

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ЗАТРАТ НА ХИМИЧЕСКУЮ ОБРАБОТКУ ТРУБ

Н. Д. Прокопенко, М. С. Морозова, М. Ю. Чубуков

АО «Волжский трубный завод», Россия, 404119, г. Волжский, пр. Metallurgov, 6

В настоящей статье представлены результаты применения методов и инструментов бережливого производства для повышения эффективности процесса химической обработки труб в условиях Волжского трубного завода.

В работе представлен практический опыт применения инструментов бережливого производства, в частности методологии управления процессами Lean Six Sigma, с целью рационального использования кислот при химической обработке труб и повышения производительности труда. Для достижения поставленной цели был использован подход концепции бережливого производства DMAIC.

С использованием инструментов бережливого производства определены наиболее оптимальные технологические режимы и ключевые факторы процесса химической обработки труб.

В ходе проведенного исследования была продемонстрирована целесообразность применения методов и инструментов бережливого производства на металлургическом предприятии.

Ключевые слова: бережливое производство, DMAIC, химическая обработка труб, регенерация кислот, травильные кислоты, металлургия, трубы из нержавеющей стали.

Для цитирования: Прокопенко Н. Д., Морозова М. С., Чубуков М. Ю. Опыт применения инструментов бережливого производства для снижения затрат на химическую обработку труб // Омский научный вестник. 2025. № 4 (196). С. 51–57. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-51-57. EDN: WPGUMD.



© Прокопенко Н. Д., Морозова М. С., Чубуков М. Ю., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

EXPERTISE IN APPLYING LEAN MANUFACTURING TOOLS TO REDUCE COSTS OF THE PIPE CHEMICAL PROCESSING

N. D. Prokopenko, M. S. Morozova, M. Yu. Chubukov

JSC "Volga Pipe Plant", Russia, Volzhsky, Metallurgov Ave., 6, 404119

This article presents results of the use of lean production methods and tools to ensure improvement of efficiency of the pipes chemical processing process at JSC "Volga Pipe Plant".

The paper presents practical experience in applying lean production tools, particularly the Lean Six Sigma process management methodology, to optimize the use of acids in the chemical processing of pipes and improve labor productivity. To achieve this goal, the DMAIC lean manufacturing concept is used.

The use of lean production tools provides determination of the most optimum process conditions of the chemical processing of pipes.

The study demonstrates the feasibility of applying lean production methods and tools at a metallurgical enterprise.

Keywords: lean production, DMAIC, pipes chemical processing, acid regeneration, etching acids, metallurgy, stainless steel pipes.

For citation: Prokopenko N. D., Morozova M. S., Chubukov M. Yu. Expertise in applying lean manufacturing tools to reduce costs of the pipe chemical processing. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 4 (196). P. 51–57. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-51-57. EDN: WPGUMD.



© Prokopenko N. D., Morozova M. S., Chubukov M. Yu., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.



Рис. 1. Схема производства горячепрессованных труб
Fig. 1. Scheme of production of hot-pressed pipes

Введение

Применение инструментов бережливого производства в любой сфере — надежный способ повысить эффективность процесса. Основная цель использования инструментов бережливого производства состоит в устранении потерь времени и ресурсов [1].

С изучением вопросов применения концепции бережливого производства на промышленных предприятиях в нашей стране связаны труды Н. В. Проsvирова [2], К. В. Бельш [3], М. А. Мирошниченко [4].

В концепции бережливого производства могут использоваться разные методы. К популярным методам бережливого производства относятся [5, 6]:

1. Система TPM (Total Productive Maintenance). Данный метод основан на исключении поломок оборудования за счёт его поддержки [7].

2. Система SMED (Single Minute Exchange of Dies). Данный метод основан на исключении потерь из-за ожидания и из-за брака за счёт быстрой переналадки оборудования [8].

3. Визуализация предполагает представление информации в наглядной форме (рисунки, диаграммы, графики, структурные схемы, карты, таблицы).

4. DMAIC (от англ. Define, Measure, Analyze, Improve, Control — определение, измерение, анализ, совершенствование, контроль). В цикле DMAIC решение каждой задачи улучшения процесса или устранения проблемы должно последовательно пройти через все фазы, для каждой фазы предполагаются конкретные действия и инструменты. Считается, что именно такая последовательность обеспечивает структурированный подход, позволяющий двигаться от определения сути проблемы к внедрению решений.

