ОСОБЕННОСТИ КРИОГЕННОЙ ОБРАБОТКИ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЕЁ ВНЕДРЕНИЯ

Кокорин Н.А.
ООО «НПЦ «КриоТехРесурс»

Аннотация. В статье определено влияние режимов криогенной обработки на физико-механические свойства, износостойкость и эксплуатационную стойкость прокатных валков. Средние значения твердости валков после криогенного воздействия возросли на 1,65 единиц HRC. Разброс значений твердости валков после криогенной обработки снизился в среднем на 30%. Получены результаты по оценке влияния криогенной обработки на повышение абразивной износостойкости инструментальных сталей.

Ключевые слова: криогенная обработка, прокатные валки, остаточный аустенит, мартенситное превращение, твердость, разброс твердости, коэрцитивная сила, криогенная камера.

ВВЕДЕНИЕ

Производство высокосортной продукции и эффективная работа мощного прокатного оборудования во многом определяется качеством прокатных валков. Поэтому изготовление крупногабаритных прокатных валков диаметром до двух метров, длиной до восьми метров, отвечающих мировому уровню качества, является актуальной задачей современного отечественного металлургического машиностроения.

В современных рыночных условиях требования к качеству холоднокатаного листа растут, увеличивается и производительность станов. Российские металлургические предприятия отказались от применения отечественных валков. Импортные рабочие валки отличаются от отечественных повышенной стойкостью, что позволяет увеличить прокатчикам межперевалочные сроки и повысить производительность станов.

Основными показателями качества валков, определяющими их эксплуатационный ресурс, являются структурная равномерность рабочего слоя и благоприятный характер распределения остаточных напряжений по сечению бочки валка. Достижение оптимального качества прокатного инструмента наиболее затруднительно на крупногабаритных прокатных валках. Основные показатели качества прокатных валков достигаются длительной термической обработкой.

В настоящее время термическая обработка крупногабаритных прокатных валков производится в два этапа. Сначала осуществляется предварительная термическая обработка, цель которой сформировать свойства сердцевинной части сечения валка и улучшить обрабатываемость поверхностных слоев. Длительность предварительной термической обработки составляет не менее 300 часов. После механической обработки производится окончательная термическая обработка, при которой формируется активный слой определенной глубины, во многом определяющий качество бочки валка и его ресурс [1].

В качестве окончательной термообработка применяют: объемную закалку либо поверхностный газовый или поверхностный индукционный нагрев до температуры аустенизации и охлаждение в спрейерных установка, заключительной операцией термообработки является отпуск, в том числе многократный для высокохромистых и быстрорежущих марок стали. Длительность цикла окончательной термообработки составляет около 600 часов. В зарубежной практике для увеличения глубины поверхностного слоя используют двухчастотный индукционный нагрев, а для обеспечения равновесной структуры рабочего слоя бочки валка применяют криогенную обработку после индукционной закалки.

Криогенная обработка (КО) - это термическое упрочнение металлопродукции сверхнизкими температурами (до – 196^{0}С). Данная обработка относится к способам направленного изменения структуры и свойств материалов.

В отечественной практике криогенную обработку в основном применяют для снижения количества остаточного аустенита в структуре закаленной стали. Аустенит имеет меньший модуль упругости, вследствие чего возможно снижение точности проката из-за увеличения

упругих деформаций прокатных валков. При охлаждении закаленной стали происходит мартенситная реакция. Переход аустенита в мартенсит совершается в точке начала превращения ($М_н$) с очень большой скоростью и в течение нескольких тысячных долей секунды большая часть аустенита (70%) переходит в мартенсит, после чего процесс замедляется. Оставшееся количество непревращенного аустенита постепенно переходит в мартенсит по мере дальнейшего понижения температуры при криогенной обработке, и процесс совершенно прекращается в точке $М_к$. Температура начала и окончания образования мартенсита зависит от содержания углерода и легирующих элементов в стали.

