**УДК 621.774.353**

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВИНТОВОЙ РАСКАТКИ ТРУБ В ЧЕТЫРЁХВАЛКОВОМ СТАНЕ

STUDY OF THE PROCESS ROLLING SEAMLESS PIPES IN A FOR-ROLL MILL

**Авторы:**

Романцев Б.А. д.т.н., профессор кафедры ОМД НИТУ «МИСиС» (boralr@yandex.ru)

Харитонов Е.А. к.т.н. доцент кафедры ОМД НИТУ «МИСиС» (haritonov45@mail.ru)

Будникоа А.С. аспирант кафедры ОМД НИТУ «МИСиС» (fiar128@yandex.ru)

Ле Ван Чонг студент кафедры ОМД НИТУ «МИСиС»

Чан Ба Хюи аспирант кафедры ОМД НИТУ «МИСиС» (tbh510@gmail.com)

**Authors:**

Romantsev B.A. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of OMD NUST "MISiS" (boralr@yandex.ru)

Kharitonov E.A. Ph.D. Assistant Professor of the Department of OMD NUST "MISiS" (haritonov45@mail.ru)

Budniko A.S. post-graduate student of the Department of OMD NUST "MISiS" (fiar128@yandex.ru)

Le Van Trong is a student of the department of OMD NUST "MISiS"

Tran Ba Huy post-graduate student of the department of OMD NUST "MISiS" (tbh510@gmail.com)

**Ключевые слова.** Четырёхвалковый раскатной стан, рабочие валки, пластилин, компьютерное моделирование, отношение диаметра к толщине стенки, модель, разностенность, точность труб.

**Keywords.** Four-roll rolling mill, work rolls, plasticine, computer simulation, diameter-to-wall thickness ratio, model, difference, pipe accuracy.

**Аннотация.** Разработана и изготовлена, в том числе с помощью аддитивных технологий, модель четырёхвалкового стана винтовой прокатки. Рабочие валки установлены: основные – по чашевидной и вспомогательные –по грибовидной схемам с углом раскатки ±7 градусов, при нерегулируемом угле подачи 15 градусов. Основные и вспомогательные валки имеют длину бочки 70 мм. Диаметр основных валков в пережиме 50 мм, вспомогательных – 36 мм. На выходном участке в сечении выхода трубы из валков их диаметры практически одинаковые и составляют 72 мм. Каждый из четырех валков приводится индивидуальным приводом с мотор-редуктором мощностью 100 Вт и частотой вращения 60 об/мин по грибовидной схеме и 83 об/мин по чашевидной, что позволяет минимизировать расхождение окружных скоростей по очагу деформации при разных диаметрах валков. На разработанной модели четырехвалкового стана проведена раскатка гильз из пластилина диаметром 25 мм с толщиной стенки 7,5; 5,5 и 3,5 мм, соответствующие соотношению диаметра к толщине стенки 3; 5 и 8. Раскатка труб осуществлялась на плавающих оправках диаметром 9, 13 и 17 мм. После прокатки проведены измерения диаметра и толщины стенки труб в 5-ти равноудаленных друг гот друга поперечных сечениях. В каждом поперечном сечении диаметр измерялся в 5-ти, а толщина стенки в 10-ти точках. Конечно-элементным методом осуществлено моделирование процесса раскатки указанных труб в программе QForm. Оценка адекватности модели проводилась путем сравнения размеров труб и их точности после раскатки и по результатам компьютерного моделирования. Согласно экспериментальным данным разностенность труб с соотношением диаметра к толщине стенки 3 и 5 составляет 4–4,1%, а компьютерным моделированием 3,2 – 4,9 %. Расхождение результатов составляет не более 20%. По результатам проведенного исследования установлено, что при раскатке в четырёхвалковом стане разностенность значительно уменьшается. Так при раскатке партии труб с исходной разностенностью гильз 26% она уменьшилась до 4%, т.е. точность труб повысилась более чем на 80%.