В работе представлены результаты применения методов и инструментов бережливого производства для повышения эффективности процесса химической обработки труб в условиях металлургического завода на предприятии АО «Волжский трубный завод» (г. Волжский) за период с марта 2023 г. по июнь 2024 г.

В металлургической отрасли широко используют процесс кислотной обработки (травления) стальных труб. Данную обработку применяют для очистки поверхности труб от окалины и/или стеклосмазки, наличие которых обусловлено способом производства труб, а также для придания трубам соответствующего внешнего вида. Схема производства труб в общем виде представлена на рис. 1.

В современном мире существует три вида травления металла: ионно-плазменное травление,

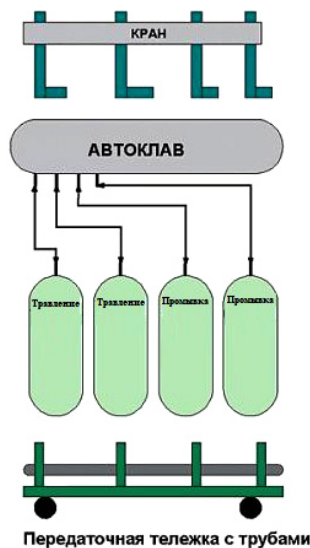


Рис. 2. Схема химической обработки в автоклаве
Fig. 2. Scheme of chemical processing in an autoclave

травление электролитами, химическое травление. Каждый вид имеет свои уникальные характеристики и области применения, позволяя эффективно обрабатывать металлические поверхности в зависимости от поставленных задач.

Химическое травление является наиболее распространенным способом. Оно отличается простотой в использовании и экономичностью. Данный способ позволяет эффективно обрабатывать большие площади и подходит для массового производства [9, 10].

При химическом травлении используют кислоты для очистки от окалины и создания пассивированного слоя. В процессе травления металл погружают в ванну с травильным раствором на определённое время при определённой температуре. В результате протекания химической реакции происходит удаление оксидной плёнки и окалины. Химическая реакция основана на взаимодействии неорганической кислоты с поверхностью металла — происходит выделение водорода. Метод обеспечивает получение чистой поверхности изделия.

Ежегодно в производстве для травления труб используют большое количество растворов неорганических кислот: серной, азотной, плавиковой. Использование данных кислот требует строгого соблюдения мер безопасности и контроля условий

работы, так как они являются высокоактивными веществами, способными вызывать серьёзные химические ожоги. Следовательно, в технологии травления постоянно внедряют мероприятия для минимизации рисков для работников и для снижения нагрузки на окружающую среду.

Горячепрессованные трубы подвергают травлению в серно-плавиковом растворе с целью удаления стеклосмазки и окалины. Трубы из нержавеющей стали аустенитного класса дополнительно подвергают осветлению поверхности в азотно-плавиковом и/или азотнокислом растворах с целью осветления поверхности и создания пассивирующего слоя.

Одним из эффективных способов химического травления является способ проведения обработки в автоклаве. К одному из преимуществ проведения химического травления в автоклаве можно отнести сокращение длительности обработки труб за счёт герметичности оборудования и проведения процесса при высоких температурах раствора и давлении выше атмосферного. В автоклав загружают трубы, далее поочерёдно подают травильные растворы и промывные воды, как показано на рис. 2.

Ежегодное потребление кислот для обработки порядка 40 000 т стальных труб превышает 2000 т, в том числе трубы из нержавеющей стали (например, 08/12Х18Н10Т) из углеродистых металлов (например, 20, 09Г2С) и хромоникелевых сплавов (например, ХН60ВТ). Кислоты являются основным расходным материалом при производстве стальных труб. В условиях растущей конкуренции на рынке производители труб вынуждены искать способы снижения затрат без потери качества выпускаемой продукции.

Таким образом, возникает необходимость повышения экономической эффективности производства и оптимизации используемых ресурсов. Для данной цели может быть применена концепция бережливого производства. Она позволяет за счёт уникальных методов и инструментов достичь результата с минимальными затратами и необходимым качеством продукции для потребителя.

