

## КРИОГЕННАЯ ОБРАБОТКА – ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Текст:

Николай Кокорин, к.т.н.,  
директор по науке и развитию  
ООО «НГПЦ «КриоТехРесурс»,  
(г. Ижевск).

Криогенная обработка – инновационная технология повышения ресурса изделий, работающих на износ, мало известна специалистам горнодобывающей промышленности, хотя первые положительные результаты были получены 80 лет назад советскими учеными. Криогенная обработка является одним из видов термической обработки металлических материалов.

Диапазон криогенных температур от 0 до минус 272 °С связан с полиморфными превращениями в обрабатываемом материале. С понижением температуры большинство материалов становится более прочным и износостойким, наблюдается увеличение их временного сопротивления и твердости. При температуре минус 196 °С (температура кипения жидкого азота) временное сопротивление разрыву большинства металлов в 2–5 раз больше, чем при комнатной температуре; прочность некоторых пластмасс увеличивается до 8 раз; стекла – в 12 раз. При температуре минус 269 °С предел прочности меди больше в 2 раза, чем при комнатной температуре, а алюминия – в 4 раза [1].

Уменьшение пластичности и повышение твердости при криогенных температурах позволяют повысить эффективность лезвийной обработки ряда материалов. В результате криогенного воздействия на металлорежущий инструмент улучшаются его режущие свойства и повышается его стойкость [2]. Применение криогенных температур при термической обработке металлов позволяет стабилизировать размеры прецизионных деталей и получать требуемую структуру.

Криогенная обработка является эффективным средством стабилизации и повышения твердости, снижения коэффициента трения при сухом трении и трении в условиях смазки. Экстремальную износостойкость обеспечивает криогенная обработка изделий с металлическим покрытием. Криогенная обработка твердосплавных пластин и сверл позволяет уменьшить коэффициент трения, что ведет к снижению сил резания. Увеличение плотности дислокаций в карбидной составляющей отражается на изме-

нении физико-механических и режущих свойств твердых сплавов, ведет к повышению производительности резания и двукратному повышению стойкости в результате криогенной обработки (КО).

Объемное криогенное упрочнение повышает износостойкость коронок и производительность бурения, за счет изменений тонкой кристаллической структуры и пластической деформации кобальтовой или иной связки твердосплавных резцов и стержней породоразрушающего инструмента. Уменьшить аварийность и повысить ресурс горнодобывающей техники, работающей в условиях абразивного износа при низких температурах можно КО.

### Для северных районов

В связи с освоением Сибири и Крайнего Севера особую актуальность приобретают вопросы хладостойкости техники. Более половины территории России расположено севернее изотермы января с температурой минус 20 °С. Такие районы, как Сибирь, Заполярье, Якутия, Дальний Восток, шельф Северного Ледовитого океана, характеризуются большими запасами полезных ископаемых и перспективны в промышленном отношении.

Эффективность работы оборудования и транспортных машин в зимнее время в этих районах резко снижается. Анализ работы автохозяйств зоны с суровыми климатическими условиями показал, что срок службы автомобилей в этой зоне по сравнению с европейской частью России сокращается в 2 раза, а аварии и отказы, связанные с климатическими условиями, выводят из строя до 25% парка машин. Поток отказов (по сравнению с летним периодом) деталей тракторов и бульдозеров увеличивается в зимнее время в 2 – 6 раз, деталей экс-

каваторов – в 5-7 раз. Особенно опасным является период пуска машин в работу после остановки [3].

На промыслах Сибири частота отказов буровых установок зимой возрастает по сравнению с летним периодом более, чем в 2 раза. При температурах ниже минус 35 °С во избежание крупных поломок приходится останавливать мощные экскаваторы, буровые установки, дорожные и строительные машины, хотя регламентом работы северных горнодобывающих предприятий предусмотрена круглогодичная эксплуатация.

Основной поток отказов по износу падает на детали из литых сталей, подвергающиеся контакту с горными породами. По данным ИФТПС СО РАН, при сроке списания 10 лет фактический срок службы узлов экскаватора ЭКГ-8И составляет для траков 2 года, для ковша – 1,5 года. Стойкость зубьев ковша в зависимости от категории грунта и климатических условий колеблется от 3 суток до 6 месяцев [3].

