

НЕОДНОРОДНОСТЬ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКЕ ТРУБ

Д.А. Павлов, М.В. Ерпалов

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

В процессе продольной прокатки труб на короткой оправке в результате неоднородности деформации металла в калибре прокатных валков происходит формирование поперечной разностенности труб. Указанная проблема приводит к снижению точности готовых труб. В работе представлены результаты исследования зависимости поперечной разностенности труб и неоднородности деформации от частоты вращения валков при продольной прокатке на короткой оправке. Исследование выполнено с помощью компьютерного моделирования. Для оценки разностенности труб был использован безразмерный параметр, равный отношению толщины стенки трубы в выпуске калибра к толщине стенки в вершине калибра. В ходе моделирования частота вращения валков изменялась от 95 до 135 об/мин. Замечено, что с увеличением частоты вращения валков стана продольной прокатки происходило увеличение температуры трубы на поверхности контакта, что приводило к увеличению интенсивности процесса разупрочнения. Следует отметить, что наряду с процессом разупрочнения металла трубы также протекал процесс скоростного упрочнения. Из-за протекания этих двух конкурирующих процессов разностенность труб при изменении частоты вращения валков изменялась нелинейно. Найдено критическое значение частоты вращения валков, при котором наблюдается наибольшая разностенность. Установлено, что при продольной прокатке на короткой оправке возможно уменьшение поперечной разностенности трубы путем подбора рациональных скоростных режимов деформации. На основании проведенных исследований сформулированы практические рекомендации при выборе скоростных режимов при продольной прокатке на короткой оправке, обеспечивающих повышение точности труб и снижение уровня брака.

Ключевые слова: продольная прокатка, короткая оправка, неоднородность деформации, конечно-элементное моделирование.

Введение

Актуальной проблемой процесса продольной прокатки труб на короткой оправке является повышенная поперечная разностенность черновых труб, вызванная затеканием металла в выпуски калибра и формированием лампасов в процессе прокатки. Эта разностенность при дальнейшей прокатке черновых труб в полной мере не устраняется, однако известно, что ее причиной является неоднородность течения металла по сечению трубы. В работах [1–3] на качественном уровне было изучено влияние характера кривой упрочнения материала на распределение деформаций в получаемом изделии в процессах осадки цилиндрических заготовок, прессования прутков, а также продольной прокатки и волочения труб. Утверждается, что с увеличением склонности материала к упрочнению возрастает однородность распределения деформаций. Однако в указанных работах постановка задач носит изотермический характер,

в то время как в горячем состоянии в металлах и сплавах происходят процессы разупрочнения, основными из которых являются возврат и полигонизация, а также рекристаллизация, при которых частично или полностью восстанавливаются структура и свойства деформированного материала [4–7]. Изучение влияния скорости деформации, а также учет изменения температуры материала в процессе обработки позволят более точно оценить влияние характера кривой упрочнения на распределение деформаций и качество прокатываемых труб на трубопрокатном агрегате ТПА-140 ПАО «Синарский трубный завод». В работе представлены результаты исследования формоизменения труб при прокатке на стане продольной прокатки труб «тандем».

Постановка задачи исследования

Стан тандем состоит из двух последовательно расположенных станков продольной прокатки труб (СПП-1 и СПП-2) [8, 9]. В ста-

тые представлены результаты моделирования прокатки труб на короткой оправке в первом стане продольной прокатки (СПП-1). Моделирование процесса прокатки гильзы в черновую трубу осуществлялось в программе Deform [10, 11]. Компьютерная модель стана представлена на рис. 1.