Целью работы является исследование влияния различных факторов на эффективность процесса травления стальных труб и обобщение опыта практического применения методов бережливого производства для оптимизации потребления ресурсов и достижения экономического результата.

Результаты исследований и их обсуждение

В процессе травления труб с целью получения требуемого результата должны обеспечиваться определенные условия: длительность химической обработки, концентрации и температуры травильных растворов и промывных вод. Для снижения потребления кислот на травление производят регенерацию серно-плавикового раствора. После процесса регенерации растворы неорганических кислот используют повторно в цикле травления.

Для достижения поставленной цели был использован подход концепции бережливого производства DMAIC. Этот подход позволяет последовательно решать проблемы и совершенствовать бизнес-процессы с помощью статистики. При этом решение проблемы осуществляется в строго определенной последовательности: каждая буква в названии метода соответствует определенному этапу (рис. 3).

На первом этапе «Определение» (D) была сформулирована основная проблема, поставлены цели и задачи проекта, определены конкретные рамки.



Рис. 3. Подход концепции бережливого производства, DMAIC
Fig. 3. Lean Manufacturing Concept Approach, DMAIC

Рассматриваемая проблема заключалась в высоких экономических затратах на кислоты для травления.

На этапе «Измерение» (M) проводился сбор всех необходимых сведений о процессе, фиксировались текущие показатели, нуждающиеся в улучшении. С помощью инструментов бережливого производства, диаграммы Исикавы и причинно-следственной матрицы были определены корневые причины высоких затрат на процесс химической обработки труб. Далее по каждой определенной причине был разработан комплекс мероприятий.

На этапе «Анализ» (A) был проведен анализ эффективности действующих процессов регенерации травильных растворов и осветления труб из нержавеющей сталей.

Технологический процесс регенерации отработанного серно-плавикового раствора, содержащего ионы железа, представляет собой важный этап в восстановлении и повторном использовании кислот, что позволяет значительно снизить затраты на сырье и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду.

Процесс регенерации начинают с понижения температуры отработанного травильного раствора, что является ключевым этапом в выделении кристаллов сульфата железа. Обычно это достигают путем охлаждения раствора, что приводит к снижению растворимости сульфата железа и, как следствие, к образованию кристаллов. Кристаллизация происходит благодаря изменению термодинамических условий, что позволяет ионам железа соединяться с сульфатными ионами и формировать устойчивые кристаллические структуры.

После того как кристаллы сульфата железа сформированы, они отделяются от оставшегося раствора на центрифуге. Центрифугирование — эффективный метод разделения твердых и жидких фаз, который использует центробежную силу для удаления жидкости из смеси. В результате получают концентрированный осадок сульфата железа (железный купорос), который может быть использован в дальнейшем для различных целей, например, в производстве удобрений или в водоочистке, и очищенный травильный раствор, который возвращают обратно в цикл и повторно используют для травления.

На схематичной технологической схеме процесса регенерации (рис. 4) представлены основные этапы: охлаждение отработанного раствора, кристаллизация сульфата железа, центрифугирование и отделение кристаллов от жидкости. Каждый из этих этапов требует контроля условий, таких как

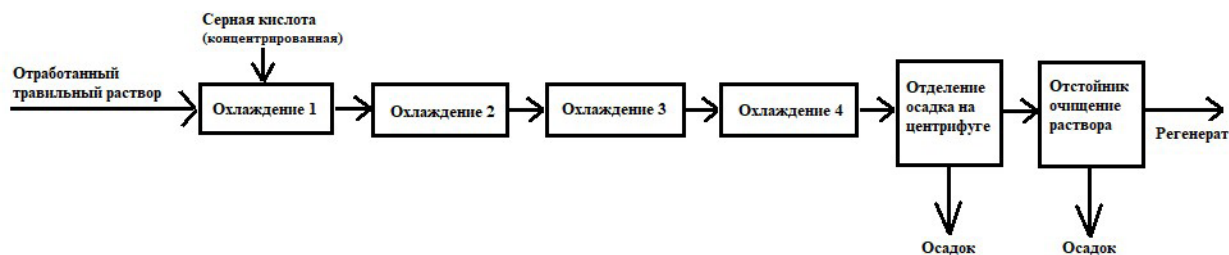


Рис. 4. Схематичная технологическая схема процесса регенерации
Fig. 4. Technological scheme of the regeneration process

температура и время обработки, концентрация кислот, чтобы обеспечить максимальную эффективность процесса и высокое качество конечного продукта.

