,6; \quad 4 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0,9$$

зависимости (18) показал (рис. 5 и 6), что на выходе из очага деформации параметр \bar{t}_0 увеличивается с ростом угла конусности мат-

рицы α и уменьшается с ростом коэффициента вытяжки за переход μ_D и параметра толсто-стенности \bar{t}_D .

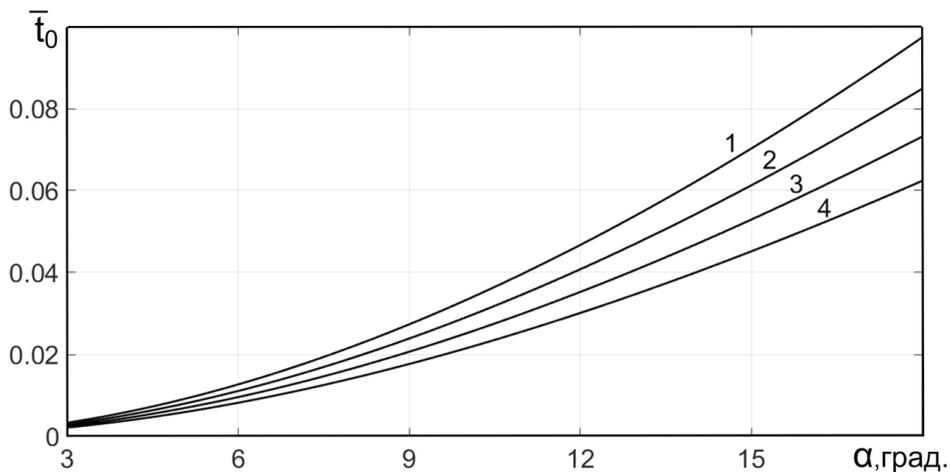


Рис. 5. Граничное значение параметра \bar{t}_0 на выходе из конического участка матрицы при $\bar{t}_D = 0,05$; $\sigma_0 = 0$:

$$1 - \mu_D = 1,1; \quad 2 - \mu_D = 1,2; \quad 3 - \mu_D = 1,3; \quad 4 - \mu_D = 1,4$$

Fig. 5. The boundary value of the parameter \bar{t}_0 at the exit from the conical section of the matrix at $\bar{t}_D = 0,05$; $\sigma_0 = 0$:

$$1 - \mu_D = 1,1; \quad 2 - \mu_D = 1,2; \quad 3 - \mu_D = 1,3; \quad 4 - \mu_D = 1,4$$

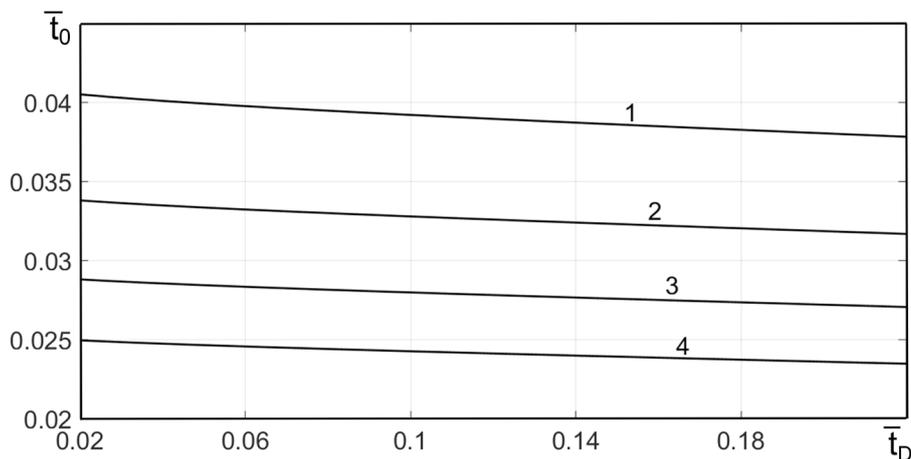


Рис. 6. Граничное значение параметра \bar{t}_0 на выходе из конического участка матрицы при $\alpha = 12^\circ$; $\sigma_0 = 0$:

$$1 - \mu_D = 1,1; \quad 2 - \mu_D = 1,2; \quad 3 - \mu_D = 1,3; \quad 4 - \mu_D = 1,4$$

Fig. 6. The boundary value of the parameter \bar{t}_0 at the exit from the conical section of the matrix at $\alpha = 12^\circ$; $\sigma_0 = 0$:

$$1 - \mu_D = 1,1; \quad 2 - \mu_D = 1,2; \quad 3 - \mu_D = 1,3; \quad 4 - \mu_D = 1,4$$

Результаты исследования подтвердили ранее полученные выводы [11–14] относительно того, что более толстостенной трубе становится энергетически выгоднее совершать изгиб на входе и выходе матрицы за счет сил сдвига, нежели за счет изгибающих моментов. А с увеличением угла конусности α стенке трубы становится энергетически выгоднее совершать изгиб на входе и выходе матрицы за счет изгибающих моментов, нежели за счет сил сдвига.