Низкая стойкость в зимнее время наблюдается как у отечественных экскаваторов, так и у экскаваторов зарубежного производства. Отказы зубьев составляют до 50% отказов всех элементов механических систем экскаваторов, причем в холодный период эксплуатации число отказов возрастает в 2-3 раза. Снижение работоспособности обусловлено не только усилением склонности металла рабочих частей к хрупкому разрушению, но и увеличением действующих нагрузок из-за смерзания грунтов.

Неудовлетворительная стойкость литых деталей при низких температурах приводит к простоям техники и большим экономическим потерям. Так масса зуба экскаватора ЭКГ-10 составляет 0,3% от массы всей машины, а затраты на их приобретение – 25-30% годовой стоимости запасных



стей к этой машине. Потери усугубляются при повышении единичной мощности машин, при которых увеличивается нагрузка на рабочие органы, стоимость простоя.

Работа с некачественными рабочими органами может привести к нарушению технологического процесса, техники безопасности выполнения работ. Все эти факторы мешают достижению основной цели горнодобывающей техники – повышению эффективности и производительности труда.

### Нагрузки на элементы техники и их износ

Самым распространенным видом изнашивания рабочего оборудования является абразивный износ. Проведенные исследования механизма абразивного изнашивания износостойких сталей с различной прочностью, применяемых в горнодобывающей технике, показали, что при испытаниях наблюдаются те же известные механизмы повреждения рабочей поверхности при неравномерном износе: упругое отщеснение, пластическое отщеснение и выкрашивание. Наиболее часто встречающимся механизмом является микроплавление, которое сопровождается первоначальным внедрением абразивных частиц породы в металл, а при дальнейшем перемещении происходит микрорезание. В случае, если частице не удается внедриться в металл на достаточную глубину, основным видом повреждений становится пластический сдвиг (отщеснение) – образование углублений волн на поверхности трения в направлении скольжения при взаимодействии твердых частиц. Не редкое образование выдавленных канавок последующим деформированием поверхностных слоев и отделением частиц металла происходит в результате отслаивания или выкрашивания. При увеличении твердости металла наблюдается переход от микрорезания к пластическому отщеснению. Такая смена механизма объясняется разрывом в металл с повышенной и стабильной твердостью поверхности. Любой вид изнашивания связан хрупкостью материала, так как происходит многократное нагружение рабочей поверхности и как следствие локальная деформация в зоне контакта. Таким образом, одним из

путей повышения износостойкости горнодобывающей техники является получение высокой и стабильной твердости рабочих поверхностей и усталостной прочности.

В отечественной практике наиболее изнашиваемые детали, в том числе зубья ковша, изготавливают из стали 110Г13Л, которая имеет механические свойства не ниже следующих:  $\sigma_{\geq 400}$  МПа;  $\sigma_{\geq 800}$  МПа;  $\delta_{\geq 25}\%$ ;  $\psi_{\geq 35}\%$ ;  $KCV_{-60} \geq 70$  Дж/см<sup>2</sup>;  $HV_{\geq 190}$ . Данная сталь относится к аустенитному классу, хорошо наклепывается при высоких удельных давлениях и ударных нагрузках. Твердость наклепанной стали может достигать 50-54 HRC, хотя большинство данных свидетельствует о недостаточной износо- и хладостойкости рабочего оборудования горнодобывающей техники, изготовленного из стали 110Г13Л. Существует мнение, что сталь Гадфильда и все современные её модификации являются экологически опасными при выплавке и сварке плавлением, когда содержание оксида марганца в воздухе более, чем в 4 раза, превышает предельно допустимые нормы [3].