Механизм прироста износостойкости в результате криогенной обработки обосновал в своих исследованиях профессор Д.Н. Коллинс из Дублинского университета [2]. В дополнение к известному эффекту трансформации остаточного аустенита в мартенсит с соответствующим увеличением твердости криогенная обработка приводит к кристаллографическим изменениям микроструктуры материала, которые отчетливо проявляются при повторном нагреве (отпуске) в виде равномерного распределения мелкодисперсных карбидов. Рост числа карбидов в структуре высокоуглеродистых легированных инструментальных сталей в результате оптимизации режимов закалки и криогенной обработки дает прирост износостойкости более, чем на 30%.

Для изготовления валков холодной прокатки используют комплексно легированные стали с содержанием углерода около 0,90%. Такое высокое содержание углерода обеспечивает повышение износостойкости валков, а также улучшает качество поверхности листа. Снижение содержания углерода до 0,75-0,85% также обеспечивает получение после закалки требуемой твердости, но при этом отмечается значительное уменьшение количества карбидной фазы, что отражается на снижении износостойкости закаленного слоя [1].

Для наиболее перспективных валковых сталей аналитически определены по известным формулам температуры начала и окончания мартенситного превращения. Результаты расчета критических точек представлены в таблице 1.

Таблица 1

Ориентировочные значения температуры мартенситного превращения сталей

№ п/п	Марка стали	Содержание элементов, по массе %							Температура мартенситного превращения, ^{0}C	
		C	Si	Mn	Cr	Ni	V	Mo	$М_н$	$М_к$
1	45Х5МФ	0,49	0,45	0,31	5,10	≤0,50	0,15	0,28	250	- 50
2	60Х2СМФ	0,57	1,05	0,2	1,8	≤0,50	0,10	0,25	259	- 40
3	60Х2СМФ	0,65	1,3	0,7	2,1	≤0,50	0,25	0,35	206	- 95
4	75ХМФА	0,79	0,51	0,49	1,45	≤0,40	-	0,16	162	- 145
5	75Х2СГФ	0,76	0,55	0,50	2,20	≤0,50	0,10	-	167	- 143
6	75Х3МФ	0,77	0,61	0,57	3,40	≤0,50	0,10	0,15	145	- 165
7	80Х2СГФ	0,79	0,61	0,65	2,25	≤0,50	0,15	-	149	- 171
8	80Х3МФ	0,82	0,63	0,60	3,20	0,14	0,10	0,18	131	- 188
9	80Х5СМ	0,76	0,92	0,29	4,84	0,25	0,04	0,23	144	- 176
10	90Х3МФ	0,92	0,45	0,50	3,35	≤0,50	0,15	0,27	85	- 236
11	90Х2МФ	0,90	0,50	0,65	2,00	≤0,50	0,17	0,30	103	- 217
12	90Х5МФ	0,90	0,65	0,65	5,20	≤0,50	0,35	0,15	66	- 253

Согласно ориентировочным значениям температуры $М_к$, приведенным в последнем столбце таблицы 1, реализовать полное завершение мартенситного превращения без специального оборудования невозможно. Для сталей с порядковыми номерами 6 и далее процесс мартенситного превращения заканчивается при криогенных температурах. Для большинства сталей полный переход аустенита в мартенсит возможен при использовании в качестве хладагента жидкого азота.

В таблице 1 для стали 60Х2СМФ приведены значения температур при наименьших и наибольших значениях допустимого интервала содержания химических элементов в соответствии с отраслевым стандартом. Разность значений начала и окончания мартенситного

превращения для данной стали превышает 50^0С, что является достаточно существенным при назначении режимов обработки и выборе оборудования. Например, температуры окончания мартенситного превращения минус 40^0С можно достичь использованием «сухого льда» или фреонового оборудования, а температуры минус 95^0С и ниже возможно при использовании в качестве хладагента жидкого азота.