Стоит отметить, что регенерация серно-плавикового раствора не только способствует экономии ресурсов, но и играет важную роль в экологической устойчивости производственных процессов.

С целью оценки эффективности процесса регенерации был проведён анализ на определение индекса способности процесса по ГОСТу Р 50779.44–2001 [11]. Анализ показал, что эффективность данного процесса находится на низком уровне, о чём говорит значение индекса способности процесса, равное меньше единицы (рис. 5). На значение индекса способности процесса повлияли такие факторы, как высокий разброс значений концентраций кислот в травильном растворе. Следовательно, требуемая остаточная концентрация примесей железа в очищенном растворе стабильно не обеспечивается. Для достижения требуемых значений остаточной концентрации примесей железа требуется частичная замена травильного раствора, в связи с чем расход кислот повышается.

С помощью регрессионного анализа были определены основные технологические параметры, влияющие на процесс регенерации, такие как содержание примесей железа в отработанном травильном растворе; концентрация серной кислоты в регенерируемом растворе; температура травильного раствора, поступающего на установку регенерации.

Следующим этапом был проведён анализ, направленный на оптимизацию режимов осветления труб из нержавеющей стали. Ежегодно осветлению подвергаются более 6000 труб из нержавеющей стали. К трубам из нержавеющей стали предъявляют повышенные требования, в частности, поверхность должна быть светлая, однородная и без загрязнений. С этой целью проводят операцию осветления в азотно-плавиковом растворе. При помощи инструмента бережливого производства статистического анализа был проведён анализ по разбросу значений концентраций плавиковой кислоты в растворе осветления. В результате был сделан вывод, что текущую технологию используют в достаточно широком интервале концентраций кислот. Разброс значений концентраций составляет более 20 г/л (рис. 6). Широкий разброс значений концентрации говорит о низкой управляемости процессом.

Ключевым этапом является «Совершенствование» (I). На основании анализа собранных статистических данных за несколько месяцев работы оборудования и проведенных опытных работ были подобраны оптимальные технологические режимы процесса регенерации, такие как содержание примесей железа в отработанном травильном растворе;

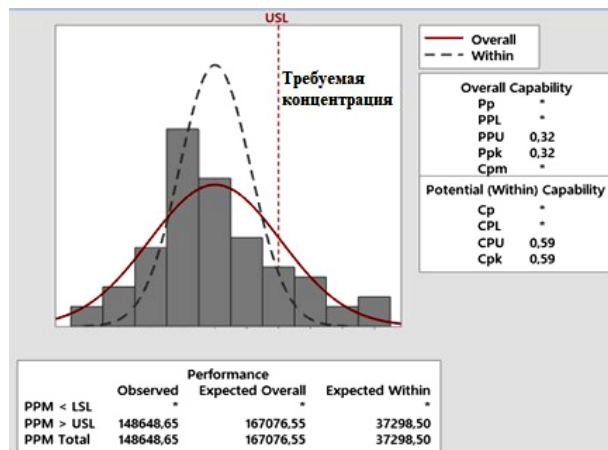


Рис. 5. Оценка стабильности процесса регенерации
Fig. 5. Assessment of the stability of the regeneration process

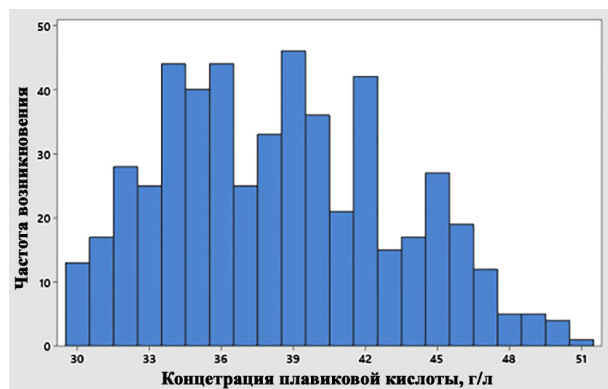


Рис. 6. Разброс концентрации плавиковой кислоты в растворе для осветления
Fig. 6. Range of hydrofluoric acid concentration in the clarification solution

ре; концентрация серной кислоты в очищенном растворе; температура отработанного травильного раствора, поступающего на установку регенерации; температура регенерированного раствора на выходе из установки. Исследование химизма процесса регенерации показало, что при повышении концентрации серной кислоты происходит ускорение реакции отделения примесей железа в регенерируемом растворе. Анализ собранных статистических данных является основным инструментом в бережливом производстве для определения причинно-следственных связей.

