

**Алексей Александрович Посохин^{1*}, Фёдор Валерьевич Водолазский¹,
Александр Юрьевич Постыляков¹, Арина Вячеславовна Жуковец¹, Дарья
Павловна Мотыженец¹, Карина Игоревна Новак¹, Светлана Игоревна
Водолазская¹**

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

*aa.posokhin@urfu.ru

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ В ХОЛОДНОКАТАНОЙ ТРУБЕ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПТ-1М

В ходе данного исследования были проведены микроструктурный и дюраметрический анализ образцов из трубы титанового сплава ПТ-1М после холодной прокатки и сравнение с результатами математического моделирования. Подтверждено неоднородное распределение степени деформации как по сечению, так и по окружности трубы в результате неравномерного воздействия в ходе прокатки. Установлено изменение твёрдости от внешних стенок трубы к внутренним на 10 HV от 242 до 233 HV.

Ключевые слова: титановый сплав ПТ-1М, холодная прокатка, структура, моделирование, анализ твёрдости

Alexey A. Posokhin, Fedor V. Vodolazsky, Alexander Yu. Postyliakov, Arina V. Zhukovets, Daria P. Motyzenets, Karina I. Novak, Svetlana I. Vodolazskaya
Ural Federal University named after B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

DISTRIBUTION OF DEFORMATION IN A COLD-ROLLED PIPE MADE OF TITANIUM ALLOY PT-1M

In the course of this study, microstructural and durometric analysis of samples from PT1M titanium alloy pipe after cold rolling and comparison with the results of mathematical modeling were carried out. The heterogeneous distribution of the degree of deformation both along the cross section and along the circumference of the pipe as a result of uneven impact during rolling is confirmed. The hardness change from the outer walls of the pipe to the inner walls by 10 HV from 242 to HV was found.

Keywords: PT-1M titanium alloy, cold rolling, structure, modeling, hardness analysis

Титан и его сплавы активно применяются в различных отраслях науки и техники в качестве материала бесшовных труб во многом благодаря их высокой удельной прочности и коррозионной стойкости [1]. Получение труб из данных сплавов осуществляется с помощью операций горячей и холодной деформации [2]. Холодная деформация труб из титановых сплавов осуществляется различными методами, чаще всего это волочение или

холодная прокатка [3]. Прокатка титановых труб обычно осуществляется с помощью метода ХПТ - холодная прокатка труб. Процесс деформации на станах ХПТ отличается сложно-деформированным состоянием, вследствие не монотонного, а циклического приложения нагрузки [4]. В результате процесса должны получаться трубы с заранее заданным комплексом свойств, при этом свойства должны оказаться однородными и не зависеть от координаты измерений [5].

Моделирование холодной прокатки трубы из титанового сплава ПТ-1М с основными размерами сечения (наружный диаметр D и толщина стенки S , $D \times S$) 38x4,1 мм на стане ХПТ-55 выполнено в пакете конечно-элементного анализа DEFORM-3D. Размеры выбраны на основе реальной калибровки одного из предприятий.

Для подготовки расчетной части задачи построены трехмерные модели валков и оправки, соответствующие одной из действующих заводских калибровок (т. н. калибровки второго поколения, имеющих переменную конусность ручья калибров и постоянную конусность оправки). Поскольку кантовка заготовки осуществляется на угол $\varphi_k = 66^\circ$, отсутствует возможность использования характерных плоскостей симметрии для уменьшения количества конечных элементов и сокращения времени расчета, что определяет необходимость выполнения постановки с воспроизведением полной геометрии для всех моделей объектов.

Приведенные данные (рис. 1) показывают, что распределение степени деформации неравномерно по поперечному сечению. Кроме того, большую степень деформации получают области заготовки, прилегающие к наружной поверхности трубы.

На рисунке 1 представлены результаты моделирования степени деформации в поперечном сечении трубы где, наружная поверхность упрочнена больше, чем внутренняя. Кроме того, распределение степени деформации на наружной поверхности неоднородно в тангенциальном (окружном) направлении, что связано с кантовками исходной заготовки в цикле работы стана ХПТ.

