

Вестник Череповецкого государственного университета. 2023. № 1 (112). С. 27–38.
Cherepovets State University Bulletin, 2023, no. 1 (112), pp. 27–38.

Научная статья
УДК 621.771.073
<https://doi.org/10.23859/1994-0637-2023-1-112-2>

**Прогнозирование упрочнения бочки опорного валка
на основе компьютерного моделирования**

**Дмитрий Юрьевич Ермушин^{1✉}, Андрей Александрович Лобачев²,
Наталья Леонидовна Болобанова³**

^{1, 3}Череповецкий государственный университет,
Череповец, Россия,

² Костромская государственная сельскохозяйственная академия,
Караваево, Россия,

^{1✉}diuermushin@chsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8224-5073>

²kostroma-andrey@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1086-7068>

³nlbolobanova@chsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1243-7173>

Аннотация. Представлены результаты моделирования напряженно-деформированного состояния бочки опорного валка методом конечных элементов в зависимости от интенсивности его работы за кампанию в клети непрерывного стана. Установлена зависимость, позволяющая прогнозировать упрочнение бочки опорного валка от длины прокатанной полосы и средней погонной нагрузки в межвалковом контакте в клети непрерывного стана. Получено соответствие результатов с данными промышленных опытных измерений приращения твердости после прокатки на широкополосном стане горячей прокатки 2000. Предложено использовать полученные результаты в программном инструменте для оперативной обработки информации об эксплуатации опорных валков чистовой группы на участке подготовки валков производства плоского проката листопрокатного цеха № 2 ПАО «Северсталь».

Ключевые слова: опорный валок, упрочнение, непрерывный широкополосный прокатный стан, метод конечных элементов, прогнозирование

Для цитирования: Ермушин Д. Ю., Лобачев А. А., Болобанова Н. Л. Прогнозирование упрочнения бочки опорного валка на основе компьютерного моделирования // Вестник Череповецкого государственного университета. 2023. № 1 (112). С. 27–38. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2023-1-112-2>.

Prediction of back-up roll barrel hardening based on computer simulation

Dmitry Yu. Ermushin^{1✉}, Andrey A. Lobachev²,
Nataliya L. Bolobanova³

^{1,3}Cherepovets State University,
Cherepovets, Russia,

²Kostroma State Agricultural Academy,
Karavaevo, Russia,

¹diuermushin@chsu.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-8224-5073>

²kostroma-andrey@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1086-7068>

³nlbolobanova@chsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1243-7173>

Abstract. The authors present the results of simulating the stress-strain state of the back-up roll barrel by the finite element method depending on the intensity of its work during the campaign in the continuous mill stand. The dependence has been established that makes it possible to predict hardening of the back-up roll barrel due to the length of the rolled strip and the average linear load in the roll-to-roll contact in the stand of a continuous mill. The results are consistent with the data of industrial experimental measurements of the increase in hardness after rolling on a wide-band hot rolling mill 2000. It is proposed to use the obtained results in a software tool for online processing of information on the operation of the back-up rolls of the finishing group at the roll preparation section of the flat-rolled production at sheet-rolling section No. 2 of PJSC Severstal.

Keywords: back-up roll, hardening, continuous wide-band rolling mill, finite element method, forecasting

For citation: Ermushin D. Yu., Lobachev A. A., Bolobanova N. L. Prediction of back-up roll barrel hardening based on computer simulation. *Cherepovets State University Bulletin*, 2023, no. 1 (112), pp. 27–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2023-1-112-2>.

Введение

Валки являются основным инструментом при производстве стальной металлопродукции на прокатных станах. По оценке ряда исследований^{1,2}, расходы на прокатные валки в структуре себестоимости прокатного передела достигают 15–20 %. При производстве широких полос и листов наибольшее распространение получила валковая система кварто, включающая опорные валки большого диаметра и рабочие валки меньшего диаметра. В условиях постоянного усложнения производимого сортамента, ужесточения требований к прокату и предельной загрузки станов важной задачей является обеспечение высокой стойкости рабочих и особенно опорных валков, эксплуатируемых продолжительное время в тяжелых условиях нагружения и определяющих трудоспособность рабочих.

