

СОДЕРЖАНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ	4
1	КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	6
1.1.	Сплавы на основе магния (МА2-1, МА15, МА20, МЛ5, МЛ5-1, МЛ5-2)	6
1.2.	Сплавы на основе алюминия (Д1, Д16, В95, АЛ8, АЛ23, АЛ27, АЛ2, АЛ4, АЛ9, АЛ32, АЛ34, САС1-400)	7
1.3.	Сплавы на основе титана (ВТ1-0, ВТ5, ОТ4, ВТ3-1, ВТ5Л, ВТ6, ВТ14, ВТ20, ВТ22)	8
2	КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ	8
2.1	Углеродистые конструкционные стали (45, 50)	8
2.2	Легированные конструкционные стали	9
2.2.1	Конструкционные низколегированные стали (14Г2, 17ГС, 15ХСНД, 10Г2ФБЮ)	9
2.2.2	Конструкционные цементуемые стали (15, 20, 20Х, 18ХГТ, 20ХГНМР, 12ХНЗА, 12Х2Н4А, 18Х2Н4ВА)	9
2.2.3	Конструкционные (машиностроительные) улучшаемые стали (30ХГСА, 35ХН2Ф, 38ХМА, 40Х, 45ХН2МФ)	11
2.2.4	Рессорно-пружинные стали (65, 65Г, 60С2ХФА)	13
2.2.5	Шарикоподшипниковые стали (ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ)	14
2.2.6	Износостойкие (аустенитные) стали (110Г13, 110Г13Л)	16
3	НЕРЖАВЕЮЩИЕ СТАЛИ	16
3.1	Хромистые нержавеющие стали (20Х13, 30Х13, 40Х13, 50Х14МФ, 95Х18)	16
3.2	Хромоникелевые нержавеющие стали (12Х18Н9, 08Х18Н10Т, 09Х15Н8Ю, 07Х16Н6, 08Х17Н5М3, 13Х15Н4АМ3-Ш)	18
4	ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ	19
4.1	Углеродистые и легированные стали для инструментов (У8, У10А, У12, 11Х, 13Х, Х, 8ХФ, 9ХС, ХВСГ, ХВГ, Х6Ф1, Х12, Х12Ф1, Х12МФ, Х12ВМФ, 3Х3М3Ф, 4Х5МФС, 5ХВ2С, 5ХН2Ф, 6ХВ2С)	19
4.2	Быстрорежущие стали (Р9, Р18, Р6М5, Р9К10, Р9М4К8, Р18К5Ф2, Р12Ф2К8М3)	21
5	ЧУГУНЫ (СЧ 10 – СЧ 15, ВЧ40, ТПХН-60)	24
6	ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИЕ ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ (ВК6, ВК8, ВКС, Т15К10, МС146, МС221)	27
	Список литературы	30

ВВЕДЕНИЕ

Улучшение эксплуатационных свойств металлопродукции является важнейшей задачей повышения конкурентоспособности, импортозамещения, обуславливающей технический прогресс в металлургии, машино-, приборо- и аппаратостроении, а также в ряде других отраслей техники.

В связи с этим особую актуальность приобретает изучение основных средств воздействия на свойства металлов и их сплавов – их легирования, термической и криогенной обработки. Легирование и термическая обработка освещены в большом числе литературных источников. Литературы по криогенному воздействию, в особенности с последними достижениями, почти нет. Источников по криогенному воздействию для заводских работников, молодых инженеров, магистров, бакалавров и практиков-термистов нет, хотя именно этот читатель нуждается в серьёзных апробированных на практике рекомендациях в отношении способов повышения качества и ресурса изделий.

Международной академией холода принято называть температурный интервал от минус 153°С до минус 272°С – криогенным. Термин «криогенное воздействие» точно отражает температурный диапазон полиморфных преобразований в материале и относит его к термической обработке. В результате криогенного воздействия изменяется структурно-фазовый состав, физические, механические, технологические и эксплуатационные свойства материала.

Криогенная обработка (КО) возможна на начальной стадии процесса изготовления (до закалки) металлопродукции, например для повышения обрабатываемости. После термической обработки (закалки) – для повышения механических и эксплуатационных характеристик изделий, и после окончательной термической операции (отпуска) с целью упрочнения.

Процесс криогенной обработки понятийно не связан с тепловыми процессами закалки или отпуска, но в комбинациях с ними будет классифицироваться комплексной термической обработкой. Пока не предложено отдельного термина такой комплексной термической обработке, как например «улучшение» (закалка плюс высокий отпуск).

При первом знакомстве с технологией криогенной обработки отдельные практики ошибочно относят её к химико-термической обработке. В процессе криогенной обработки металл длительное время находится в среде жидкого или газообразного азота при отрицательных температурах, где диффузионного насыщения поверхностного слоя азотом не происходит.

Криогенная обработка не является окончательной операцией термообработки. Для снижения температурных напряжений, вызванных закалкой и криогенной обработкой, и получения требуемых механических свойств стали детали подвергают после криогенной обработки старению или отпуску.













Режимы криогенного воздействия определяются в отдельных случаях температурным интервалом условий эксплуатации, а для сталей, титановых сплавов, сплавов с эффектом памяти критическими точками начала и окончания мартенситного превращения.

В большинстве случаев криогенная обработка проводится однократно и не нуждается в повторении, поскольку свойства материала, приобретенные в результате комплексной термической обработки, сохраняются в течение длительного времени эксплуатации.