Эффективность криогенной обработки в первую очередь во многом определяется последовательностью взаимодействия с различными видами термической обработки и временным интервалом между ними. Наиболее эффективным процессом термической обработки в сочетании с криогенным воздействием, применяемым с целью повышения прочности, твердости, износостойкости является схема, представленная на рис. 1. Продолжительность выдержки закаленных деталей перед дальнейшим охлаждением до криогенных температур должна быть белее короткой. Поэтому целесообразно помещать в криогенную камеру закаленную деталь немедленно после охлаждения до комнатной температуры. В практике термической обработки редко удается обеспечить передачу крупногабаритных деталей немедленно в криогенную камеру. Обычно между окончанием закалки и загрузкой детали в криогенную камеру проходит некоторое время, необходимое для контроля и накопления достаточной партии деталей.

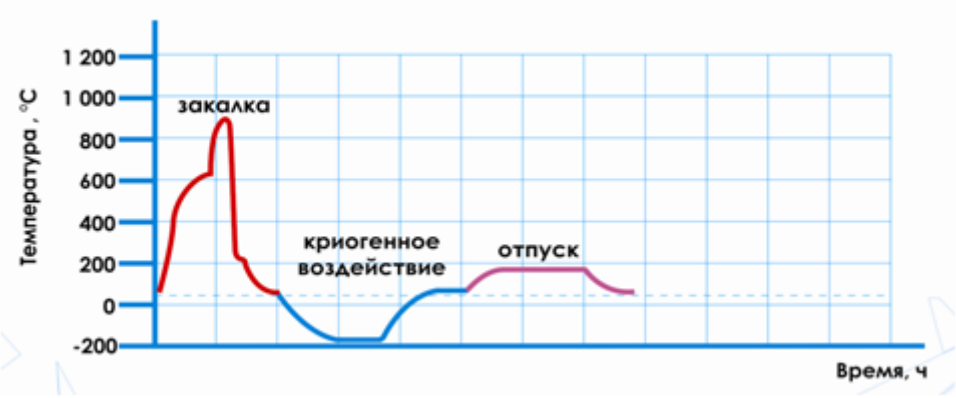


Рис. 1 - Схема термической обработки с криогенной обработкой после закалки

Если процесс охлаждения при закалке был прерван при комнатной температуре и после некоторого промежутка времени возобновлен в криогенной камере, то превращение аустенита в мартенсит начинается вновь не сразу, а лишь после определенного температурного перепада. Вновь начавшийся процесс протекает с опозданием по температуре на 20-100^0С. Таким образом, время выдержки между закалкой и криогенной обработкой понижает точку конца мартенситного превращения и для комплексно легированных сталей с содержанием углерода около 0,90% являющимися высокочувствительными к стабилизации аустенита, может стать критическим при обработке с использованием азота.

Явление стабилизации не позволяет получать максимально возможный результат, однако во многих случаях не предотвращает полностью мартенситного превращения остаточного аустенита, достигаемого охлаждением до криогенных температур. Закаленные детали, имеющие длительную выдержку при комнатной температуре, несколько повышают твердость в среднем на 0,5-1,5 единицы HRC после охлаждения до криогенных температур. В сравнении с приростом средней твердости на 2-4 единицы HRC в результате немедленного криогенного воздействия после закалки.

На температуру конца мартенситного превращения оказывает влияние и способ нагрева под закалку. Газопламенная поверхностная закалка, применяемая для обработки крупногабаритных прокатных валков, основана на том, что ацетилено-кислородное пламя имеет температуру выше 3000^0С и благодаря чрезвычайно большому тепловому потоку поверхность стальных изделий до температуры закалки нагревается за очень короткий промежуток времени, в течение которого внутренние слои не успевают прогреться до критической точки, и поэтому при последующем охлаждении не закаливаются. При таком виде закалки трудно получать равномерно закаленный слой регламентированной глубины.

