

УДК 669.14.018.255:536.483

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИОГЕННОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПРОФИЛЕГИБОЧНЫХ ВАЛКОВ

© Колобов Александр Владимирович¹, канд. техн. наук (vkolobov@severstal.com);Соминин Марк Анатольевич¹ (masominin@severstal.com);Плеханов Сергей Валерьевич¹ (svplehanov@severstal.com); Тихонов Сергей Михайлович² (tserg491@yandex.ru)Ионов Сергей Михайлович² (ionov@pdss.misis.ru); Киселев Даниил Александрович² (kisdaniil@mail.ru);Кондратенков Михаил Сергеевич³ (info@cryotech.ru); Данилов Иван Александрович³ (i.danilov@gas18.ru)Кокорин Николай Анатольевич³ (kokorin@techgazy.ru)¹ ПАО «Северсталь». Россия, г. Череповец² НИТУ «МИСиС». Россия, Москва³ ООО «НПЦ «КриоТехРесурс». Россия, Ижевск

Статья поступила 14.11.2016 г.

Проведен анализ возможности применения технологии криогенной обработки инструментальной стали марки X12BMФ при изготовлении рабочих валков профилегибочного стана. Рассмотрен характер влияния криогенной обработки на структуру: доли остаточного аустенита и распределение вторичных карбидов, механические свойства и износостойкость стали-аналога AISI D2. Проанализированы результаты производственного эксперимента в условиях ПАО «Северсталь» по повышению износостойкости роликов турголовок путем криогенной обработки. Дана предварительная оценка эффективности применения криогенной обработки при производстве гнутых профилей проката.

Ключевые слова: инструментальная сталь; криогенная обработка; износостойкость; остаточный аустенит.

Одной из основных тенденций развития современной металлургии является совершенствование технологического процесса с целью снижения производственных издержек. В прокатном переделе это возможно при увеличении срока службы дорогостоящего валкового инструмента за счет улучшения износостойкости при повышении твердости рабочей поверхности. В частности, крайне актуальна проблема снижения износа дорогостоящих рабочих валков профилегибочных станов [1].

Существует устоявшееся мнение, что при взаимодействии деформируемого металла и материала профилегибочного валка в большинстве случаев имеет место абразивный износ. В первую очередь это связано со значительными напряжениями на границе контакта металл-валок при наличии их взаимного перемещения друг относительно друга в зонах, удаленных от нейтрального сечения. Очевидно, что величина износа пропорциональна приложенной нагрузке, но также зависит от ее распределения и скорости относительного скольжения [2]. Износостойкость прямо связана с твердостью материала, поэтому для ее повышения целесообразно использовать методы увеличения

твердости материала инструмента: повышение доли карбидной фазы путем его легирования, наклеп поверхностного слоя путем холодного деформирования, химическая и термическая обработка. Известные данные о влиянии на износостойкость остаточного аустенита в структуре металла показывают, что снижение его количества может приводить к значительному росту ресурса инструмента [3].

На сегодня на станах горячей и холодной прокатки чаще всего используются валки, изготовленные из средне- и высоколегированных сталей типа 9Х. В отдельных случаях – при прецизионной прокатке полос и гнутых профилей или прокатке в чистовых калибрах, применяют валки из твердого сплава или стали типа X12MФ (X12BMФ), состав которой близок к стали AISI D2 (табл. 1).

Все валки подвергаются термической обработке (ТО), причем наиболее распространена

Таблица 1. Химический состав сталей AISI D2 и X12MФ

Сталь	Содержание элементов, мас. %									
	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	V	Cu
X12MФ	1,5	0,25	0,3	≤0,35	≤0,03	≤0,03	12,0	0,5	0,2	≤0,3
AISI D2	1,5	0,3	0,4	–	≤0,03	≤0,03	12,0	0,8	0,9	–

закалка от температуры аустенизации и низкий отпуск. Структура валковых сталей после ТО состоит преимущественно из мартенсита и остаточного аустенита, объемная доля которого зависит как от режима ТО, так и от химического состава стали. Также в структуре могут присутствовать дисперсные карбиды, образуемые легирующими элементами. Доля остаточного аустенита может достигать 25–30% [4], что неблагоприятно сказывается на эксплуатационных характеристиках валка, так как аустенит характеризуется гораздо более низкими прочностными свойствами и твердостью по сравнению с мартенситом. Кроме того, аустенит имеет меньший модуль упругости, вследствие чего возможно снижение точности проката из-за увеличения упругих деформаций валков.

