

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.774.35.016.2
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-140-147



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБКАТКИ ДЕФЕКТНЫХ КОНЦОВ ГОРЯЧЕДЕФОРМИРОВАННЫХ ТРУБ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ НА УСТАНОВКАХ С АВТОМАТИЧЕСКИМ СТАНОМ

Федулов А.А., Беляев С.Ю., Булганина М.Ю., Раскатов Е.Ю.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Для технологии получения горячедеформированных труб на трубопрокатных установках с раскаткой труб способом продольной прокатки на короткой оправке в диапазоне номинальных диаметров к толщине стенке $D/S = 25-35$ характерно появление продольных концевых дефектов. Попадание труб с данными дефектами после автоматического стана (или тандемного стана) в дальнейшие станы сопровождается ростом энергосиловых параметров процессов, а следовательно, ударными нагрузками на элементы клетей и привода станов. **Цель работы.** Оценка характера нагрузок, возникающих при разглаживании продольных концевых дефектов труб в обкатных машинах, посредством выполнения математического моделирования данного процесса, которое позволило определить нагрузки в течение процесса и получить окончательное формоизменение трубы после выхода из обкатной клетки в зависимости от режимов обкатки. **Используемые методы.** Для объемной постановки задачи по определению напряженно-деформированного состояния материала трубы в очаге деформации используется программный комплекс трехмерного моделирования DEFORM, основанный на применении метода конечных элементов для задач пластического течения. **Новизна.** Разработка математической модели процесса обкатки труб после автоматического стана способом поперечно-винтовой прокатки на конической оправке, которая учитывает геометрию дефектного заднего конца трубы, образованного при раскатке на предыдущей стадии и напряженно-деформированном состоянии заготовки перед обкаткой, а также позволяет варьировать режим обкатки, выполнять моделирование для различных материалов (в том числе сталей групп повышенной прочности). **Результат.** Впервые получены данные по нагрузкам на инструмент для всех стадий процесса – от задачи заготовки в рабочую клетку, при установившемся режиме, а также в момент выхода трубы с попаданием дефектного конца между валками и оправкой, что приводит к пиковому возрастанию нагрузок. **Практическая значимость.** Модель может быть использована для получения новых данных о процессе обкатки.

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

© Федулов А.А., Беляев С.Ю., Булганина М.Ю., Раскатов Е.Ю., 2023

Для цитирования

Моделирование процесса обкатки дефектных концов горячедеформированных труб при производстве на установках с автоматическим станом / Федулов А.А., Беляев С.Ю., Булганина М.Ю., Раскатов Е.Ю. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 140-147. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-140-147>



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

SIMULATION OF A BURNISHING PROCESS FOR DEFECTIVE ENDS OF HOT-DEFORMED TUBES, WHEN PRODUCING THEM ON FACILITIES WITH AN AUTOMATIC ROLLING MILL

Fedulov A.A., Belyaev S.Yu., Bulganina M.Yu., Raskatov E.Yu.

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

Abstract. Problem Statement (Relevance). The technology of producing hot-deformed tubes on tube rolling facilities with the rough tube elongation by longitudinal rolling on a short mandrel in the range of the nominal diameter/wall thickness ratio, $D/S = 25-35$, is characterized by containing longitudinal end defects. The transfer of tubes with these defects after the automatic mill (or the tandem mill) into the downstream mills is accompanied by an increase in the energy and power parameters of the processes, and, therefore, impact loads on the units of the stands and the drive of the mills. **Objectives.** The research is aimed at assessing loads that occur when flattening longitudinal end defects of tubes on burnishing mills using the mathematical simulation of the process to determine loads during the process and obtain the final forming shape for the tube after the burnishing stand depending on the process parameters. **Methods Applied.** For a 3D problem statement used to determine the stress and strain state of the tube material in the deformation zone, the DEFORM 3D modeling software suite is used based on the finite element method (FEM) for plastic flow problems. **Originality.** Development of a mathematical model of the tube burnishing process after an automatic rolling mill by helical rolling on a conical mandrel, factoring into geometry of the defective rear end of the tube formed during the elongation at the previous stage and the stress and strain state of the workpiece before burnishing, and varying the burnishing mode, perform simulation for various materials (including steels of higher strength groups). **Result.** The authors obtained novel data on the loads on the tool for all the process stages: from feeding the workpiece into an operating stand at the steady state, and to the exiting tube with the defective end between the rolls and the mandrel, leading to a peak increase in loads. **Practical Relevance.** The model can be used to obtain new data on the burnishing process.