Хотя криогенная обработка относится к объёмным методам упрочнения, но также эффективно её применение после поверхностных методов термического упрочнения, таких как цементация, нитроцементация, поверхностная закалка токами высокой частоты, лазерная обработка, наплавка, нанесение износостойких покрытий. Сердцевина обрабо-

ванных по такой технологии изделий должна обладать высокой прочностью при повышенной вязкости, а поверхность – хорошо сопротивляться воздействию внешней среды.

Для удобства восприятия материала в конце каждой главы справочника приводятся условные обозначения в виде инфографики, отображающие эффекты применения криогенного воздействия для конкретной группы материалов:

-  повышение, обеспечение однородной, с более узким разбросом, твердости
-  повышение износостойкости конструкционных материалов и стойкости инструмента
-  стабилизация точных размеров и формы деталей в процессе изготовления, хранения и эксплуатации
-  повышение ресурса наиболее нагруженных деталей, агрегатов, машин
-  снижение количества остаточного аустенита в структуре материала
-  повышение прочности конструкционных материалов
-  повышение циклической прочности цапг, пружин, упругих элементов и крепежных изделий
-  повышение производительности горнодобывающего, металлообрабатывающего, деревообрабатывающего инструмента
-  повышение устойчивости конструкционных материалов против коррозии
-  снижение коэффициента трения в результате упрочнения
-  формирование в поверхностных слоях остаточных напряжений сжатия
-  устранение дефектов и сокращения цикла термообработки

1. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

1.1 Сплавы на основе магния

(МА2-1, МА15, МА20, МЛ5, МЛ5-1, МЛ5-2)

Сплавы на основе магния хорошо свариваются и обрабатываются резанием, удовлетворительно работают при криогенных температурах. Магний при криогенных температурах имеет незначительное снижение пластичности.

В приборостроении магниевые сплавы используются для корпусов и деталей оптической аппаратуры. Для уменьшения коробления габаритных и малогабаритных деталей с допусками по 5 - 8 квалитетам из магниевых сплавов перед окончательной механической обработкой проводят термоциклическую обработку (ТЦО) с криогенным воздействием. Режимы ТЦО приведены в таблице 1. Схемы ТЦО с криогенным воздействием цветных сплавов приведены на рис.1.

Режимы ТЦО с криогенным воздействием магниевых сплавов [2]

Таблица 1

Параметры ТЦО	Марка материала	
	МА2-1, МА15, МА20	МЛ5, МЛ5-1, МЛ5-2
Нижняя температура цикла, °С	- 50 / - 190	- 50 / - 190
Верхняя температура цикла, °С	+ 270 ⁻²⁰	+ 190 ⁻²⁰
Время выдержки, час	1 - 2	1 - 2
Количество циклов	3	3

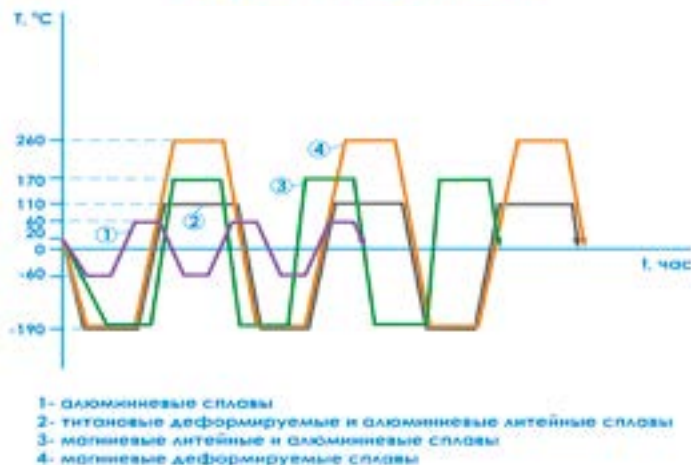


Рис. 1 Схемы ТЦО с криогенным воздействием деталей из цветных сплавов

1.2 Сплавы на основе алюминия

(Д1, Д16, В95, АЛ8, АЛ23, АЛ27, АЛ2, АЛ4, АЛ9, АЛ32, АЛ34, САС1-400)

Дуралюмины Д1 и Д16 удовлетворительно обрабатываются резанием в закаленном и состаренном состоянии и хорошо свариваются точечной сваркой, но неудовлетворительно обрабатываются давлением. Для обеспечения удовлетворительной обработки резанием дуралюмины после закалки охлаждают и выдерживают при криогенных температурах для торможения старения и сохранения пластичности. Далее охлажденные полуфабрикаты удовлетворительно обрабатываются давлением и подвергаются естественному старению для упрочнения. Сплав Д16 применяют для изготовления деталей и элементов конструкций средней и повышенной прочности, требующих долговечности при переменных нагрузках (обшивка, шпангоуты, стрингеры и лонжероны самолетов).

Влияние криогенной обработки на твердость сплава В95 приведено в таблице 2. В результате криогенной обработки ускоряется процесс старения высокопрочных сплавов. Криогенную обработку целесообразно применять для стабилизации размеров габаритных и малогабаритных деталей с допусками по 5 - 8 квалитетам из высокопрочных алюминиевых сплавов перед окончательной механической обработкой.