Присутствие остаточного аустенита в структуре валковых сталей связано с тем, что температура окончания их мартенситного превращения (M_k) находится в субнулевой области температур. При закалке в масло или в контролируемую среду с охлаждением до комнатной температуры мартенситное превращение протекает далеко не полностью, причем, чем ниже температура M_k , тем больше аустенита остается в структуре.

На практике режим закалки и отпуска стали конкретной марки не учитывает колебания содержания углерода и легирующих элементов для различных плавок в пределах допуска на химический состав. Соответственно в структуре металла различных валков после закалки может содержаться различная доля остаточного аустенита. В связи с этим твердость рабочей поверхности валков одной калибровки из стали X12ВМФ, устанавливаемая допуском на ТО, обычно может колебаться в диапазоне 60 ± 4 HRC в соответствии с законом нормального распределения. Но если доля остаточного аустенита пренебрежимо мала, влияние

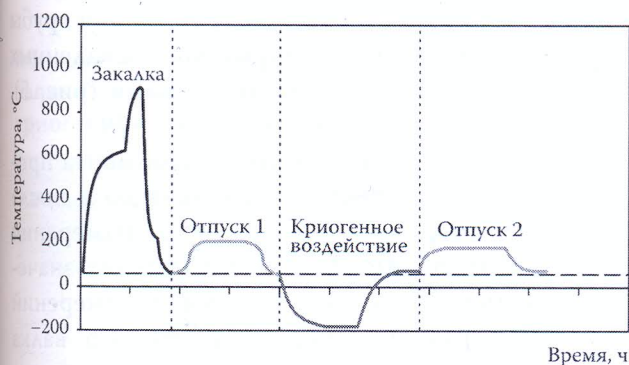


Рис. 1. Схема закалки и криогенной термообработки инструментальной стали

отклонений химического состава сводится к минимуму. Актуальной проблемой становится разработка методов стабилизации поверхностной твердости на более высоком уровне и уменьшения диапазона разброса ее значений в результате превращения остаточного аустенита в мартенсит после закалки.

Одна из перспективных технологий стабилизации поверхностной твердости – криогенная обработка стали. Она предусматривает охлаждение металла, прошедшего закалку и отпуск, до температуры жидкого азота, выдержку при этой температуре и последующий низкий отпуск (рис. 1). При температуре близкой к -196 °С доля остаточного аустенита в стали для изготовления профилегированных валков стремится к нулю. Это обусловлено тем, что при минусовых температурах происходит полное мартенситное превращение аустенита, сохранившегося в структуре металла после закалки (рис. 2). Таким образом, криогенная обработка позволяет повысить средний уровень твердости металла рабочей поверхности инструмента, характеризующегося значительным содержанием остаточного аустенита. При этом для профилегированных валков обеспечивается стабилизация на максимально высоком уровне твердости рабочей поверхности независимо от колебаний поплавоочного химического состава. Соответственно повышается их износостойкость и увеличивается срок эксплуатации без переточки.

Известен опыт применения криогенной обработки быстрорежущих сталей [4]. Однако применение ударного охлаждения в жидком азоте не только не приносило положительного эффекта, но и приводило к общему понижению прочностных и пластических свойств и образованию термических трещин, т.е. браку. Это может быть связано с тем, что не учитывалось влияние времени

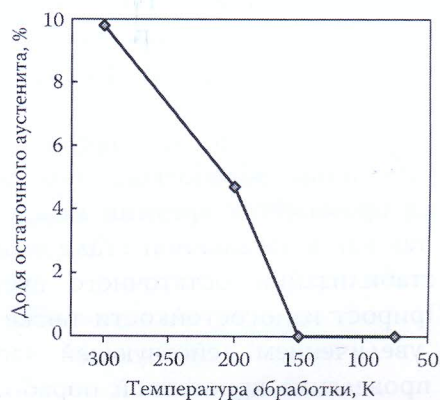


Рис. 2. Влияние температуры криогенной термообработки на содержание остаточного аустенита в стали AISI D2 [5]