Основываясь на зарубежном опыте эксплуатации непрерывных широкополосных станов, с 2002 года на ПАО «Северсталь» применяются опорные валки с рабочим слоем из стали, содержащей 5 % хрома. Так, применяемые на стане горячей прокатки

¹ Иводитов В. А., Трайно А. И., Вольшонков И. З., Русаков А. Д. Современные методы повышения эффективности листопрокатного производства. Москва: МИСиС, 2013. 288 с.

² Гостев К. А. Оптимизация прокатных валков в целях снижения совокупной стоимости владения // *Сталь*. 2021. № 10. С. 19–24.

2000 опорные валки из марки стали AST70X¹ имеют предел прочности бочки до 1600 МПа и твердость по Шору *HSD* – 62–70 единиц. Глубина рабочего слоя бочки с постоянной твердостью достигает 15 % от номинального диаметра вала. Эксплуатация опорных валков включает чередование их работы по клетям стана в контакте со смежным рабочим валком с перешлифовками для снятия поврежденного слоя до полной выработки рабочего слоя их бочек.

Многолетняя практика эксплуатации высококачественных валков на прокатном стане 2000 ПАО «Северсталь» с контролем в системе производства истории их работы, включая прокатанный объем металла за кампанию, величину износа, величину съема за перешлифовку, результаты вихретокового и ультразвукового методов контроля, комментарии к инцидентам и авариям и др., позволяет достигать наработку опорного вала от 10 млн т и выше. Продолжительность работы такого вала на стане доходит до пяти лет и более. При этом стоит отметить, что, чем выше качественные показатели вала, тем важнее становятся требования к его контролю после каждой прокатной кампании с одновременным решением вопроса по снижению расхода рабочего слоя. В связи с этим актуальной проблемой современного листопрокатного производства является сохранение эксплуатационных характеристик опорных валков в процессе их износа с полной реализацией их высокого потенциала при работе в условиях высоких усталостных нагрузок. Кроме того, опорные валки последнего поколения характеризуются незначительным износом, и основным критерием при определении величины съема с таких валков во время перешлифовки становится требование по удалению наклепа бочки. В этом случае твердость бочки после шлифовки не должна превышать 2–3 единиц по шкале Шора в сравнении с исходной твердостью бочки опорного вала, измеренного перед его началом эксплуатации на стане². Важный вопрос упрочнения бочки опорных валков за кампанию при прокатке различного объема металла с разной скоростью и другими показателями процесса прокатки до сих пор не решен. Отсутствуют закономерности изменения твердости поверхности бочки опорного вала, определяющие параметры перешлифовки, возможность достижения высокой наработки вала и увеличения объема прокатной кампании.

Вопрос исследования процессов поверхностного пластического деформирования не является простым и однозначно решаемым из-за нестационарности, комплексного характера нагружения и влияния на результат напряженно-деформированного состояния материала в контакте. Кроме того, при проведении физического эксперимента процесс исследования деформационного упрочнения является сложным и ресурсозатратным. Все это предопределяет эффективность выполнения исследований на основе компьютерного моделирования. В этом случае при исследовании различных упрочняющих методов эффективно применение вычислительных сред конечно-

¹ Гостев К. Современные валки на станах 2000 Череповецкого и Магнитогорского металлургических комбинатов // Металлург. 2008. № 9. С. 52–55.

² Хайстеркам П., Шнайдер З., Жи д-р В. Расширяя пределы возможностей материалов опорных валков // Труды XII Конгресса прокатчиков (том II). Сборник статей. Москва: Грин Принт, 2020. С. 215–226.

элементного анализа. Несмотря на значительное число работ^{1,2,3}, посвященных вопросам численного исследования процессов поверхностного пластического деформирования, а также имеющееся описание технологии поверхностного деформационного упрочнения валков станов холодной прокатки⁴, применяемой ранее для повышения износостойкости опорных валков в процессе эксплуатации, проблема определения упрочнения бочки опорного вала требует дальнейшего развития.

Учитывая, что конечно-элементное моделирование достаточно эффективно для исследования поверхностного пластического деформирования, актуально прогнозирование упрочнения бочки опорных валков за кампанию при прокатке различного объема металла с разной скоростью этим же способом.

Цель работы – прогнозирование упрочнения бочки опорного вала с помощью среды конечно-элементного анализа SIMULIA Abaqus и проверка адекватности полученных результатов с данными промышленных опытных измерений приращения твердости после прокатки на широкополосном стане горячей прокатки 2000.