Влияние криогенной обработки на твердость сплава В95

Таблица 2

Наименование показателя	Состояние сплава В95			Изменение показателя
	закалка	закалка + старение	после криогенной обработки	
Твердость средняя, НВ	692,4	-	678,7	- 13,7
Разброс твердости, НВ	16	-	5,2	- 11,8
Твердость средняя, НВ	-	663	680,6	17,6
Разброс твердости, НВ	-	5	6,5	1,5

Литейные алюминиевые сплавы АЛ2, АЛ4, АЛ9, АЛ 32, АЛ34 и высокопрочные литейные сплавы АЛ8, АЛ23, АЛ27, а также спеченный алюминиевый сплав САС1-400 подвергают термоциклической обработке с криогенным воздействием для стабилизации размеров габаритных и малогабаритных деталей с допусками по 5 - 8 квалитетам перед окончательной механической обработкой. Режимы ТЦО алюминиевых сплавов приведены в таблице 3.

Режимы ТЦО с криогенным воздействием алюминиевых сплавов [2]

Таблица 3

Параметры ТЦО	Марка материала			
	АЛ2, АЛ4, АЛ9, АЛ34	АЛ8, АЛ23, АЛ27	АЛ 32	САС1-400
Нижняя температура цикла, °С	- 50 / - 190	- 60 ⁻¹⁰	- 50 / - 190	- 50 / - 190
Верхняя температура цикла, °С	+ 125 ⁻²⁵	+ 60 ⁻¹⁰	+ 110 ⁻¹⁰	+ 60 ⁻⁵
Время выдержки, час	1 - 2	1 - 2	1 - 2	1 - 2
Количество циклов	3	3	3	3



1.3 Сплавы на основе титана

(ВТ1-0, ВТ5, ОТ4, ВТ3-1, ВТ5Л, ВТ6, ВТ14, ВТ20, ВТ22)

Титан обладает высокой прочностью и удельной прочностью в условиях глубокого холода, сохраняя при этом достаточную пластичность.

Криогенная обработка деформируемых и литейных титановых сплавов применяется для стабилизации размеров габаритных деталей с допусками по 5 – 8 квалитетам. Термоциклическая обработка с криогенным воздействием проводится до окончательной механической обработки для сплавов ВТ1-0, ВТ5, ОТ4, ВТ5Л, ВТ6, ВТ14, ВТ20, ВТ22, а для сплавов ВТ3-1, ВТ6С, ВТ14 после окончательной механической обработки. Режимы ТЦО титановых сплавов приведены в таблице 4.

Режимы ТЦО с криогенным воздействием алюминиевых сплавов [2]

Таблица 4

Параметры термоциклирования	Марка материала
	ВТ1-0, ВТ5, ОТ4, ВТ3-1, ВТ5Л, ВТ6, ВТ14, ВТ20, ВТ22
Нижняя температура цикла, °С	- 50 / - 190
Верхняя температура цикла, °С	+ 110 ⁻¹⁰
Время выдержки, час	1 - 2
Количество циклов	3



2 КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ

2.1 Углеродистые конструкционные стали

(45, 50)

Качественные машиностроительные углеродистые стали применяют для изготовления мелких деталей, упрочняемых закалкой с последующим высоким отпуском (550°С). Они имеют суженные пределы по содержанию углерода. Криогенная обработка применяется с целью предотвращения необходимости отжига и повторной закалки, связанных с обезуглероживанием, повышением опасности возникновения трещин (исправления дефектов термообработки) [3].

В результате криогенного воздействия на материал деталей испытательной оснастки (сталь 45) наблюдается повышение средних значений твердости на 2,45 HRC. Заметные изменения в результате криогенной обработки произошли с разбросом значений твердости оснастки (таблица 5).

Влияние криогенной обработки на твердость стали 45

Таблица 5

Наименование показателя	Состояние стали 45		Изменение показателя
	до криогенной обработки	после криогенной обработки	
Твердость средняя, HRC	61,5	63,95	2,45
Разброс твердости, HRC	3,4	2,0	- 1,4

В результате криогенного воздействия на материал деталей испытательной оснастки (сталь 45) установлено повышение абразивной износостойкости на 60%.



2.2 Легированные конструкционные стали

2.2.1 Конструкционные низколегированные стали

(14Г2, 17ГС, 15ХСНД, 10Г2ФБЮ)

Данные стали применяют при температурном диапазоне от – 70°С до + 450°С. Такие стали хорошо свариваются и не образуют при сварке холодных и горячих трещин. Поставляются после закалки и отпуска, что повышает их прочность и понижает порог хладноломкости и склонность к старению. Криогенная обработка позволяет перераспределить внутренние напряжения и предотвратить нежелательные структурные превращения при эксплуатации в условиях Крайнего Севера.

В результате криогенного воздействия наблюдается незначительное повышение твердости и снижение разброса твердости (таблица 6).

Влияние криогенной обработки на твердость стали 10Г2ФБЮ

Таблица 6

Наименование показателя	Состояние стали 10Г2ФБЮ		Изменение показателя
	до криогенной обработки	после криогенной обработки	
Твердость средняя, HRC	19,0	20,45	1,4
Разброс твердости, HRC	11,4	8,5	- 2,9

При испытаниях на абразивный износ зафиксировано достаточно выраженное увеличение износостойкости после криогенного воздействия стали 10Г2ФБЮ. В среднем повышение износостойкости достигает 16% при весовом износе и более 18% при линейном износе.



2.2.2 Конструкционные цементуемые стали

(10, 20, 20Х, 18ХГТ, 20ХГНМР, 12ХНЗА, 12Х2Н4А, 18Х2Н4ВА)

В цементованном слое после закалки применяют обработку холодом для стабилизации размеров с допусками по 5 – 11 квалитету, снижения количества остаточного аустенита в поверхностном слое, что повышает твердость, сопротивление износу и предел усталости.