**Abstract.** A model of a four-roll helical rolling mill has been developed and manufactured, including by means of additive technologies. Work rolls are installed: the main rollers are cup-shaped and the auxiliary ones are mushroom-shaped with a rolling angle of ± 7 degrees, with an unregulated feed angle of 15 degrees. The main and auxiliary rolls have a barrel length of 70 mm. The diameter of the main rolls in the vestige of 50 mm, auxiliary - 36 mm. At the output section in the section of the exit of the tube from the rolls, their diameters are practically the same and amount to 72 mm. Each of the four rolls is driven by an individual drive with a 100 W motor-reducer with a rotational speed of 60 rpm in the mushroom scheme and 83 rpm in a cup-shaped manner, which minimizes the discrepancy between the circumferential velocities along the deformation center at different roll diameters. On the developed model of a four-roll mill, a plasticine liner of 25 mm in diameter with a wall thickness of 7.5 has been rolled; 5.5 and 3.5 mm, corresponding to the ratio of the diameter to the wall thickness of 3; 5 and 8. Pipe rolling was carried out on floating mandrels with a diameter of 9, 13 and 17 mm. After rolling, the diameter and wall thickness of the tubes were measured in 5 cross-sections equally spaced from each other. In each cross-section, the diameter was measured in 5, and the wall thickness at 10 points. The finite-element method was used to simulate the rolling process of these pipes in the QForm program. Evaluation of the adequacy of the model was carried out by comparing the pipe dimensions and their accuracy after rolling and the results of computer simulation. According to experimental data, the difference in the pipes with a diameter to wall thickness ratio of 3 and 5 is 4-4.1%, and computer simulation 3.2 - 4.9%. The discrepancy between the results is no more than 20%. According to the results of the study, it is established that when rolling in a four-roll mill, the difference is significantly reduced. So when rolling a batch of pipes with an initial difference of 26% liners, it decreased to 4%, i.e. the accuracy of the pipes has increased by more than 80%.

Макет четырехвалкового стана винтовой прокатки (рисунок 1) состоит из станины закрытого типа 1 [1], рабочие валки установленные по чашевидной схеме 2 условно обозначены как основные, а валки установленные по грибовидной схеме 3 – вспомогательные. Угол подачи рабочих валков не регулируется и составляет 150 [2]. Основные и вспомогательные рабочие валки установлены с углом раскатки ±70 [3-4]. Совмещение чашевидной и грибовидной схем прокатки позволяет разместить привод валков на входной и выходной стороне стана. Основные и вспомогательные валки имеют одинаковую длину бочки 70 мм. Диаметр основных валков в пережиме 50 мм, а вспомогательных – 36 мм. На выходном участке в сечении выхода трубы из валков их диаметры практически одинаковые и составляют 72 мм. Каждый из четырех валков приводится индивидуальным приводом с мотор-редуктором мощностью 100 Вт и частотой вращения 60 об/мин для основных валков 4 и 83 об/мин для вспомогательных 5, что позволяет минимизировать расхождение окружных скоростей по очагу деформации характерное при совмещении чашевидной и грибовидной схем прокатки из-за различия в диаметрах валков [5-6].

На рисунке 2 представлена схема очага деформации четырехвалкового стана с основными размерами валков и их калибровкой [7-8]. Данная калибровка предназначена для исследования процесса прошивки, поэтому углы наклона образующей валка к оси прокатки на входном и выходном участках составляют 2 и 3 градуса соответственно. Диаметр калибра в пережиме 23 мм, наружный диаметр на входе 25 мм, что позволяет осуществлять прокатку с обжатием по диаметру 9%. [9-10] Отсутствие гребня, который применяется при раскатке не позволяет увеличить обжатие как по диаметру, так и по толщине стенки [2-3].

С целью исследования процесса раскатки труб в четырехвалковом стане винтовой прокатки осуществлена деформация гильз из пластилина диаметром 25 мм с толщиной стенки 7,5; 5,5 и 3,5 мм. В виду особенностей реологических свойств пластилина, таких как: большая вязкость, склонность к налипанию на валки, низкая механическая прочность, выбраны пониженные значения соотношения диаметра к толщине стенки трубы (Dт/Sт) равные 3, 5 и 8. Раскатка труб осуществлялась на плавающих оправках диаметром 9, 13 и 17 мм [11]. Оправки изготавливались на 3D принтере из пластика типа ABS. Длина исходных гильз составляет 60 мм. Обжатие по толщине стенки в процессе раскатки 0,5 мм.

Проведены измерения диаметра и толщины стенки в 5-ти равноудаленных друг от друга поперечных сечениях [13]. В каждом поперечном сечении диаметр измерялся в 5-ти, а толщина стенки в 10-ти точках (рисунок 3).

Для эффективного анализа геометрических параметров труб, полученных в процессе четырехвалковой раскатки, с помощью программы QForm [13-17] осуществлено конечно-элементное [14, 16, 19] моделирование процесса раскатки труб тех же размеров, в условиях, приближенных к условиям прокатки в четырехвалковом стане. Реологические свойства пластилина, необходимые для расчёта формоизменения заготовки, задавались в соответствии с данными работы [15].