Keywords: hot-deformed tubes, tube rolling facility, burnishing mill, thin-walled tubes, longitudinal defects

For citation

Fedulov A.A., Belyaev S.Yu., Bulganina M.Yu., Raskatov E.Yu. Simulation of a Burnishing Process for Defective Ends of Hot-Deformed Tubes, when Producing Them on Facilities with an Automatic Rolling Mill. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 140-147. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-140-147>

Введение

На сегодняшний день бесшовные трубы применяются практически во всех отраслях промышленности, например, в качестве нефтегазопроводных, для бурения и обсадки скважин, а также как основные элементы для котельных установок и силовых элементов машин и сооружений [1].

Производство труб является одним из наиболее сложных и ответственных этапов в общей технологической цепи выпуска металлопродукции, который должен совмещать в себе высокую производительность, большой объем производства и гарантированное качество готовых изделий, направляемых по дальнейшим этапам производственного цикла [2]. Специфика трубного передела заключается в многопереходной деформации заготовки, осуществляющейся последовательно в станах различных типов, каждый из которых характеризуется различными схемами напряженно-деформированного состояния (НДС) [3, 4].

Важное место среди трубопрокатных установок занимают установки с автоматическим раскатным станом (или двухклетьевым tandemным станом), поз-

воляющие совмещать универсальность и маневренность с потребительским уровнем выпускаемой продукции. В то же время черновые трубы, полученные на данном агрегате, характеризуются повышенной (по сравнению с другими освоенными способами) разностенностью и возможностью появления продольных рисок в местах контакта боковой поверхности труб с изношенными участками калибра.

С целью устранения этих дефектов трубопрокатные установки с автоматическим станом (tandemным станом) оборудуются двух- или трехвалковыми обкатными машинами поперечно-винтовой прокатки. Следует отметить, что рассчитанные на исправления данных дефектов обкатные машины не всегда способны устранить более крупные дефекты, выраженные в отклонении раскатанной гильзы от заданной геометрии, что, в свою очередь, может привести к перегрузке линии привода машины или поломке прокатного инструмента.

Постановка задачи и моделирование процесса

Один из примеров ярко выраженных дефектов, не предназначенных к дальнейшему исправлению, мож-

но наблюдать в исследовании [5]. В ходе работы обнаружен новый вид дефектов – продольные «плавники» переменной высоты на выходном конце черновой трубы после автоматического стана (рис. 1).

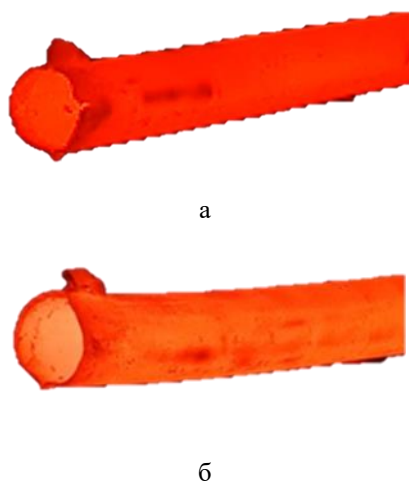


Рис. 1. Дефект прокатки: выпуски на задних концах трубы – продольные «плавники» переменной высоты: а – для трубы 219×7; б – для трубы 219×8

Fig. 1. Rolling defect: free length on rear ends of the tube – longitudinal “fin-shaped” defects of variable height: a is for tube 219×7; b is for tube 219×8

Появление данного дефекта после раскатки гильзы в автоматическом стане наиболее характерно для тонкостенных труб (с соотношением номинальных диаметра к толщине стенки $D/S = 25 \div 35$), что обосновывается стесненной деформацией при раскатке гильзы в автоматическом стане. В результате потери устойчивости заднего конца труб часть металла заготовки попадает в выпуски калибра прокатных валков автоматического стана и раскатывается между их ребрами [6].

При передаче в клети обкатного и калибровочного стана труба обжимается по диаметру, и плавники, прижимаясь к боковой поверхности трубы, образуют складки, несплошности заднего конца, местные утолщения по периметру. Как показывают экспериментальные измерения [7], разглаживание данного дефекта в прокатных клетях сопровождается появлением пиковых нагрузок вплоть до выходных клетей калибровочного стана. Полученный конец не пригоден для дальнейшего использования и должен быть удален перед финишной обработкой труб.

