



УДК 621.771

**Ю.А. Офицеров, В.В. Черешнев,  
В.Н. Черкасов, А.А. Сакир, Р.В. Терехов**  
ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат»  
г. Липецк, Россия  
E-mail: info@nlmk.com  
Дата поступления 13.05.2016

## ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ НЕПРЕРЫВНОГО СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

### Аннотация

Представлены результаты разработки и внедрения режимов эксплуатации рабочих валков стана холодной прокатки в зависимости от величины использованного закаленного слоя, а также мероприятия по восстановлению работоспособности валков, получивших повреждения в клети. Внедрение новых режимов позволило существенно увеличить ресурс и снизить расход валков непрерывного стана 1400 холодной прокатки.

**Ключевые слова:** валки, закаленный слой, перевалка, шлифовка, легирование, надежность, ресурс.

### Введение

Эксплуатация прокатных валков стана холодной прокатки осуществляется в условиях крайне высоких контактных нагрузок, что связано с необходимостью получения проката требуемой геометрии, с определенным уровнем механических свойств и заданной чистотой поверхности.

Характерной особенностью эксплуатации рабочих валков непрерывного четырехклетевого стана 1400 холодной прокатки ПАО «НЛМК» является производство широкого спектра сортаментных групп проката, определяющего существенные различия динамических нагрузок и механизма износа рабочей поверхности бочки, различный уровень повреждаемости, аварийных отказов и, в конечном итоге, показатель эффективности использования закаленного слоя рабочих валков.

### Состояние вопроса и постановка задачи

Существующий мировой уровень развития черной металлургии не позволяет полностью исключить наличие внутренних дефектов на горячекатаном подкате и приводит к повреждениям прокатных валков в клети.

Воздействие вышеуказанного фактора приводит к повышенному расходу

прокатных валков и отрицательно влияет на формирование себестоимости готового металлопроката.

Увеличение эксплуатационной надежности и долговечности рабочих валков станов холодной прокатки возможно в результате реализации комплекса организационно-технических мероприятий, направленных на совершенствование технологии подготовки и эксплуатации валков: оптимизации режимов шлифовки и межперевалочных сроков, дифференцированного назначения валков различных исполнений для прокатки определенного сортамента, своевременной диагностики дефектов закаленного слоя, поддержания необходимого оборотного парка валков [1].

Во многом срок службы рабочих валков определяется химическим составом прокатываемых сталей, требованиями к качеству поверхности прокатываемых полос, существующим назначением валков для прокатки определенного сортамента по мере использования рабочего слоя в процессе эксплуатации и соответствующими режимами восстановления работоспособности валков, получивших повреждения в клети [2].

Качественные характеристики рабочих валков формируются на стадии изго-

товления и не могут обеспечивать максимальную эффективность их использования в стане для производства любой сортовой группы проката.

Применяемые на стане 1400 рабочие валки различных поставщиков по исполнению (марка валковой стали, способ отливки,ковки, термообработки) и качественным характеристикам (глубина закаленного слоя, твердость рабочей поверхности бочки) в состоянии поставки имеют в целом аналогичные показатели (таблица 1).

Химический состав сталей, применяемых на стане 1400 рабочих валков, постав-

щиков «А» и «Б» по массовой доле легирующих элементов различается незначительно (таблица 2).

Кроме валков указанных поставщиков, на стане 1400 применяются рабочие валки, изготовленные поставщиком «В» способом переточки списанных валков больших типоразмеров с последующей повторной закалкой.

Материал поставляемых валков, а также валков, используемых для переточки и перезакалки – ковкая сталь марок 60Х2СМФ и 9Х2МФ.

Таблица 1

Технические характеристики рабочих валков, применяемых в непрерывном четырехклетевом стане 1400 ПАО «НЛМК»

Поставщик	Исполнение валков	Марка валковой стали	Способ термообработки	Твердость бочки в состоянии поставки*	Глубина закаленного слоя на радиус валка, не менее	Разброс твердости по поверхности бочки, не более*
А	стальные кованые	60Х2СМФ	ТПЧ	870÷895 LD	20 мм	20 LD
Б	стальные кованые	9Х2МФ	ТПЧ	858÷896 LD	20 мм	25 LD
*- Измерение твердости производится прибором «EQUOTYP» с ударным устройством D, шкала HLD						