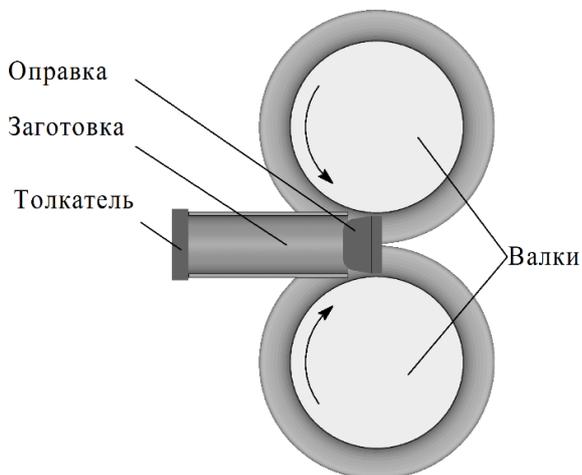


Рис. 1. Компьютерная модель стана продольной прокатки труб на короткой оправке

При постановке задачи температура гильзы принималась равной 1200 °С. В качестве материала заготовки использовалась сталь AISI-1045, являющаяся аналогом российской стали 45. Диаметр и толщина стенки гильзы составляли соответственно $D_r = 166$ мм и $S_r = 10$ мм. Диаметр и толщина стенки черновой трубы составляли соответственно $D_c = 160$ мм и $S_c = 7$ мм. Матрица вычислительного эксперимента представлена в таблице. В качестве параметра, позволяющего оценить разностенность трубы и склонность к образованию дефектов на внутренней поверхности труб, использовано отношение толщины стенки в выпуске к толщине стенки в вершине калибра $S_{вып}/S_{верш}$ (рис. 2). В работе [12] было показано, что при $S_{вып}/S_{верш} \geq 1,80$ велика склонность труб к образованию дефектов на внутренней поверхности.

Матрица вычислительного эксперимента

Номер вычислительного эксперимента	Частота вращения валков, об/мин
1	95
2	105
3	115
4	125
5	135

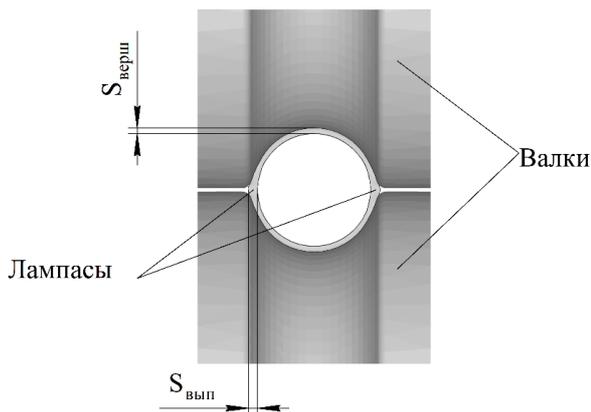


Рис. 2. Поперечный разрез очага деформации

В конце каждого вычислительного эксперимента на выходе из очага деформации выполнялось вычисление наибольшей толщины стенки трубы в каждом выпуске калибра через координаты узловых точек конечных элементов и определялось среднее между ними значение толщины стенки в выпуске калибра – $S_{вып}$. Таким же образом было выполнено измерение толщины стенки в вершине калибра – $S_{верш}$. На основе полученных результатов в каждом вычислительном эксперименте был определен безразмерный параметр $S_{вып}/S_{верш}$.



Рис. 3. Геометрический очаг деформации

Для оценки влияния разогрева трубы в процессе прокатки на неоднородность деформации и разностенность в каждой задаче был вырезан геометрический очаг деформации. На рис. 3 представлен геометрический очаг деформации, вырезанный в программе Deform-3D [11].