Выводы

1. Полученные зависимости (10) и (18) позволяют определить условия, при которых следует использовать метод разрывных решений в теоретическом исследовании процессов безоправочного волочения труб в конической матрице.

2. Если параметр толстостенности исходной трубы $t_0/2R_0$ превышает значение \bar{t}_0 , определяемое формулами (10) и (18), то в теоретическом исследовании внеконтактную деформацию целесообразно учитывать с помощью метода разрывных решений.

3. Если параметр толстостенности исходной трубы $t_0/2R_0$ не превышает значение \bar{t}_0 , определяемое формулами (10) и (18), то необходимо использовать другие методы численного моделирования процессов волочения.

4. Полученные зависимости могут быть использованы при проектировании процессов волочения труб.

Список литературы

1. Avitzur B. Tube sinking and expanding // Journal of Engineering for Industry. – 1965. – Vol. 87, iss. 1. – P. 71–79. – DOI: 10.1115/1.3670762.

2. Грязев М.В., Пасынков А.А., Платонов В.И. Силовые и деформационные параметры обжима анизотропной трубной заготовки в конической матрице // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2016. – № 10. – С. 3–7.

3. An analytical solution for tube sinking by strain rate vector inner-product integration / D.W. Zhao, H.J. Du, G.J. Wang, X.H. Liu, G.D. Wang // Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – Vol. 209, iss. 1. – P. 408–415. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.02.011.

4. Sinking of ultra-thick-walled double-layered aluminium tubes / B. Gulseren, O. Bychkov, I. Frolov,

M. Schaper, O. Grudin // Archives of Metallurgy and Materials. – 2018. – Vol. 63, iss. 1. – P. 365–370. – DOI: 10.24425/118949.

5. Myshechkin A.A., Osadchii V.Y. Drawing of thin-walled welded pipe // Steel in Translation. – 2019. – Vol. 49, iss. 4. – P. 277–280. – DOI: 10.3103/S0967091219040090.

6. Осадчий В.Я., Воронцов А.Л., Карпов С.М. Расчет напряжений и усилий при волочении труб // Производство проката. – 2001. – № 10. – С. 8–12.

7. Логинов Ю.Н., Шалаева М.С., Овчинников А.С. Исследование соотношения деформаций при волочении толстостенных и тонкостенных медных труб // Производство проката. – 2011. – № 7. – С. 31–35.

8. Выдрин А.В., Яковлева К.Ю. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при волочении труб на самоустанавливающейся оправке на основе совместного применения проекционного метода и метода конечных элементов // Производство проката. – 2016. – № 1. – С. 26–33.

9. Влияние модели материала на напряженно-деформированное состояние в очаге деформации на примере процесса безоправочного волочения трубы / Г.В. Шимов, М.В. Ерпалов, Д.А. Павлов // Черные металлы. – 2018. – № 10. – С. 27–32.

10. Паршин С.В., Удалов А.А., Удалов А.В. Влияние внеконтактной деформации на напряжения в процессе пластического обжима труб в конической матрице // Производство проката. – 2017. – № 11. – С. 24–30.

11. Удалов А.А., Удалов А.В. Метод разрывных решений в исследовании процесса пластического обжима труб // Производство проката. – 2018. – № 2. – С. 30–36.

12. Udalov A.A., Udalov A.V., Parshin S.V. Influence of deformation conditions on the power regimes of the process of cold crimping of a pipe billet in a conical die // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 946, iss. 10. – P. 812–817. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.946.812.

13. Баранов Г.Л. Анализ напряженно-деформированного состояния при проталкивании круглых труб // Известия вузов. Черная металлургия. – 1984. – № 4. – С. 30–35.

14. Баранов Г.Л., Кузнецов В.И. Напряжения на границе очага пластической деформации при безоправочном волочении труб // Цветные металлы. – 1988. – № 11. – С. 88–90.