Таблица 2

Химический состав применяемых рабочих валков

Марка валковой стали	Массовые доли основных легирующих элементов, %					
	С	Mn	Si	Cr	Mo	V
60Х2СМФ	от 0,57	от 0,20	от 1,05	от 1,80	от 0,25	от 0,10
	до 0,65	до 0,70	до 1,30	до 2,10	до 0,35	до 0,25
9Х2МФ	от 0,85	от 0,20	от 0,20	от 1,70	от 0,20	от 0,10
	до 0,95	до 0,70	до 0,60	до 2,10	до 0,30	до 0,20

Таким образом, возможность повышения эффективности эксплуатации рабочих валков путем их вариативного назначения для прокатки различного сортамента проката в зависимости от качественных характеристик валков, полученных в процессе изготовления, практически отсутствует.

Вместе с тем, известно дифференцированное распределение служебных характеристик рабочих валков одного исполнения по мере использования в процессе эксплуатации всей глубины закаленного слоя бочки [1].

На основании вышеизложенного, актуальными направлениями повышения надежности и долговечности рабочих валков стана 1400 следует считать оптимизацию использования закаленного слоя за счет дифференцированного назначения валков для прокатки различного сортамента по мере расходования закаленного слоя и внедрение эффективных технических решений для восстановления работоспособности валков, получивших повреждения в процессе эксплуатации [3].

### Определение критериев назначения рабочих валков в клеть для прокатки различного сортамента

Сортамент проката непрерывного четырехклетевого стана 1400 ПАО «НЛМК» включает как низкоуглеродистую сталь марок 08Ю, 08пс, так и электротехнические анизотропную (трансформаторную) сталь и изотропную (динамную) сталь различных групп легирования.

Углеродистая сталь марок 08Ю и 08пс обладает высокой пластичностью при прокатке.

Основным признаком, определяющим группу электротехнической изотропной стали, является доля содержания в химическом составе массовой доли легирующего элемента - кремния (Si).

На стане 1400 ПАО «НЛМК» производят электротехническую изотропную сталь 0, 1, 2, 3 и 4 групп легирования.

Содержание кремния в составе прокатываемых на стане 1400 различных марок стали представлено в таблице 3.

Таблица 3

Массовая доля кремния в сталях, прокатываемых на непрерывном четырехклетевом стане 1400 ПАО «НЛМК»

Сортамент проката	углеродистая конструкционная		электротехническая изотропная, группы легирования					электротехническая анизотропная	
	08Ю	08пс	0	1	2	3	4	ЭЗА	0504Д
Массовая доля кремния в составе стали, %	от 0,05	от 0,05	от 0,05	от 0,40	от 0,80	от 2,00	от 3,00	от 3,00	от 3,00
	до 0,15	до 0,17	до 0,35	до 0,80	до 1,75	до 2,30	до 3,15	до 3,25	до 3,25

Назначение рабочего валка для прокатки определенного сортамента должно обеспечивать решение следующих задач: большую долговечность валка за счет наиболее эффективного использования рабочего слоя, высокое качество поверхности и плоскостность прокатываемых полос, повышение коэффициента готовности и производительности прокатного стана за счет

уменьшения количества внеплановых перевалок.

В качестве критериев назначения рабочих валков стана 1400 для производства определенного сортамента в настоящей работе приняты содержание кремния в различных марках прокатываемой стали и расход закаленного слоя бочки в процессе эксплуатации.

## **Разработка и промышленное опробование режимов дифференцированного назначения рабочих валков**

Одним из ключевых требований при производстве проката из низкоуглеродистой стали является обеспечение высокого качества поверхности и плоскостности полос.

Рабочие валки на ранних этапах эксплуатации (с большими диаметрами) имеют наиболее высокую твердость и износостойкость, что определяет их применение в последних клетях стана, формирующих окончательные геометрические характеристики и требуемое качество поверхности полос [2].

Применение рабочих валков с большими диаметрами, (следовательно – с наиболее высокой твердостью бочки) для прокатки низкоуглеродистой стали (с содержанием легирующего элемента – кремния менее 0,2%) обеспечивает получение полос первого класса отделки поверхности, с повышенными требованиями к геометрическим размерам и плоскостности.

Прокатка низкоуглеродистой стали происходит при малой обрывности полос, незначительной повреждаемости рабочей поверхности бочки и низкой вероятности аварийных отказов валков по неисправным дефектам.

