

4. Biryukov A.V., Tsentner G.A., Valchuk O.M., Gorin N.N. *Instrument dlya poperechno-klinovoj prokatki* [Cross-wedge rolling tool]. Patent no. 1586835 USSR, 1990.
5. Manin V.P., Pykhtunova S.V. *Sovershenstvovanie protsessa kholodnoj poperechno-klinovoj prokatki: monografiya* [Improvement of cold cross-wedge rolling: Monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2007. 103 p.
6. Pesin A.M., Chukin M.V., Kartunov A.D., Bakshinov V.A., Biryukov M.A., Biryukov A.V. *Instrument dlya poperechno-klinovoj prokatki* [Cross-wedge rolling tool]. Utility model application no. 2015129882, 2015.
7. Pesin A.M., Chukin M.V., Kartunov A.D., Bakshinov V.A., Biryukov M.A., Biryukov A.V. *Instrument dlya poperechno-klinovoj prokatki* [Cross-wedge rolling tool]. Utility model application no. 2015129964, 2015.
8. Pesin A.M., Chukin M.V., Kartunov A.D., Bakshinov V.A., Biryukov M.A., Biryukov A.V. *Instrument dlya prokatki izdeliya na rolke – segmente* [An instrument for rolling the product on the roller–segment]. Utility model application no. 2015129966, 2015.
9. Pesin A.M., Chukin M.V., Kartunov A.D., Bakshinov V.A., Biryukov M.A., Biryukov A.V. *Raspornyj dyubel* [Expansion dowel]. Utility model application no. 2015129970, 2015.

Разработка импортозамещающей технологии производства дюбель-гвоздей на основе численного моделирования методом конечных элементов / Бирюков М.А., Песин А.М., Чукин М.В., Картунов А.Д., Бакшинов В.А., Бирюков А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №1. С. 52–59. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-52-59

Biryukov M.A., Pesin A.M., Chukin M.V., Kartunov A.D., Bakshinov V.A., Biryukov A.V. Development of an import-substituting technology of dowel-nails production the basis of numerical modelling with the finite-element method. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 1, pp. 52–59. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-52-59

УДК 621. 771

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-59-68

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС

Кушнарев А.В.¹, Богатов А.А.², Киричков А.А.¹, Пузырев С.С.²

¹ ОАО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат», Нижний Тагил, Россия

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Аннотация. В работе представлены результаты исследования технологического процесса производства железнодорожных колес, направленные на снижение расходного коэффициента металла, материальных и энергетических затрат, повышение стабильности характеристик качества и долговечности колес. В ОАО «ЕВРАЗ НТМК» выполнена комплексная широкомасштабная работа, найдены и внедрены в производство новые технические решения совершенствования конвертерного передела и внепечной обработки стали, получения слитка на МНЛЗ, освоения новых технологических схем деформационной обработки при штамповке, прокатке, прессовой гибке, правке и калибровке колеса.

В результате совмещения операций осадки, разгонки и калибровки заготовки на стадии предварительной штамповки, а также применения способа самоцентрирования поковки в штампах окончательной формовки обеспечено повышение точности чернового колеса и уменьшение массы исходной заготовки. Пресспрокатная линия имеет высокий уровень автоматизации всех операций, а метрологическое обеспечение технологического процесса способствует появлению рекомендаций по корректировке параметров настройки в режиме реального времени и минимизации брака. Ужесточение требований точности нагрева колес под закалку и использование рациональной скорости охлаждения обода колеса на закалочных столах способствовали освоению производства твердых (320 НВ) и особо твердых (350 НВ) колес со стабильными показателями качества. Эксплуатационные характеристики железнодорожных колес увеличены в 1,5 раза, в том числе благодаря внедрению полнопрофильной механической обработки колеса, дробеметному упрочнению диска и ужесточению приборного ультразвукового и магнитолюминисцентного способов контроля качества.

Ключевые слова: железнодорожное колесо; литая заготовка; штампы; штамповка; внепечная обработка стали; непрерывная разливка; модификация; вакуумирование; компьютерное моделирование; метрология; точность размеров; закалка; отпуск; механическая обработка; дробеметное упрочнение; приборный контроль качества.

Введение

Производство железнодорожных колес основано на общей технологической схеме: получение непрерывнолитой заготовки и раскрой ее на мерные длины; нагрев заготовки и гидросбив окалина; предварительная и окончательная штамповка

заготовки; прокатка штампованной поковки на колесопрокатном стане; прошивка ступицы, прессовая гибка, правка и калибровка колеса. Черновые колеса подвергаются закалке и отпуску, полнопрофильной механической обработке, балансировке и дробеметному упрочнению диска. Готовое колесо подвергается магнитолюминисцентному и ультразвуковому контролю для выявления по-

© Кушнарев А.В., Богатов А.А., Киричков А.А., Пузырев С.С., 2016

верхностных и внутренних дефектов. Многие из перечисленных операций впервые были освоены в ОАО «ЕВРАЗ НТМК» и способствовали снижению производственных затрат и повышению служебных характеристик колес при эксплуатации.

1. Повышение качества непрерывнолитых заготовок

Качество колесной стали, химический состав которой для трех марок приведен в табл. 1, формируется на стадиях десульфурации и дефосфорации чугуна или полупродукта, при внепечной обработке с целью предотвращения образования неметаллических включений, микролегирования и модифицирования стали, при продувке аргоном в печи-ковше и вакуумировании [1–4].