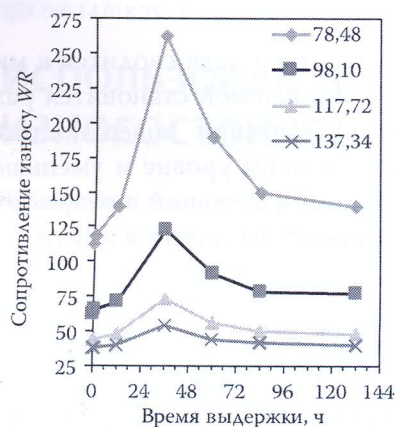


Рис. 3. Зависимость среднего сопротивления износу WR от времени выдержки при криогенной температуре и нормальной нагрузки [6]

выдержки на формирование комплекса свойств металла инструмента, поскольку целью ставилось именно устранение остаточного аустенита: время выдержки соответствовало необходимому для того чтобы заготовка в полном объеме успела охладиться до необходимой температуры.

Существует ряд методов контролируемого охлаждения заготовок в широком диапазоне скоростей, основным из которых является охлаждение в парах жидкого азота. Ведущим фактором для определения времени выдержки стало не выравнивание температурного поля на уровне отрицательных температур, а время, необходимое для перераспределения атомов углерода и легирующих элементов, участвующих в образовании вторичных карбидов, которые в значительной степени влияют на твердость и износостойкость инструмента [5–7]. Для каждой композиции химического состава стали существует свое оптимальное время выдержки при отрицательной температуре, необходимое для достижения максимальной износостойкости (рис. 3). Известно, что для стали AISI D2 максимальное количество вторичных карбидов и сопротивление износу соответствует времени выдержки при отрицательной температуре 36 ч (табл. 2).

Необходимо отметить, что эффект, достигаемый криогенной обработкой, тем больше, чем меньше промежуток времени между ней и закалкой, так как в закаленной стали возможен процесс стабилизации остаточного аустенита (рис. 4). Прирост износостойкости также понижается с увеличением действующей нагрузки. Наконец, проведение криогенной обработки не всегда целесообразно для валков, закаленных на вторичную твердость (т.е. после высокого отпу-

Таблица 2. Влияние времени выдержки при температуре -196°C на характеристики распределения вторичных карбидов и сопротивление износу стали AISI D2 [6]

Время выдержки, $t_{\text{кр}}$, ч	Вторичные карбиды		Среднее сопротивление износу металла валков, WR
	количество, об. %	плотность колоний, $\times 10^3$, мм^{-2}	
0	7,65	421	63,21
1	8,69	484	65,56
12	9,65	491	72,74
36	10,06	489	126,16
60	9,93	415	93,77
84	9,88	346	78,29

Примечание. Среднее сопротивление износу металла валков при нагрузках в диапазоне 78,48–137,34 Н – безразмерная величина, рассчитываемая по соотношению Арчарда–Хирста $WR = F_N S_v / V_L H_V$, где F_N – нормальная нагрузка, Н; S_v – линейная скорость вращения, м/с; V_L – разрушаемый путем износа объем в единицу времени, $\text{м}^3/\text{с}$; H_V – твердость по Виккерсу, МПа.

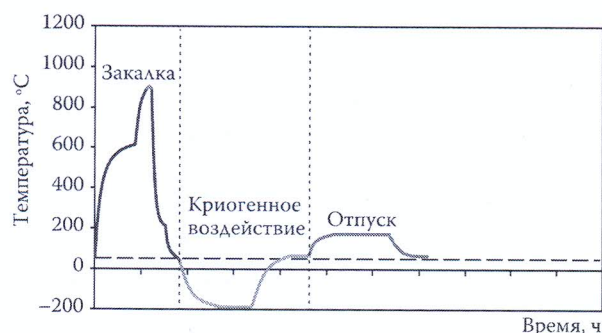


Рис. 4. Схема термической обработки с криогенной обработкой после закалки

ска), а также закаленных при максимальных температурах аустенизации, т.е. для стали X12VMФ ($HRC > 64$).