Анализ результатов компьютерного моделирования

На основе результатов вычисления безразмерного параметра $S_{вып}/S_{верш}$ была построена диаграмма (рис. 4). Из диаграммы, представленной на рис. 4, видно, что с увеличением частоты вращения валков от 95 до 115 об/мин

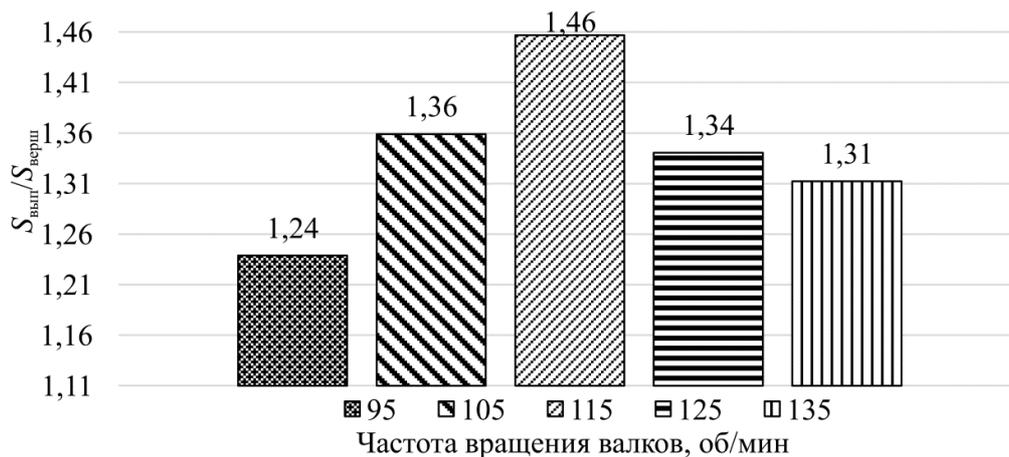


Рис. 4. Влияние частоты вращения валков на поперечную разностенность

наблюдается рост разностенности труб, так как параметр $S_{\text{вып}}/S_{\text{верш}}$ увеличивается от 1,24 до 1,46. При дальнейшем увеличении частоты вращения валков до 125 и 135 об/мин наблюдается уменьшение разностенности труб, так как параметр $S_{\text{вып}}/S_{\text{верш}}$ уменьшается до 1,34 и 1,31 соответственно. Для выяснения причин такого изменения параметра $S_{\text{вып}}/S_{\text{верш}}$ в ходе вычислительных экспериментов была проанализирована неоднородность деформации в очаге деформации, а также распределение температур на поверхности контакта.

Анализ данных компьютерного модели-

рования показал, что наиболее вероятной причиной повышенной неоднородности течения металла стало изменение температурного поля заготовок в очаге деформации. В этой связи было изучено распределение температуры трубы на поверхности контакта с валком и оправкой. Результаты измерения температур трубы на внутренней и внешней поверхности трубы представлены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что по мере увеличения частоты вращения валков происходило увеличение температуры трубы в очаге деформации. В результате в металле протекали про-