Для осуществления конечно-элементного моделирования, в программе SolidWorks разработана сборка, состоящая из валков, заготовки и оправки. С помощью редактора геометрии QShape на каждом объекте сборки генерировалась сетка конечных элементов. Моделирование осуществлялось без смазки с отсутствием проскальзывания на контактной поверхности заготовки и валка.

В таблице 1 представлены исходные геометрические параметры гильз DгхSг и полученных труб DтхSт. Согласно данным, полученным при измерении (таблица 1) разностенность труб с соотношением диаметра к толщине стенки 3 и 5 составляет 4–4,1%, а компьютерным моделированием 3,2 – 4,9 %, расхождение между результатами экспериментальной раскатки и компьютерной модели не более 20%. Наименьшее отклонение экспериментальных от компьютерных данных получены на трубах с Dт/Sт=8, а наибольшее расхождение между экспериментальными и компьютерными данными наблюдается при оценке точности по диаметру, что объясняется большой погрешностью измерения диаметра на пластилиновых образцах.

Для исследования изменения разностенности в процессе раскатки на четырехвалковом стане осуществлена деформация партии гильз с D/S=4 диаметром 29 мм с минимальной и максимальной толщиной стенки 6 и 8 мм, что соответствует исходной разностенности 26%. Раскатка осуществлялась на оправке диаметром 13 мм. В результате раскатки получена труба средним диаметром 23 мм и средней толщиной стенки 5 мм. Зазор между внутренней поверхностью гильзы и оправкой равен 1 мм. Результаты измерений представлены в таблицы 2.

После раскатки разностенность центральной части трубы, соответствующая установившемуся процессу уменьшилась до 4%, в результате чего точность труб повышается на 80%. Существенное снижение разностенности объясняется увеличением количества циклов деформации по сравнению с раскаткой труб в двух- и трехвалковых станах [18-20]. Количество циклов деформации можно определить по формуле (1):

где – суммарное обжатие по диаметру, мм; – шаг подачи за 1/t – оборота заготовки, мм; t – количество рабочих алков; – угол наклона образующей валка к оси прокатки; – суммарный коэффициент вытяжки.

Согласно формуле (1) количество циклов деформации для процесса раскатки данных образцов в четырехвалковом стане составляет 15 штук. Если раскатку производить в трехвалковом стане, то количество циклов уменьшается до 11 штук, а в двухвалковом – до 7,5 штук [19]. Количество циклов деформации в четырехвалковом стане по сравнению с двухвалковым увеличивается в два раза, а с трех – в 1,3 раза. Увеличение количества циклов деформации за счет добавление валков делает равномерным обжатие толщины стенки раската по его периметру, а так же способствует лучшей проработки толщины стенки раската, что приводит к существенному снижению разностенности.

**Выводы**

Проведен анализ раскатки образцов из пластилина и сравнение результатов геометрических параметров труб с Dт/Sт равным 3; 5 и 8, полученных на четырехвалковом стане с их компьютерным моделированием. Разностенность труб с Dт/Sт равным 3 и 5 полученных на стане равна 4 – 4,1%, а компьютерным моделированием 3,2 – 4,9 %, расхождение результатов составляет не более 20%.

Исследование изменения разностенности в процессе четырехвалковой раскатки показало, что точность труб при раскатке – увеличивается. В проведенном эксперименте разностенность труб уменьшилась с 26% у гильз до 4% у труб в установившемся режиме прокатки. В целом, можно отметить, что процесс раскатки труб в четырехвалковом стане, благодаря особенностям геометрии очага деформации и формоизменению, благоприятно воздействует на конечные геометрические параметры получаемых труб.

**Литература**

1. Романцев Б.А., Гамин Ю.В., Гончарук А.В., Алещенко А.С. Автоматизированная линия винтовой прокатки полых заготовок малого диаметра // Механическое оборудование металлургических заводов. 2017. № 2 (9). С. 9-17.

2 Romantsev, B.A., Gamin, Y.V., Goncharuk, A.V., Aleshchenko, A.S. Innovative Equipment for Producing Cost-Effective Hollow Billets for Mechanical-Engineering Parts of Small Diameter // Metallurgist 2017, 61(3-4), p. 217-222

3 Осадчий В.Я., Вавилин А.С., Зимовец В.Г., Коликов А.П. Технология и оборудование трубного производства – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. — 608 с.