Основная часть

Работа опорных валков непрерывных станов за кампанию определяется массой прокатываемого металла Q и номером клетки. Одним из направлений снижения расхода и повышения их наработки является возможность учета особенностей работы опорного вала в зависимости от номера клетки стана. Для этого был выполнен анализ регистрируемых автоматической системой измерения и контроля технологических данных процесса прокатки на непрерывном широкополосном стане 2000 ПАО «Северсталь» по каждой кампании опорных валков. Анализ параметров прокатки показал, что интенсивность работы опорного вала за кампанию в клетки непрерывного стана определяется числом контактов с рабочим валком и погонной нагрузкой, действующей на валок в межвалковом контакте. Учитывая, что число циклов нагружения зависит от массы прокатываемого металла за кампанию, оценку интенсивности работы опорных валков можно также напрямую связать с длиной прокатываемых полос в каждой клетки непрерывного стана.

Количественные значения числа циклов нагружения N_i , длины полосы L_{pi} (км) и средней погонной нагрузки в межвалковом контакте q_i (т/мм) в каждой i -й клетки прокатной кампании определяются путем обработки данных, фиксируемых автома-

¹ Блюменштейн В. Ю. МКЭ-моделирование и расчеты пластических свойств упрочняемого металла в процессах ППД // Материалы IX Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении». Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2018. С. 478–485.

² Голенков В. А., Радченко С. Ю., Дорохов Д. О., Короткий Г. П. Научные основы упрочнения комплексным локальным деформированием: монография. Москва: Машиностроение, Орел: Госуниверситет – УНПК, 2013. 122 с.

³ Фокин В. Г. Моделирование МКЭ термопластического упрочнения цилиндрической поверхности отверстия дискам // Материалы Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева. 2018. С. 37–38.

⁴ Гарбер Э. А. Станы холодной прокатки (теория, оборудование, технология). Москва: Черметинформация; Череповец: ГОУ ВПО ЧГУ, 2004. 416 с.

тической системой измерения и контроля параметров прокатки. Результаты расчета средних значений циклов нагружений, длины прокатанных полос и погонной нагрузки по клетям чистовой группы стана 2000 за 22 кампании за период с января 2020 года по май 2021 года при их средней тоннажности $Q_{cp} = 275$ тыс. т представлены в табл. 1.

Таблица 1

Среднее число циклов контакта рабочего и опорного валков, средний километраж прокатанных полос и средняя погонная нагрузка по клетям чистовой группы стана за 22 кампании опорных валков при их $Q_{cp} = 275$ тыс. т

Номер клетки	Число циклов $N_i \cdot 10^6$	Длина прокатанных полос L_{pi} , км	Погонная нагрузка в контакте q_i , т/мм
6	0,30	1441	1,14
7	0,50	2351	1,15
8	0,74	3502	0,94
9	1,03	4885	0,90
10	1,36	6496	0,81
11	1,60	7697	0,72
12	1,74	8280	0,49

Моделирование упрочнения бочки опорного вала для экономии времени расчета выполнено в 2D-постановке в зависимости от числа циклов нагружения (табл. 1). Диаметр бочки опорного вала равен $D_{оп} = 1500$ мм, свойства материала рабочего слоя бочки вала получены в программном комплексе JMatPro. Упругопластическая модель бочки опорного вала (рис. 1 а) нагружена нормальным давлением со стороны контакта с рабочим валком от действия усилия прокатки. Первоначально рассматривались два варианта: первый вариант – усилие прокатки $P = 30$ МН, что соответствует нормальному давлению $p_0 = 1405$ МПа и ширине контакта валков $2b_{оп} = 14$ мм, полученной по известному решению Г. Герца при контакте двух цилиндров¹; второй – $P = 15$ МН, $p_0 = 1038$ МПа, $2b_{оп} = 9$ мм. Опорный валок жестко закреплен относительно центра. В зоне межвалкового контакта выполнено измельчение сетки, ее размер составляет 1,5 мм.

¹ Гарбер Э. А. Станы холодной прокатки (теория, оборудование, технология). Москва: Черметинформация; Череповец: ГОУ ВПО ЧГУ, 2004. 416 с.