15. Cold drawing of 316L stainless steel thin-walled tubes: experiments and finite element analysis / M. Palengat, G. Chagnon, D. Favier, H. Louche, C. Linardon // International Journal of Mechanical Sciences. – 2013. – Vol. 70. – P. 69–78. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2013.02.003.

16. Manufacturing of precision seamless steel tubes using cold drawing technology: simulation and experiment / M. Ridzon, P. Bucek, M. Necpal, L. Parilak // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 808. – P. 80–85. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.808.80.

17. Kuroda K., Kawakami T., Okui T. Influential factor to dimensional precision of cold-drawn tubes // *Journal of Engineering Manufacture*. – 2014. – Vol. 229, iss. 1. – P. 100–109. – DOI: 10.1177/0954405414525381.

18. Zottis J., Soares Diehl C.A.T., Rocha A. da Silva. Evaluation of experimentally observed asymmetric distributions of hardness, strain and residual stress in cold drawn bars by FEM-simulation // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2018. – Vol. 7, iss. 4. – P. 469–478. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2018.01.004.

19. Numerical simulation of cold drawing of steel tubes with straight internal rifling / P. Bella, R. Durcik, M. Ridzon, L. Parilak // *Procedia Manufacturing*. – 2018. – Vol. 15, iss. 10. – P. 320–326. – DOI: 10.1016/j.promfg.2018.07.225.

20. Effect of die geometry on residual stress level present after bar drawing / T. Kuboki, M. Akiyama, Y. Neishi, K. Kuroda // *Ironmaking and Steelmaking*. – 2001. – Vol. 28, iss. 1. – P. 65–71. – DOI: 10.1179/irs.2001.28.1.65.

21. Pirling N., Carrado A., Palkowski H. Residual stress distribution in seamless tubes determined experimentally and by FEM // *Procedia Engineering*. – 2011. –

Vol. 10, iss. 10. – P. 3080–3085. – DOI: 10.1016/j.promfg.2011.04.510.

22. Residual stresses evolution in Cu tubes, cold drawn with tilted dies – Neutron diffraction measurements and finite element simulation / F. Foadian, A. Carrado, T. Pirling, H. Palkowski // *Materials and Design*. – 2016. – Vol. 107, iss. 5. – P. 163–170. – DOI: 10.1016/j.matdes.2016.06.028.

23. Finite element modelling of cold drawing for high-precision tubes / F. Boutenel, M. Delhomme, V. Velay, R. Boman // *Comptes Rendus Mécanique*. – 2018. – Vol. 346, iss. 8. – P. 665–677. – DOI: 10.1016/j.crme.2018.06.005.

24. Удалов А.А., Удалов А.В., Паршин С.В. Определение сопротивления деформации металлов и сплавов методом внедрения индентора // *Деформация и разрушение материалов*. – 2019. – № 4. – С. 40–44. – DOI: 10.31044/1814-4632-2019-4-40-44.

25. Удалов А.В., Удалов А.А. Исследование изменения сопротивления деформации низкоуглеродистой стали в процессе ротационной вытяжки с утонением стенки // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 59–71. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-59-71.

26. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. – М.: Металлургия, 1971. – 448 с.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 Автор. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



The Limits of Applicability of the Method of Discontinuous Solutions in the Study of Pipe Drawing Processes

Aleksander Udalov

Vyatka State University, 36 Moskovskaya st., Kirov, 610000, Russian Federation

 <https://orcid.org/0000-0003-0210-5423>,  a.v.udalov1960@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 11 June 2020

Revised: 22 June 2020

Accepted: 01 October 2020

Available online: 15 December 2020

Keywords:

Pipe

Discontinuous solutions

Shear

Bending moment

Stress

Work

Drawing

Conical die

ABSTRACT

Introduction . Non-contact deformation of the workpiece material, which occurs along the boundaries of the deformation zone, is one of the main factors determining the energy-power parameters of pipe reduction processes. The most widespread practice in the design of metal forming processes is the method of discontinuous solutions, which makes it quite simple to take into account non-contact deformation in numerical simulation of processes. However, for most processes in the technical literature there are no systematic practical recommendations on the application of this method, which inevitably leads to a mismatch of theoretical principles and practice. **The aim of the work** is to determine the limits of applicability of the method of discontinuous solutions for processes of faultless drawing of pipes through a conical die, depending on the geometric parameters of the workpiece, tool, as well as the degree of deformation and hardening of the processed material. **Research Methods**. The model of the deformation zone for the process of flawless drawing is considered in two versions: by the method of discontinuous solutions and taking into account non-contact bends of the pipe wall. From the condition of the balance of the shear forces acting on the conditional shear surface and the bending moments caused by the bending of the pipe wall, under various deformation conditions, the boundary values of the thickness parameter are determined, at which it is advisable to carry out numerical simulation of the drawing processes using the discontinuous solution method. In this case, the calculations are performed separately for two sections of the deformation zone corresponding to the bending of the pipe wall at the entrance to and exit from the die. **Results and discussions**. The numerical implementation of the obtained dependences showed that at the entrance to the deformation zone, the boundary value of the thickness parameter increases with an increase in the taper angle of the die and the hood for the transition, but decreases with an increase in the anti-tension stress and the thickness parameter of the initial workpiece. At the exit from the deformation zone, the boundary value of the thick-walled parameter increases with an increase in the taper angle of the die and decreases with an increase in the stretch coefficient for the transition and the thick-walled parameter of the initial billet. If the parameter of the thickness of the initial billet exceeds the boundary value, then in numerical modeling it is advisable to use the method of discontinuous solutions. If it does not exceed, then other methods and models should be used. The results of a theoretical study can be used in the design of pipe drawing processes.

For citation: Udalov A.V. The limits of applicability of the method of discontinuous solutions in the study of pipe drawing processes. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 18–30. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-18-30. (In Russian).

References

1. Avitzur B. Tube sinking and expanding. *Journal of Engineering for Industry*, 1965, vol. 87, iss. 1, pp. 71–79. DOI: 10.1115/1.3670762.
2. Gryazev M.V., Pasyukov A.A., Platonov V.I. Silovye i deformatsionnye parametry obzhima anizotropnoi trubnoi zagotovki v konicheskoi matritse [The power and deformation parameters of the anisotropic crimped tube stock in a conical matrix]. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem = Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*, 2016, no. 10, pp. 3–7.

* Corresponding author

Udalov Aleksander V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Vyatka State University,
36 Moskovskaya st.,
610000, Kirov, Russian Federation
Tel.: +7 (922) 930-72-45, e-mail: a.v.udalov1960@gmail.com