Для карьерных экскаваторов типа ЭКГ основным параметром, определяющим нагрузки на рабочий орган, является наибольшее усилие на подвеске ковша, которое в зависимости от типа экскаватора колеблется от 500 кН (ЭКГ-5) до 2000 кН (ЭКГ-20). Расчетами установлено, что напряжения, создаваемые на поверхности зуба, в момент касания зубьями породы не превышают 30% от величины предела текучести стали 110Г13Л ( $\sigma_{\geq 400}$  МПа). Такой величины нагрузки не достаточно для существенного увеличения твердости за счет наклепа зубьев из стали 110Г13Л. А при таких условиях эксплуатации и уровне нагрузок износостойкость стали 110Г13Л практически не отличается от износостойкости обычных углеродистых сталей. Поэтому повышение износостойкости зубьев ковшей экскаватора должно быть достигнуто на заводе-изготовителе за счет увеличения твердости и усталостной прочности конструктивными и технологическими средствами.

Заводы-изготовители горнодобывающей техники уделяют недостаточно внимания технологическим средствам повышения хладо- и износостойкости. Ограничивая решение

вопроса конструктивными средствами, а именно выбором хладостойкого материала деталей.

### Технологии повышения износостойкости

Технологическими средствами повышения износостойкости являются упрочнение термической обработкой и наклеп поверхностных слоев. Способы упрочнения наклепом основаны на получении поверхностных сжимающих напряжений за счет неоднородной упруго-пластической деформации в зоне контакта детали и рабочего тела (дробь). Обработка дробью используется в литейных цехах для удаления окалина и для увеличения твердости поверхности. При соударении дроби с поверхностью детали образуется наклепанный слой глубиной до 0,8 мм. Упрочняющая обработка дробью приводит к повышению износостойкости в период приработки, сопротивлению усталости на 15-70%.

Для улучшения механических свойств, особенно износостойкости, детали из стали 110Г13Л подвергают упрочняющей термообработке: закалке, последующему отпуску и КО. Структура стали после литья состоит из аустенита и избыточных карбидов, выделяющихся по границам зерен, что снижает прочность и вязкость стали. Для повышения вязкости литые изделия подвергают закалке с охлаждением в воде или на воздухе. При нагреве от 1100 °С карбиды марганца переходят в твердый раствор, а при быстром охлаждении они не успевают выделиться, и структура стали становится гомогенной аустенитной, без карбидов. Твердость стали после закалки не превышает 200 HV, но в процессе отпуска при 300-600 °С, благодаря превращению аустенита в мартенсит, твердость увеличивается и при 450 °С достигает максимальной – 400 HV. Если операции закалки и отпуска хорошо изучены, то влияние криогенной обработки изучено недостаточно и в основном рекомендовано применять её для изделий, эксплуатируемых при низких температурах, в том числе в условиях арктических широт Сибири, Заполярья, Якутии, Дальнего Востока, шельфа Северного Ледовитого океана.

Если при изготовлении однократно охладить изделие до температуры ниже температуры эксплуатации,



Таблица 1 – Химический состав исследуемого образца стали 110Г13Л

№ п/п	Элемент	Фактическое содержание, %	Содержание элементов по ГОСТ 2167-77	Содержание элементов по ГОСТ 7370-2015
1	C	0,901	0,90-1,40	1,0-1,3
2	Si	1,107	0,80-1,00	0,3-0,9
3	Mn	10,228	11,5-15,0	11,5-16,5
4	P	0,068	< 0,012	< 0,090
5	S	0,011	< 0,005	< 0,020
6	Cu	0,177	< 0,30	-
7	Al	0,069	-	-
8	Cr	0,766	< 1,00	-
9	Mo	0,134	-	-
10	Ni	0,171	< 1,00	-
11	V	0,077	-	-
12	Ti	0,014	-	-
13	Nb	0,014	-	-
14	W	0,189	-	-
15	Fe	86,07	Ост.	Ост.