В нитроцементованных деталях из стали 10 в результате криогенного воздействия повышается абразивная износостойкость на 41%.

Влияние криогенной обработки на изменение твердости цементованной стали 20 показано в таблице 7. Абразивная износостойкость цементованной стали 20 повышается на 22% в результате криогенного воздействия.

Влияние криогенной обработки на твердость цементованной стали 20

Таблица 7

Наименование показателя	Состояние стали 20		Изменение показателя
	до криогенной обработки	после криогенной обработки	
Твердость средняя, HRC	43,4	46,1	2,7
Разброс твердости, HRC	3,5	1,8	- 1,7

Нитроцементованная сталь 20X в результате криогенной обработки имеет абразивную износостойкость на 36% выше исходного состояния.

Влияние криогенной обработки на количество остаточного аустенита, твердость и величину разрушающей нагрузки при статическом изгибе цементованных образцов из стали 12X2H4A приведено в таблице 8.

Влияние криогенной обработки на количество остаточного аустенита, твердость и величину разрушающей нагрузки при статическом изгибе цементованных образцов стали 12X2H4A. Глубина цементации 1,5 мм [3]

Таблица 8

Наименование показателя	Состояние стали 12X2H4A		Изменение показателя
	до криогенной обработки	после криогенной обработки	
Содержание аустенита, %	15	2	- 13
Твердость средняя, HRC	56,5	62,0	5,5
Разброс твердости, HRC	1	0	- 1,0
Разрушающая нагрузка, Н	144 400	157 000	12 600 (9%)

Влияние криогенного воздействия на предел усталости цементованной стали 18XНВА приведено в таблице 9.

Влияние криогенной обработки на предел усталости и твердость цементованной стали 18XНВА (цементация на глубину 1,2 мм) [3]

Таблица 9

Наименование показателя	Состояние стали 18XНВА		Изменение показателя
	до криогенной обработки	после криогенной обработки	
Твердость средняя, HRC	58,1	64,2	6,1
Предел усталости, кг/мм ²	74	79	5 (7%)

При сравнительных испытаниях на износ пар трения в условиях смазки маслом бронзовой втулки и цементованного стального образца (18XНВА) без криогенного воздействия и с дополнительным криогенным воздействием установлено снижение коэффициента трения на 11% у пары трения с криогенной обработкой.

В таблице 10 приведены результаты сравнительных испытаний на износ цементованных образцов из трех марок сталей.

Влияние криогенной обработки на износ цементованных образцов [3]

Таблица 10

Марка стали	Износ образцов в 10 ⁻³ мм ³		Увеличение износостойкости, %
	до криогенной обработки	после криогенной обработки	
18XНМА	5,75	3,99	32
12X2H4A	3,85	2,38	38
18XНВА	2,47	2,19	11

Абразивная износостойкость цементованной стали 20XГНМР в результате криогенного воздействия повысилась на 52%. Изменение твердости в результате криогенной обработки цементованной стали 20XГНМР показано в таблице 11.

Влияние криогенной обработки на твердость цементованной стали 20XГНМР

Таблица 11

Наименование показателя	Состояние стали 20XГНМР		Изменение показателя
	до криогенной обработки	после криогенной обработки	
Твердость средняя, НВ	580	590	10
Разброс твердости, НВ	23,2	11,8	- 11,4



2.2.3 Конструкционные (машиностроительные) улучшаемые стали (30XГСА, 35XН2Ф, 38XМА, 40X, 45X2H4МФ)

Из стали 30XГСА изготавливают ресурсный крепеж (шпильки, болты) группы прочности 10.9, который должен выдерживать не менее 200 тысяч циклов нагружения. В результате криогенного упрочнения ресурс крепежа достиг 375 тысяч циклов. При этом в результате криогенной обработки твердость шпилек повысилась с 39 до 42 единиц HRC.

Сталь 35XН2Ф применяется в основном для изготовления крупных ответственных изделий (валы, червяки, цилиндры, прошивки). В результате криогенной обработки повышается твердость (таблица 12) и абразивная износостойкость на 36%.

Влияние криогенной обработки на твердость стали 35ХН2Ф

Таблица 12

Наименование показателя	Состояние стали 35ХН2Ф		Изменение показателя
	до криогенной обработки	после криогенной обработки	
Твердость средняя, HRC	58,0	59,7	1,7
Разброс твердости, HRC	8,0	3,6	- 4,4

Влияние криогенной обработки стали 38ХМА на твердость показано в таблице 13. При сравнительных испытаниях на износ пар трения в условиях сухого трения в режиме фреттингизнашивания установлено снижение коэффициента трения на 50% в результате криогенной обработки образцов из улучшенной стали 38ХМА по стали ШХ15. При этом установлено повышение износостойкости на 11% образцов с криогенным упрочнением.

Влияние криогенной обработки на твердость стали 38ХМА

Таблица 13

Наименование показателя	Состояние стали 38ХМА		Изменение показателя
	до криогенной обработки	после криогенной обработки	
Твердость средняя, HRC	40,0	46,0	6,0
Разброс твердости, HRC	5,6	4,6	- 1,0

В таблице 14 приведены механические свойства хромистой конструкционной стали 40Х до и после криогенной обработки.