Таким образом, в условиях интенсификации производства, необходимости снижения технологических отходов и повышения качества труб ключевой задачей является стабильность производства в каждой отдельной операции. Успешное ведение операции обкатки требует оценки особенностей протекания процесса поперечно-винтовой прокатки труб в обкатных машинах, в том числе при попадании в клеть обкатной ма-

шины труб с продольными концевыми дефектами, а также верхней границы значений параметров процесса при появлении пиковых нагрузок.

В связи с этим поставлена задача исследования обкатки горячедеформированных труб выбранного сортамента при помощи математической модели (на основе конечно-элементного анализа) с целью подбора настроечных параметров обкатного стана, что позволило бы предложить рациональные режимы ведения данного процесса.

Для выполнения математического моделирования предлагается разработка трехмерной модели процесса поперечно-винтовой прокатки труб в двухвалковой клети на конической оправке на основе обкатной машины, установленной за автоматическим станом ТПА-220, в условиях, приближенных к реальным. Задание математической модели и ее аналитическое решение производится с помощью программного комплекса КЭ-моделирования, зарекомендовавшего себя на практике [8-12].

Расчетная схема процесса обкатки, представленная на рис. 2, включает трубную заготовку, обкатные валки, стабилизирующую оправку стана и направляющую проводку. Деформация осуществляется за счет обкатывания валками заготовки, помещенной на конической оправке. Так как заготовка при обкатке перемещается в трехмерном пространстве по винтовой траектории, а оси вращения обкатных валков наклонены к оси перемещения заготовки на угол подачи, геометрическую схему необходимо формулировать в объемной постановке. Окружная скорость валков задается $0,5 \text{ рад/с}$ при угле обкатки $7,5^\circ$, скольжение определяется продольной составляющей линейной скорости перемещения валков.

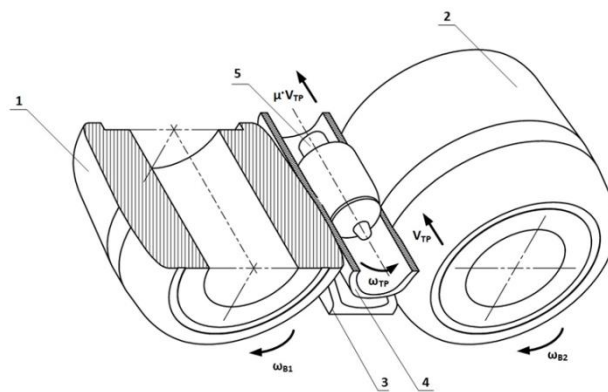


Рис. 2. Схема процесса обкатки: 1, 2 – валки обкатного стана; 3 – направляющая проводка; 4 – труба; 5 – оправка

Fig. 2. The burnishing process diagram: 1, 2 are rolls of the burnishing mill; 3 is a guide block; 4 is a tube; 5 is a mandrel

Материал заготовки выбран в соответствии со справочными данными для стали 45 ГОСТ 1050-2013 в виде таблиц данных для различных степеней и скоростей деформации при температуре материала 900-

1200°C. Геометрия трубной заготовки импортируется в виде сетки КЭ из решения задачи по прокатке заготовки на автоматстане, при которой получены концевые дефекты, аналогичные имеющим место на производстве [5]. Импортируемая сетка КЭ содержит данные о компонентах напряжений и деформаций, рассчитанных для операции раскатки горячекатаной трубы, что позволяет учесть их в качестве начальных условий модели. Пример начальной геометрии трубной заготовки перед задачей в обкатную машину представлен на **рис. 3**.



Рис. 3. Начальная геометрия трубной заготовки перед задачей в обкатную машину
Fig. 3. Initial geometry of the tube workpiece before feeding to the burnishing machine

Бочкообразные валки устанавливаются наклонно к оси заготовки на угол подачи с межвалковым расстоянием по калибру трубы и совершают сложное движение, сочетающее вращение вокруг своей оси и оси прокатки. Оправка и проводка устанавливаются отно-

сительно прокатных валков в продольном направлении таким образом, чтобы избежать дефектов трубы в виде скручивания, продавливания наружной поверхности рабочих поясков валка или заклинивания трубы между оправкой и проводкой. При продольном перемещении труба вращается вокруг проводки и оправки со скоростью обкатки ее валками (с возможностью уменьшения продольной скорости перемещения для учета проскальзывания трубы). Взаимодействие между заготовкой и инструментом задается с помощью показателя трения по Зибелю, который варьируется от 0,2 до 0,5.