Рис. 1 Криогенная камера модели КП-0,8

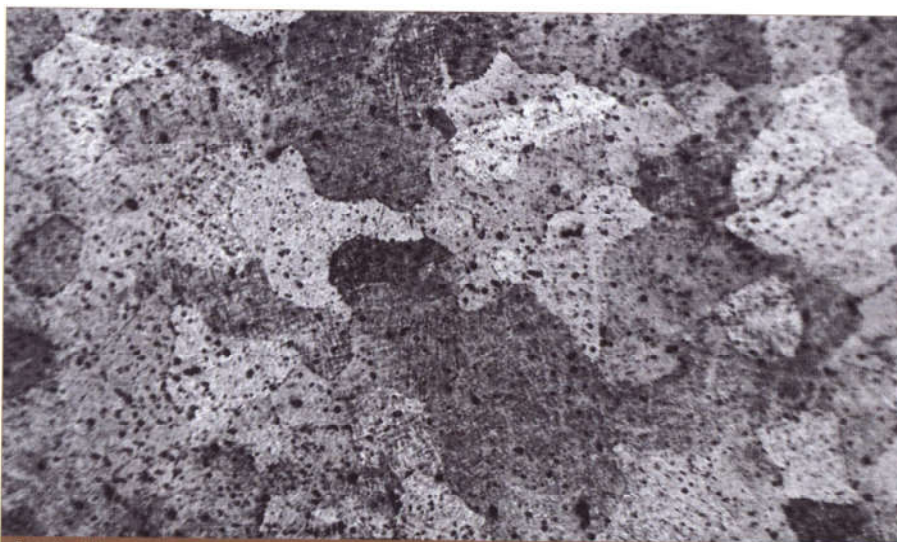


Рис. 3 – Микроструктура стали 110Г13Л (x20)

то в материале ускорятся процессы распада метастабильных фаз и изменятся поля остаточных напряжений, а при повторном эксплуатационном охлаждении структурно-фазовые изменения нейтрализуются. А при этом стабилизируется и повышается твердость и растет износостойкость. Повышается надежность и ресурс изделий.

Проведено комплексное исследование влияния дополнительной КО на абразивную износостойкость термически обработанных зубьев ковша экскаватора из стали 110Г13Л. На исследование представлен брусок из стали 110Г13Л. Химический состав исследуемого образца определяли на эмиссионном оптическом спектрометре «Belec Compact Port». Результаты приведены в таблице 1.

Фактический химический состав стали 110Г13Л по основным элементам соответствует ГОСТу 2167-77 [4], дополнительно обнаружено присутствие в небольших количествах карбидообразующих элементов, таких как молибден, ванадий, титан, ниобий и вольфрам. Широкие пределы концентраций углерода и марганца в стали при прочих равных условиях не гарантируют постоянства свойств однотипных деталей одного и того же назначения. Для деталей, работающих при абразивном изнашивании с небольшими ударными нагрузками, рекомендуют соотношение  $Mn/C < 10$ , а при высоких ударных нагрузках и многократном циклическом нагружении это соотношение должно быть более 12 [5]. В данном случае соотношение  $Mn/C = 11,3$ .

Дальнейшие исследования образцов проводились в сравнении исходного состояния стали 110Г13Л и после криогенной упрочняющей обработки. Криогенная обработка образцов проводилась с использованием опытного образца криогенной камеры модели КП-0,8 (рис. 1).

Проведен металлографический анализ структуры поперечного сечения исследуемых образцов с использованием оптического микроскопа «Неофот-32». Фотографии микроструктуры стали 110Г13Л до и после КО представлены на рисунке 2. Структура стали 110Г13Л в обоих случаях состоит из крупнозернистого аустенита с внутризерненным выделением мелкодисперсных карбидов. После КО в отдельных зернах наблюдается выделение предположительно цементита игольчатой формы.



Средний размер зерна для стали 110Г13Л до и после КО составляет около 400 мкм, о чем свидетельствует микроструктура этой стали при небольшом увеличении (рис. 3).

Проведённое исследование фазового состава на рентгеновском дифрактометре «D2 Phaser Theta» показало, что фазовый состав мартенситной аустенитной стали марки 110Г13Л в исходном состоянии состоит из  $\gamma$  — фазы состава  $Fe_{0,94}C_{0,06}$ ;  $\alpha'$  — 1-фазы состава  $CrFe_7C_{0,45}$ ; карбидов цементитного типа  $(Fe,Cr)_3C$ ,  $(Fe,Mn)_3C$ ; легированных специальных карбидов  $(Fe,Cr)_{23}C_6$  и  $(Fe,Cr)_7C_3$  в очень малых количествах. На дифрактограмме присутствуют также слабые линии на углах  $2\theta = 39,9^\circ$ ,  $45,1^\circ$  и  $49,7^\circ$  от кремнистого железа  $FeSi$ . Согласно данным химического анализа, в стали 110Г13Л присутствуют малые добавки карбидообразующих элементов, которые должны образовывать дисперсные карбиды, например углерода в стали достаточно для образования связей. Карбиды наблюдаются на уровне погрешности измерений и представлены фазами:  $NbC$ ;  $W_2C$ ;  $VC$  и  $WC_{1-x}$ ;  $V_4C_{2,66}$  на угле  $2\theta=43,55^\circ$ ;  $Cr_7C_3$  — на  $2\theta=38,9^\circ$ . Карбида титана не обнаружено.