Механические свойства стали 40Х после криогенной обработки

Таблица 14

Режим термообработки	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности $\sigma_{\text{в}}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость КСЧ, кДж/м ²
Штатная термообработка + криогенная обработка (минус 196°С) + отпуск (150-160 °С) на воздухе	360	600	23	65	10
Штатная термообработка	290	600	22	64	10

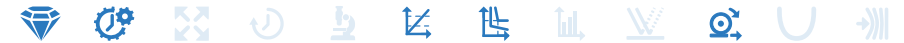
Из таблицы 14 видно, что ударная вязкость образцов до и после криогенной обработки не изменилась. Образцы, обработанные дополнительно криогенной обработкой, имеют условный предел текучести на 20% выше, чем образцы, обработанные по штатной технологии. Более высокие значения предела текучести позволяют реализовать мероприятия по уменьшению сечения и массы детали.

Влияние криогенной обработки стали 45Х2Н4МФ на твердость показано в таблице 15. При сравнительных испытаниях на абразивный износ установлено повышение износостойкости на 46% образцов с криогенным упрочнением.

Влияние криогенной обработки на твердость стали 45Х2Н4МФ

Таблица 15

Наименование показателя	Состояние стали 45Х2Н4МФ		Изменение показателя
	до криогенной обработки	после криогенной обработки	
Твердость средняя, HRC	59,4	62,0	2,6
Разброс твердости, HRC	2,4	1,0	- 1,4



2.2.4 Рессорно-пружинные стали (65, 65Г, 60С2ХФА)

Рессорно-пружинные стали общего назначения должны обладать высоким сопротивлением малым пластическим деформациям и пределом выносливости. А также иметь повышенную релаксационную стойкость. Срок службы деталей, работающих при циклических нагрузках, может быть повышен криогенной обработкой, создающей в поверхностных слоях остаточные напряжения сжатия.

Влияние криогенного упрочнения на циклическую прочность пружин из стали 65 приведено в таблице 16.

Влияние криогенной обработки на циклическую прочность пружин

Таблица 16

Марка стали	Число циклов до разрушения		Увеличение циклической прочности, %
	без криогенной обработки	после криогенной обработки	
65	120 000	270 000	225

Рессорно-пружинные стали применяют для изготовления деталей, работающих на износ (дорожная и сельскохозяйственная техника). При испытаниях на абразивный износ установлено повышение износостойкости стали 65Г в результате криогенного упрочнения на 63%. Результаты исследования количества остаточного аустенита и твердости стали 65Г до и после криогенной обработки показаны в таблице 17.

Влияние криогенной обработки на количество остаточного аустенита и твердость стали 65Г

Таблица 17

Наименование показателя	Состояние стали 65Г		Изменение показателя
	до криогенной обработки	после криогенной обработки	
Содержание аустенита, %	10	5	- 5
Твердость средняя, HRC	60,5	61,0	0,5
Разброс твердости, HRC	3,1	1,6	- 1,5

Сталь 60С2ХФА является перспективной для пружин рессорного подвешивания большегрузных вагонов и обладает наилучшим сочетанием технологических и механических свойств. После термической обработки пружинная сталь должна содержать минимальное количество остаточного аустенита, так как он отличается более низким, чем мартенсит, пределом упругости. Его наличие снижает сопротивление умеренным и малым пластическим деформациям изделий.

По этой причине, а также из-за возможности превращения остаточного аустенита в мартенсит при нагружении и особенно при охлаждении до низких температур, сталь, содержащая в структуре аустенит, обладает пониженной релаксационной стойкостью и склонностью к замедленному разрушению, в результате чего происходит преждевременное разрушение пружин даже в условиях статического нагружения.

В связи с этим, чтобы уменьшить количество остаточного аустенита, в процессе термической обработки пружин используют все доступные методы, в частности рационально выбирают условия закалки – температуру и скорость нагрева, а также охлаждения.

Так как в процессе отпуска пружин остаточный аустенит может претерпевать превращение и это ведет к росту предела упругости. Продукты этого превращения характеризуются меньшим сопротивлением малым пластическим деформациям, чем продукты превращения мартенсита, полученные при охлаждении до температуры конца мартенситного превращения (M_s).

Температура конца мартенситного превращения стали 60С2ХФА находится в интервале от минус 50°С до минус 90°С в зависимости от содержания в стали углерода, марганца, никеля, хрома и молибдена. Данный интервал температур может быть достигнут охлаждением с использованием оборудования для криогенной обработки после закалки. Результаты влияния криогенной обработки на твердость и коэрцитивную силу стали 60С2ХФА приведены в таблице 18.

Влияние криогенной обработки на твердость и коэрцитивную силу стали 60С2ХФА

Таблица 18

Наименование показателя	Состояние стали 60С2ХФА		Изменение показателя
	до криогенной обработки	после криогенной обработки	
Коэрцитивная сила, А/см	55	56	1,0
Твердость средняя, HRC	47,5	49,0	1,5
Разброс твердости, HRC	4,8	2,3	- 2,5

2.2.5 Шарикоподшипниковые стали (ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ)

Стали для подшипников качения должны иметь высокую прочность, износостойкость и высокий предел выносливости. Не допускается неравномерное распределение

карбидов в сталях. Поэтому детали из шарикоподшипниковой стали обрабатывают холодом с целью уничтожения остаточного аустенита и предупреждения изменения размеров при работе, повышения твердости и износостойкости.

Результаты исследования влияния криогенного воздействия на структурные изменения и твердость приведены в таблице 19.