В качестве иллюстрации на **рис. 4** изображено промежуточное положение заготовки в клети обкатной машины в момент попадания в валки дефектного конца трубы.

Особенностями задачи для выбранного диапазона моделирования являются разностенность труб, уникальная для каждого типоразмера за счет выпусков калибра автоматстана, и размеры продольных «плавников». Раскатка местных утолщений, а также попадание в очаг деформации продольных складок различных размеров поперечных сечений и, таким образом, взаимодействие между ними и прокатным инструментом при обкатывании трубы сопровождается переменным характером изменения энергосиловых параметров. Программный пакет позволяет в узлах сетки КЭ построить поля напряжений и скоростей деформаций и путем согласованных вычислений получить конечное формоизменение созданной сетки и энергосиловые параметры процесса для прокатного инструмента. Примеры подобных полей представлены на **рис. 5**.

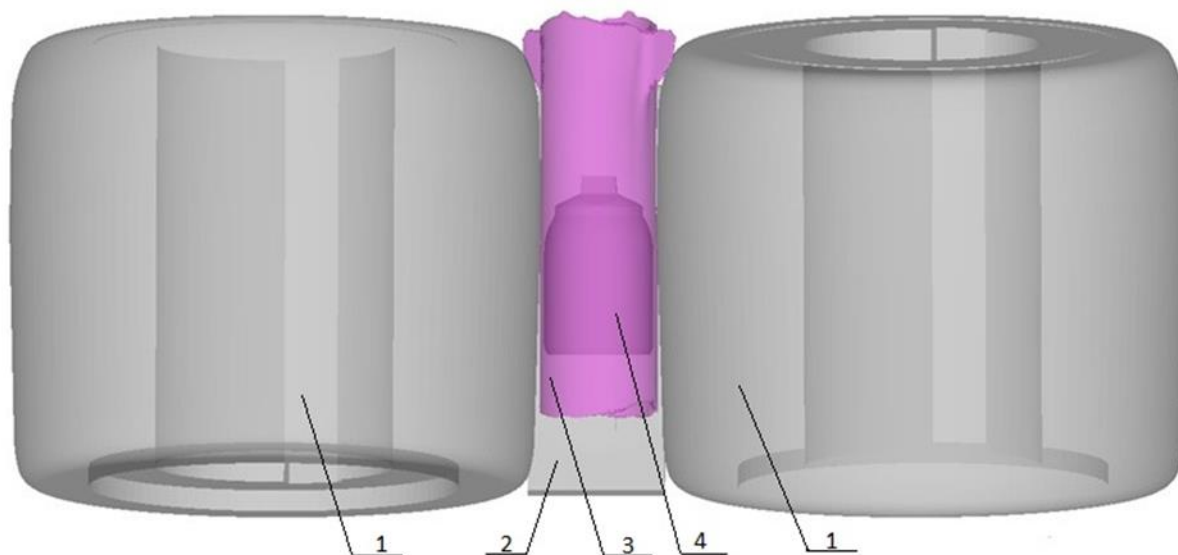


Рис. 4. Схема обкатки трубы с оправкой: 1 – валок; 2 – направляющая проводка; 3 – труба; 4 – оправка (расположена внутри трубы по оси)

Fig. 4. Tube burnishing with the mandrel: 1 is a roll; 2 is a guide block; 3 is a tube; 4 is a mandrel (inside the tube along the axis)