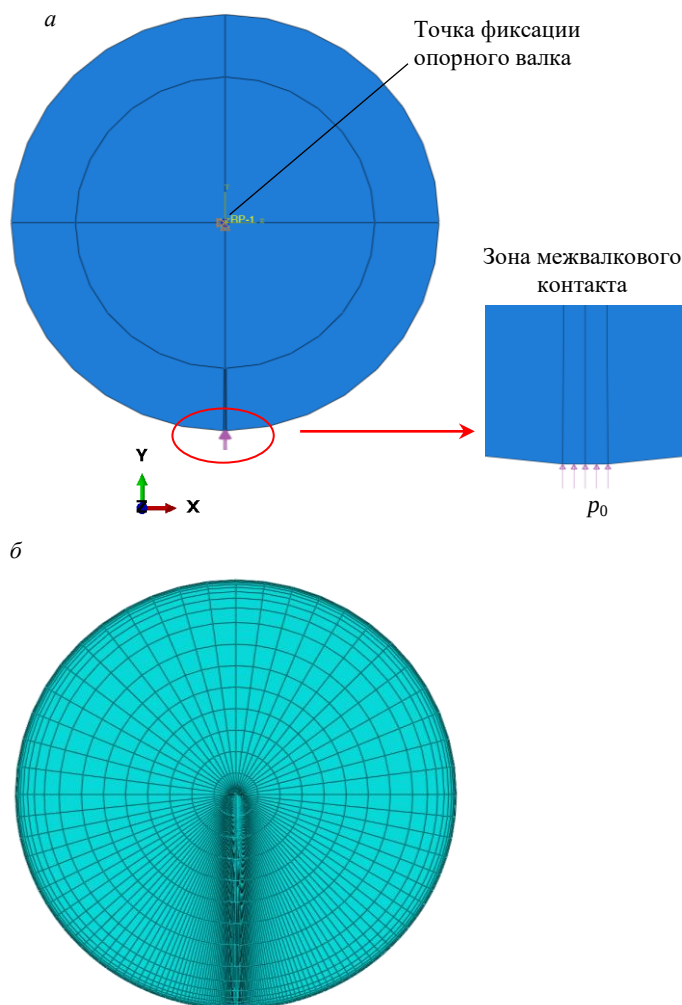


Рис. 1. Задание граничных условий (а) и конечно-элементная модель опорного вала (б)

На рис. 2 в качестве примера приведен график периодического контакта опорного вала с рабочим в клети № 6.

Для реализации циклов контакта межвалковое давление задавалось в виде графика гармонических колебаний по закону косинуса:

$$y = A \cos(\omega \cdot \tau + \varphi_0), \quad (1)$$

где y – величина, характеризующая положение опорного вала в момент времени τ относительно рабочего вала; A – амплитуда колебаний; $\omega = 2\pi/T$ – циклическая ча-

стота; T – период колебаний или время полного оборота опорного вала, составляет в среднем 0,2 с в клетке № 12 и 2 с в клетке № 6; φ_0 – начальная фаза.