При поверхностной индукционной закалке стали твердость получается на 2-4 HRC выше, чем твердость при объемной закалке. Объясняется это главным образом чрезвычайно быстрыми скоростями нагрева, поэтому зерна аустенита не успевают вырасти и сталь не перегревается. Однако высокая твердость стали, получающаяся при индукционной закалке, во время последующего отпуска сохраняется только до 140-150^{0}С. Или до температуры не превышающей $М_н$ (таблица 1).

На температуру окончания мартенситного превращения и результативность криогенной обработки оказывает влияние температура нагрева под закалку. Влияние температуры криогенной обработки стали Х12МФ и температуры аустенизации на количество карбидов представлено на рис. 2.

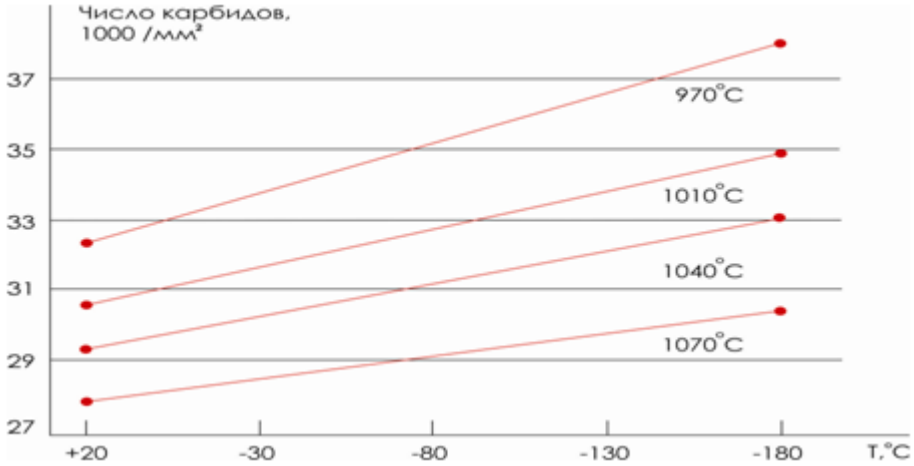


Рис. 2 - Влияние температуры КО стали Х12МФ на количество карбидов [2]

Для стали Х12МФ температура закалки находится в интервале от 950 до 1100^{0}С. На число карбидов в микроструктуре стали оказывает влияние температура аустенизации, что подтверждается соответствующими значениями при температуре + 20^{0}С (рис. 2). Охлаждение стали до температуры минус 180^{0}С по схеме комплексной термической обработки (рис. 1) ведет к значительному росту числа карбидов. Рост числа карбидов проявляется не сразу после криогенной обработки, а в результате теплового воздействия при отпуске.

Влияние температуры криогенной обработки на уровень износа стали Х12МФ при различных температурах закалки представлено на рис. 3. Следует отметить, что криогенная обработка однозначно повышает износостойкость стали Х12МФ, закаленной при различных температурах. Причем наибольший прирост износостойкости установлен в результате экспериментов при температуре минус 196^{0}С (температура конца мартенситного превращения). Прирост износостойкости стали Х12МФ в результате криогенной обработки составляет от 11 до 14% при различных температурах закалки.