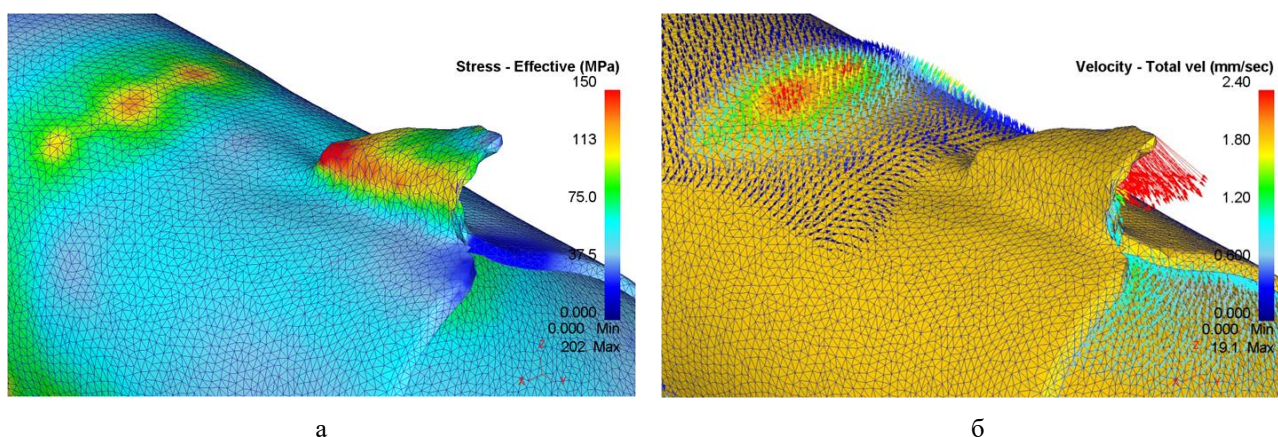


Рис. 5. Примеры эпюр параметров напряженно-деформированного состояния заготовки в момент попадания заднего продольного дефекта в калибр валков: а – эквивалентные напряжения; б – линейные скорости в КЭ-узлах

Fig. 5. Reference curves of the stress and strain state parameters of the workpiece, when the longitudinal end defect is in the roll pass: а are equivalent stresses; б are linear velocities in FE nodes

Полученные результаты

Рассмотрим результаты, полученные при обработке данных моделирования процесса. В задачи исследования входило выявление характеристик процесса при попадании в калибр обкатной машины участка трубы с продольными концевыми дефектами («плавниками»).

На рис. 6 и 7 представлены примеры графиков изменения усилий и моментов прокатки. Как видно из графиков, значения энергосиловых параметров не являются постоянными. Они колеблются в процессе поперечно-винтовой прокатки на конической оправке в клетке обкатной машины за счет разности усилий заготовки, получаемой после автоматического стана. При попадании в калибр концевой дефекта имеет место ярко выраженный пик, превышающий номинальные значения, характерные для стационарной стадии обкатки трубы.



Рис. 6. График изменения усилия обкатки
Fig. 6. Burnishing force behavior graph

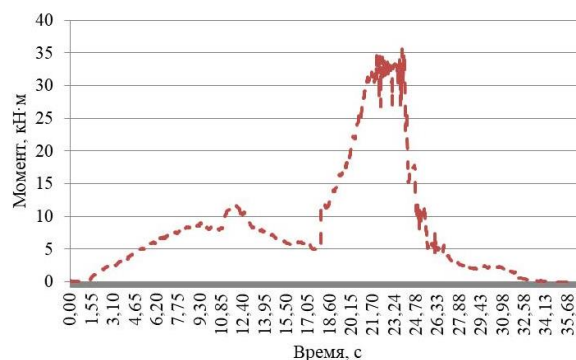


Рис. 7. График изменения момента обкатки
Fig. 7. Burnishing torque behavior graph

Рассмотрим особенности протекания процесса на стадии раскатки продольного дефекта («плавника») на заднем конце трубы. При попадании продольного дефекта («плавника») в очаг деформации обкатной машины процесс поперечно-винтовой прокатки совмещается с процессом гибки дефекта. Стадии гибки «плавников» в калибре обкатной машины представлены на рис. 8.

В некоторых случаях притормаживание трубы при гибке продольных дефектов может приводить к закручиванию трубы вокруг собственной оси.

Вне зависимости от геометрии дефекта и его размеров происходит постепенное складывание плавника вдоль наружной поверхности трубы с возрастанием площади соприкосновения заготовки и вала, а также появлением, таким образом, локального утолщения стенки. Геометрия трубы после обкатки представлена на рис. 9. Все эти факторы должны приводить к росту энергосиловых параметров.