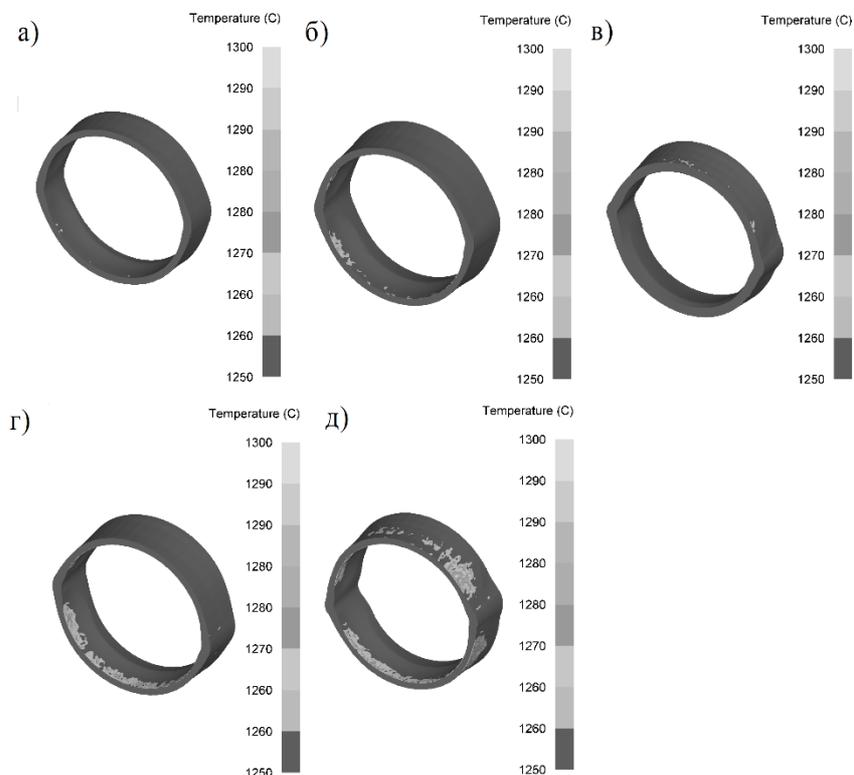


Рис. 5. Распределение температуры на поверхности контакта металла и инструмента

цессы скоростного упрочнения и температурного разупрочнения. На основании данных рис. 4 и 5а–в можно сделать вывод о том, что при увеличении частоты вращения валков от 95 до 115 об/мин скоростное упрочнение протекает более интенсивно, чем температурное разупрочнение. Это связано с тем, что разогрев металла трубы в процессе пластической деформации сравнительно не велик. При этом на поверхности контакта трубы с инструментом происходило интенсивное упрочнение металла и ему энергетически более выгодно было течь в выпуск калибра. В результате параметр $S_{\text{вып}}/S_{\text{верш}}$ возрастал, то есть происходило увеличение разностенности труб. При дальнейшем увеличении частоты вращения валков до 135 об/мин процесс разупрочнения металла начинал превалировать над упрочнением, так как разогрев трубы в процессе пластической деформации увеличивался. Из рис. 5г, д видно, что на стыке вершины и выпуска калибра происходил интенсивный разогрев металла. При этом металл начинал более интенсивно течь в осевом направлении и утолщение трубы в выпусках калибра уменьшалось, так как параметр $S_{\text{вып}}/S_{\text{верш}}$ снижался.

Заключение

В ходе работы исследовано влияние частоты вращения валков на неоднородность деформации, поперечную разностенность и температуру трубы в очаге деформации. Установлено, что существует критическое значение частоты вращения валков, при котором наблюдается наибольшая разностенность труб. При увеличении частоты вращения валков с 95 до 115 об/мин происходило интенсивное упрочнение металла трубы на поверхности контакта с инструментом, что привело к увеличению интенсивности затекания металла в выпуск калибра и росту параметра $S_{\text{вып}}/S_{\text{верш}}$. В ходе дальнейшего увеличения частоты вращения валков до 135 об/мин происходил рост температуры и интенсивности процесса разупрочнения металла. При этом металл более интенсивно начинал течь в осевом направлении. В результате наблюдалось снижение параметра $S_{\text{вып}}/S_{\text{верш}}$. На основании всего вышесказанного можно сделать вывод о том, что при продольной прокатке труб на короткой оправке можно управлять неоднородностью деформации и поперечной разностенностью труб с помощью частоты вращения валков. При этом есть некоторое критическое значе-

ние частоты вращения валков, при котором имеет место наибольшая разностенность труб. Следует также отметить, что при повышении температуры трубы велика вероятность пережога зерен металла, а также приваривания металла к инструменту, что приводит к росту уровня брака труб. В этой связи для снижения разностенности и объема брака труб процесс раскатки труб на короткой оправке следует проводить с уменьшенным значением частоты вращения валков.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых – кандидатов наук МК-1878.2020.8.