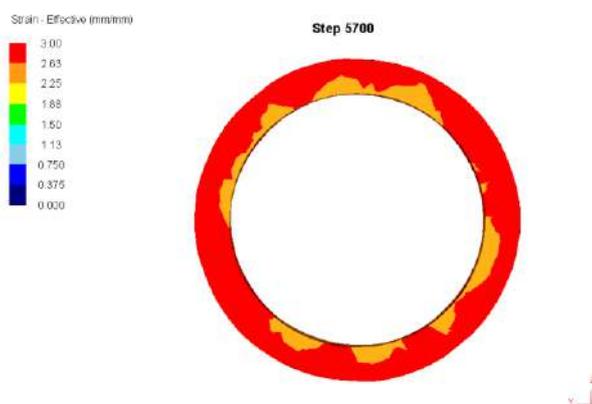


Рис. 1. Распределение эффективной степени деформации в поперечном сечении холоднокатаной трубы из сплава ПТ-1М

Для проверки распределения степени деформации в холоднокатаной трубе из титанового сплава ПТ-1М полученной на стане ХПТ были проведены замеры твёрдости в поперечном сечении трубы с помощью прибора МНТХ CSM Instruments по методике Оливера и Фарра при нагрузке 9 Н: 7 измерений с шагом в 0,5 мм от внешней стенки трубы к внутренней, каждые 22,5° от условной нулевой точки. Полученные значения представлены в шкале Викерса (HV) на рисунке 2.

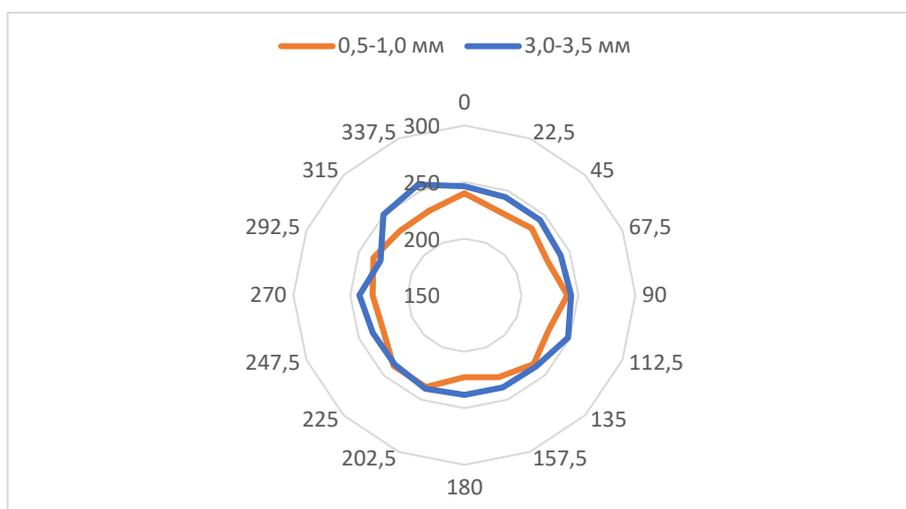


Рис. 2. Распределение твёрдости по углу от условной нулевой точки и по расстоянию от внутренней поверхности трубы в поперечном сечении холоднокатаной трубы из сплава ПТ-1М

Средняя величина твёрдости вблизи внешней стенки трубы 242 HV, в то время как средняя величина твёрдости вблизи внутренней стенки трубы 233 HV. Разница в 10 HV между внешней и внутренней стенкой трубы подтверждает смоделированную картину распределения степеней деформации. Также неравномерное распределение твёрдости подтверждает неоднородное распределение деформации выявленное в ходе моделирования.

Анализ микроструктуры был проведён на оптическом микроскопе «Olympus GX-51». Снимки полученной микроструктуры приведены на рисунке 3. Микроструктура трубы в поперечном направлении после холодной прокатки характеризуется вихреобразными зёрнами α -фазы с изогнутыми границами. При этом на участках трубы вблизи внешней поверхности размер α -зёрен меньше в связи с тем, что данные участки трубы претерпевают более высокие степени деформации согласно расчетам приведенным ранее.