4 Romanenko, V.P., Stepanov, P.P., Kriskovich, S.M. Production of Hollow Railroad Axles by Screw Piercing and Radial Forging. // M.: Metallurgist. 2018. p. p. 873-877

5 Никулин А.Н. Винтовая прокатка. Напряжения и деформации. М.: Металлургиздат, 2015. 380 с. Ил.

6 Пат. №2635685 RU, Способ прошивки в стане винтовой прокатки / Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Чан ба Хюи, заявл. 02.12.2016 г., опубл. 15.11.2017 Бюл. № 32.

7.Chiluveru S. Computational Modeling of Crack Initiation in Crossroll Piercing. Massachusetts Institute of Technology. PhD thesis Massachusetts. 2007

8. Modelling of the Mannesmann Effect in Tube Piercing - Padua@Research URL: http://paduaresearch.cab.unipd.it/1552/ (дата обращения: 16. 11. 2017).

9 Романенко В.П., Степанов П.П., Гончарук А.В., Крискович С.М., Илларионов Г.П., Никулин А.Н., Филиппов Г.А. Перспективная технология производства полых вагонных осей из полой заготовки // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2016. № 2. С. 27-34.

10 Бретшнайдер Э., Мюллер Г., Фрикке Ю. Планетарный стан с коническими валками // Черные металлы, 1973, № 22. с. 29 - 35.

11 Красиков А.В. Исследование процесса раскатки труб на агрегатах с непрерывными станами с целью повышения износостойкости оправок. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2015, 140 с.

12 Kadach М.V., Gamin Y.V., Solonin A.N. and at. Converting high-boron steel pipe from round to hexagonal cross // Steel in Translation 44(11), p.p. 783-786

13 QForm Моделирование процессов обработки металлов давлением URL: http://www.qform3d.ru (дата обращения: 11. 09. 2017)

14 Pater Z., Bartnicki J., Kazanecki J. 3d finite elements method (fem) analysis of basic process parameters in rotary piercing mill//Metalurgija 51 (2012) 4, pp 501-504.

15 Buchely M., Maranon A., Silberschmidt V. Material model for modeling clay at high strain rates // International Journal of Impact Engineering. 2016. Т. 90. С. 1-11.

16 Berazategui, D. A., Cavaliere, M. A., Montelatici, L. and Dvorkin, E. N. On the modelling of complex 3D bulk metal forming processes via the pseudo-concentrations technique. Application to the simulation of the Mannesmann piercing process // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2006. Т. 65. № 7. С. 1113-1144

17 Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Скрипаленко М.Н., Чан Ба Хюи, Гладков Ю.А., Гартвиг А.А. **Компьютерное моделирование прошивки заготовок в четырёхвалковом стане винтовой прошивки. //** Металлург, №9, 2017, с. 19-24

18 The KOCKS Rotation Mill (KRM): The Ideal Planetary Cross Rolling Process for Copper Tube Production, by Dr.-Ing. W.-Jürgen Ammerling – Managing Director Marketing & Sales – and Jörg Surmund – Area Sales Manager –FRIEDRICH KOCKS GmbH & Co KG, Hilden / Germany presented 29.10.2007 at the “DANIELI ECT™ Forum” in Buttrio / Italy

19 Харитонов Е.А., Романенко В.П., Будников А.С. Моделирование процесса раскатки труб на трехвалковом раскатном стане винтовой прокатки // Сталь. 2014. №10. С. 44-47.

20 Romanenko, V.P., Zolotarev, A.A., Sizov, D.V. Screw piercing of large-diameter billet in a two-roller mill // Steel in Translation 43(5). 2013. P.p. 249-253.

**Reference**

1. Romantsev B.A., Gamin Yu.V., Goncharuk A.V., Aleshchenko A.S. Automated line of screw rolling of hollow billets of small diameter. *Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov.* 2017. № 2 (9). p. p. 9-17. (in Russ)

2 Romantsev, B.A., Gamin, Y.V., Goncharuk, A.V., Aleshchenko, A.S. Innovative Equipment for Producing Cost-Effective Hollow Billets for Mechanical-Engineering Parts of Small Diameter // Metallurgist 2017, 61(3-4), p. 217-222 (in Eng.).