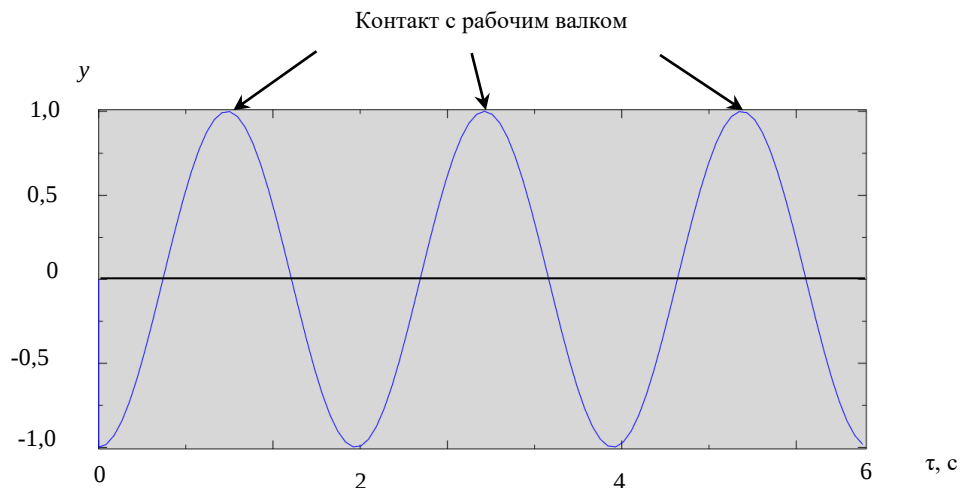


Рис. 2. График периодического контакта опорного вала с рабочим

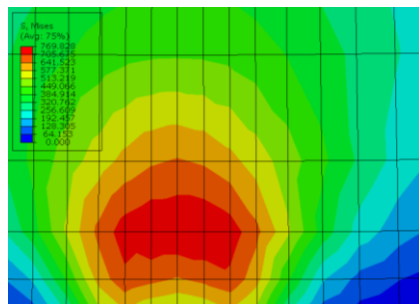
На рис. 3 приведены результаты моделирования числа циклов нагружения в клетках № 6 (а) и № 12 (б) при $p_0 = 1405$ МПа. Максимальные напряжения располагаются на глубине 5 мм и составляют 770 МПа. Увеличение числа циклов нагружения, как в клетке № 12, приводит к увеличению остаточных напряжений на 82 МПа и деформаций – на 0,02 мм.

Имеющиеся исследования зависимости между твердостью и напряжением деформируемого тела на основе получения тарировочных графиков «твердость – напряжения» при испытаниях на сжатие¹ позволили принять, что рост интенсивности напряжений на 20 МПа приводит к росту HSD на 4 единицы. Значит, увеличение напряжений на 82 МПа может привести к росту твердости на 16 единиц. Учитывая, что опорные валки клетки № 12 не работают в условиях $1,74 \cdot 10^6$ циклов при усилии 30 МН (допустимое усилие составляет 15 МН), на рис. 3 представлены результаты моделирования напряжений при усилии 15 МН с числом циклов нагружения, соответствующих клеткам № 6 (а) и № 12 (б). В этом случае при одной и той же нагрузке в клетке № 12 за счет большего числа циклов твердость возрастет на 4 единицы в сравнении с клеткой № 6.

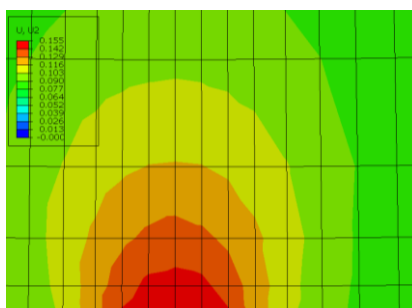
¹ Богомолов Ю. С., Дель Г. Д., Седоков Л. М. Зависимость между твердостью и напряжением деформируемого тела // Известия Томского политехнического института им. С. М. Кирова. 1966. Том 147. С. 14–17.

а

Распределение напряжений, МПа

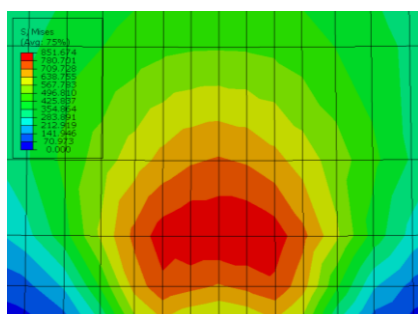


Распределение деформаций, мм



б

Распределение напряжений, МПа



Распределение деформаций, мм

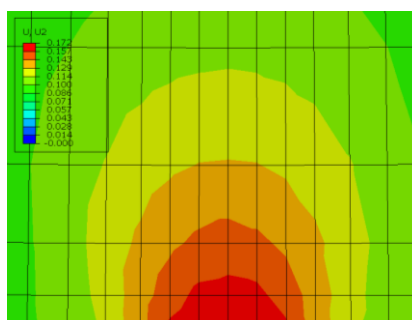


Рис. 3. Результаты моделирования распределения напряжений и деформаций при $P = 30$ МН с числом циклов нагружения, соответствующих клетки № 6 (а) и клетки № 12 (б)