Влияние криогенной обработки на количество остаточного аустенита и твердость деталей из сталей ШХ9, ШХ15 и ШХ15СГ

Таблица 19

Сталь	Наименование показателя	Состояние детали		Изменение показателя
		закалка + отпуск	закалка + КО + отпуск	
ШХ9	Остаточный аустенит, %	27	4	- 23
	Твердость, HRC	59,4	62,1	+ 2,7
	Разброс твердости, HRC	4,8	4,5	- 0,3
ШХ15	Остаточный аустенит, %	28	4	- 24
	Твердость, HRC	59,8	64,0	+ 4,2
	Разброс твердости, HRC	6,5	2,4	- 4,1
ШХ15СГ	Остаточный аустенит, %	32	4	- 28
	Твердость, HRC	60,5	62,5	+ 2,0
	Разброс твердости, HRC	1,8	1,2	- 0,6
	Коэрцитивная сила, А/см	16,1	18,3	+ 2,2

Испытания показали повышение износостойкости стали ШХ9 на 26%, стали ШХ15 на 32%, а стали ШХ15СГ на 75% в результате криогенного упрочнения.

Шарикоподшипниковую сталь широко применяют для изготовления металлообрабатывающего инструмента, например вытяжных пуансонов. Криогенная обработка повысила эксплуатационную стойкость вытяжных пуансонов из стали ШХ15 на 15% [1].



2.2.6 Износостойкие (аустенитные) стали (110Г13, 110Г13Л)

Износостойкие аустенитные стали применяют для изготовления корпусов вихревых и шаровых мельниц, щек и конусов дробилок, зубьев ковшей экскаваторов, железнодорожных и трамвайных крестовин и других тяжело нагруженных деталей, работающих при высоких динамических нагрузках, от которых требуется высокая износостойкость. Криогенную упрочняющую обработку применяют для повышения абразивной износостойкости и ресурса тяжело нагруженных деталей.

Исследованиями установлено повышение абразивной износостойкости стали 110Г13Л на 24% в результате криогенного воздействия. Результаты изменения твердости стали 110Г13 в результате криогенной обработки показаны в таблице 20.

Влияние криогенной обработки на твердость зубьев ковша экскаватора из стали 110Г13Л

Таблица 20

Сталь	Наименование показателя	Состояние детали		Изменение показателя
		до криогенной обработки	после криогенной обработки	
110Г13	Твердость, HB	452,0	562,0	110
	Разброс твердости, HB	81,0	62,0	- 19
110Г13Л	Твердость, HB	415,14	430,06	14,92
	Разброс твердости, HB	174,0	138,0	- 36,0

По результатам опытно-промышленных испытаний комплекта зубьев ковша экскаватора, упроченного криогенной обработкой, отгружено 28 000 м³ породы объемным весом 2,5 т/м³. Для сравнения комплектом зубьев ковша экскаватора без криогенного упрочнения в среднем отгружают 20 519 м³ породы на данном руднике [4]. Таким образом, упрочненные криогенной обработкой зубья ковша экскаватора прошли испытания и показали повышение абразивной износостойкости на 26,7%.



3. НЕРЖАВЕЮЩИЕ СТАЛИ

3.1 Хромистые нержавеющие стали (20X13, 30X13, 40X13, 50X14МФ, 100X13М)

Хромистые нержавеющие стали мартенситного класса 20X13, 30X13 и 40X13 используют для изготовления хирургических инструментов, карбюраторных игл, куттерных ножей и других деталей. Для получения однородной структуры и стабильных размеров при механической обработке на данных сталях после закалки необходимо провести криогенную обработку (точка конца мартенситного превращения минус 55°C). После отпуска сталь сохраняет мартенситную структуру, высокую твердость и хорошую устойчивость против коррозии. Влияние криогенной обработки на твердость стали 40X13 показано в таблице 21.

Влияние криогенной обработки на твердость деталей из нержавеющей сталей

Таблица 21

Сталь	Наименование показателя	Состояние детали		Изменение показателя
		закалка + отпуск	закалка + криогенная обработка + отпуск	
30X13	Твердость, HRC	55	63	8,0
	Разброс твердости, HRC	5,6	3,8	- 1,8
40X13	Твердость, HRC	59,0	59,6	0,6
	Разброс твердости, HRC	4,2	2,3	- 1,9

Продолжение таблицы 21

50X14МФ	Твердость, HRC	58,4	61,9	3,5
	Разброс твердости, HRC	20	3,7	- 16,3
03X17H14M2	Твердость, HB	280,1	431,5	151,4
	Разброс твердости, HB	58	53	- 5
05X16H4Д2БА	Твердость, HRC	45,0	50,0	+ 5,0
	Разброс твердости, HRC	3,6	2,5	- 1,1
07X16H6	Твердость, HRC	33,6	48,7	15,1
	Разброс твердости, HRC	6,4	5,4	- 1,0
08X18H10Т	Твердость, HB	273,5	332,4	58,9
	Разброс твердости, HB	90	40	- 50
08X17H5M4ДАЛ	Твердость, HRC	39,6	44,4	4,8
	Разброс твердости, HRC	6,3	1,8	- 4,5
10X15H9C3Б1-III	Твердость, HRC	37,7	43,4	5,7
	Разброс твердости, HRC	2,6	2,6	0
95X18	Твердость, HRC	36,0	45,0	9,0
	Разброс твердости, HRC	11,0	6,3	- 4,7

Высокохромистые стали 95X18 и 90X18МФ относятся к мартенситному классу и используются для изготовления стоматологического хирургического инструмента, втулок, подшипников, промышленных ножей. После закалки в структуре стали 95X18 сохраняется от 17 до 30% остаточного аустенита. Криогенная обработка позволяет уменьшить количество остаточного аустенита, повысить прочность, твердость (таблица 22), сопротивление к истиранию и сохранить коррозионную стойкость, стабилизировать размеры.