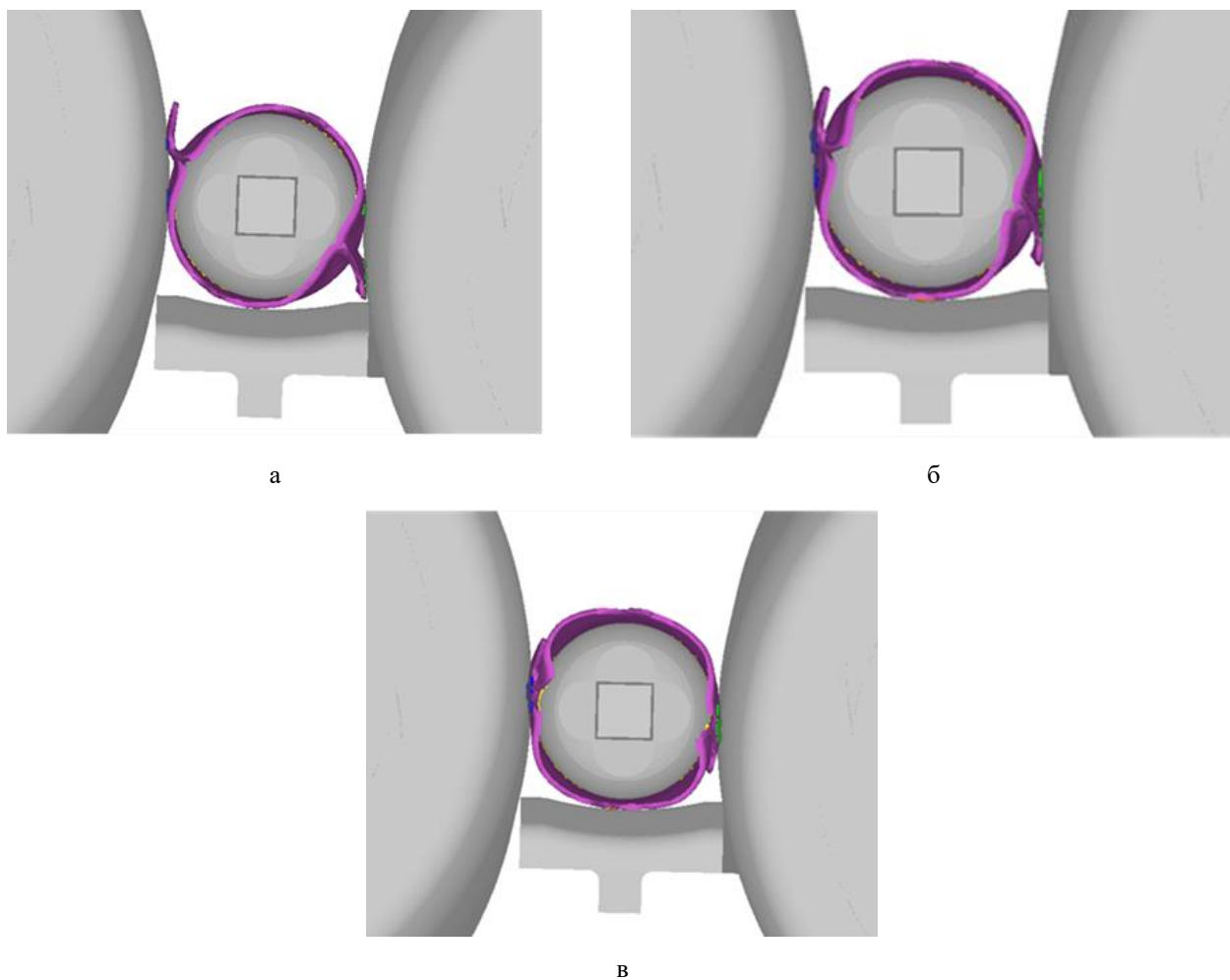


Рис. 8. Разглаживание концевых дефектов в обкатной машине: а-в – стадии процесса
Fig. 8. Leveling end defects in the burnishing machine: а-в are process stages

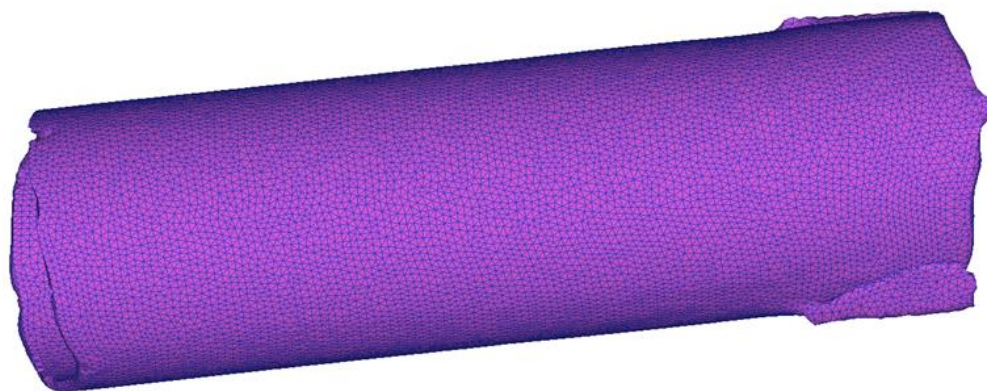


Рис. 9. Геометрия трубной заготовки после обкатки
Fig. 9. Tube workpiece geometry after burnishing

Заключение

Точность размеров горячедеформированных труб в значительной степени зависит от окончательных этапов получения трубы, что обеспечивается стабильностью расположения прокатного инструмента и уровнем его износа.