3. Zhao D.W., Du H.J., Wang G.J., Liu X.H., Wang G.D. An analytical solution for tube sinking by strain rate vector inner-product integration. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, iss. 1, pp. 408–415. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.02.011.
4. Gulseren B., Bychkov O., Frolov I., Schaper M., Grudin O. Sinking of ultra-thick-walled double-layered aluminium tubes. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2018, vol. 63, iss. 1, pp. 365–370. DOI: 10.24425/118949.
5. Myshechkin A.A., Osadchii V.Y. Drawing of thin-walled welded pipe. *Steel in Translation*, 2019, vol. 49, iss. 4, pp. 277–280. DOI: 10.3103/S0967091219040090.
6. Osadchii V.Ya., Vorontsov A.L., Karpov S.M. Raschet napryazhenii i usilii pri volochenii trub [Calculation of stresses and efforts when drawing pipes]. *Proizvodstvo prokata = Rolling*, 2001, no. 10, pp. 8–12.
7. Loginov Yu.N., Shalaeva M.S., Ovchinnikov A.S. Issledovanie sootnosheniya deformatsii pri volochenii tolstostennykh i tonkostennykh mednykh trub [Strain relations during drawing the thin-walled and thick-walled copper tubes]. *Proizvodstvo prokata = Rolling*, 2011, no. 7, pp. 31–35.
8. Vydrin A.V., Yakovleva K.Yu. Matematicheskoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya pri volochenii trub na samoustanavlivayushcheisya opravke na osnove sovместного primeneniya proektsionnogo metoda i metoda konechnykh elementov [Mathematical simulation of deflected mode during tube drawing on floating plug mandrel, based on combined use of projection method and finite element method]. *Proizvodstvo prokata = Rolling*, 2016, no. 1, pp. 26–33.
9. Shimov G.V., Erpalov M.V., Pavlov D.A. Vliyanie modeli materiala na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie v ochage deformatsii na primere protsessa bezopravochnogo volocheniya truby [Effect of the material model on the stress-strain state in the deformation zone during pipe drawing]. *Chernye metally = Stahl und Eisen*, 2018, no. 10, pp. 27–32. (In Russian).
10. Parshin S.V., Udalov A.A., Udalov A.V. Vliyanie vnekontaktnoi deformatsii na napryazheniya v protsesse plasticheskogo obzhima trub v konicheskoi matritse [Influence of non-contact deformation on stresses during plastic crimping of pipes in a conical matrix]. *Proizvodstvo prokata = Rolling*, 2017, no. 11, pp. 24–30.
11. Udalov A.A., Udalov A.V. Metod razryvnykh reshenii v issledovanii protsessa plasticheskogo obzhima trub [The method of discontinuous solutions in the study of the process of plastic crimping pipes]. *Proizvodstvo prokata = Rolling*, 2018, no. 2, pp. 30–36.
12. Udalov A.A., Udalov A.V., Parshin S.V. Influence of deformation conditions on the power regimes of the process of cold crimping of a pipe billet in a conical die. *Materials Science Forum*, 2019, vol. 946, iss. 10, pp. 812–817. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.946.812.
13. Baranov G.L. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya pri protalkivanii kruglykh trub [Analysis of the stress-strain state when pushing round pipes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 1984, no. 4, pp. 30–35.
14. Baranov G.L., Kuznetsov V.I. Napryazheniya na granitse ochaga plasticheskoi deformatsii pri bezopravochnom volochenii trub [Stresses at the boundary of the center of plastic deformation during faultless pipe drawing]. *Tsvetnye metally = Non-ferrous metals*, 1988, no. 11, pp. 88–90.
15. Palengat M., Chagnon G., Favier D., Louche H., Linardon C. Cold drawing of 316L stainless steel thin-walled tubes: experiments and finite element analysis. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2013, vol. 70, pp. 69–78. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2013.02.003.
16. Ridzoň M., Buček P., Nécpal M., Parilák L. Manufacturing of precision seamless steel tubes using cold drawing technology: simulation and experiment. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 808, pp. 80–85. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.808.80.
17. Kuroda K., Kawakami T., Okui T. Influential factor to dimensional precision of cold-drawn tubes. *Journal of Engineering Manufacture*, 2014, vol. 229, iss. 1, pp. 100–109. DOI: 10.1177/0954405414525381.
18. Zottis J., Soares Diehl C.A.T., Rocha A. da Silva. Evaluation of experimentally observed asymmetric distributions of hardness, strain and residual stress in cold drawn bars by FEM-simulation. *Journal of Materials Research and Technology*, 2018, vol. 7, iss. 4, pp. 469–478. DOI: 10.1016/j.jmrt.2018.01.004.
19. Bella P., Durcik R., Ridzon M., Parilak L. Numerical simulation of cold drawing of steel tubes with straight internal rifling. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 15, pp. 320–326. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.07.225.
20. Kuboki T., Akiyama M., Neishi Y., Kuroda K. Effect of die geometry on residual stress level present after bar drawing. *Ironmaking and Steelmaking*, 2001, vol. 28, iss. 1, pp. 65–71. DOI: 10.1179/irs.2001.28.1.65.
21. Pirling N., Carradò A., Palkowski H. Residual stress distribution in seamless tubes determined experimentally and by FEM. *Procedia Engineering*, 2011, vol. 10, pp. 3080–3085. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.510.

22. Foadian F., Carradó A., Pirlinge T., Palkowski H. Residual stresses evolution in Cu tubes, cold drawn with tilted dies – Neutron diffraction measurements and finite element simulation. *Materials and Design*, 2016, vol. 107, iss. 5, pp. 163–170. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.06.028.

23. Boutenel F., Delhomme M., Velay V., Boman R. Finite element modelling of cold drawing for high-precision tubes. *Comptes Rendus Mécanique*, 2018, vol. 346, iss. 8, pp. 665–677. DOI: 10.1016/j.crme.2018.06.005.

24. Udalov A.A., Udalov A.V., Parshin S.V. Opredelenie soprotivleniya deformatsii metallov i splavov metodom vnedreniya indentora [Determination of resistance to deformation of metals and alloys by the method of indentation]. *Deformatsiya i razrushenie materialov = Russian Metallurgy (Metally)*, 2019, no. 4, pp. 40–44. DOI: 10.31044/1814-4632-2019-4-40-44. (In Russian).

25. Udalov A.V., Udalov A.A. Issledovanie izmeneniya soprotivleniya deformatsii nizeouglerodistoi stali v protsesse rotatsionnoi vytyazhki s utoneniem stenki [Investigation of changes in the resistance to deformation of low-carbon steel in the process of flow forming]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, iss. 3, pp. 59–71. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-59-71.

26. Perlin I.L., Ermanok M.Z. *Teoriya volocheniya* [Theory of rolling large ingots]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1971. 448 p.

Conflicts of Interest

The author declare no conflict of interest.

© 2020 The Author. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).