Фазовый состав исследуемой стали после КО аналогичен исходному состоянию. Отличие состоит в меньшей интенсивности всех дифракционных пиков и в некотором смещении их в сторону меньших углов  $2\theta$ .

Измерение микротвердости поверхностных слоев исследуемых образцов до и после криогенной обработки проводили на микротвердометре ПМТ-3М по ГОСТ 9450-76 при нагрузке 0,981 Н (100 гс). Результаты измерений представлены в таблице 2. Для стали 110Г13Л наблюдается повышение микротвердости после КО. Для получения информации с более глубоких слоёв металла дополнительно была определена твердость образцов по методу Роквелла (ГОСТ 9013-59) при нагрузках 588,4 Н (шкала А) и 1471 Н (шкала С) на приборе ТР5006. Результаты измерений показывают стабильное повышение твердости в центре образца на единицу по шкалам HRA и HRC для стали 110Г13Л в результате криогенного воздействия.

Обобщая полученные результаты исследования твердости, следует отметить, что в стали 110 Г13Л в результате КО наблюдается упрочнение как поверхностных слоев, так и в центре.

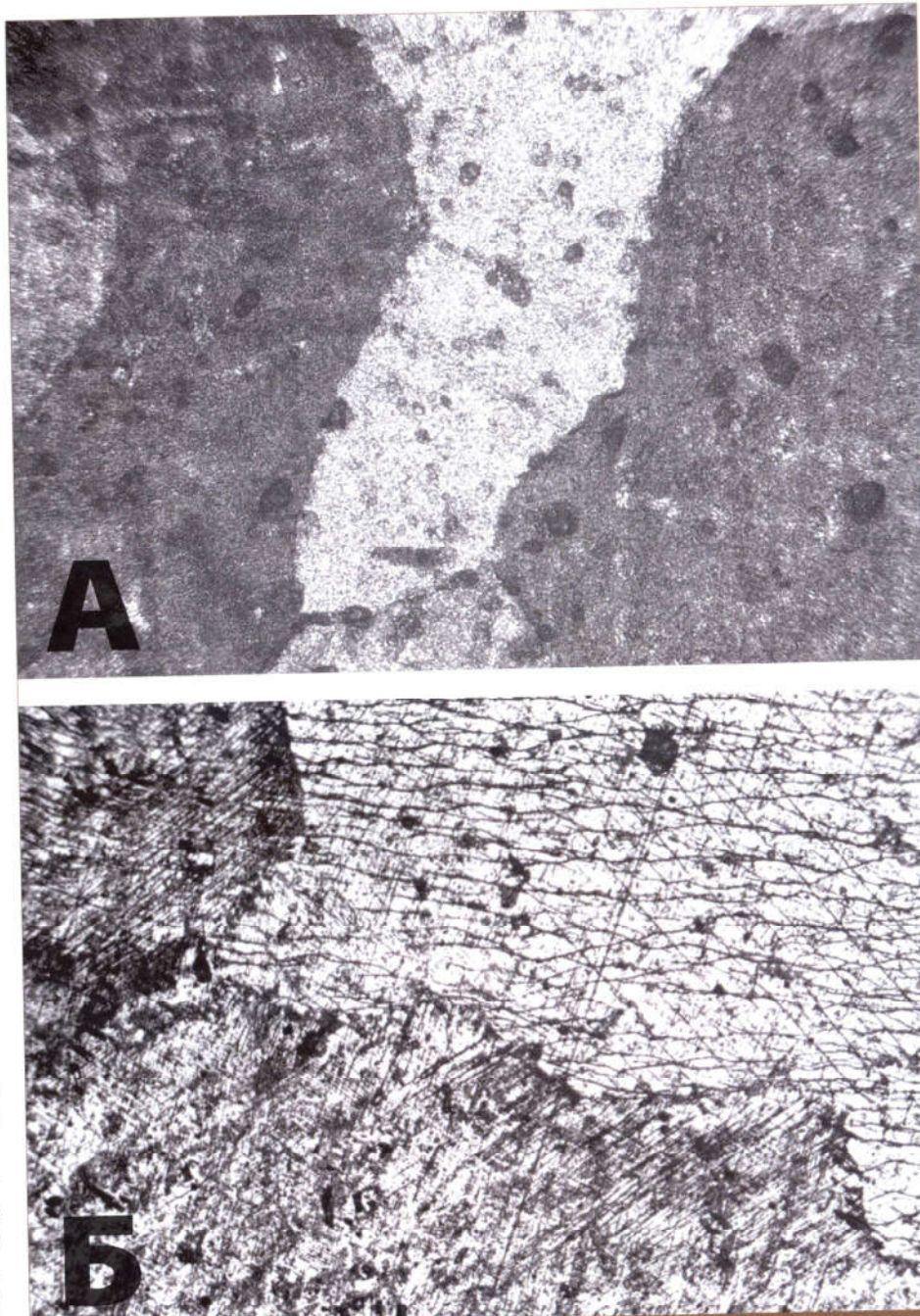


Рис. 2 – Микроструктура стали 110Г13Л до (а) и после (б) КО (x100)

Таблица 2 – Микротвердость стали 110Г13Л при нагрузке 0,981 Н

№ п/п	Расстояние от центра, мм	Микротвердость, HV		Прирост микротвердости, HV
		исходное состояние	после КО	
1	0,5	572	774	202
2	1,5	572	774	202
3	2,5	572	724	152
4	3,5	572	624	52
5	4,5	572	724	152
6	5,5	572	624	52
7	6,5	572	724	152
8	7,5	572	724	152
9	8,5	572	724	152
10	9,5	572	774	202