Для облегчения работы персонала подобранные оптимальные технологические режимы процесса регенерации внесены в стандартные операционные

Regression Equation

качество = $-5,29 + 0,1206 \text{ температура} + 0,2459 \text{ конц плавиков кислоты}$

Parameters

Response Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
качество	Target	1	7	10	1

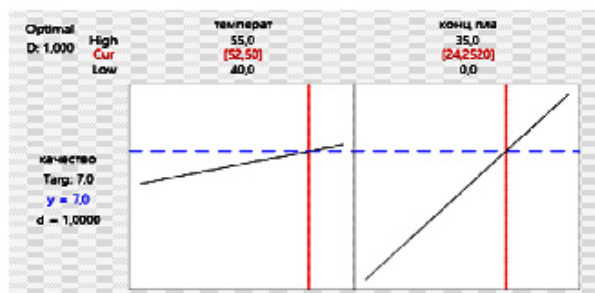


Рис. 7. Определение оптимальных параметров процесса осветления в Minitab

Fig. 7. Determining the optimal parameters of the lightening process in Minitab



Рис. 8. Качество поверхности осветлённых труб

Fig. 8. Surface quality of clarified pipes

процедуры, размещённые непосредственно на рабочих местах. Стандартные операционные процедуры представляют собой документ, включающий допустимые значения технологических параметров, необходимых для максимальной эффективности процесса. Данные мероприятия показывают применение такого инструмента бережливого производства, как «визуализация».

С целью обеспечения эффективного использования оборудования был использован элемент метода TRM и разработан стандарт ежесменной диагностики и оперативного обслуживания [12]. Указанный стандарт представлен в виде наглядной стандартной операционной процедуры, в которой описаны возможные неисправности оборудования и порядок действий персонала для предотвращения их возникновения.

Благодаря подобранной оптимальной технологии процесса регенерации (ускорению реакции отделения примесей железа в регенерируемом растворе) и разработанному стандарту ежесменной диагностики и оперативного обслуживания оборудования эффективность процесса регенерации увеличилась на 40 %.

Повторное использование восстановленных травильных растворов и, как следствие, снижение количества образующихся отходов способствуют снижению негативного влияния на окружающую среду и соблюдению норм экологической безопасности.

Также были реализованы мероприятия, направленные на оптимизацию режимов осветления труб из нержавеющей стали. С помощью инструмента «планирование эксперимента (DoE)» определены наиболее оптимальные параметры осветления труб из нержавеющей стали. При этом учитывалось получаемое качество продукции и обеспечение установленных требований потребителей [13]. При планировании эксперимента учитывались технологические параметры, такие как концентрации кислот в травильном растворе, температура травильного раствора и длительность процесса в их различных вариациях [14].

По результатам экспериментальных травлений, согласно построенному плану, было проведено математическое моделирование в программе Minitab. В результате оптимизации полученной математической модели определены рекомендуемые режимы ведения процесса осветления (рис. 7).

Подобранные режимы осветления обеспечили требуемое качество поверхности труб (рис. 8).

Заключительным этапом реализации алгоритма DMAIC является «Контроль» (C). Он состоит в оценке достижения поставленных целей для совершенствования процесса. После прохождения указанного этапа проект признают реализованным и завершают [15].

Для оценки результатов внедрённых мероприятий проводился анализ динамики изменения удельных расходов кислот. Анализ динамики внедрённых мероприятий является обязательным этапом фазы DMAIC «Контроль».

По результатам проведённого анализа удельный расход кислот был снижен более чем на 15 % (рис. 9).