Продольные дефекты на заднем конце трубы, которые характерны при прокатке некоторых типоразмеров тонкостенных труб на трубопрокатных установках с автоматическим станом, приводят к неравномерной геометрии концов труб и пиковым нагрузкам на прокатном инструменте и при их разглаживании в последующих клетях обкатных и калибровочных станов трубопрокатных агрегатов.

Разработана математическая модель поперечно-винтовой прокатки тонкостенной трубы в двухвалковой обкатной машине с конической оправкой, которая позволяет установить физическую картину разглаживания продольных концевых дефектов труб («плавников») после автоматического стана. Полученные зависимости позволяют оценить нагрузки, действующие на прокатный инструмент и линию привода, что в дальнейшем позволит выбрать наиболее рациональные режимы обкатки для снижения величин нагрузок.

Список источников

1. Технология и оборудование трубного производства: учеб. пособие для вузов / Осадчий В.Я., Вавилин А.С., Зимовец В.Г., Коликов А.П. М.: Интермет Инжиниринг, 2007. 560 с.: ил.
2. Изучение трансформации дефектов поверхности при производстве труб в условиях ТПА-80 / Черных И.Н., Устьянцев В.Л., Литвинов М.А., Кривоногов И.Н. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». 2019. Т.19. №4. С. 27-36. DOI: 10.14529/met190404
3. Аль-Джумаили М.Ж.М., Выдрин А.В., Шкуратов Е.А. Влияние условий непрерывной раскатки гильз на технологические параметры процесса // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». 2020. Т. 20. №1. С. 60-67. DOI: 10.14529/met200107
4. Выдрин А.В., Аль-Джумаили М.Ж.М., Шкуратов Е.А. Алгоритм расчета энергосиловых параметров процесса раскатки гильзы в непрерывном стане // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №2. С. 32-37. DOI: 10.18503/1995-2732-2019-17-2-32-37
5. Checulin Y.B., Morgunov V.A., & Fedulov A.A. Increasing the stability of the pipe rolling process on an automatic mill. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 19, pp. 2234-2238. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.541>
6. Fedulov A.A., Belyaev S.Y., Morgunov V.A., Bulganina M.Y., & Khasenov R K. Exclusion of the pipe

rear end defects in the process of the PRP 220 rolling using the FE modeling. В I. V. Kovalev, A.A. Stupina, & A.A. Voroshilova (Ред.), *Proceedings of the III International Conference on Advanced Technologies in Materials Science, Mechanical and Automation Engineering*, MIP: Engineering-III 2021 [070010] (AIP Conference Proceedings; Том 2402). American Institute of Physics Inc. <https://doi.org/10.1063/5.0071420>

7. Belyaev S.Y., Fedulov A.A., Bulganina M.Y., & Kuznetsov V.I. Studying the process of pipe reeling based on the monitoring of the drive's loading parameters. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 38, pp. 1813-1816. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.425>
8. Роговой А.А., Салихова Н.К. Численное моделирование технологического процесса горячей обработки слитка давлением // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2022. №3. С. 135-146. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.3.14
9. Ларин С.Н., Пасынков А.А., Бессмертная Ю.В. К оценке предельных возможностей многооперационной вытяжки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 5. С. 302-306. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-5-302-306
10. Железков О.С., Лактюшин А.А., Макаров Б.Б. Силовые параметры и формоизменение при радиальной локальной осадке цилиндрической заготовки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. Вып. 3. С. 42-46. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-3-42-46
11. Вяткина Д.В., Звонов С.Ю. Моделирование процесса отбортовки при разной геометрии инструмента // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2021. Т. 23. №6. С. 42-46. DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-6-42-46
12. Zinger A.A., Zhakupov A.N., Bogomolov A.V. Predicting steel mechanical properties using computer modeling in deform 3D // Наука и техника Казахстана. 2022. № 1. С. 71-80. DOI: 10.48081/RLYO5699