11	среднее	572	734	162



Повышение твердости и микротвердости после КО этой стали предположительно связано с микроструктурными изменениями, с выделением карбидов и образованием напряжений в зерне металла в процессе охлаждения до криогенных температур.

Для изучения влияния КО на абразивную износостойкость ста-

ли 110Г13Л образцы подвергали изнашиванию по свежему следу по закрепленному абразиву по стандартной схеме палец – диск [6]. Основными параметрами испытаний являются: сила нагружения образца  $N=4Н$ ; скорость перемещения  $F=500$  мм/мин; путь трения  $L=415$  мм. Варьируемый параметр – зернистость

абразива (электрокорунда) Р400 и Р240. Размерный (линейный) износ определялся с точностью 0,001 мм микрометром цифровым типа МКЦ-25-0,001. Результаты испытаний на абразивный износ представлены в таблице 3.

Испытаниями установлено, что заметное влияние на абразивную износостойкость аустенитной стали 110Г13Л оказывает КО. Следует отметить, что во всех экспериментах зафиксировано достаточно выраженное увеличение износостойкости после криогенной обработки, так в условиях крупного (Р240) абразивного зерна почти на 20% и в условиях мелкого (Р400) абразива почти на 30%.

В результате комплексного исследования образцов из стали 110Г13Л установлено повышение поверхностной микротвердости в среднем на 162 единицы НV, увеличение твердости сердцевины, структурное изменение за счет выделения цементита игольчатой формы, повышение абразивной износостойкости в среднем на 25% в результате КО.