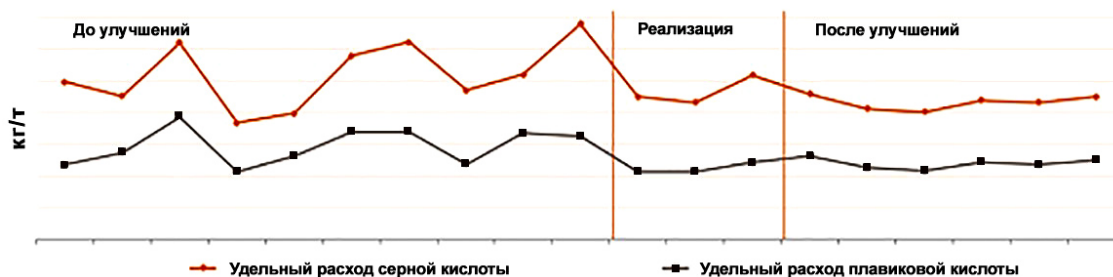


Рис. 9. Изменения удельного расхода серной и плавиковой кислот
Fig. 9. Changes in the specific consumption of sulfuric and hydrofluoric acids

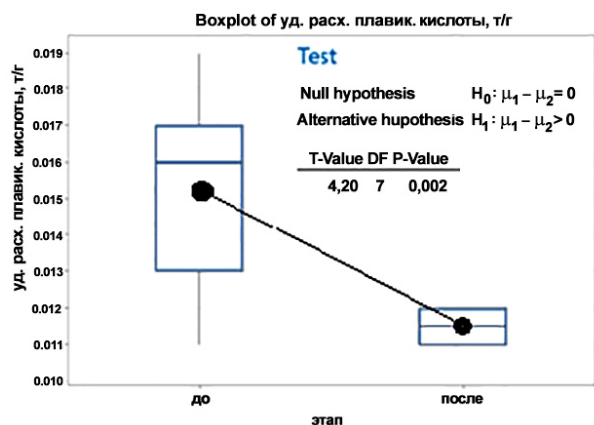


Рис. 10. Проверка значимости улучшений гипотезным тестом в Minitab

Fig. 10. Checking the significance of improvements with a hypothesis test in Minitab

С помощью инструментов анализа улучшений в программе Minitab была подтверждена значимость внесенных улучшений, что доказано гипотезным тестом (рис. 10).

На заключительном этапе все мероприятия, реализованные с помощью инструментов бережливого производства, были стандартизованы в технологической документации, что является обязательным заключительным этапом фазы DMAIC «Контроль».

По результатам оценки эффективности применения концепции бережливого производства для повышения эффективности процесса химической обработки труб был достигнут положительный экономический эффект.

Выводы

С целью повышения экономической эффективности производства и оптимизации используемых ресурсов были проведены комплексные исследования влияния различных факторов на эффективность процесса травления. В ходе работы определены ключевые факторы, такие как концентрация и температура травильных растворов, а также время протекания процесса травления. На основании данных факторов подобрана оптимальная технология химической обработки труб. С использованием инструментов бережливого производства указаны наиболее оптимальные технологические режимы процесса химической обработки.

Список источников / References

1. Вейдер М. Инструменты бережливого производства II: Карманное руководство по практике применения Lean. Москва: Альпина Бизнес Букс, 2017. 59 с.
2. Weider M. Instrumenty berezhlivogo proizvodstva II: Karmannoye rukovodstvo po praktike primeneniya Lean [Lean Manufacturing Tools II: A Pocket Guide to Lean Practice]. Moscow, 2017. 59 p. (In Russ.).
3. Просвирина Н. В., Тихонов А. И. Особенности управления производственным процессом промышленного предприятия на основе концепции бережливого производства // Московский экономический журнал. 2019. № 11. DOI: 10.24411/2413-046X-2019-10152. EDN: MAGNWW.
4. Prosvirina N. V., Tikhonov A. I. Osobennosti upravleniya proizvodstvennym protsessom promyshlennogo predpriyatiya na osnove kontseptsii berezhlivogo proizvodstva [Features of managing the production process of an industrial enterprise

based on the concept of lean manufacturing]. Moskovskiy ekonomicheskij zhurnal. Moscow Economic Journal. 2019. No. 11. DOI: 10.24411/2413-046X-2019-10152. EDN: MAGNWW. (In Russ.).