3 Osadchii V.Ya., Vavilin A.S., Zimovets V.G., Kolikov A.P. *Tekhnologiya i oborudovanie trubnogo proizvodstva* [Technology and equipment of pipe production] – M.: Intermet Inzhiniring, 2001. — 608 p. (in Russ)

4 Romanenko, V.P., Stepanov, P.P., Kriskovich, S.M. Production of Hollow Railroad Axles by Screw Piercing and Radial Forging. // M.: Metallurgist. 2018. p. p. 873-877 (in Eng)

5 Nikulin A.N. *Vintovaya prokatka. Napryazheniya i deformatsii* [Screw rolling. Stresses and strains]. M.: Metallurgizdat, 2015. 380 p. (in Russ)

6 Romantsev B.A., Skripalenko M.M., Chan ba Khyui. *Sposob proshivki v stane vintovoi prokatki* [The method of insertion in a helical rolling mill]. Patent RF no 2635685 MPK В21В 19/04. *Bulleten’ izobretenii* 2017, no 32. (in Russ.)

7.Chiluveru S. Computational Modeling of Crack Initiation in Crossroll Piercing. Massachusetts Institute of Technology. PhD thesis Massachusetts. 2007 (in Eng.)

8. Modelling of the Mannesmann Effect in Tube Piercing - Padua@Research URL: http://paduaresearch.cab.unipd.it/1552/ data obrashcheniya: 16. 11. 2017. (in Eng).

9 Romanenko V.P., Stepanov P.P., Goncharuk A.V., Kriskovich S.M., Illarionov G.P., Nikulin A.N., Filippov G.A. Perspective technology of hollow car axle production from hollow billet. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya. 2016. № 2. p. 27-34.* (in Russ.)

10 Bretshnaider E., Myuller G., Frikke Yu. Planetary mill with conical rollers // Chernye metally, 1973, № 22. p. 29 - 35. (in Russ).

11 Krasikov A.V. *Issledovanie protsessa raskatki trub na agregatakh s nepreryvnymi stanami s tsel'yu povysheniya iznosostoikosti opravok: diss. na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk* [Investigation of the process of rolling pipes on aggregates with continuous mills in order to improve the wear resistance of mandrels]. Moskva, 2015, 140 p. (in Russ.).

12 Kadach М.V., Gamin Y.V., Solonin A.N. and at. Converting high-boron steel pipe from round to hexagonal cross // Steel in Translation 44(11), p.p. 783-786. (in Eng.).

13 *QForm Modelirovanie protsessov obrabotki metallov davleniem* [QForm Modeling of metal forming processes]. Available at URL: http://www.qform3d.ru. (Accessed 11. 09. 2017). (in Russ.).

14 Pater Z., Bartnicki J., Kazanecki J. 3d finite elements method (fem) analysis of basic process parameters in rotary piercing mill//Metalurgija 51 (2012) 4, pp 501-504. . (in Eng.).

15 Buchely M., Maranon A., Silberschmidt V. Material model for modeling clay at high strain rates // International Journal of Impact Engineering. 2016. Т. 90. С. 1-11. (in Eng.).

16 Berazategui, D. A., Cavaliere, M. A., Montelatici, L. and Dvorkin, E. N. On the modelling of complex 3D bulk metal forming processes via the pseudo-concentrations technique. Application to the simulation of the Mannesmann piercing process // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2006. 65. № 7. p. 1113-1144 . (in Eng.).

17 Romantsev B.A., Skripalenko M.M., Skripalenko M.N., Chan Ba Khyui, Gladkov Yu.A., Gartvig A.A. Computer modeling of firmware insertion in a four-roll mill of screw firmware. Metallurg, №9, 2017, p. 19-24 (in Russ.).

18 The KOCKS Rotation Mill (KRM): The Ideal Planetary Cross Rolling Process for Copper Tube Production, by Dr.-Ing. W.-Jürgen Ammerling – Managing Director Marketing & Sales – and Jörg Surmund – Area Sales Manager –FRIEDRICH KOCKS GmbH & Co KG, Hilden / Germany presented 29.10.2007 at the “DANIELI ECT™ Forum” in Buttrio / Italy (in Eng.).

19 Kharitonov E.A., Romanenko V.P., Budnikov A.S. Modeling of the rolling-out process on a three-roll rolling mill. *Stal'.* 2014.no 10. p. 44-47. (in Russ.).

20 Romanenko, V.P., Zolotarev, A.A., Sizov, D.V. Screw piercing of large-diameter billet in a two-roller mill // Steel in Translation 43(5). 2013. P.p. 249-253. (in Eng.).