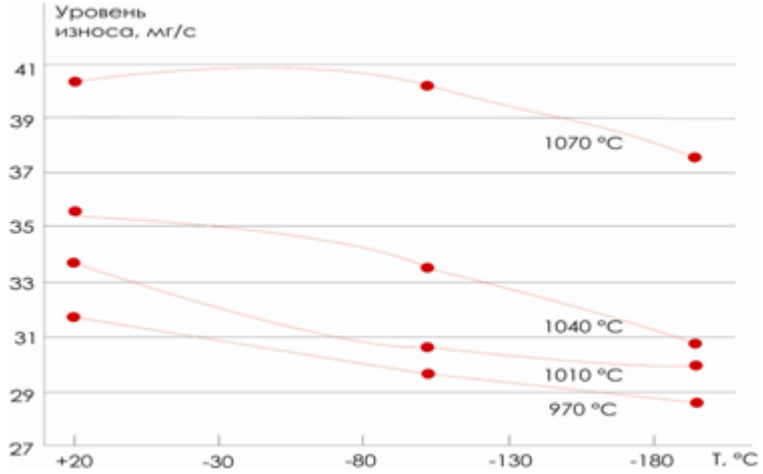


Рис. 3 - Влияние температуры КО на уровень износа стали Х12МФ [2]

Более 30% прироста износостойкости можно получить в результате криогенной обработки в случае оптимизации режимов термообработки (закалки). Например, заменить существующий технологический процесс закалки с температуры 1040^0С на закалку с температуры 970^0С с последующей криогенной обработкой при температуре минус 196^0С.

Эффективность криогенной обработки инструментальных сталей во многом определяется временем изотермической выдержки при криогенных температурах. Существенное влияние на рост числа карбидов оказывает и время выдержки при криогенной температуре (рис. 4).

Экстремум функции количества карбидов от времени выдержки при криогенной температуре приходится на длительную выдержку, равную 36 часам (рис. 4).

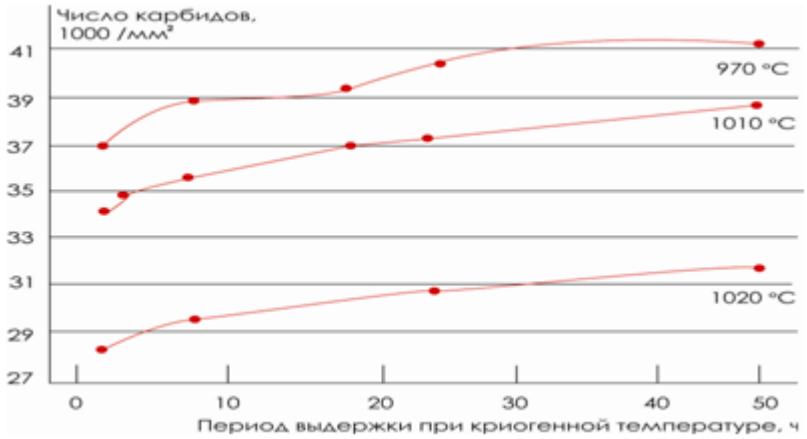


Рис. 4 - Влияние времени выдержки при криогенной температуре – 196^0С на количество карбидов в стали Х12МФ [2]

Твердость поверхности бочки валка стана холодной прокатки (рис.5), а точнее, ее равномерность (минимальный разброс), является основным физико-механическим свойством, влияющим на геометрические параметры прокатываемого листа.

Рис. 5 – Валки стана холодной прокатки

Средняя твердость первого валка до криогенной обработки составила 55,8 HRC, а после криогенной обработки – 57,8 HRC. На втором валке средняя твердость бочки в исходном состоянии составляла 57,9 HRC, а после криогенной обработки – 59,2 HRC. Таким образом, в результате криогенной обработки твердость по двум валкам в среднем приросла на 1,65 единицы HRC.

Результаты контроля разброса твердости валков до и после криогенной обработки показали однозначное снижение данной характеристики после обработки. До криогенной обработки средний разброс твердости первого валка составлял 10,0%, что соответствует 5,6 единицы HRC, а после криогенной обработки он составил 6,0%, что эквивалентно 3,5 единицы

HRC. Разброс твердости второго валка в состоянии поставки составлял 4,0%, что соответствует 2,3 единицы HRC, а после криогенной обработки он составил 3,0%, что эквивалентно 1,7 единицы HRC. Таким образом, криогенная обработка, позволила значительно устранить неоднородную твердость валков после закалки.