В ходе выполнения работы предложено новые рабочие валки применять для производства проката из низкоуглеродистой стали марок 08Ю и 08пс до расходования закаленного слоя в процессе перешлифовок до величины, составляющей не более 25% от максимальной глубины закалки.

Таким образом, закаленный слой валка на первом этапе его назначения в клетки используется наиболее эффективно, обеспечивая одновременно высокую износостойкость валка и повышенные требования к качеству поверхности, плоскостности и точности геометрических размеров полос из низкоуглеродистой стали.

На следующем этапе целесообразно использование рабочего валка для прокатки полос электротехнических изотропных сталей с содержанием кремния до 2,0%, по-

скольку уровень обрывности полос, и, следовательно, повреждаемость валка достаточно малы.

Требования к качеству поверхности полос электротехнических изотропных сталей при этом ниже, чем к качеству полос конструкционных углеродистых сталей. Таким образом, эффективность использования рабочего слоя на втором этапе эксплуатации, при прокатке низколегированных электротехнических изотропных сталей высока.

Применение рабочих валков с большими диаметрами для прокатки электротехнических сталей с высоким содержанием кремния нецелесообразно по следующим причинам.

Прокатка сталей с высоким содержанием кремния характеризуется большим количеством обрывов полос и высоким уровнем повреждаемости бочки рабочих валков (в т.ч. приобретение грубых либо неисправимых дефектов бочки «навар», «отслоение рабочего слоя»), что приводит к необходимости выполнения увеличенных съемов рабочего слоя при перешлифовках, либо к преждевременному выводу валков из работы на начальном этапе эксплуатации и снижению ресурса валков.

Следует принять во внимание и тот факт, что при снижении твердости валка по мере расходования рабочего слоя глубина проникновения повреждений вглубь валка уменьшается. Таким образом, рабочие валки для прокатки электротехнических сталей с высоким содержанием кремния следует применять на более поздних этапах эксплуатации, по мере снижения твердости бочки в результате расходования закаленного слоя.

Назначение рабочего валка для прокатки сталей с высоким содержанием (3% и более) кремния наиболее эффективно после использования более половины всего закаленного слоя, исходя из следующих соображений:

- требования к качеству поверхности полос электротехнической изотропной и электротехнической анизотропной стали ниже, чем к прокату конструкционных уг-

леродистых сталей; таким образом, возможно применение рабочих валков с более низкой твердостью рабочей поверхности;

- прокатка хрупких сталей с содержанием кремния более 2% связана с большим количеством обрывов и повреждений бочки валков, при этом следует принять во внимание тот факт, что при снижении твердости валка по мере расходования закаленного слоя, глубина проникновения повреждений вглубь валка уменьшается, что позволяет производить непродуктивные съемы меньшей величины при шлифовках валков, получивших повреждения при эксплуатации.

В результате анализа всех вышеуказанных особенностей технологии разработана и опробована в промышленных условиях следующая схема назначения рабочих валков в клети непрерывного стана 1400 ПАО «НЛМК»:

- с момента ввода в эксплуатацию до использования в ходе выполнения перешлифовок закаленного слоя до величины, составляющей менее 25% максимальной величины закаленного слоя, валок применяют для прокатки полос из низкоуглеродистой стали, содержащей в химическом составе менее 0,2% кремния;

- по мере использования закаленного слоя бочки величиной, составляющей от 25% до 50% включительно от максимального значения глубины закалки рабочего слоя, рабочий валок применяют для прокатки электротехнической изотропной стали с содержанием кремния от 0,2% до 2%.

- после использования 50% глубины рабочего слоя валка валок применяют в стане для прокатки электротехнической изотропной стали с содержанием кремния 2% и более и для прокатки электротехнической анизотропной стали до полного использования перешлифовками глубины закаленного слоя или до минимального конструктивного диаметра.

#### **Разработка режимов восстановления работоспособности и эксплуатации рабочих валков, получивших повреждения в клети**

Восстановление работоспособности рабочего валка с дефектом бочки «навар»

без наличия на металле бочки «цветов побежалости», а также с дефектами «сетка», «поруб» производили путем выполнения при шлифовке увеличенных съемов до полного удаления перешлифовкой поврежденного закаленного слоя.

Величина удаляемого закаленного слоя составляла при выполнении шлифовки от 7% до 10% максимальной глубины закаленного слоя, при этом после удаления дефектов не требовалось выполнение операции повторной закалки валка.