Химический состав колесных марок стали, %

Марка стали	C	Mn	Si	Cr	Ni	V	S	P
2	0,55–0,63	0,50–0,90	0,22–0,45	≤0,30	≤0,30	≤0,10	≤0,025	≤0,030
T	0,62–0,70	0,50–1,00	0,22–0,65	≤0,40	≤0,30	≤0,15	0,005–0,025	≤0,030
C	0,68–0,77	0,66–1,00	0,22–0,65	0,10–0,50	≤0,35	0,05–0,15	≤0,015	≤0,020

Новые технологические решения, направленные на совершенствование технологии переработки ванадийсодержащего чугуна дуплекс-процессом, освоение технологии десульфурации полупродукта, комбинированной продувки стали и присадки шлакообразующих материалов в конвертере, обеспечили высокую стабильность результатов от плавки к плавке, снижение окисленности стали и потерь металла со шлаком, уменьшение расхода ферросплавов, снижение содержания серы и фосфора. Освоение технологии внепечной обработки стали способствовало выравниванию температуры и усреднению химического состава в объеме ковша, удалению и модифицированию неметаллических включений, дегазации металла и внедрению технологии безалюминиевого раскисления стали за счет ввода кремний- и марганецсодержащих ферросплавов. Содержание общего кислорода снизилось с 82 ppm перед печью-ковшом до 15 ppm после вакуумирования, содержание водорода в вакуумированной стали не превысило 2 ppm. Загрязненность стали неметаллическими включениями по сравнению с мартеновской технологией снизилась в разы, а брак колес по УЗК снизился с 1,4 до 0,1%. При освоении непрерывной разливки ста-

ли добились получения слитка с плотной мелкозернистой структурой без рыхлости и трещин в осевой зоне слитка, предотвратили вторичное окисление стали в металлопроводах МНЛЗ, внедрили рациональный режим охлаждения слитка [5].

2. Модернизация технологии нагрева и обжатия заготовки на прессопрокатной линии

Железнодорожные колеса изготавливаются из высокоуглеродных марок стали (см. табл. 1), к нагреву которых предъявляются особые требования по скорости и равномерности нагрева. На нагревательной печи до реконструкции раз-

ница температур по сечению заготовки достигала 50°C, а между отдельными заготовками в одной партии до 60°C, отклонение фактических результатов нагрева заданным параметрам составляло (10–15)°C, угар металла достигал 3%, на поверхности заготовки образовывалась трудноотделяемая окалина. После реконструкции

печи эти показатели были значительно улучшены: разность температур по сечению заготовки не превышает 15°C, а величина угара металла менее 0,75%. Успешно внедрена технология гидросбива окалины перед обжатием заготовок на прессе, благодаря чему отсутствуют забракованные колеса по вкатанной окалине.

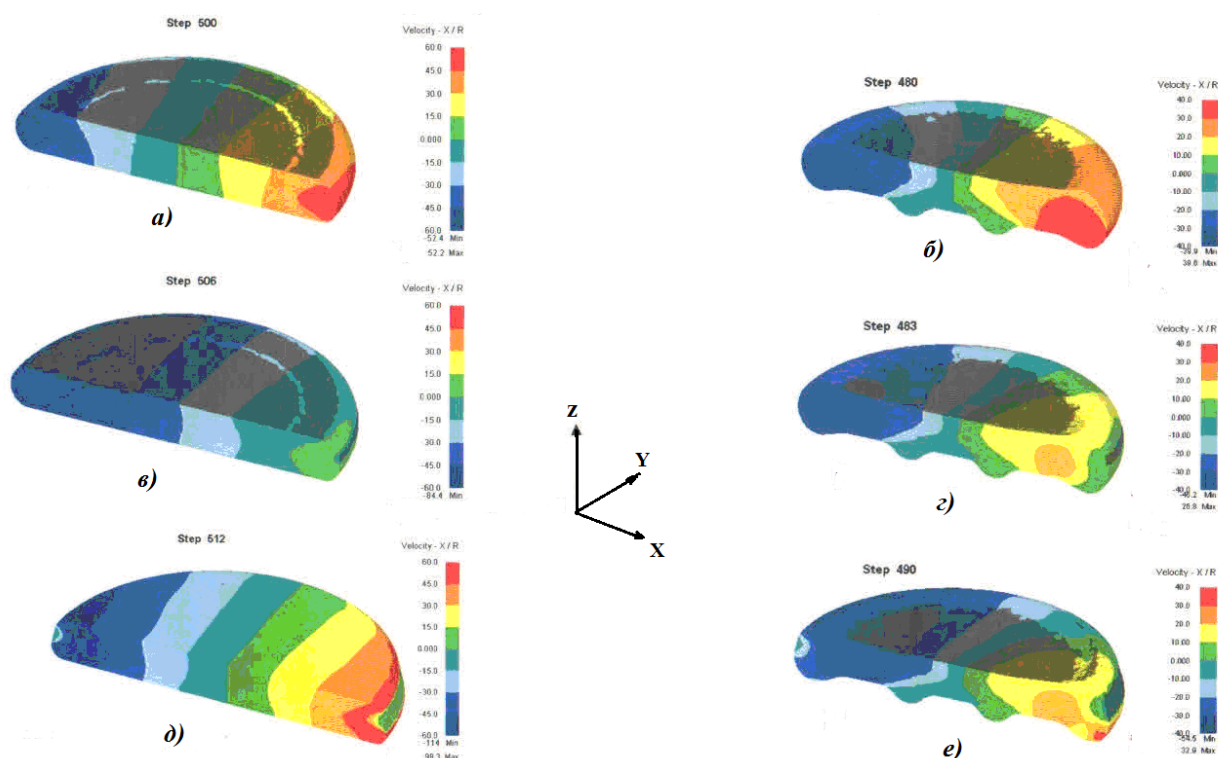
Технологическая схема деформации непрерывнолитой заготовки на прессопрокатной линии разработана фирмой «SMS EUMUCO» и предусматривает предварительную и окончательную штамповку на одном либо раздельно на двух прессах, прокатку штампованной поковки на колесопрокатном стане, прошивку ступицы, выгибку диска, правку и калибровку черного колеса на прессе. Исследование формоизменения заготовки и силовых параметров указанных технологических процессов осуществлялось методом компьютерного моделирования с использованием программы DEFORM 3D. Целью исследования являлось определение рационального соотношения обжатия при штамповке и прокатке [6], оценка влияния формы и размеров поковки после предварительной штамповки на качество оформления поковки при окончательной штамповке [7–14]. На новые технические решения получены патенты

Таблица 1

РФ [7, 8]. Важным результатом компьютерного моделирования технологического процесса явилось изучение асимметричного радиального течения металла под влиянием отклонения формы и размеров заготовки от идеального цилиндра, неточности настройки инструмента деформации и установки заготовки в межштамповом пространстве [15].