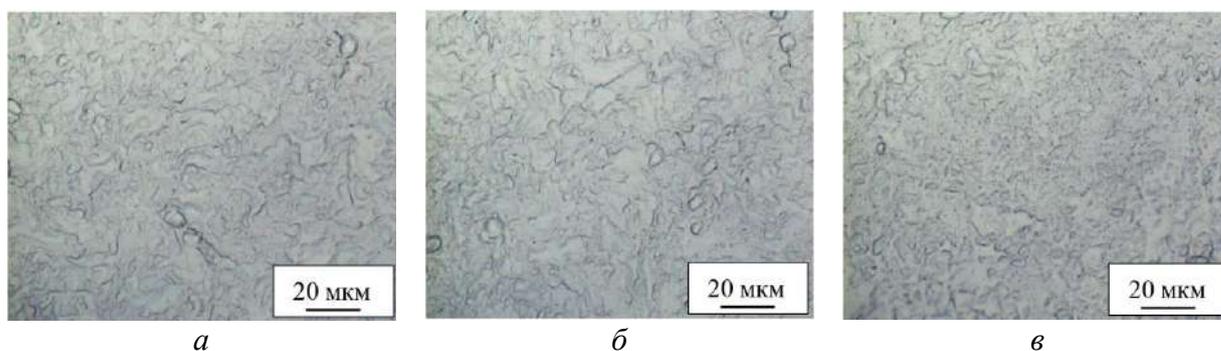


Рис. 3. Микроструктура трубы сплава ТТ1М после холодной прокатки в поперечном сечении: а – внутренняя часть трубы; б – середина трубы; в – внешняя часть трубы

Таким образом, в работе установлено, что при прокатке трубы из титанового сплава ТТ-1М на стане ХПТ большую степень деформации получают области заготовки, прилегающие к наружной поверхности трубы. Это подтверждается структурными измерениями и измерениями твердости по сечению. Области заготовки, прилегающие к наружной поверхности трубы, имеют более высокую твердость и более мелкозернистую структуру по сравнению с остальным сечением трубы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пумпянский Д. А. Перспективные сплавы титана для изготовления холоднодеформированных труб. / Пумпянский Д.А. [и др.] // *Металлург*, № 1, 2023, стр. 37-48
2. Пумпянский Д.А. Материаловедческие аспекты производства титановых труб. Часть 1. Получение горячепрессованных труб. / Пумпянский Д.А. [и др.] // *Металлург*, № 8, 2023, стр. 30-40
3. Пумпянский Д. А. Материаловедческие аспекты производства титановых труб. Часть 2 получение холоднокатаных труб / Пумпянский Д. А. [и др.] // *Металлург*, № 1, 2023, стр. 37-48
4. Егоров М.В. Оптимизация расчета деформационных схем и калибровки прокатного инструмента для станов холодной прокатки труб из титановых сплавов. / Егоров М.В., Курганов С.В. / *Титан*. 2010. № 3 (29). С. 21-23.
5. Космацкий Я.И. Оценка влияния степени холодной деформации и термической обработки на формирование и изменение механических свойств титанового сплава Ti-3Al-2,5V. / Космацкий Я.И. [и др.] // *Титан*. 2016. № 4 (54). С. 39-44.

REFERENCES

1. Pumpyansky D.A. Promising titanium alloys for the manufacture of cold-formed pipes. / Pumpyansky D.A. [et al.] // *Metallurg*, No. 1, 2023, pp. 37-48
2. Pumpyansky D.A. Material science aspects of titanium pipe production. Part 1. Obtaining hot-pressed pipes. / Pumpyansky D.A. [et al.] // *Metallurg*, No. 8, 2023, pp. 30-40

3. Pumpyansky D. A. Material science aspects of titanium pipe production. Part 2 obtaining cold-rolled pipes / Pumpyansky D. A. [et al.] // Metallurg, No. 1, 2023, pp. 37-48
4. Egorov M.V. Optimization of calculation of deformation schemes and calibration of rolling tools for cold rolling mills of pipes made of titanium alloys. / Egorov M.V., Kurganov S.V. / Titan. 2010. No. 3 (29). pp. 21-23.
5. Kosmatsky Ya.I. Assessment of the influence of the degree of cold deformation and heat treatment on the formation and change of mechanical properties of titanium alloy Ti-3Al-2,5V. / Kosmatsky Ya.I. [et al.] // Titanium. 2016. No. 4 (54). pp. 39-44.