В то же время, образование каждого из вышеуказанных дефектов связано с повышенными нагрузками в зоне контакта полосы и валка и достижением критического уровня интенсивности внутренних напряжений в рабочем слое бочки.

В ходе опытно - промышленной проверки установлено: если степень развития дефекта такова, что для его удаления потребовалось выполнить при перешлифовке съем (на диаметр валка) величиной от 7% до 10% максимальной глубины рабочего слоя (на диаметр валка), то при дальнейшей эксплуатации валок разрушался по дефектам контактно-усталостного характера (отслоению и выкрошиванию рабочего слоя) вследствие критического уровня внутренних напряжений в рабочем слое, полученных при повышенных контактных нагрузках в момент повреждения в клети.

Для уменьшения вероятности отказа по дефектам контактно-усталостного характера рабочий валок после перешлифовки со съемом закаленного слоя величиной, составляющей от 7% до 10% максимальной глубины рабочего слоя на диаметр валка, дополнительно подвергали низкотемпературному отпуску.

Выполнение операции низкотемпературного отпуска после удаления грубых дефектов бочки шлифовкой со съемом величиной, составляющей от 7% до 10% максимальной глубины рабочего слоя на диаметр валка, позволило обеспечить благоприятное распределение внутренних напряжений в рабочем слое, уменьшить уровень их интенсивности и снизить вероятность преждевременных отказов валков по дефектам контактно-усталостного характера.

Таким образом, выполнение низкотемпературного отпуска обеспечило дополнительное увеличение стойкости валков.

Выполнение операции повторной закалки необходимо для валка, получившего при эксплуатации дефект бочки «навар» или «оков» с визуально различимыми на металле бочки «цветами побежалости». Образование данных дефектов связано с обрывом и свариванием поверхности бочки валка и полосы в результате резкого увеличения контактного давления.

Происходящий при этом локальный разогрев бочки валка (термический удар) приводит к необратимым изменениям структуры закаленного слоя валка, образованию трещин и падению твердости рабочей поверхности валка ниже допустимого уровня.

Восстановление работоспособности валка с грубыми дефектами бочки «навар», «оков» производили путем полного удаления перешлифовкой поврежденного закаленного слоя и повторной закалкой для получения необходимой твердости поверхности бочки.

Величина удаляемого закаленного слоя составляла при выполнении перешлифовки 10% и более от максимальной величины закаленного слоя, таким образом, валки после повторной закалки имели малый диаметр.

По результатам эксплуатации перезакаленных валков установлено, что выполнение повторной закалки не позволяет полностью восстановить качественные характеристики валка до уровня нового.

Очевидно, что это связано с технологией отливки иковки стальных валков, при которой изготовленный валок имеет различные свойства по сечению. Наиболее чистым по содержанию неметаллических включений, имеющим более плотную структуру является металл наружного слоя отливки (поковки) валка, в то время как, ближе к сердцевине отливки (поковки) структура металла более рыхлая и загрязненная по уровню неметаллических включений.

Применение перезакаленных валков с малыми диаметрами в клетях №3 и №4 стана 1400 приводило к уменьшению срока

службы и повышенному расходу валков в результате интенсивного износа их рабочей поверхности и необходимости выполнения внеплановых перевалок по причинам «выработка», «по профилю», обусловленных неудовлетворительным качеством поверхности и плоскостности полосы и непродуктивного использования закаленного слоя при перешлифовках.

Применение перезакаленных валков ограничило клетями №1 и №2 непрерывного стана 1400, оказывающих при прокатке меньшее влияние на формирование качества поверхности и плоскостности полосы, что обеспечило повышение их срока службы при выполнении требований к качеству полос и производительности стана.

Таким образом, в результате опытно-промышленных испытаний определена следующая технологическая схема восстановления и эксплуатации рабочих валков стана 1400, получивших грубые повреждения бочки:

- рабочий валок, восстановление работоспособности которого после повреждения в клети было произведено съемом рабочего слоя за одну перешлифовку величиной, составляющей от 7% до 10% максимальной глубины рабочего слоя, перед установкой в клеть дополнительно подвергать низкотемпературному отпуску;

- рабочий валок, восстановление работоспособности которого после повреждения в клети было произведено съемом рабочего слоя за одну перешлифовку величиной, составляющей более 10% максимальной глубины рабочего слоя, подвергать операции повторной закалки, после чего применять только в клетях №1 и №2 стана 1400.