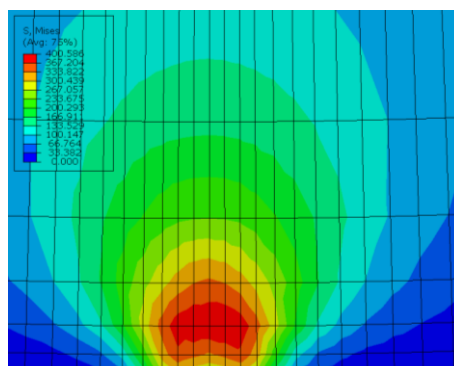
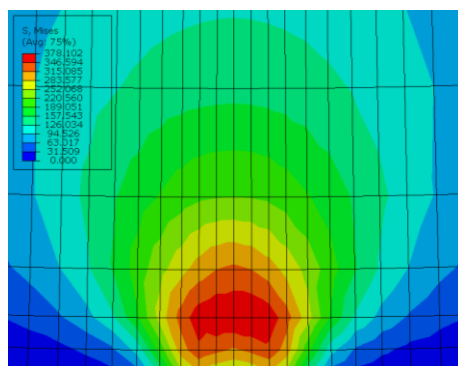


Рис. 3. Распределение напряжений при различных циклах нагружения в клетях № 6 (а) и № 12 (б) при $P = 15$ МН

Также определено, что при одном цикле нагружения при усилии 30 МН напряжения в валке составили 748 МПа, при 15 МН – 378 МПа, следовательно, рост твердо-

сти при усилии 30 МН может составлять в клетях № 6 за число контактов $0,3 \cdot 10^6$ – 4,4 единицы, а при усилии 15 МН – 2,1 единицы.

Результаты вычислительного эксперимента по определению напряжений в каждой клетке при средних значениях погонной нагрузки и числе циклов контакта рабочего и опорного валков за 22 кампании представлены в табл. 2. Получено, что максимальное приращение твердости характерно для последних клетей стана и составляет 6,1–6,3 *HSD*, и есть резерв по увеличению тоннажа прокатных кампаний, поскольку производители валков рекомендуют не превышать твердость бочки валка более чем на 8 единиц *HSD* за прокатную кампанию.

Таблица 2

Результаты определения максимальных напряжений и приращения твердости

Номер клетки	Число циклов $N_i \cdot 10^6$	Длина прокатанных полос L_{pi} , км	Погонная нагрузка в контакте q_i , т/мм	Напряжения при одном цикле нагру- жения ($N=1$) / при N циклах, МПа	Приращение твердости бочки, <i>HSD</i>
6	0,30	1441	1,14	569 / 585	3,3
7	0,50	2351	1,15	569 / 589	4,0
8	0,74	3502	0,94	492 / 513	4,1
9	1,03	4885	0,90	473 / 498	5,0
10	1,36	6496	0,81	436 / 465	5,8
11	1,60	7697	0,72	402 / 433	6,3
12	1,74	8280	0,49	323 / 353	6,1

После обработки результатов численного эксперимента с помощью обобщенного метода наименьших квадратов было получено выражение приращения твердости бочки валка в зависимости от работы в i -й клетке чистовой группы за прокатную кампанию:

$$\Delta HSD_i = -1,1158 + 0,0006926 \cdot L_{pi} + 3,0258 \cdot q_i, \quad (2)$$

где L_{pi} – длина прокатанной полосы в i -й клетке, км; q_i – средняя погонная нагрузка в межвалковом контакте i -й клетки, т/мм. Значение коэффициента корреляции составило $r = 0,99$.

На рис. 4 представлено изменение приращения твердости рабочего слоя опорных валков по клетям стана при разных объемах кампаний Q .

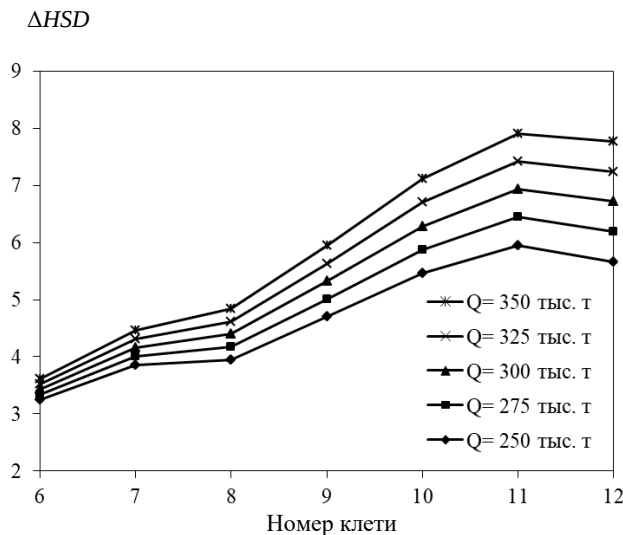


Рис. 4. Приращение твердости бочки опорного валка в зависимости от номера клетки и объема кампании