Неудовлетворительная настройка технологического процесса на стадии предварительной штамповки характеризовалась следующими значениями: овальность заготовки $\Delta D = 6,5$ мм; косина реза $S = 5$ мм; неточность установки заготовки на нижнем штампе $\delta_2 = 3$ мм, отклонение осей нижнего и верхнего штампа отсутствовало, $\delta_1 = 0$ мм. Исследование формоизменения заготовки, полученное в штампах с гравюрой, разработанной фирмой «SMS EUMUCO», показало, что перепад по толщине обода достигал 12 мм, а разница радиусов поковки из-за эксцентриситета расположения ступицы относительно обода составляла 7 мм. Причиной этого несоответствия является свободное истечение металла из центральной части штампового пространства в периферийную, без ограничения наружной поверхности обода поковки. В промышленных опытах при освоении

технологии SMS EUMUCO теоретические расчеты получили подтверждение: максимальная разница в наружных диаметрах на одной заготовке достигала 23–25 мм, а по ширине обода 21 мм. Таким образом, технология предварительной штамповки оказалась чувствительной к настройке прессы и приводила при дальнейшей обработке к неравномерному распределению массы по периметру поковки, а затем чернового колеса, появлению дефектов прокатного происхождения. Суммарный брак колес по дефектам проката не опускался ниже 24,9%. Освоение предварительной штамповки заготовок по новому способу [7] способствовало повышению точности черновых колес и уменьшению брака до 1,5%. Развитие идеи совмещения при предварительной штамповке операций осадки, разгонки и калибровки, а также применения операции самоцентрирования поковки в штампах окончательной формовки [8] обеспечило повышение точности чернового колеса. Для двух разработанных способов предварительной штамповки [7, 8] методом компьютерного моделирования был выполнен сравнительный анализ формоизменения заготовки и поля скоростей (см. рисунок).



Формоизменение и поле скоростей непрерывнолитой заготовки при двух способах предварительной штамповки: а, в, д – в плоских штампах с подвижным калибровочным кольцом (способ 1); б, г, е – в профилированных штампах с неподвижным кольцом (способ 2)

На **рисунке** приведены результаты компьютерного моделирования двух новых способов черновой штамповки: на плоских штампах с подвижным калибровочным кольцом (способ 1) [7] и на профилированных штампах с закрепленным кольцом (способ 2) [8]. Масса заготовки в обоих случаях принята одинаковой и равной $m = 482$ кг, овальность заготовки $\Delta D = 6,5$ мм, косина реза на обоих торцах $C = 5$ мм, смещение заготовки от оси штампов $\delta_2 = 3$ мм. Начальная стадия осадки заготовки в обоих случаях характеризуется осесимметричной деформацией без исправления геометрических нарушений очага деформации (см. **рисунок, а и б**). Для первого способа эта стадия продолжается до момента одностороннего контакта поковки с калибровочным кольцом, в результате которого оно перемещается до соосного положения с заготовкой. На второй стадии (см. **рисунок, в**) происходит формирование боковой поверхности поковки с односторонним течением металла, а на третьей – уменьшение недоштамповки до минимума, а деформация является осесимметричной (см. **рисунок, д**).

Для второго способа на первой стадии при осадке на верхнем торце поковки формируется выступ в виде полутора, ось которого совпадает с осью верхнего штампа и калибровочного кольца прессы R5000. Кроме того, на первой стадии

осуществляется разгонка металла и формируется обод черновой поковки увеличенной массы. Вторая стадия предварительной штамповки начинается с момента соприкосновения боковой поверхности поковки с калибровочным кольцом и характеризуется односторонним течением металла до момента завершения формовки поковки в калибровочном кольце таким образом, что ширина контакта кольца с поковкой становится одинаковой по периметру поковки. С этого момента начинается третья стадия штамповки с характерной осесимметричной деформацией, сопровождаемой уменьшением высоты поковки и увеличением ширины контакта ее с калибровочным кольцом. В результате образуется осесимметричная черновая поковка, которую передают роботом-манипулятором на пресс R9000. Черновая поковка на нижнем штампе может быть центрирована двумя способами: либо по контуру нижнего штампа в области перехода диска к ободу, либо после кантовки поковки на 180° с помощью осесимметричного выступа на торцевой поверхности поковки в виде полутора (см. **рисунок, е**).

Результаты теоретического анализа течения металла при окончательной штамповке на прессе R9000 показаны в **табл. 2 и 3** в зависимости от формы поковки, полученной на прессе R5000 разными способами.

Таблица 2

Время окончательной штамповки τ и радиус нейтрального сечения R_n в зависимости от величины недоштамповки δ для поковки, полученной способом 1 предварительной штамповки

δ , мм	65,1	55,9	46,2	36,5	26,7	17,6	13,2	9,1	4,5	0
R_n , мм	200	210	210	211	209	205	201	0	0	0
R_l , мм	–	–	–	–	–	–	–	150	100	25
τ , с	1,25	2,18	3,14	4,12	5,10	6,01	6,44	6,85	7,31	7,77

Таблица 3

Время окончательной штамповки τ и радиус нейтрального сечения R_n в зависимости от величины недоштамповки δ для поковки, полученной способом 2 предварительной штамповки

δ , мм	51,5	33,0	24,9	20,6	13,5	7,2	4,1	2,0	0,0
R_n , мм	201	207	209	214	214	214	202	0	0
R_l , мм	–	–	–	–	60	50	45	40	25
τ , с	1,4	3,24	4,06	4,37	5,09	5,72	6,02	6,25	6,44