Рисунок 1 – Макет четырёхвалкового стана винтовой раскатки

Fig. 1 - Model of a four-roll screw rolling mill

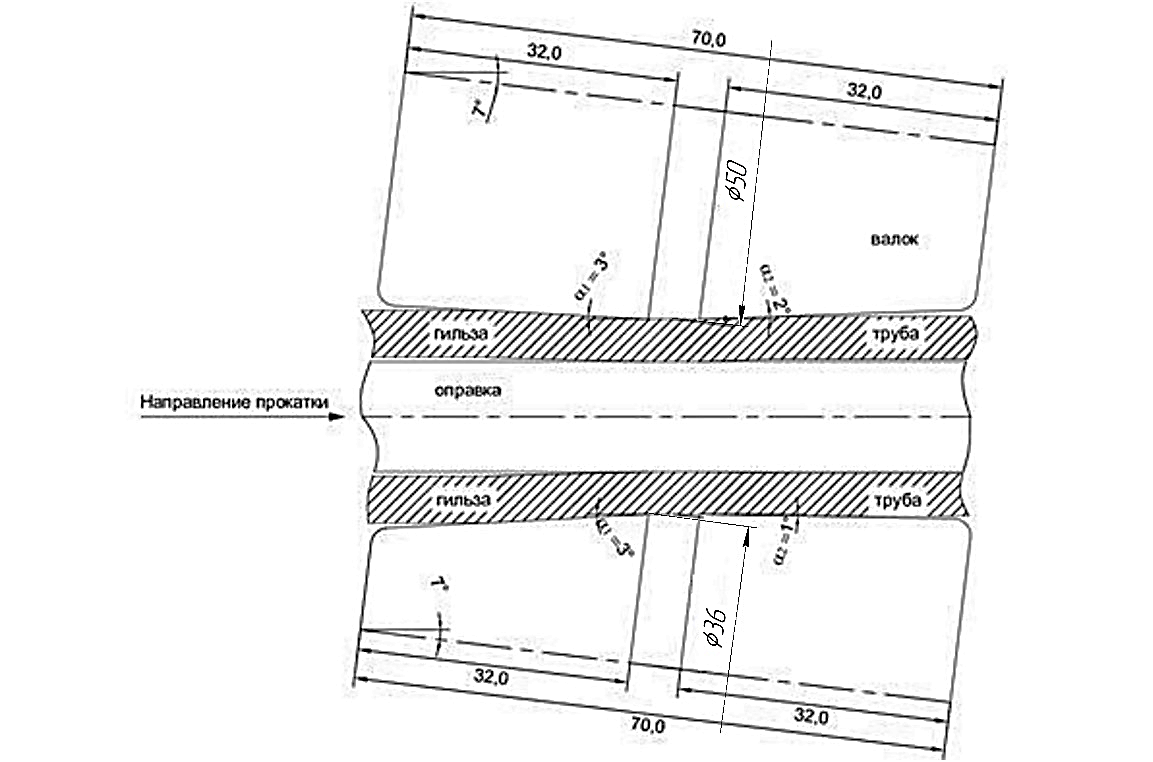


Рисунок 2 – Схема очага деформации

Fig. 2 - Scheme of the deformation region



Рисунок 3 – Схема измерения образцов

Fig 3 – Measurement scheme of samples

Таблица 1 – Геометрические размеры гильз и труб

Table 1 - Geometric dimensions of sleeves and tubes

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| DгхSг  мм | DтхSт  мм | Dт/Sт | Отклонение по диаметру, % | | Разностенность, % | |
| эксперимент | моделирование | эксперимент | моделирование |
| 25х7,5 | 23х7 | 3 | 0,6 | 0,1 | 4,1 | 4,9 |
| 25х5,5 | 23х5 | 5 | 0,7 | 0,2 | 4,0 | 3,2 |
| 25х3,5 | 23х3 | 8 | 0,7 | 0,7 | 10,2 | 10,2 |

Таблица 2 – Измерения толщины стенки, мм и разностенности, % труб

Table 2 - Measurements of wall thickness, mm and difference,% of pipes

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| образцы | передний конец | | | установившейся режим | | | задний конец | | |
| макс | мин | разн% | макс | мин | разн% | макс | мин | разн% |
| 1 | 5,1 | 4,8 | 6,1 | 5,0 | 4,8 | 4,1 | 5,1 | 4,7 | 8,2 |
| 2 | 5,1 | 4,9 | 4,0 | 5,1 | 4,9 | 4,0 | 5,1 | 4,8 | 6,1 |
| 3 | 5,2 | 4,7 | 10,1 | 5,1 | 4,9 | 4,0 | 5,1 | 4,8 | 6,1 |