Литература

1. Логинов, Ю.Н. Влияние вида кривой упрочнения на локализацию деформации при осадке титановых заготовок / Ю.Н. Логинов, А.А. Ершов // Титан. – 2012. – № 1 (35). – С. 22–28.
2. Ершов, А.А. Влияние параметров упрочнения материала на деформированное состояние в процессах обработки металлов давлением: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05 / А.А. Ершов. – Екатеринбург, Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2014. – 169 с.
3. Исследование влияния свойств материала на неоднородность деформации при продольной прокатке труб на короткой оправке / Д.А. Павлов, М.В. Ергалов, Г.В. Шимов, Е.А. Павлова // Черные металлы. – 2018. – № 10. – С. 17–21.
4. Зюзин, В.И. Сопротивление деформации сталей при горячей прокатке / В.И. Зюзин, М.Я. Бровман, А.Ф. Мельников. – М.: Металлургия, 1964. – 270 с.
5. Колбасников, Н.Г. Теория обработки металлов давлением. Сопротивление деформации и пластичность / Н.Г. Колбасников. – СПб.: СПбГТУ, 1991. – 307 с.
6. Работнов, Ю.Н. Сопротивление материалов / Ю.Н. Работнов. – М.: Физматгиз, 1962. – 456 с.
7. Определение сопротивления пластической деформации металлических материалов на автоматизированном пластометрическом комплексе / А.И. Потапов, С.В. Гладковский, Е.А. Коковихин и др. // *Diagnostics, resource and mechanics of materials and structures*, 2015. – № 2. – С. 24–43.
8. Харитонов, В.В. Оборудование для про-

катки, прессования и волочения труб / В.В. Харитонов, А.А. Богатов, В.Ю. Вахрушев. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2008. – 233 с.

9. Трубное производство / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин, С.В. Самусев. – М.: Издат. дом МИСус, 2011. – 970 с.

10. Development of finite element analysis model for plug mill rolling / T. Katsumura, K. Ishikawa, A. Matsumoto et al. // *Key Engineering Materials*. – 2014. – Vol. 622–623. – P. 899–904.

11. Общее руководство по работе с инженерным программным комплексом DEFORM: учеб. пособие / И.М. Таупек, Е.Г. Кабулова, К.А. Положенцев и др. – Старый Оскол: Кириллица, 2015. – 217 с.

12. Новый способ раскатки горячедеформированных труб на короткой оправке / А.А. Богатов, Д.А. Павлов, С.В. Липнягов и др. // *Сталь*. – 2014. – № 12. – С. 49–51.

Павлов Дмитрий Андреевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра обработки металлов давлением, Институт материаловедения и металлургии, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; d.a.pavlov@urfu.ru.

Ерпалов Михаил Викторович, канд. техн. наук, доцент, кафедра обработки металлов давлением, Институт материаловедения и металлургии, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; m.v.erpalov@urfu.ru.

Поступила в редакцию 13 января 2020 г.

DOI: 10.14529/met200104

INHOMOGENEITY OF DEFORMATION DURING LENGTHWISE ROLLING OF TUBES

D.A. Pavlov, d.a.pavlov@urfu.ru,
M.V. Erpalov, m.v.erpalov@urfu.ru

*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russian Federation*

The formation of the pipes wall thickness variation occurs in the process of lengthwise rolling on a stub mandrel as a result of inhomogeneity of metal deformation in the roll pass. This problem leads to a decrease in the accuracy of the production. The paper presents the results of a study of the dependence of pipes wall thickness variation and the inhomogeneity of metal deformation on the frequency of rotation of the rolls during lengthwise rolling on a stub mandrel. The study was performed using computer simulation. We used a dimensionless parameter equal to the ratio of the pipe wall thickness in the outlet of the gauge to the wall thickness at the top of the gauge to evaluate the difference in the pipes. During the simulation, the rotation frequency of the rolls varied from 95 to 135 rpm. It was noted that with an increase of the rotation frequency of the rolls during lengthwise rolling, an increase in the temperature of the pipe on the contact surface occurred, which led to an increase in the intensity of the softening process. It should also be noted that along with the process of softening the metal of the pipe, the process of high-speed hardening also proceeded. The difference between the pipes when changing the rotation frequency of the rolls changed nonlinearly due to the occurrence of these two competing processes. The critical value of the rotation frequency of the rolls is found. The wall thickness variation of the pipe is observed at this frequency. It was found that during lengthwise rolling on a stub mandrel, it is possible to reduce the wall thickness variation of the pipe by selecting rational speed modes of deformation. Practical recommendations for choosing speed modes for lengthwise rolling, which increase the accuracy of pipes and reduce the level of defects are formulated based on the studies.