В тех случаях, когда при криогенной обработке не достигнута температура конца мартенситного превращения, распределение наибольшей и наименьшей твердости по поверхности бочки валка имеет особенность, представленную на рис. 6. Наибольшие значения твердости, полученные в результате такой обработки, не превышают значений твердости, полученных закалкой. А наименьшие значения твердости в результате криогенной обработки растут, за счет чего заметен рост средней твердости по сечениям и по всей бочке в целом. Разброс твердости при этом снижается как в отдельных сечениях, так и по всей бочке в целом. Что естественно отражается и на повышении износостойкости бочки валка.

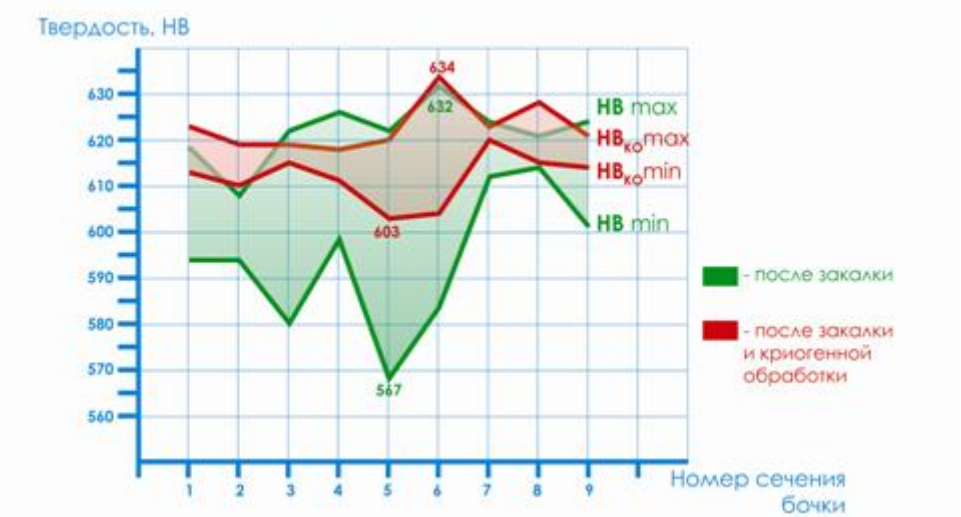


Рис. 6 – Распределение твердости по поверхности бочки валка

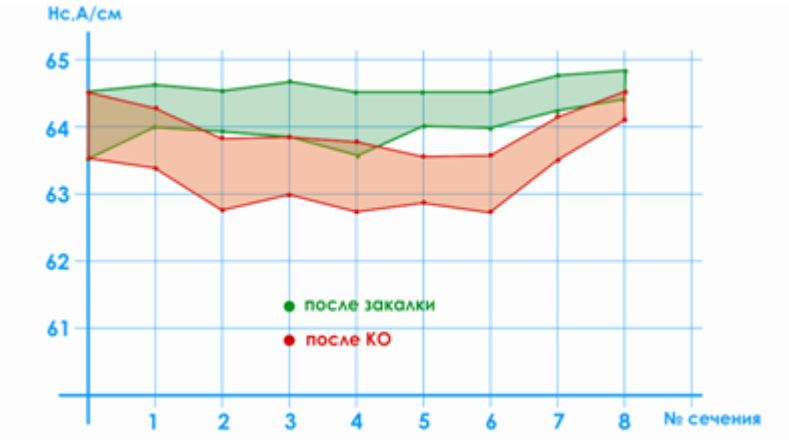
Наиболее информативным показателем достижения температуры конца мартенситного превращения при криогенной обработке служит коэрцитивная сила. В тех случаях, когда мартенситная реакция не возобновлена в результате охлаждения при отрицательных температурах, полигон распределения наибольших и наименьших значений коэрцитивной силы по длине бочки валка опускается ниже полигона значений, полученных в результате закалки (рис. 7 а).