3. Бельш К. В. Организация бережливого производства на промышленных предприятиях // Лин-технологии: Бережливое производство. 2018. № 5.

Belysh K. V. Organizatsiya berezhlivogo proizvodstva na promyshlennykh predpriyatiyakh [Organization of lean production at industrial enterprises]. Lin-tekhnologii: Berezhlivoye Proizvodstvo. LEAN-technology: Saving Production. 2018. No. 5. (In Russ.).

4. Мирошниченко М. А., Голобородько Е. О., Сарычева И. Н. Методология эффективного управления на основе принципов бережливого производства // Вестник Академии знаний. 2020. № 2 (37). С. 179–183. DOI: 10.24411/2304-6139-2020-10161. EDN: PGHANX.

Miroshnichenko M. A., Goloborod'ko E. O., Sarycheva I. N. Metodologiya effektivnogo upravleniya na osnove printsipov berezhlivogo proizvodstva [Effective management methodology based on the principles of lean manufacturing]. Vestnik Akademii znaniy. Bulletin of the Academy of Knowledge. 2020. No. 2 (37). P. 179–183. DOI: 10.24411/2304-6139-2020-10161. EDN: PGHANX. (In Russ.).

5. ГОСТ Р 56407 – 2023. Бережливое производство. Основные инструменты и методы их применения. Введ. 01–02–2024. Москва: Русский Регистр, 2023. 12 с.

GOST P 56407 – 2023. Berezhlivoye proizvodstvo. Osnovnyye instrumenty i metody ikh primeneniya [Lean production. Basic tools and methods of use]. Moscow, 2023. 12 p. (In Russ.).

6. Ballé M., Jones D., Chaize J., Fiume O. The Lean Strategy: Using Lean to Create Competitive Advantage, Unleash Innovation, and Deliver Sustainable Growth. McGraw Hill, 2017. 304 p. ISBN 1259860426, 978-1259860423.

7. Итикава А., Такаги И., Такэбэ Ю. [и др.]. TPM в простом и доступном изложении / пер. с яп. А. Н. Стерляжников; под ред. В. Е. Растимешина, Т. М. Куприяновой. Москва: Стандарты и качество, 2008. 128 с.

Itikava A., Takagi I., Takebe Yu. [et al.]. TRM v prostom i dostupnom izlozhenii [TRM in a simple and accessible presentation] / trans. from Japanese A. N. Sterlyazhnikova; ed. by V. E. Rastimeshin, T. M. Kupriyanaova. Moscow, 2008. 128 p. (In Russ.).

8. Быстрая переналадка для рабочих / пер. с англ. А. Рыкова; ред. А. Нижельский. Москва: Институт комплексных стратегических исследований, 2009. 112 с. ISBN 978-1-5632L-25-0, 978-5-903148-28-8.

Bystraya perenaladka dlya rabochikh [Quick changeover for workers] / trans. from Engl. A. Rykova; ed. by Nizhelskiy. Moscow, 2009. 112 p. ISBN 978-1-5632L-25-0, 978-5-903148-28-8. (In Russ.).

9. Травление металла // Metalworking Industrial: справ. URL: <https://metalworkind.com/ru/spravochnik/materialovedenie/travlenie-metalla> (дата обращения: 13.03.2025).

Travleniye metalla [Etching of metal] // Metalworking Industrial. URL: <https://metalworkind.com/ru/spravochnik/materialovedenie/travlenie-metalla> (accessed: 13.03.2025). (In Russ.).

10. Ward A. C., Sobek D. K. Lean Product and Process Development. 2nd ed. Lean Enterprise Institute, Inc., 2020. 349 p. ISBN 9781934109434; 1934109436.

11. ГОСТ Р 50779.44–2001. Статистические методы. Показатели возможностей процесса. Основные методы расчёта. Введ. 01–07–2002. Москва: АО НИЦ КД, 2001. 16 с.

GOST P 50779.44-2001. Statisticheskiye metody. Pokazateli vozmozhnostey protsesssa. Osnovnyye metody rascheta [Statistical methods. Process capability characteristics. Basic methods for calculation]. Moscow, 2001. 16 p. (In Russ.).