Радиус нейтрального сечения определяет две зоны течения металла при окончательной штамповке – в ступицу и в обод. Из таблиц видно, что радиус нейтрального сечения в различные моменты окончательной штамповки, полученной способами 1 и 2, находится в диапазоне значений R_n от 200 до 214 мм, то есть наблюдается преимущественное течение металла в обод. Однако в обоих случаях оформление ступицы наступает раньше, чем обода. Величина недоштаповки в первом случае $\delta = 13,1$ мм, а во втором случае $\delta = 2,5$ мм соответствует моменту, когда радиус нейтрального сечения становится равным нулю $R_n = 0$, то есть наступает одностороннее течение металла от ступицы к ободу по всей контактной поверхности поковки. Это приводит к резкому росту силы штамповки, которая в момент завершения окончательной штамповки для первого случая составляет 74 МН, а для второго 67 МН. Отмеченные особенности течения металла при окончательной формовке поковки, полученной по способам 1 и 2, оказывают влияние на качество формовки обода, которое можно характеризовать значением радиуса оформления обода с наружной стороны колеса. Для первого случая при недоштаповке $\delta = 9,1$ мм, $R_f = 150$ мм, в то время как для второго случая $R_f = 50$ мм при $\delta = 7,2$ мм. Важным показателем преимущества применения поковки, полученной по способу 2, по сравнению с поковкой, полученной по способу 1, является уменьшение времени на окончательную штамповку с 7,77 с до 6,44 с.

Кроме того, повышение точности поковки и чернового колеса было достигнуто благодаря разработке и применению теоретического метода оценки точности поковки и чернового колеса [16]. Техническим результатом применения теоретического метода оценки точности поковки и чернового колеса 957 HW3N явилось развитие новых способов производства железнодорожных колес [8], основанных на самоцентрировании поковки в штамповом пространстве прессы окончательной штамповки. Освоение нового способа способствовало снижению массы заготовки на 6 кг, уменьшению припуска на механическую обработку, повышению производительности и надежности работы станков VDM 120-12 для полнопрофильной обточке колес.

Результаты компьютерного моделирования положены в основу определения рациональной гравюры штампов предварительной формовки. В результате была разработана САПР калибровки

инструмента деформации на прессопрокатной линии, благодаря этому на комбинате освоено 47 типоразмеров заготовок и цельнокатаных колес для нужд железнодорожного транспорта. Серьезным достижением явилось освоение цельнокатаных колес диаметром 1250 мм для скоростных локомотивов. Внедрение рациональной калибровки инструмента деформации, найденной путем компьютерного моделирования процесса предварительной и окончательной штамповки заготовки на прессах, а также последующей прокатки обеспечило получение поковки под прокатку с размерами высокой точности, силой штамповки на прессе R9000 менее 80 МН и величиной недоштаповки менее 0,5 мм [13].

Совершенствование конструкции валков колесопрокатного стана и корректировка параметров, вводимых в программу управления стана, позволили успешно освоить производство цельнокатаных колес и заготовок колес диаметром от 710 до 1250 мм, а также колесных центров и заготовок зубчатых колес с цилиндрической поверхностью круга катания без гребня. Освоено производство колес диаметром 957 мм с криволинейным (S-образным) диском для грузовых вагонов с повышенной осевой нагрузкой. Для европейского и североамериканского рынков освоено производство цельнокатаных колес диаметром 920 и 914 мм с криволинейным диском для грузовых вагонов.

Технико-экономические показатели производства продукции на прессопрокатной линии в значительной мере зависят от стойкости инструмента деформации. Основными факторами, влияющими на стойкость инструмента, являются: температура поверхности штампов и валков; гравюра штампов и калибровка валков; величина нормальных контактных напряжений и скорость скольжения металла; качество технологической смазки и охлаждения инструмента. Наиболее неблагоприятные условия работы инструмента имеют место на прессе R9000. Причинами выхода штампов из строя являются: сетка разгара, выкрашивание, налипание металла, общий износ. Технические решения повышения стойкости инструмента деформации были найдены в соответствии с программой импортозамещения. Технология изготовления штампов и их восстановления способом наплавки была освоена на комбинате. Вместо импортных марок технологической смазки была освоена отечественная смазка «Атлантик»

Лансон 1001». Благодаря внедрению указанных выше мероприятий норма расхода штампов в 2012–2014 годах по сравнению с периодом 2007–2011 годов уменьшилась в 1,6 раза, повысились качество оформления поковок и производительность прессопрокатной линии, цикл проката составил 39–40 с [17].

3. Научное обоснование и внедрение новой технологии и оборудования для термообработки колес

Анализ результатов промышленных экспериментов, проведенных с целью определения рационального химического состава колесной стали, температуры нагрева под закалку и отпуска, расхода воды и скорости охлаждения, показал, что оборудование участка термообработки не обеспечивает стабильные результаты по твердости из-за неудовлетворительных технических характеристик нагревательной печи, закалочных столов. В техническом задании реконструкции термического отделения были сформулированы следующие требования:

- температура нагретых колес под закалку и отпуск устанавливается на оптимальном уровне с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$;

- рациональные значения скорости охлаждения обеспечиваются оборудованием закалочных столов устройствами по регулированию расхода охладителя (вода, воздух);

- закалочные столы имеют высокий уровень автоматизации и обеспечивают воспроизводимые режимы независимо от работы оператора.

Исследование влияния скорости охлаждения на формирование структуры и твердости стали трех марок 2, Т и С, разработанных в ОАО «ЕВРАЗ НТМК» совместно с ОАО «ВНИИЖТ», проводилось методом физического моделирования на комплексе Gleeble 3500 совместно с сотрудниками Магнитогорского государственного технического университета Г.И. Носова [18]. Результаты исследования представлены в **табл. 4**.