В случае возобновления мартенситного превращения при охлаждении до отрицательных температур, но при этом не достигнута температура конца мартенситного превращения, полигоны коэрцитивной силы частично или полностью перекрываются (рис. 7 б).

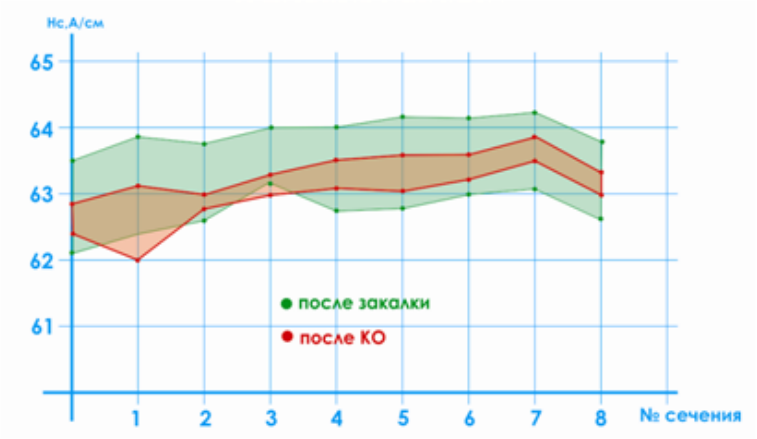
На рисунке 7 в показано распределение полигонов коэрцитивной силы, когда мартенситная реакция при криогенной обработке завершена. Значения коэрцитивной силы, полученные в результате криогенной обработки, превосходят значения коэрцитивной силы, полученные после закалки. При этом снижается и разброс коэрцитивной силы в результате криогенной обработки. Что отражается и на повышении износостойкости бочки валка.

На количество образовавшегося мартенсита в закаленной детали оказывает влияние скорость охлаждения при криогенной обработке и время изотермической выдержки при криогенной температуре. Так при медленном охлаждении в мартенситном интервале и длительной изотермической выдержке мартенсит образуется равномерно по сечению закаленного слоя, а после быстрого охлаждения в структуре стали наблюдается лишь мартенситная оторочка вокруг аустенитного ядра.

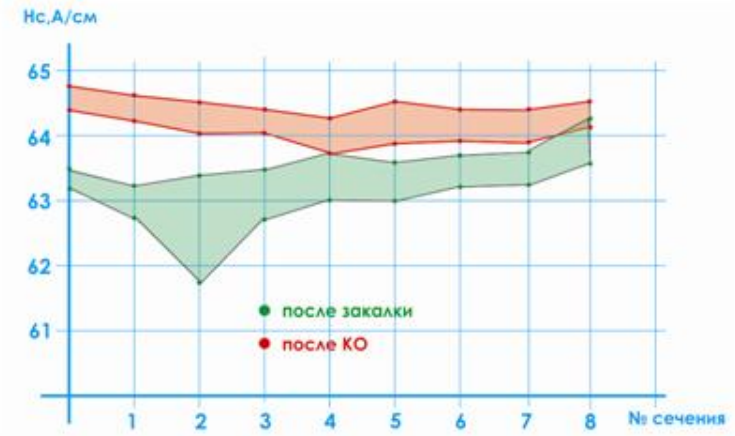
Результаты сравнительных испытаний на абразивный износ образцов из сталей 9ХС, Р6М5 и Х12МФ до и после криогенной обработки показали прирост относительной износостойкости: для стали 9ХС на 18-31%; для стали Р6М5 на 25-33% и стали Х12МФ на 19-22% [3, 4, 5].



а)



б)



в)

Рис. 7 – Распределение коэрцитивной силы по поверхности бочки валка (0,9% С)
а- сталь с 0,9% С; б- сталь с 0,8% С; в- сталь с 0,75% С.