12. Омельченко И. Н., Лазарев С. В. Модель системы управления качеством производства на основе принципов

производственной системы Тойота и учении Деминга // Вестник машиностроения. 2013. № 9. С. 79–84. EDN: RVEDOZ.

Omel'chenko I. N., Lazarev S. V. Model' sistemy upravleniya kachestvom proizvodstva na osnove printsiptov proizvodstvennoy sistemy Toyota i uchenii Deminga [Production quality management system model, basing on Toyota production system principles and Deming theory]. *Vestnik Mashinostroyeniya*. 2013. No. 9. P. 79–84. EDN: RVEDOZ. (In Russ.).

13. Исикава К. Японские методы управления качеством: моногр. / сокр. пер. с англ. / под ред. А. В. Гличева. Москва: Экономика, 1988. 214 с. ISBN 0-13-952433-9, 5-282-00114-4.

Ishikawa K. Yaponskiye metody upravleniya kachestvom [Japanese quality management methods] / abbreviated trans. from Engl. / ed. by A. V. Glichev. Moscow, 1988. 214 p. ISBN 0-13-952433-9, 5-282-00114-4. (In Russ.).

14. Хан Д., Хунгенберг Х. Планирование и контроль / пер. с нем. / под ред. Л. Г. Головача, М. Л. Лукашевича [и др.]. Москва: Финансы и статистика, 2015. 128 с.

Hahn D., Hungenberg H. Planirovaniye i kontrol' [Planning and control] / trans. from German / ed. by L. G. Golovach, M. L. Lukashevich [et al.]. Moscow, 2015. 128 p. (In Russ.).

15. Фалько С. Г., Орлов А. И. «Шесть сигм» как подход к совершенствованию бизнеса // Контроллинг. 2004. № 4 (12). С. 42–46. EDN: WNPZIG.

Falko S. G., Orlov A. I. «Shest' sigm» kak podkhod k sovershenstvovaniyu biznesa ["Six Sigma" as an approach to business improvement]. *Kontrolling*. 2004. No. 4 (12). P. 42–46. EDN: WNPZIG. (In Russ.).

ПРОКОПЕНКО Никита Дмитриевич, инженер-технолог лаборатории химической обработки труб и материалов АО «Волжский трубный завод», г. Волжский.

SPIN-код: 4489-4802

AuthorID (РИНЦ): 1288220

Адрес для переписки: nikita.prokopenko@tmk-group.com

МОРОЗОВА Марина Сергеевна, кандидат технических наук, начальник лаборатории химической обработки труб и материалов АО «Волжский трубный завод», г. Волжский.

SPIN-код: 5354-5360

AuthorID (РИНЦ): 624459

AuthorID (SCOPUS): 58554651000

Адрес для переписки: ms.morozova@tmk-group.com

ЧУБУКОВ Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), начальник центральной заводской лаборатории АО «Волжский трубный завод», г. Волжский.

SPIN-код: 1442-9379

AuthorID (РИНЦ): 881253

AuthorID (SCOPUS): 57189297192

Адрес для переписки: mikhail.chubukov@tmk-group.com

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 18.06.2025; одобрена после рецензирования 07.10.2025; принята к публикации 14.10.2025.

PROKOPENKO Nikita Dmitriyevich, Engineer Technologist of the Laboratory for Chemical Processing of Pipes and Materials, JSC "Volga Pipe Plant", Volzhsky.

SPIN-code: 4489-4802

AuthorID (RSCI): 1288220

Correspondence address: nikita.prokopenko@tmk-group.com

MOROZOVA Marina Sergeyevna, Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory for Chemical Processing of Pipes and Materials, JSC "Volga Pipe Plant", Volzhsky.

SPIN-code: 5354-5360

AuthorID (RSCI): 624459

AuthorID (SCOPUS): 58554651000

Correspondence address: ms.morozova@tmk-group.com

CHUBUKOV Mikhail Yuryevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Central Plant Laboratory, JSC "Volga Pipe Plant", Volzhsky.

SPIN-code: 1442-9379

AuthorID (RSCI): 881253

AuthorID (SCOPUS): 57189297192

Correspondence address: mikhail.chubukov@tmk-group.com

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 18.06.2025; approved after reviewing 07.10.2025; accepted for publication 14.10.2025.