В рамках проведения совместной НИР ООО «НПЦ «КриоТехРесурс» с АО «Сухоложский литейно-механический завод» (г. Сухой Лог, Свердловская обл.) проводилась КО комплекта зубьев ковша экскаватора ЭКТ-5А из высокомарганцевистой стали аустенитного класса 110Г13Л. Упрочненные КО зубья ковша экскаватора (рис. 4) прошли опытно-промышленные испытания в условиях Открытого рудника ПАО «Гайский ГОК». Упрочненные зубья ковша экскаватора имели твердость, представленную в таблице 4, отработали 26 суток и подверглись естественному износу до предельно допустимых размеров. При испытаниях не выявлено следов опережающего износа какого-либо зуба из установленного комплекта, не выявлено следов деформаций, трещин и сколов.

По результатам опытно-промышленных испытаний комплекта зубьев ковша экскаватора отгружено 28000 м<sup>3</sup> породы объемом весом 2,5 т/м<sup>3</sup>. Для сравнения комплектом зубьев ковша экскаватора без криогенного упрочнения в среднем отгружают 20519 м<sup>3</sup> породы на данном руднике. Упрочненные КО зубья ковша экскаватора прошли испытания и показали повышение абразивной износостойкости на 26,7%.

Оценивая положительные результаты проведенных исследований влияния КО на абразивную износ-

Таблица 3 - Результаты испытаний на линейный износ образцов из стали 110Г13Л

№ п/п	Зернистость	Номер серии испытаний	Износ, мм		Повышение износостойкости, %
			до КО	после КО	
1	Р400	1	0,029	0,020	31,0
2		2	0,030	0,021	30,0
3		3	0,029	0,021	27,5
4		среднее	0,0293	0,0206	29,7
5	Р240	1	0,046	0,037	19,6
6		2	0,046	0,037	19,6
7		3	0,046	0,037	19,6
8		среднее	0,046	0,037	19,6

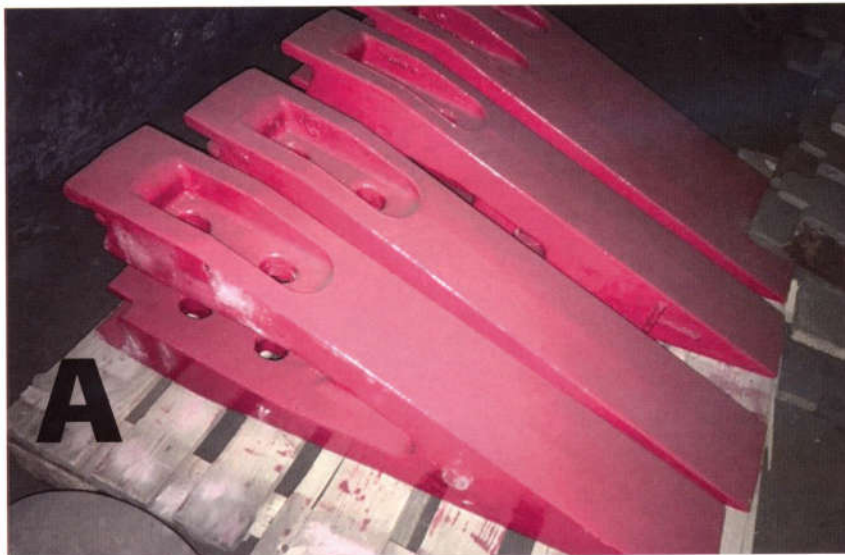


Рис. 4 – Упрочненные криогенной обработкой зубья ковша экскаватора до (а) и после (б) эксплуатационных испытаний



Таблица 4 - Влияние КО на твердость зубьев ковша экскаватора из стали 110Г13Л

№ п/п	Наименование показателя	Состояние образца		Изменение показателя
		исходное	после КО	
1	Твердость, HB	415,14	430,06	+ 14,92
2	Разброс твердости, %	41,8	32,0	- 9,8

стойкость стали 110Г13Л, можно с оптимизмом предложить увеличить срок службы крестовин железнодорожных стрелочных переводов, щек камнедробилок, корпусов вихревых и шаровых мельниц, траков гусеничных машин, мелющих шаров и других деталей, изготавливаемых для переработки высоко абразивного минерального сырья из сталей.

В горнодобывающей технике широко применяются литые детали из серого перлитного чугуна, благодаря высоким литейным качествам, относительно низкой температуре плавления, хорошей жидкотекучести, малой усадке при кристаллизации, а также невысокой стоимости. В сравнении со сталью чугун обладает более высокой прочностью, пластичностью, ударной вязкостью, более высокими демпфирующими свойствами, меньшей чувствительностью к надразам и эффектам механической обработки, более значительной износостойкостью [7].