### **Результаты внедрения разработанных режимов**

Разработанная технология эксплуатации рабочих валков реализована на непрерывном четырехклетевом стане 1400 холодной прокатки для производства всего объема металлопродукции.

Оценка эффективности новой технологии выполнена по результатам анализа эксплуатационных показателей списанных

за год рабочих валков типоразмера 440×1400 мм.

В качестве сравнения взяты аналогичные показатели рабочих валков за год, предшествовавший реализации разработок.

Результаты сравнительного анализа эксплуатационных показателей рабочих валков представлены в таблице 4 и на рисунках 1-4.

Таблица 4

Показатели эффективности использования рабочих валков четырехклетевого стана 1400  
ПАО «НЛМК»

Наименование показателя	Период сравнения	
	до внедрения разработки	после внедрения разработки
Доля валков, списанных по «износу» (%)	10,8	34,1
Доля аварийных отказов рабочих валков по причинам «отслоение», «поломка» (%)	7,4	2,0
Эффективность использования закаленного слоя валков (т/мм)	1 027	1 308
Среднее количество установок валка в клеть до списания (штук/валок)	20,8	31,6
Средняя наработка рабочих валков до списания (т/валок)	10 787	20 467
Удельный расход рабочих валков (кг/т)	1,07	0,69

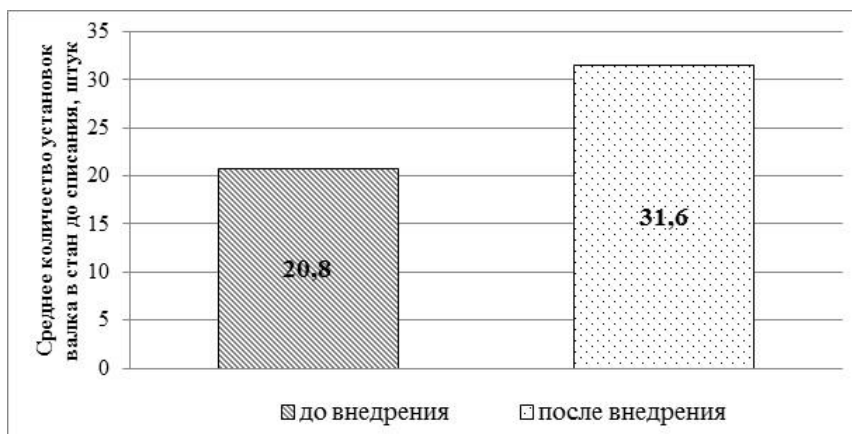


Рисунок 1. Среднее количество установок рабочего валка в клетке стана 1400 до списания

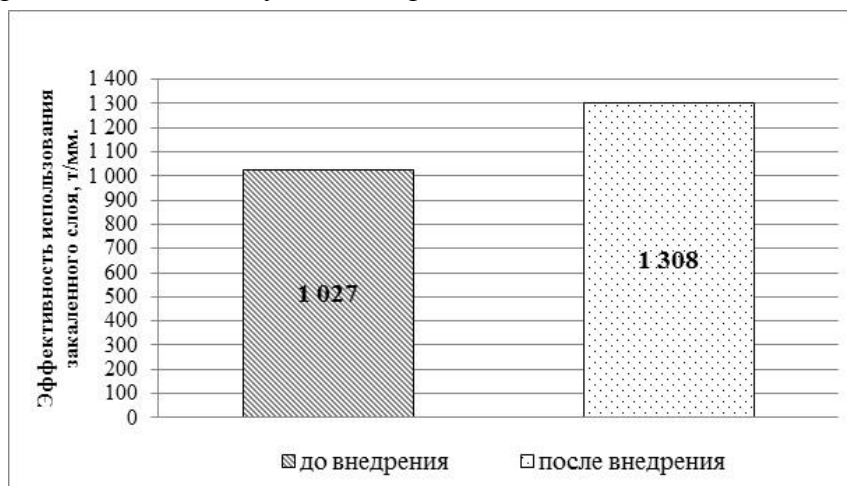


Рисунок 2. Средняя эффективность использования 1 мм закаленного слоя рабочих валков стана 1400