В цехе гнутых профилей (ЦГП) ПАО «Северсталь» был проведен эксперимент по оценке эффективности влияния криогенной обработки на повышение износостойкости деформирующего инструмента из стали X12VMФ. На производственной установке НПЦ «КриоТехРесурс» была проведена криогенная обработка комплекта четырех валков турголовок ТЭСА 10-25 для трубы размерами 15×15 мм, предварительно закаленных и отпущенных по штатной технологии (рис. 5). Требуемая твердость валков – 60–62 HRC.

В рамках промышленного эксперимента проведены измерения твердости валков до и после криогенной обработки. Результаты измерений представлены в табл. 3. Помимо средних значений твердости по серии из десяти измерений определяли разброс твердости каждого валка (табл. 4).

В результате криогенного воздействия на материал валков турголовок наблюдается значи-



Рис. 5. Комплект валков турголовок ТЭСА 10-25

тельное повышение средних значений твердости на 2,875 ед. *HRC*. Заметные изменения в результате криогенной обработки произошли с разбросом значений твердости валков (см. табл. 4). В результате криогенного воздействия разброс твердости уменьшился в среднем в 3,4 раза, так как структура металла стала более равновесной. Это положительно отразилось на эксплуатационной стойкости валков турголовок.

Для оценки влияния криогенного упрочнения на эксплуатационную стойкость в производственных условиях ЦПП ПАО «Северсталь» на ТЭСА 10-25 было проведено опытно-производственное испытание обработанных валков турголовок из стали X12VMФ. Стойкость валков без криогенного упрочнения для труб данного сортамента обычно составляет 90 т до переточки. Стойкость упрочненных криогенной обработкой валков турголовок находилась на уровне производства 120 т труб. Таким образом, прирост эксплуатационной стойкости упрочненного инструмента составил 33,33%.

Получены положительные результаты эксперимента для валков, подвергнутых криогенной обработке в «недокаленном» состоянии, т.е. после закалки и низкого отпуска (табл. 5). После криогенной обработки твердость валков повысилась в

Таблица 3. Прирост твердости валков турголовок из стали X12VMФ в результате криогенной обработки

Номер валка	Среднее значение твердости, <i>HRC</i>		Прирост твердости после обработки, <i>HRC</i>
	до обработки	после обработки	
1	62,8	63,3	0,5
2	61,4	62,6	1,2
3	56,4	58,9	2,5
4	54,4	61,7	7,3
Среднее	58,75	61,625	2,875

среднем на 5 *HRC*, что обеспечило значительный рост их износостойкости. Такой эффект хорошо объясняется описанным выше механизмом криогенной обработки и связан, в первую очередь, с уменьшением доли остаточного аустенита в стали. Следует отметить, что повторяемости результатов по типу заготовки и толщине выдержать не удалось – на криообработанных валках трубу профилировали из х/к, г/к и травленной полосы; на обычных – только г/к полосы.

Также в ЦПП было проведено опытно-промышленное опробование валков калибратора и турголовок из стали X12VMФ для ТЭСА 10-38 и ТЭСА 25-60, подвергнутых криогенной обработке в НПЦ «КриоТехРесурс». После предварительной стандартной термообработки (закалка и средний отпуск) инструмент имел твердость 63–69 *HRC*. Установлено, что при таком уровне исходной твердости криогенная обработка не приводит к ее заметному повышению, хотя разброс значений твердости на каждом валке несколько снизился, что подтверждает повышение стабильности показателей качества инструмента. Износ валков, прошедших криогенную обработку, также заметно не отличался от износа обычных закаленных валков этой же партии в процессе эксплуатации.

Таблица 4. Уменьшение разброса твердости валков турголовок из стали X12VMФ в результате криогенного воздействия

Номер п/п	Среднее значение разброса твердости, %		Уменьшение разброса твердости после обработки
	до обработки	после обработки	
1	6	2	В 3 раза
2	12	2	В 6 раз
3	8	2	В 4 раза
4	7	5	В 0,7 раз
Среднее	8,25	2,75	В 3,4 раза

Таблица 5. Результаты производственных испытаний

Свойства роликов	Твердость, <i>HRC</i>	Износостойкость, тонн 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 травленной полосы.