Проведено комплексное исследование влияния криогенной обработки на структуру, твердость и абразивную износостойкость серого чугуна разных производителей. В результате криогенного воздействия наблюдается прирост абразивной износостойкости на всех исследуемых чугунах, как при истирании в условиях мелкозернистого, так и в условиях крупнозернистого абразива. Прирост абразивной износостойкости составил от 10% до 73% по параметрам линейного (размерного) износа. Установлено, что повышение абразивной износостойкости серого чугуна объясняется произошедшими структурно-фазовыми изменениями в исследуемом материале в результате криогенного воздействия.

Испытания на абразивный износ образцов из серого чугуна в исходном состоянии показали, что разность значений износа при крупном и мелком размере абразивного материала составляет 10%, а в упрочненном криогенной обработкой состоянии разность составила 5%. Разность значений износа в зависимости от размеров абразивного материала

в результате криогенной обработки уменьшилась вдвое. Таким образом, установлено сближение значений износа упрочненного криогенной обработкой серого чугуна при испытании на крупном и мелком размере абразивного материала [7].

В ходе сравнительных эксплуатационных испытаний передних тормозных дисков из серого чугуна автомобиля «Газель» установлено увеличение ресурса дисков с криогенной обработкой в среднем с 70 000 до 120 000 километров пробега.

В заключение следует отметить, что в результате проведенных исследований по оценке влияния криогенного воздействия на абразивную износостойкость стальных и чугунных литых деталей горнодобывающей техники установлено повышение поверхностной микротвердости, увеличение твердости сердцевин, благоприятные структурные изменения, повышение абразивной износостойкости при лабораторных и опытно-промышленных испытаниях в результате КО.

Охлаждение хладостойких стальных и чугунных деталей требует достижения более низких температур, чем при эксплуатации. Обычное холодильное оборудование оказывается недостаточным и требует создания современных специальных высокопроизводительных охлаждающих камер. Выбор метода охлаждения оказывает существенное значение на размеры, конфигурацию и производительность оборудования, используемого для охлаждения чугуна и стали. 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 (рис. 1) наиболее полно используют производственное пространство и представляют собой экономичное решение для охлаждения крупных деталей. Загрузочное окно такой камеры расположено сверху, что позволяет использовать цеховые механизмы для загрузки и выгрузки обрабатываемых деталей.

В результате выполнения НИОКР разработан и сертифицирован модельный ряд энергоэффективных камер криогенной обработки чугунных и стальных изделий 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 зарубежными камерами. Конструкция камеры защищена патентом на полезную модель РФ [8].

#### Список литературы

1. Кокорин Н.А. Термическая обработка при криогенных температурах // РИТМ машиностроения. 2018. № 2. С. 24-28.
2. Кокорин Н.А. Криогенное упрочнение – гарантия оптимизации инструмента // РИТМ машиностроения. 2018. № 4. С. 80-84.
3. Сердитов А.Е. Рациональные хладостойкие стали для горнодобывающей техники и технология их производства. Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Санкт-Петербург, 2007, 20 с.
4. Марочник сталей и сплавов. Под ред. В.Г. Сорокина. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.
5. ГОСТ 7370-2015 Крестовины железнодорожные. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2015, с. 128.
6. Тарасов В.В., Данилов И.А., Кокорин Н.А. и др. Исследование абразивной износостойкости серого чугуна с криогенным упрочнением. // В сборнике Механика и физико-химия гетерогенных сред, наносистем и новых материалов. - Ижевск: Изд-во УрО РАН, 2015. - С 190-198.
7. Данилов И.А., Кокорин Н.А., Кондратенков М.С. Повышение абразивной износостойкости серого чугуна криогенным воздействием // Литейное производство. 2015. №12. С. 7-10.
8. Кондратенков М.С. Камера криогенной обработки чугунных или стальных изделий // Патент на полезную модель РФ №162822. 2016, Бюл. №18. ДТ