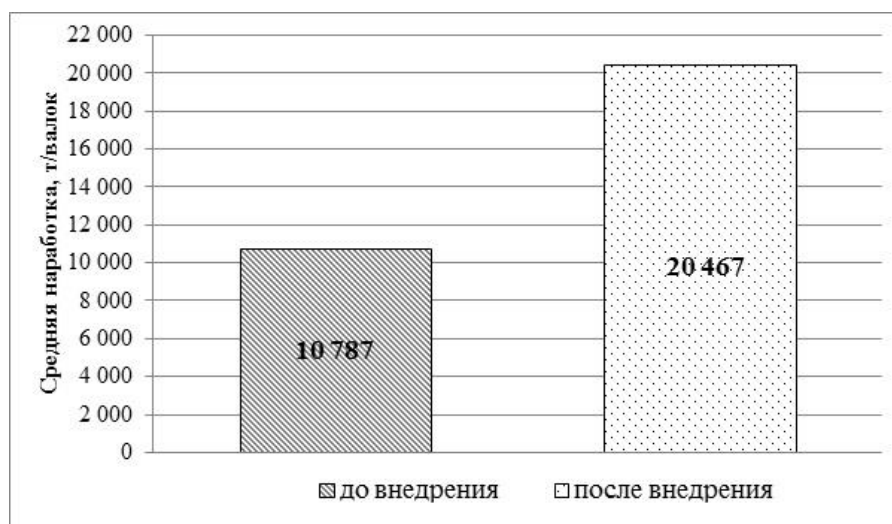


Рисунок 3. Средняя наработка рабочих валков стана 1400 до списания

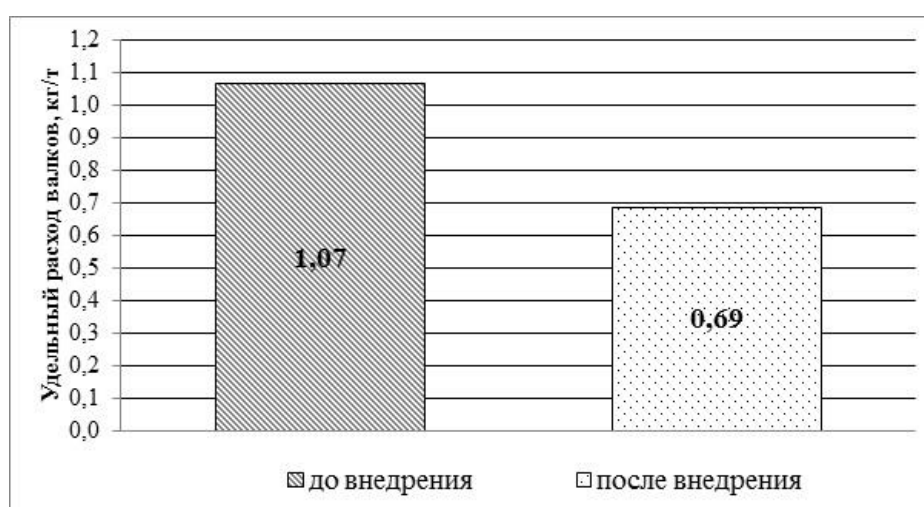


Рисунок 4. Удельный расход рабочих валков стана 1400 на 1 тонну проката

### Заключение

Разработаны режимы подготовки и эксплуатации прокатных валков непрерывного стана холодной прокатки, позволяющие повысить их эксплуатационную надежность и долговечность.

Определена технологическая схема восстановления работоспособности и эксплуатации валков стана 1400, получивших грубые повреждения бочки.

Внедрение разработанных режимов на стане 1400 ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» позволило уменьшить количество аварийных отказов рабочих валков, повысить на 27% эффективность использования закаленного слоя и увеличить в 1,9 раза средний ресурс валков до списания.

### Библиографический список

1. Повышение качества и эксплуатационной стойкости валков листовых станов/Е.И. Трейгер, В.П. Приходько. Москва, Металлургия, 1988, 192 с.
2. Надежность и долговечность валков холодной прокатки/ Полухин В.П., Николаев В.А., Тылкин М.А. Москва, Металлургия, 1976, 488 с.
3. Офицеров Ю.А., Черешнев В.В., Черкасов В.Н., Терехов Р.В. Разработка технологии эксплуатации рабочих валков непрерывного стана холодной прокатки для производства сортамента различной сложности / Труды X конгресса прокатчиков, Липецк, 12-14 апреля 2015 г., т.1, с. 271-275