Можно предположить, что недостаточная эффективность криогенной обработки в данном случае связана с применением после закалки отпуска при более высокой температуре. Повышение температуры отпуска приводит к распаду остаточного аустенита и уменьшению его доли в структуре стали, а также вызывает дисперсионное твердение вследствие выделения карбидов вольфрама и ванадия. При этом для криообработки были использованы валки со слишком высокой твердостью после закалки. Такой твердости соответствует минимальное содержание остаточного аустенита в поверхностной зоне – весь имеющийся аустенит уже превратился в мартенсит в процессе закалки и последующего отпуска. В результате ресурс для дальнейшего повышения твердости таких валков минимален. Можно считать, что обработка валков при температуре жидкого азота для данных условий нецелесообразна.

Заключение. Таким образом, криогенная обработка представляется перспективным для отечественной металлургии методом термической обработки таких видов инструмента, в структуре металла которых после закалки может содержаться значительное количество остаточного аустенита. Криогенная обработка инструмента, применяемого в прокатном производстве, способна существенно увеличить его эксплуатационный ресурс, в частности, профилегибочных валков, вплоть до 1,5–2,0 раз и тем самым обеспечить снижение издержек производства.

Следует отметить, что вопрос применения криогенной обработки для повышения стойкости профилегибочных валков в условиях отечественных предприятий изучен недостаточно глубоко. Несмотря на очевидный потенциал этого направления, в России исследования в этой области практически не проводились. В связи с этим необходимо дальнейшее изучение этой проблемы

применительно к широкому диапазону инструментальных сталей для холодного деформирования.

Исследования проводили в рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства по теме: «Разработка и освоение наукоемкой технологии производства хладостойкого и коррозионностойкого проката для изготовления прямошовных газонефтепроводных труб в рамках инфраструктурного развития ТЭК РФ с целью импортозамещения» (Постановление Правительства РФ № 218 от 09.04.10, договор № 02.G25.31.0141).

Библиографический список

1. **Ионов С.М., Осадчий С.В.** Разработка калибровок валков для производства гнутых профилей проката под управлением современных графических операционных систем: Сб. тр. науч.-техн. конф. «Теория и технология процессов пластической деформации» (8–10 октября 1996 г.). М.: МИСиС, 1996. С. 287–290.
2. **Колобов А.В., Барабанцев Г.Е., Тюляпин А.Н. и др.** Анализ износа технологического инструмента при производстве электросварных прямошовных труб на трубоэлектросварочных агрегатах // Черная металлургия: Бюл. НТИЭИ. 2003. № 10. С. 53–56.
3. **Любарский И.М., Палатник Л.С.** Металлофизика трения. М.: Металлургия, 1976. 176 с.
4. **Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г.** Специальные стали. Учеб. для вузов. М.: Металлургия, 1985. 408 с.
5. **Das D., Sarkar R., Dutta A.K., Ray K.K.** Influence of sub-zero treatments on fracture toughness of AISI D2 steel // Materials Science and Engineering. 2010. Vol. A 528. P. 589–603.
6. **Das D., Dutta A.K., Ray K.K.** Influence of varied cryotreatment on the wear behavior of AISI D2 steel // Wear. 2009. Vol. 266. P. 297–309.
7. **Das D., Dutta A.K., Ray K.K.** Optimization of the duration of cryogenic processing to maximize wear resistance of AISI D2 steel // Cryogenics. 2009. Vol. 49. P. 176–184.

USE OF CRYOGENIC TREATMENT TO IMPROVE WEAR RESISTANCE OF PROFILE-BENDING ROLLS

© **Kolobov A.V., Sominin M.A., Plekhanov S.V., Tikhonov S.M., Ionov S.M., Kiselev D.A., Kondratenkov M.S., Danilov I.A., Kokorin N.A.**

Influence of cryogenic treatment on GOST X12BMΦ tool steel and application possibilities of the treatment of rolls for roll-forming mills have been analyzed. The impact of cryogenic treatment on characteristics of AISI D2 steel, which has chemical composition similar to GOST X12BMΦ, has been examined. Dependence of retained austenite volume, secondary carbides distribution, mechanical parameters as well as wear resistance of the steel from cryogenic treatment application in terms of "Severstal" workshop have been studied. Preliminary benefit of rolls for the electric-weld pipe mills cryogenic treatment has been assessed.

Keywords: tool steel; cryogenic treatment; wear resistance; retained austenite.