Для качественной оценки критерия приращения твердости бочки, учитывающего интенсивность работы валка в зависимости от номера клетки непрерывного стана и полученной зависимости (2), была реализована серия промышленных экспериментов по измерению упрочнения бочек валков по клетям стана. Степень соответствия значений фактического и рассчитанного приращения твердости бочки опорного валка по клетям стана составила $R^2 = 87,2 \%$ и средняя погрешность – 11,4 %. Результаты выполненных экспериментов показали, что для прогнозирования приращения твердости по клетям чистовой группы стана 2000 может использоваться зависимость (2) для определения допустимого объема кампании опорных валков и величины съема рабочего слоя при шлифовке.

Выводы

На основе обработки результатов численного эксперимента получена зависимость, описывающая влияние длины прокатанных полос и межвалковой нагрузки на приращение твердости бочки. Получено соответствие результатов численного и промышленного экспериментов.

Установленную зависимость прогнозирования величины приращения твердости бочек опорных валков по клетям чистовой группы стана 2000 за прокатную кампанию предложено использовать в программном инструменте, как онлайн приложении, позволяющем оперативно обрабатывать информацию об эксплуатации опорных валков чистовой группы за выбранный период и выдавать результаты обработки участка подготовки валков производства плоского проката листопрокатного цеха № 2 ПАО «Северсталь».

Список источников

- Блюменштейн В. Ю. МКЭ-моделирование и расчеты пластических свойств упрочняемого металла в процессах ППД // Материалы IX Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении». Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, 2018. С. 478–485.
- Богомолов Ю. С., Дель Г. Д., Седоков Л. М. Зависимость между твердостью и напряжением деформируемого тела // Известия Томского политехнического института им. С. М. Кирова. 1966. Том 147. С. 14–17.
- Гарбер Э. А. Станы холодной прокатки (теория, оборудование, технология). Москва: Черметинформация; Череповец: ГОУ ВПО ЧГУ, 2004. 416 с.
- Голенков В. А., Радченко С. Ю., Дорохов Д. О., Короткий Г. П. Научные основы упрочнения комплексным локальным деформированием: монография. Москва: Машиностроение, Орел: Госуниверситет – УНПК, 2013. 122 с.
- Гостев К. А. Оптимизация прокатных валков в целях снижения совокупной стоимости владения // Сталь. 2021. № 10. С. 19–24.
- Гостев К. Современные валки на станах 2000 Череповецкого и Магнитогорского металлургических комбинатов // Металлург. 2008. № 9. С. 52–55.
- Иводитов В. А., Трайно А. И., Вольшонов И. З., Русаков А. Д. Современные методы повышения эффективности листопрокатного производства: монография. Москва: МИСиС, 2013. 288 с.
- Фокин В. Г. Моделирование МКЭ термопластического упрочнения цилиндрической поверхности отверстия диска // Материалы Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева. 2018. С. 37–38.
- Хайстеркам П., Шнайдер З., Джи д-р В. Расширяя пределы возможностей материалов опорных валков // Труды XII Конгресса прокатчиков (том II). Сборник статей. Москва: Грин Принт, 2020. С.215–226.

References

- Blumenshtein V. Yu. MKE-modelirovanie i raschety plasticheskikh svoystv uprochniaemogo metalla v protsessakh PPD [The hardened metal FEM-modeling and plastic property calculations in the SPD processes]. *Materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Innovatsii v mashinostroyenii»* [Proceedings of the IX International research and practice conference "Innovations in Mechanical Engineering"]. Barnaul: Altaiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. I. I. Polzunova, 2018, pp. 478–485.
- Bogomolov Yu. S., Del' G. D., Sedokov L. M. Zavisimost' mezhdru tverdst'iu i napriazheniem deformiruемого tela [The relationship between the hardness and stress of the deformable body]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo instituta im. S. M. Kirova* [Proceedings of Tomsk Polytechnic Institute named after S. M. Kirov], 1966, vol. 147, pp. 14–17.
- Garber E. A. *Stany kholodnoi prokatki (teoriia, oborudovanie, tekhnologiia)* [Cold rolling mills (theory, equipment, technology)]. Moscow: Chermetinformatsiia; Cherepovets: GOU VPO ChGU, 2004. 416 p.
- Golenkov V. A., Radchenko S. Yu., Dorokhov D. O., Korotkii G. P. *Nauchnye osnovy uprochneniia kompleksnym lokal'nyim deformirovaniem* [Scientific foundations of hardening by complex local deformation]. Moscow: OOO «Izdatel'stvo Mashinostroyeni», Orel: Gosuniversitet – UNPK, 2013. 122 p.