Keywords: lengthwise rolling, stub mandrel, Inhomogeneity of deformation, FEM.

References

1. Loginov Yu.N., Ershov A.A. [Effect of the hardening curve view on deformation localization during upsetting of titanium billets]. *Titan*, 2012, no. 1 (35), pp. 22–28. (in Russ.)
2. Ershov A.A. *Vliyaniye parametrov uprochneniya materiala na deformirovannoye sostoyaniye v protsessakh obrabotki metallov davleniyem: dis. kand. tekhn. nauk* [Influence of Material Hardening Parameters on the Deformed State in the Metal Forming Processes. Cand. sci. diss.]. Ekaterinburg, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 2014. 169 p.
3. Pavlov D.A., Erpalov M.V., Shimov G.V., Pavlova E.A. [Investigation of the influence of material properties on the inhomogeneity of deformation during lengthwise rolling of tubes on a stub mandrel]. *Chernyye Metally*, 2018, no. 10, pp. 17–21. (in Russ.)
4. Zyuzin V.I., Brovman M.Ya., Melnikov A.F. *Soprotivleniye deformatsii staley pri goryachey prokatke* [Strain resistance of steel during hot rolling]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1964. 270 p.
5. Kolbasnikov N.G. *Teoriya obrabotki metallov davleniyem. Soprotivleniye deformatsii i plastichnost'* [Theory of metal forming. Strain resistance and plasticity]. St. Petersburg, St. Petersburg State Technical University Publ., 1991. 307 p.
6. Rabotnov Yu.N. *Soprotivleniye materialov* [Strain resistance of materials]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1962. 456 p.
7. Potapov A.I., Gladkovsky S.V., Kokovikhin E.A. et al. [Determination of the strain resistance of metallic materials on an automated plastometric complex]. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*, 2015, no. 2, pp. 24–43. (in Russ.)
8. Kharitonov V.V., Bogatov A.A., Vakhrushev V.Yu. *Oborudovaniye dlya prokatki, pressovaniya i volocheniya trub* [Equipment for rolling, extrusion and drawing of pipes]. Ekaterinburg, USTU-UPI Publ., 2008. 233 p.
9. Romantsev B.A., Goncharuk A.B., Vavilkin N.M., Samusev S.V. *Trubnoye proizvodstvo* [Pipe and tube production]. Moscow, MISiS Publ., 2011. 970 p.
10. Katsumura T., Ishikawa K., Matsumoto A., Sasaki S., Kato Y., Yanagimoto J. Development of finite element analysis model for plug mill rolling. *Key Engineering Materials*, 2014, vol. 622–623, pp. 899–904. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.622-623.899
11. Taupek I.M., Kabulova E.G., Polozhentsev K.A., Lisovsky A.V., Makarov A.V. [General guideline on the application of the DEFORM engineering software complex]. *Staryy Oskol, Kirillitsa*, 2015. 217 p.
12. Bogatov A.A., Pavlov D.A., Lipnyagov S.V., Suvorov V.N., Pavlova E.A. Rolling hot-deformed pipe on a stub mandrel. *Steel in Translation*, 2014, no. 12, pp. 912–915. DOI: 10.3103/s0967091214120055

Received 13 January 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Павлов, Д.А. Неоднородность деформации при продольной прокатке труб / Д.А. Павлов, М.В. Ерпалов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 34–39. DOI: 10.14529/met200104

FOR CITATION

Pavlov D.A., Erpalov M.V. Inhomogeneity of Deformation during Lengthwise Rolling of Tubes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 34–39. (in Russ.) DOI: 10.14529/met200104