Из анализа данных **табл. 4** следует, что с увеличением содержания в стали углерода и легирующих элементов (Cr, Ni, V), которые повышают устойчивость переохлажденного аустенита и способствуют уменьшению размера зерна и повышению дисперсности перлита, верхнее значение скорости охлаждения, определяющее распад аустенита по диффузионному механизму с образованием феррито-

карбидной смеси и избыточного феррита, уменьшается. Для стали марки 2 эта скорость равна $7^\circ\text{C}/\text{с}$, для стали марки Т – $4^\circ\text{C}/\text{с}$, а для стали марки С – $3^\circ\text{C}/\text{с}$. Увеличение скорости охлаждения выше указанного значения приводит к образованию игольчатых составляющих структуры бейнита и мартенсита, которые снижают эксплуатационные характеристики железнодорожных колес и приводят к выкрашиванию металла на поверхности катания колеса. Указанные значения скорости охлаждения толщина ферритных пластинок в перлите и твердость для стали марки 2 равны 0,195 мкм и 303 НВ, для стали марки Т – 0,140 мкм и 342 НВ, для стали марки С – 0,119 и 371 НВ. Стандартами регламентируется значение твердости на глубине от поверхности катания 30 мм для твердых колес не менее 320 НВ, а для особо твердых колес не менее 340 НВ. Таким образом, видно, что из стали марки 2 ни твердые, ни особо твердые колеса получить нельзя. При освоении нового оборудования для термоупрочнения колес [19–21] были отработаны основные параметры новой технологии:

- температура нагрева колес под закалку $(950\pm 5)^\circ\text{C}$;

- продолжительность охлаждения на закалочных машинах 300 с;

- температура воды при закалке колес $(35\pm 3)^\circ\text{C}$;

- минимальный расход воды 12 л/мин;

- максимальный расход воды 60 л/мин;

- температура отпуска колес $(510\pm 10)^\circ\text{C}$.

Для исключения случаев формирования неоднородной структуры разработаны и внедрены технические решения [22–24]:

- уменьшено количество форсунок с 16 до 6 ед.;

- разработаны конструкции форсунок, надежно работающих при малых расходах воды;

- введена в эксплуатацию система «Vurpass» для управления скоростью охлаждения [22];

- разработана схема расположения форсунок и изготовлены шаблоны для быстрой и точной их настройки;

- для каждой марки стали разработана и освоена технология дифференцированного охлаждения рабочего слоя обода и его торца во времени [25, 26].

В результате освоения новой технологии термоупрочнения колес достигли стабильного уровня механических свойств (**табл. 5**).

Таблица 4

Характеристики микроструктуры и твердости колесных марок стали в зависимости от скорости охлаждения

Марка стали	Скорость охлаждения, °С/с	Относительная объемная доля структурных составляющих, %				Межпластинчатое расстояние в перлите, мкм	Твердость		
		Ф	ФКС	Б	М		HV ₅	HRC	HB
2	4	6	94	0	0	0,233	303	30	276
	7	5	95	0	0	0,233	321	32	303
	10	4	84	0	12	0,150	335	34	319
Т	1	3	97	0	0	0,155	334	35	323
	4	2	98	0	0	0,140	360	36	342
	5	2	38	26	34	0,130	380	39	363
С	2,5	2	98	0	0	0,120	329	36	341
	3,0	2	98	0	0	0,119	390	40	371
	3,25	1	97	19	33	0,118	408	41	390

Таблица 5

Механические свойства стали (средние значения за 6 мес. 2013 г.)

Марка стали	Временное сопротивление σ_b , Н/мм ² , на ободе	Относительное удлинение δ , %, на ободе	Относительное сужение ψ , %, на ободе	Ударная вязкость при +20 °С, КСИ, Дж/см ² , на ободе	Твердость HB на глубине 30 мм от поверхности обода
2	1016	15	33	44	285
Т	1161	14	31	25	341
С	1272	14	28	35	368

Эти значения получены в результате усреднения данных испытания образцов за период 6 мес. 2013 г., что свидетельствует о стабильности технологического процесса производства колес.

4. Финишная обработка и контроль качества железнодорожных колес на поточной линии

Одним из наиболее опасных эксплуатационных дефектов являются усталостные трещины в дисках цельнокатаных колес. Чаще всего такие трещины возникают с внутренней стороны колеса в месте сопряжения диска с ободом. Полигонные и лабораторные испытания колес показали, что наличие дефектов металлургического либо прокатного происхождения способствуют ускоренному развитию трещин. Наличие растягивающих остаточных напряжений в опасной зоне также снижает время работы колеса до появления усталостной трещины. Дробеструйная обработка диска приводит к снижению уровня и смене знака остаточных напряжений. Внедрение полнопрофильной механической обработки колес на автоматизированной поточной линии станков с числовым программным управлением обеспечило повышение эксплуатационного ресурса на 15–20% за счет отсутствия поверхностных дефектов и образования сжимающих напряжений после дробенаклепа в пределах 100–150 МПа. Повышению стабильности характеристик качества колес способствует освоение приборного неразру-

шающего контроля, который включает:

- контроль и оценку точности размеров колес;
- ультразвуковой контроль обода, диска и ступицы с целью выявления внутренних дефектов и проверки однородности структуры металла обода;
- магнитопорошковый контроль боковых поверхностей с целью выявления поверхностных дефектов;
- ультразвуковой контроль распределения остаточных напряжений в ободу (для колес повышенной твердости);
- контроль твердости металла обода и ступицы.

Заключение

Проведение комплекса работ по улучшению качества стали, реконструкции пресспрокатной линии и модернизации технологии пластической обработки заготовок, совершенствованию оборудования и технологии термической обработки, а также финишной обработке колес и ужесточению приборного неразрушающего контроля качества в ОАО «ЕВРАЗ НТМК» обеспечило увеличение эксплуатационной надежности, долговечности железнодорожных колес и безопасности грузовых перевозок. Количество колес, забракованных потребителями в стадии поставки в 2015 году в сравнении с 2008 годом, сократилось в 3,6 раза, а забракованных в процессе эксплуатации – в 4,7 раза.