References

1. Osadchii V.Ya., Vavilin A.S., Zimovets V.G., Kolikov A.P. *Tekhnologiya i oborudovanie trubnogo proizvodstva* [Theory and equipment of pipe production]. Moscow: Intermet Engineering, 2007, 560 p. (In Russ.)
2. Chernykh I.N., Ustyantsev V.L., Litvinov M.A., Krivonogov I.N. Study on surface defect transformations during pipe manufacturing using tube mill 80. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Metallurgiya»* [Bulletin of South Ural State University. Series: Metallurgy]. 2019;19(4):27-36. (In Russ.) DOI: 10.14529/met190404
3. Al-Jumaili M.J.M., Vydrin A.V., Shkuratov E.A. Influence of the conditions of continuous rolling of sleeves on the process parameters. *Vestnik Yuzhno-*

- Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Metallurgiya»* [Bulletin of South Ural State University. Series: Metallurgy]. 2020;20(1):60-67. (In Russ.) DOI: 10.14529/met200107
4. Vydrin A.V., Al-Jumaili M.J.M., Shkuratov E.A. Algorithm for calculating the energy parameters of the process of rolling hollow billets on a continuous mill. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019;17(2):32-37. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2019-17-2-32-37
 5. Checulin Y.B., Morgunov V.A., Fedulov A.A. Increasing the stability of the pipe rolling process on an automatic mill. *Materials Today: Proceedings*. 2019;19:2234-2238. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.541>
 6. Fedulov A.A., Belyaev S.Yu., Morgunov V.A., Bulgagina M.Yu., Khasenov R.K. Exclusion of the pipe rear end defects in the process of the PRP 220 rolling using the FE modeling. *Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Technologies in Materials Science, Mechanical and Automation Engineering, MIP: Engineering-III. Krasnoyarsk*. 2021;2402(1): Article ID 070010. <https://doi.org/10.1063/5.0071420>
 7. Belyaev S.Yu., Fedulov A.A., Bulgagina M.Yu., Kuznetsov V.I. Studying the process of pipe reeling based on the monitoring of the drive's loading parameters. *Materials Today: Proceedings*. 2021;38:1813-1816. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.425>
 8. Rogovoy A.A., Salikhova N.K. Numerical simulation of the nickel alloy microstructure formed in the process of hot fogging. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanics]. 2022;(3):135-146. (In Russ.) DOI: 10.15593/perm.mech/2022.3.14
 9. Larin S.N., Pasyukov A.A., Bessmertnaya Yu.V. To the evaluation of the limiting capabilities of the multi-operation drawing. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences]. 2022;(5):302-306. (In Russ.) DOI: 10.24412/2071-6168-2022-5-302-306
 10. Zhelezkov O.S., Laktyushin A.A., Makarov B.B. Power parameters and shape change in the radial local draft of a cylindrical billet. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences]. 2021;(3):42-46. (In Russ.) DOI: 10.24412/2071-6168-2021-3-42-46
 11. Vyatkina D.V., Zvonov S.Yu. Modeling the process of cutting with different geometry of the tool. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2021;23(6):42-46. (In Russ.) DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-6-42-46
 12. Zinger A.A., Zhakupov A.N., Bogomolov A.V. Predicting steel mechanical properties using computer modeling in DEFORM 3D. *Nauka i tekhnika Kazakhstana* [Science and Technology of Kazakhstan]. 2022;(1):71-80. DOI: 10.48081/RLYO5699

Поступила 20.06.2023; принята к публикации 08.09.2023; опубликована 25.12.2023
Submitted 20/06/2023; revised 08/09/2023; published 25/12/2023

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

Беляев Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия. Email: s.iu.beliaev@urfu.ru. ORCID 0009-0007-4137-1069

Булганина Марина Юрьевна – ведущий инженер, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия. Email: marina.bulgagina@urfu.ru. ORCID 0009-0009-7833-7846

Раскатов Евгений Юрьевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой металлургических и роторных машин, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия. Email: e.j.raskatov@urfu.ru. ORCID 0000-0002-5640-9580

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

Sergey Yu. Belyaev – PhD (Eng.), Associate Professor, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. Email: s.iu.beliaev@urfu.ru. ORCID 0009-0007-4137-1069

Marina Yu. Bulgagina – Lead Engineer, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. Email: marina.bulgagina@urfu.ru. ORCID 0009-0009-7833-7846

Evgeny Yu. Raskatov – DrSc (Eng.), Head of the Department of Metallurgical and Rotary Machines, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. Email: e.j.raskatov@urfu.ru. ORCID 0000-0002-5640-9580