Gostev K. A. Optimizatsiia prokatnykh valkov v tseliakh snizheniia sovokupnoi stoimosti vlade-niia [Optimization of rolling rolls with the purpose of reducing the TCO]. *Stal'* [Steel], 2021, no. 10, pp. 19–24.

Gostev K. Sovremennye valki na stanakh 2000 Cherepovetskogo i Magnitogorskogo metallur-gicheskikh kombinatov [Modern rolls at rolling mills 2000 of Cherepovetsky and Magnitogorsky Iron and Steel Works]. *Metallurg* [Metallurgist], 2008, no. 9, pp. 52–55.

Ivoditov V. A., Traino A. I., Vol'shonok I. Z., Rusakov A. D. *Sovremennye metody povysheniia effektivnosti listoprokatnogo proizvodstva* [Modern methods to increase the efficiency of sheet rolling production]. Moscow: Izdatel'skii Dom MISiS, 2013. 288 p.

Fokin V. G. Modelirovanie MKE termoplasticheskogo uprochneniia tsilindricheskoi poverkhnos-ti otverstii diska [Finite element simulation for thermoplastic hardening of the cylindrical surface of the hole in the disc]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Problemy i perspektivy razvitiia dvigatelestroeniia»* [Proceedings of the International scientific and technical conference "Problems and prospects of engine building development"]. Samara: Samarskii natsion-al'nyi issledovatel'skii universitet imeni akademika S. P. Koroleva, 2018, pp. 37–38.

Khaisterkam P., Shnaider Z., Dzhi d-r V. Rasshiriaia predely vozmozhnostei materialov opornykh valkov [Expanding the capabilities of the back-up roll materials]. *Trudy XII Kongressa prokatchikov (tom II). Sbornik statei* [Proceedings of the XII Congress of Rolling Mill Operators: collection of articles]. Moscow: Grin Print, 2020, vol. II, pp. 215–226.

Сведения об авторах

Дмитрий Юрьевич Ермушин – аспирант; <https://orcid.org/0000-0002-8224-5073>, diuermushin@chsu.ru, Череповецкий государственный университет (д. 5, пр-т Луначарского, 162600 г. Череповец, Россия); **Dmitry Yu. Ermushin** – Postgraduate student; <https://orcid.org/0000-0002-8224-5073>, diuermushin@chsu.ru, Cherepovets State University (5, pr. Lunacharskogo, 162600 Cherepovets, Russia).

Андрей Александрович Лобачев – кандидат технических наук; <https://orcid.org/0000-0002-1086-7068>, kostroma-andrey@yandex.ru, Костромская государственная сельскохозяй-ственная академия (д. 34, ул. Учебный городок, 156530 Костромская обл., п. Караваево, Россия); **Andrey A. Lobachev** – Candidate of Technical Sciences, <https://orcid.org/0000-0002-1086-7068>, kostroma-andrey@ya.ru, Kostroma State Agricultural Academy (34, ul. Uchebny Go-rodok, 156530 Kostroma Region, Karavaevo, Russia).

Наталья Леонидовна Болобанова – кандидат технических наук; <https://orcid.org/0000-0003-1243-7173>, nlbolobanova@chsu.ru, Череповецкий государственный университет (д. 5, пр-т Луначарского, 162600 г. Череповец, Россия); **Nataliya L. Bolobanova** – Candidate of Technical Sciences, <https://orcid.org/0000-0003-1243-7173>, nlbolobanova@chsu.ru, Cherepovets State Univer-sity (5, pr. Lunacharskogo, 162600 Cherepovets, Russia).

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку пуб-ликации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 01.09.2022; одобрена после рецензирования 25.11.2022; при-нята к публикации 06.12.2022.

The article was submitted 01.09.2022; Approved after reviewing 25.11.2022; Accepted for publi-cation 06.12.2022.