Список литературы

1. Кушнарев А.В. Использование инъекционных технологий внепечной десульфурации ванадийсодержащего чугуна-полупродукта в конвертерном цехе НТМК // *Металлург*. 2004. № 10. С. 36–38.
2. Кушнарев А.В., Смирнов Л.А. Современное состояние и перспективы переработки титано-магнетитового ванадийсодержащего сырья в России // *Черная металлургия*. Бюл. науч.-техн. и экон. информации. 2013. № 5. С. 3–20.
3. Разработка и развитие передела ванадийсодержащих чугунов кислородно-конвертерным процессом / А.В. Кушнарев [и др.] // *Сталь*. 2013. № 9. С. 32–36.
4. Кушнарев А.В. Новая технология производства колесной стали в ОАО «ЕВРАЗ НТМК» // *Черные металлы*. 2014. № 3. С. 33–37.
5. Кушнарев А.В. Повышение качества непрерывнолитого слитка из колесной стали в ОАО «ЕВРАЗ НТМК» // *Черные металлы*. 2014. № 3. С. 28–32.
6. Кушнарев А.В., Богатов А.А., Кропотов В.А. Выбор рационального соотношения обжатий при штамповке и прокатке железнодорожных колес // *Производство проката*. 2010. № 3. С. 21–24.
7. Способ штамповки заготовок для цельнокатаных колес : пат. 2335373 Рос. Федерация : МПК С 2 В 21 К 1/28 (2006.01), В 21 Н 1/04 (2006.01) / Кушнарев А.В., Киричков А.А., Шестаков В.Д., Петренко Ю.П., Васильев А.А., Султинских И.Е., Зудов А.Ф.; патентообладатель ОАО «НТМК». № 2006128068/02 ; заявл. 01.08.2006; опубл. 10.10.2008, Бюл. № 28.
8. Способ изготовления цельнокатаных железнодорожных колес: пат. 2404009 Рос. Федерация: МПК В 21 Н 1/04 (2006.01), В 21 К 1/28 (2006.01) / Кушнарев А.В., Богатов А.А., Киричков А.А., Кропотов В.А., Шестаков В.Д., Петренко Ю.П.; патентообладатель ОАО «НТМК». № 2008115847/02; заявл. 21.04.2008; опубл. 20.11.2010, Бюл. № 32.
9. Кушнарев А.В., Богатов А.А., Кропотов В.А. Математическое моделирование черновой и чистовой штамповки непрерывнолитых заготовок, используемых при производстве железнодорожных колес // *Кузнечно-штамповочное производство*. 2010. № 1. С. 34–38.
10. Развитие и освоение в ОАО «Нижнетагильский металлургический комбинат» новой технологии производства железнодорожных колес высокого качества / А.В. Кушнарев [и др.] // *Производство проката*. 2008. № 1. С. 24–28.
11. Introduction of wheel production on a new pressing and rolling line / A. V. Kushnarev [et. al.] // *Steel in Translation*. 2010. Vol. 40. № 12. P. 1098–1100.
12. Production of high-quality railroad wheels / A.V. Kushnarev [et. al.] // *Steel in Translation*. 2010. Vol. 40. № 3. P. 268–272.
13. Кушнарев А.В. Разработка научных основ и внедрение современной технологии производства железнодорожных колес с высокими эксплуатационными характеристиками // *Инновационные технологии в металлургии и машиностроении / под. ред. А.А. Богатова*. Екатеринбург, 2013. С. 626–637; *Заготовительные производства в машиностроении*. 2013. № 1. С. 17–26.
14. Improved wheel rolling / A.V. Kushnarev [et. al.] // *Steel in Translation*. 2010. Vol. 40. № 5. P. 485–487.
15. Кушнарев А.В. Разработка и теоретическое исследование новых способов изготовления железнодорожных колес на ОАО «НТМК» / А.В. Кушнарев, науч. консультант, проф. А.А. Богатов; ГОУ ВПО «Уральский гос. техн. ун-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; ОАО «Нижнетагильский металлург. комбинат». Нижний Тагил, 2009. 46 с.
16. Кушнарев А.В., Богатов А.А. Теоретический метод оценки точности поковок и железнодорожных колес // *Производство проката*. 2015. №9. С. 23–26.
17. Стойкость штампового инструмента при изготовлении железнодорожных колес / А.В. Кушнарев [и др.] // *Производство проката*. 2015. №5. С. 46–48.
18. Структурно-фазовые превращения при непрерывном охлаждении сталей для цельнокатаных железнодорожных колес / А.В. Кушнарев [и др.] // *Сталь*. 2014. № 4. С. 78–83.
19. Теоретическое обоснование и отработка конкретных режимов термообработки колес с целью получения твердости 320-360НВ: аннотированный отчет: работа Д 1084/2006 / *Трансметалл*.
20. Разработка технологии изготовления цельнокатаных колес с твердостью обода 350-390НВ на новом термоучастке КБЦ ОАО «НТМК»: аннотированный отчет: Работа ДГНТЗ-2679.-2010. ИСО-лаб.
21. Определение влияния скорости охлаждения на превращения переохлажденного аустенита в сталях: технический отчет. Работа ДГНТЗ-00-7408/2013 / ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова».
22. Современный комплекс термообработки железнодорожных колес / А.В. Кушнарев [и др.] // *Черная металлургия*. Бюл. науч.-техн. и экон. информации. 2010. № 4. С. 38–39.
23. Производство на ОАО «НТМК» колес повышенной твердости / С.В. Филатов [и др.] // *Черная металлургия*. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2011. № 3. С. 52–57.
24. Способ термической обработки железнодорожных колес : пат. 2451093 Рос. Федерация : МПК С 21 D 9/34 (2006.01) / Кушнарев А.В., Фомичев М.С., Киричков А.А., Теляшов Н.В., Тимофеев В.В., Петренко Ю.П., Флатов В.Г.; патентообладатель ОАО «НТМК». № 2010112161/02; заявл. 29.03.2010; опубл. 20.05.2012, Бюл. № 14.
25. Технология производства железнодорожных колес повышенной твердости из стали Т / А.В. Кушнарев [и др.] // *Сталь*. 2011. № 11. С. 122–124.
26. Научное обоснование и внедрение новой технологии и оборудования для термической обработки колес / А.В. Кушнарев [и др.] // *Черная металлургия*. Бюл. науч.-техн. и экон. информации. 2015. №6. С. 19–23.