Результаты промышленного эксперимента по влиянию криогенной обработки после закалки и низкого отпуска на стойкость валков турголовок ТЭСА представлены в таблице 2.

Таблица 2

Влияние криогенной обработки на износостойкость валков [6]

Состояние валков	Твердость, HRC	Износостойкость, т проката до переточки
Без криогенной обработки*	60-64	90
После криогенной обработки**	65-69	197
После первой переточки	65-69	170
*Профилирование трубы из г/к полосы **Профилирование трубы из х/к, г/к и травленой полосы		

Результаты комплексных исследований результативности криогенной обработки валков свидетельствуют о необходимости точного управления процессом в широком диапазоне криогенных температур, что должно учитываться при выборе схемы охлаждения и разработке оборудования для криогенной обработки валков. Выбор метода охлаждения оказывает существенное значение на размеры и конфигурацию оборудования, используемого для охлаждения валков. Схема непосредственного или прямого охлаждения является эффективным средством получения криогенных температур для управляемой обработки. Такой способ охлаждения требует минимальных затрат на оборудование и весьма экономичен из-за сравнительно небольшого расхода хладагента.

Традиционно криогенные камеры конструируют для обработки партии деталей или комплекта поставки определенной массы и размеров с учетом периодичности загрузки. По способу загрузки камеры подразделяют на фронтальные и вертикальные. Камеры с вертикальной загрузкой (в виде ванны) наиболее полно используют производственное пространство и представляют собой экономичное решение для охлаждения валков. Загрузочное окно такой камеры расположено сверху, что позволяет использовать цеховые механизмы для загрузки и выгрузки обрабатываемых деталей, а также для снятия и установки крышки.

Энергоэффективная камера криогенной обработки чугунных и стальных изделий разработана при финансовой поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере». Технической задачей разработки являлось снижение расхода хладагента на 25-50% по сравнению с аналогичными камерами. Конструкция камеры защищена патентом на полезную модель РФ [7].

ВЫВОДЫ

На основании выполненных исследований можно считать, что криогенная обработка является эффективным способом повышения стойкости прокатных валков. В результате криогенной обработки повышается твердость и коэрцитивная сила, существенно снижается разброс твердости и абразивный износ поверхности бочки прокатного инструмента.

Разработано и сертифицировано энергоэффективное оборудование для реализации криогенной обработки стальных и чугунных изделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Валки многовалковых станов. В.П. Полухин, М.Л.Бернштейн, А.Ф.Пименов и др. М.: Металлургия, 1983, 128 с.
2. D.N. Collins, J. Dormer, Heat Treatment of Metals, 1997, No 3.
3. Кокорин Н.А., Тарасов В.В., Трифонов И.С. Криогенное упрочнение промышленных ножей из стали 9ХС для повышения их износостойкости // Химическая физика и мезоскопия. 2016. Т.18, №2 С.257-264.
4. Кокорин Н.А., Тарасов В.В., Михайлов Ю.О., Трифонов И.С. Криогенное воздействие – фактор повышения ресурса инструмента из быстрорежущей стали // Химическая физика и мезоскопия. 2017. Т.19, №2 С.270-277.
5. Кокорин Н.А. Повышение ресурса прокатных валков криогенной обработкой // Труды X конгресса прокатчиков.- Том 2. Сборник статей. -М.: ООО «ВАШ ФОРМАТ».-2015.- С. 217-220.
6. Колобов А.В., Соминин М.А., Плеханов С.В. и др. Использование криогенной обработки для повышения износостойкости профилегибочных валков.//Металлург, 2017. №6, С. 86-90.
7. Кондратенков М.С. Камера криогенной обработки чугунных или стальных изделий// Патент на полезную модель РФ №162822. 2016, Бюл. №18.

Кокорин Николай Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, директор по науке и развитию ООО «НПЦ «КриоТехРесурс», тел. 8(3412)334-455, e-mail: info@cryoteh.ru