Материал поступил в редакцию 02.03.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-59-68

RAILWAY WHEEL MANUFACTURING PROCESS IMPROVEMENT

Kushnarev Aleksey Vladislavovich – D.Sc. (Eng.), Managing Director of EVRAZ NTKM Open Joint Stock Company, Nizhni Tagil, Russia. E-mail: director@ntmk.ru.

Kirichkov Anatoly Aleksandrovich – Ph.D. (Eng.), Advisor to the Managing Director of EVRAZ NTKM for Research and Technology Advancement, Nizhni Tagil, Russia. E-mail: anatoly.kirichkov@evraz.com.

Bogatov Aleksander Aleksandrovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Metal Forming Department, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. E-mail: omd@urfu.ru.

Puzyrev Sergey Sergeevich – Postgraduate Student, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. E-mail: siga@inbox.ru.

Abstract. This work summarises the results of research on the railway wheel manufacturing process focused on reduction of the metal consumption index, material and energy savings, and better wheel performance reproducibility and durability. "EVRAZ NTMK" Open Joint Stock Company has completed a comprehensive and ambitious initiative to find and apply new technical solutions for improved converter treatment and secondary metallurgy, continuous casting processes, new process flow charts of wheel deformation processing by forging, rolling, dishing, restriking, and preforming.

The rough wheel accuracy increased and the wheel block weight decreased due to a combination of upsetting, spreading and sizing of wheel blocks at blocker-type forging, as well as the application of the method of forging self-alignment in final molding dies. The forging and rolling line is highly automated; process measurement capabilities ensure occurrence of online setting correction prompts and minimization of wastes. Hard wheels (320 HB) and super hard wheels (350 HB) of sustainable quality have been manufactured due to strengthening of requirements on wheel austenitizing temperature accuracy and the application of a rational wheel-tread quenching rate. Railway wheel service performance has been increased by 50% due to the implementation of a full-profile wheel machining, wheel plate shot peening, and tougher ultrasonic and fluorescent magnetic particle methods of quality control.

Keywords: Railway wheel; cast billet; dies; forging; secondary metallurgy; continuous casting; modification; vacuum degassing; computer simulation; measurements; size precision; quenching; tempering; machining; shot peening; instrumental quality monitoring.

References

1. Kushnarev A.V. Ispolzovanie inzhektionsnykh tekhnologiy vnepechnoy desulfuratsii vanadisoderzhashchego chugunopoluprodukta v konvertornom tsekh NTMK [Application of the DeV hot metal desulfurizing injection processes at the BOS of the NTMK]. *Metallurg* [Metallurgist]. 2004, no. 10, pp. 36–38.
2. Kushnarev A.V., Smirnov L.A. Sovremennoe sostoianie i perspektivy pererabotki titano-magnetitovogo vanadisoderzhashchego syria v Rossii [Present and future of titanium and vanadium iron ore processing in Russia]. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous metallurgy. Science, Technology and Economy Bulletin]. 2013, no. 5, pp. 3–20.
3. Kushnarev A.V. (et al.) Razrabotka i razvitie peredela vanadisoderzhashchikh chugunov kislородно-konvertornym protsessom [Engineering and improvement of vanadium-bearing cast iron LD processing]. *Stal* [Steel]. 2013, no. 9, pp. 32–36.
4. Kushnarev A.V. Novaya tekhnologiya proizvodstva kolesnoy stali na OAO «EVRAZ NTMK» [New wheel steel manufacturing process at "EVRAZ NTMK" OJSC]. *Chiomnye metally* [Ferrous metals]. 2014, no. 3, pp. 33–37.
5. Kushnarev A.V. Povyshenie kachestva nepreryvnitogo slitka iz kolesnoy stali na OAO «EVRAZ NTMK» [Improvement of the quality of continuous wheel steel cast billet at "EVRAZ NTMK" OJSC]. *Chiomnye metally* [Ferrous metals]. 2014, no. 3, pp. 28–32.
6. Kushnarev A.V., Bogatov A.A., Kropotov V.A. Vybór ratsionalnogo sootnosheniya obzhatiy pri shtampovke i prokatke zheleznodorozhnykh kolios [Selection of an efficient ratio of reductions during railway wheel forging and rolling]. *Proizvodstvo prokata* [Rolled steel manufacturing]. 2010, no. 3, pp. 21–24.
7. Kushnarev A.V., Kirichkov A.A., Shestak V.D., Petrenko Yu.P., Vasilev A.A., Sultinskikh I.E., Zudov A.F. *Sposob shtampovki zagotovok dlya tselnokatanykh kolios* [All-rolled wheel block forging technique]. Patent no. 2335373 Russian Federation, 2008.
8. Kushnarev A.V., Bogatov A.A., Kirichkov A.A., Kropotov V.A., Shestak V.D., Petrenko Yu.P. *Sposob izgotovleniya tselnokatanykh zheleznodorozhnykh kolios* [All-rolled railway wheel manufacturing technique]. Patent no. 2404009 Russian Federation, 2010.
9. Kushnarev A.V., Bogatov A.A., Kropotov V.A. Matematicheskoe modelirovaniye chernovoy i chistovoy shtampovki nepreryvnolykh zagotovok, ispolzuemykh pri proizvodstve zheleznodorozhnykh kolios [Mathematical modeling of rough and fine die forging of continuous cast blocks used for railway wheel manufacturing]. *Kuznechno-shtampovnoye proizvodstvo* [Die forging]. 2010, no. 1, pp. 34–38.
10. Kushnarev A.V. (et al.) Razvitie i osvoenie v OAO «Nizhnetagil'skiy metallurgicheskyy kombinat» novoy tekhnologii proizvodstva zheleznodorozhnykh kolios vysokogo kachestva [Development and assimilation of a new process of high-quality railway wheel manufacturing at the "Nizhni Tagil Metallurgical Plant" OJSC]. *Proizvodstvo prokata* [Rolled steel manufacturing]. 2008, no. 1, pp. 24–28.
11. Kushnarev A.V., Kirichkov A.A., Shestak V.D. [et al.] Introduction of wheel production on a new pressing and rolling line. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 12, pp. 1098–1100.
12. Kushnarev A.V., Kirichkov A.A., Petrenko Yu.P., Bogatov A.A. Production of high-quality railroad wheels. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 3, pp. 268–272.
13. Kushnarev A. V. Razrabotka nauchnykh osnov i vnedrenie sovremennoy tekhnologii proizvodstva zheleznodorozhnykh kolios s vysokimi ekspluatatsionnymi kharakteristikami [Development of scientific principles and implementation of a modern high-performance railway wheel manufacturing process]. *Innovatsionnye tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii* [Innovative steelmaking and machine building processes]. 2013, pp. 626–637.
14. Kushnarev A.V., Vasilev A.A., Shestak V.D., Bogatov A.A. Improved wheel rolling. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 5, pp. 485–487.
15. Kushnarev A.V., Bogatov A.A. *Razrabotka i teoreticheskoe issledovanie novykh sposobov izgotovleniya zheleznodorozhnykh kolios na OAO «NTMK»* [Development and theoretical exploration of new railway wheel manufacturing techniques at "NTMK" OJSC]. Nizhni Tagil, 2009, p. 46.
16. Kushnarev A.V., Bogatov A.A. Teoreticheskyy metod otsenki tochnosti pokovok i zheleznodorozhnykh kolios [Theoretical evaluation method of forging and railway wheel accuracy]. *Proizvodstvo prokata* [Rolled steel manufacturing]. 2015, no. 9, pp. 23–26.
17. Kushnarev A.V. (et al.) Stoikost shtampovogo instrumenta pri izgotovlenii zheleznodorozhnykh kolios [Forging tool durability in railway wheel manufacturing]. *Proizvodstvo prokata* [Rolled products manufacturing]. 2015, no. 5, pp. 46–48.
18. Kushnarev A.V. (et al.) Strukturno-fazovyye prevrashcheniya pri nepreryvnom okhlazhdenii staley dlya tselnokatanykh zheleznodorozhnykh kolios [Structural and phase transformations in continuous cooling of steels for all-rolled railway wheels]. *Stal* [Steel]. 2014, no. 4, pp. 78–83.
19. Teoreticheskoe obosnovaniye i otrabotka konkretnykh rezhimov termoobrabotki kolios s seliyyu polucheniya tverdosti 320–360 HB [Theoretical justification and development of specific wheel heat treatment conditions to obtain 320–360 HB hardness]: annotirovannyy otchiot [annotation report]: rabota D 1084/2006 / Transmetall.
20. Razrabotka tekhnologii izgotovleniya tselnokatanykh kolios s tverdosti oboda 350–390 HB na novom termouchastke KBTs OAO

- «NTMK» [Development of an all-rolled wheel manufacturing process to obtain 350–390 HB tread hardness at a new wheel heat treatment plant of the "NTMK" OJSC wheel shop]: annotirovanny otchiot [annotation report]: Rabota DGNT3-2679. 2010. ISO-lab.
21. Opredelenie vliyaniya skorosti okhlazhdeniya na prevrashcheniya pereokhlazhdiannogo austenita v staliakh [Determination of the cooling rate impact on undercooled austenite transformations in steels]: tekhnicheski otchiot [technical report]. Rabota DGNT3-00-7408/2013 / FGBOU VPO Magnitogorskiy gosudarstvenny tekhnicheskiy universitet im. G.I. Nosova [Nosov Magnitogorsk State Technical University].
 22. Kushnarev A.V. (et al.) Sovremenny kompleks termoobrabotki zheleznodorozhnykh kolios [Modern railway wheel heat treatment complex]. *Chiornaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous metallurgy. Science, Technology and Economy Bulletin]. 2010, no. 4, pp. 38–39.
 23. Filatov S.V. (et al.) Proizvodstvo na OAO «NTMK» kolios povyshennoy tvordosti [Hard wheel manufacturing at "NTMK" OJSC]. *Chiornaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous metallurgy. Science, Technology and Economy Bulletin]. 2011, no. 3, pp. 52–57.
 24. Kushnarev A.V., Fomichev M.S., Kirichkov A.A., Telyashov N.V., Timofeev V.V., Petrenko Yu.P., Flatov V.G. *Sposob termicheskoy obrabotki zheleznodorozhnykh kolios* [Railway wheel heat treatment technique]. Patent no. 2451093 Russian Federation, 2012.
 25. Kushnarev A.V. (et al.) Tekhnologiya proizvodstva zheleznodorozhnykh kolios povyshennoy tvordosti iz stali T [Hard T-steel wheel manufacturing process]. *Stal* [Steel]. 2011, no. 11, pp. 122–124.
 26. Kushnarev A.V. (et al.) Nauchnoe obosnovanie i vnedrenie novoy tekhnologii i oborudovaniya dlia termicheskoy obrabotki kolios [Scientific rationale and implementation of new wheel heat treatment process and equipment]. *Chiornaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous metallurgy. Science, Technology and Economy Bulletin]. 2015, no. 6, pp. 19–23.

Развитие технологии производства железнодорожных колес / Кушнарев А.В., Богатов А.А., Киричков А.А., Пузырев С.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №1. С. 59–68. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-59-68

Kushnarev A.V., Kirichkov A.A., Bogatov A.A., Puzyrev S.S. Railway wheel manufacturing process improvement. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 1, pp. 59–68. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-59-68