Механические свойства стали 95X18 после криогенной обработки [3]

Таблица 22

Режим термообработки	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Ударная вязкость КСУ, кДж/м ²	Твердость, HRC
Закалка 1 000-1 050°C в масло + обработка холодом (минус 70-80°C) + отпуск (150-160°C)	1980 (1,04)	2300 (1,15)	63	59
Закалка в масло 1 000-1 050°C + отпуск при (150-300°C) + охлаждение на воздухе	1900	2000	196	56



3.2 Хромоникелевые нержавеющие стали

(12X18Н9, 08X18Н10Т, 09X15Н8Ю, 07X16Н6, 08X17Н5М3, 13X15Н4АМ3-Ш)

Хромоникелевые (аустенитные) стали 12X18Н9, 08X18Н10Т широко применяются в промышленности и обладают большим сопротивлением коррозии и хорошими технологическими свойствами: высокой пластичностью, большой вязкостью, хорошей свариваемостью. После закалки сталь приобретает наилучшую устойчивость против коррозии и высокую вязкость. Прочность стали повышается криогенной обработкой (повышается условный предел текучести до 23%).

Аустенито-мартенситные нержавеющие стали наряду с хорошей устойчивостью против атмосферной коррозии обладают высокими механическими свойствами. Такие стали, как 09X15Н8Ю, 07X16Н6, 08X17Н5М3 подвергают комплексной термической обработке, включающей: закалку с 980 - 1 020°C, при этом сталь получает аустенитную структуру, обладает достаточно высокой пластичностью и может быть подвергнута пластической деформации и обработке резанием; криогенную обработку для частичного (направленного) перевода аустенита (около 40%) в мартенсит; отпуск (старение) для заданного уровня механических свойств. При старении из мартенсита выделяются дисперсные частицы, соединения Ni₃Al, и сталь при таком упрочнении имеет высокие механические свойства. Механические свойства сталей 09X15Н8Ю, 07X16Н6, 08X17Н5М3 зависят от количества образовавшегося мартенсита, содержание которого регулируется температурой закалки и режимами криогенной обработки (таблица 23) [5, 6].

Механические свойства коррозионностойких сталей после термической обработки с криогенным воздействием [1]

Таблица 23

Сталь	Режим термообработки	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %	Ударная вязкость КСЧ, Дж/см ²
20X17Н2	Закалка 975-1 020°C в масло или воздух + отпуск 680-700°C	650	850	16	45
	Закалка в масло 1 000-1050°C + криогенная обработка + отпуск при 250-320°C	1200	1500	8	45
09X15Н8Ю	Закалка 980-1 020°C в воду или на воздухе + криогенная обработка + старение 400-480°C	900	1200	10	40
	Закалка 980-1 020°C в воду или на воздухе + криогенная обработка + старение 350-380°C	900	1100	12	70
	Закалка 980-1 020°C в воду или на воздухе + криогенная обработка + отпуск 200°C	700	950	18	100

Продолжение таблицы 23

07X16Н6	Закалка 980-1020°C в воду или на воздухе + криогенная обработка + старение 350-380°C	1000	1200	12	70
	Закалка 980-1020°C в воду или на воздухе + криогенная обработка + старение 400-450°C	1050	1250	10	50
	Закалка 980-1020°C в воду или на воздухе + криогенная обработка + отпуск 180-200°C	700	950	20	120
08X17Н5М3	Закалка 980-1020°C в воду или на воздухе + криогенная обработка + старение 350-380°C	850	1200	12	40

Разрыв между операциями закалки и криогенной обработки не должен превышать 12 часов. При упрочняющей криогенной обработке изделий из сталей 09X15Н8Ю, 07X16Н6 происходит увеличение их размеров по сравнению с закаленным состоянием на 0,3-0,5%.

Сталь 13X15Н4АМ3-Ш с параметрами прочности $\sigma_b = 1\ 400 - 1\ 600$ МПа применяется для изготовления высоконагруженных деталей и сварных узлов. Высокие параметры прочности этой стали обеспечиваются повышенным содержанием углерода и азота, а пластичность и вязкость – наличием в составе 15 – 20% равномерно распределенного аустенита. Термическая обработка стали включает закалку 1 070°C, обработку холодом (минус 70°C, 2 часа) и отпуск при 200°C или 350°C. При отпуске 200°C сталь имеет высокие значения вязкости разрушения, пластичности, сопротивления к концентраторам напряжений. Сталь используется для изготовления накаткой высоконагруженных болтов, работающих на срез и растяжение. Детали из этой стали становятся более прочными после обработки холодом. Снижение температуры при обработке холодом в область криогенных температур позволит дополнительно повысить циклическую прочность высокопрочного крепежа.



4. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ

4.1 Углеродистые и легированные стали для инструментов

(У8, У10А, У12, 11Х, 13Х, Х, 8ХФ, 9ХС, ХВСГ, ХВГ, Х6Ф1, Х12, Х12Ф1, Х12МФ, Х12ВМФ, 3Х3М3Ф, 4Х5МФС, 5ХВ2С, 5ХН2Ф, 6ХВ2С)

Углеродистые У8, У10А, У12 и легированные 11Х, 13Х, Х, 8ХФ, 9ХС, ХВСГ, ХВГ, Х6Ф1, Х12, Х12Ф1, Х12МФ, Х12ВМФ стали в обязательном порядке обрабатывают холодом для стабилизации размеров, повышения износостойкости и производительности инструментов.

Изменение твердости углеродистых и легированных инструментальных сталей в результате криогенного воздействия показано в таблице 24. Сравнительные испытания на абразивный износ инструментальных сталей, приведенные в таблице 21 до и после криогенного упрочнения, показали стабильное повышение износостойкости на 30 - 71 % в результате криогенной обработки.

Производительность резания инструментом из стали 9ХС с криогенным упрочнением превосходит производительность обработки метчиком без криогенного воздействия на 33% [7].

В цехах гнутых профилей при производстве электросварных труб используются агрегаты (ТЭСА), производительность которых ограничивается стойкостью валков турголовок. Износостойкость валков турголовок без криогенного упрочнения составила 90 тонн трубы. Стойкость упрочненных криогенной обработкой валков турголовки находится на уровне производства 120 тонн трубы. Прирост эксплуатационной стойкости упрочненного инструмента составил 33,33% [8].

Эксплуатационные испытания комплекта валков турголовок ТЭСА 10-25 для трубы 20x20мм из стали Х12МФ, упрочненных криогенной обработкой на Альметьевском трубном заводе, показали повышение износостойкости на 20–25 % [9].

Влияние криогенной обработки на твердость инструментальных сталей

Таблица 24

Сталь	Наименование показателя	Состояние детали		Изменение показателя
		закалка + отпуск	закалка + КО + отпуск	
У10	Содержание аустенита, %	12	5,5	- 6,5
	Твердость, HRC	62	63,5	1,5
	Разброс твердости, HRC	2,5	1,3	- 1,2
8ХФ	Твердость, HRC	52,7	53,2	0,5
	Разброс твердости, HRC	3,9	1,7	- 2,2
9ХС	Содержание аустенита, %	11	7	- 4,0
	Твердость, HRC	61,9	62,3	0,4
	Разброс твердости, HRC	0	0	0
ХВГ	Содержание аустенита, %	24	9	- 15
	Твердость, HRC	61,0	61,9	0,9
	Разброс твердости, HRC	5,5	3,4	- 2,1
Х6Ф1	Твердость, HRC	60,0	62,4	+ 2,4
	Разброс твердости, HRC	2,4	1,9	- 0,5
Х12	Твердость, HRC	61,4	61,9	0,5
	Разброс твердости, HRC	2,5	0	- 2,5

Продолжение таблицы 24

Х12Ф1	Твердость, HRC	61,0	62,0	1,0
	Разброс твердости, HRC	4,0	0,6	- 3,4
Х12МФ	Твердость, HRC	60,5	61,7	1,2
	Разброс твердости, HRC	3,0	1,8	- 1,2
Х12ВМФ	Твердость, HRC	61,5	62,0	0,5
	Разброс твердости, HRC	1,9	0,6	1,3
3Х3М3Ф	Твердость, HRC	57	58	1,0
	Разброс твердости, HRC	4	2,3	- 1,7
4Х5МФС	Твердость, HRC	54,5	56	1,5
	Разброс твердости, HRC	2,2	1,7	- 0,5
5ХВ2С	Твердость, HRC	61,1	61,2	0,1
	Разброс твердости, HRC	1,2	0,6	- 0,6
5ХН2Ф	Твердость, HRC	54,3	56,4	2,1
	Разброс твердости, HRC	3,8	2,3	- 1,5
6ХВ2С	Твердость, HRC	58,2	62	3,8
	Разброс твердости, HRC	5,2	0,3	- 4,9

Криогенная обработка колец внутренних прессы фирмы «Ateliers Roche» на Синарском трубном заводе в ходе эксплуатационных испытаний показала повышение стойкости колец на 21%. Отсутствие налипания исключает необходимость остановки прессы для замены и зачистки кольца, что повышает производительность процесса формоизменения на прессе [1, 9].



4.2 Быстрорежущие стали (P9, P18, P6M5, P9K10, P9M4K8, P18K5Ф2, P12Ф2K8M3)

Применение инструмента из быстрорежущих сталей позволяет повысить скорость резания (в 2 – 4 раза) и стойкость инструментов (в 10 – 30 раз) [10]. Криогенную обработку быстрорежущих сталей проводят в комбинации с различными видами закалки. Влияние криогенного воздействия на структуру и твердость стали P9, P18 показано в таблице 25 и 26 соответственно. В результате криогенной обработки повышается стойкость инструмента сталей P9 и P18 на 32 – 34%.

Влияние охлаждения на структуру и твердость стали P9 [11]

Таблица 25

Условия охлаждения при закалке	Содержание структурных составляющих, %				Твердость, HRC
	карбиды	аустенит	бейнит	мартенсит	
Закалка с непрерывным охлаждением в масле или на воздухе и ступенчатая закалка в расплавах селитры и щелочи или в расплавах солей	5	25 - 30	-	65 - 70	61 - 63
Закалка с непрерывным охлаждением в масле или на воздухе и ступенчатая закалка в расплавах селитры и щелочи или в расплавах солей + обработка холодом		10 - 15	-	80 - 85	63 - 66
Изотермическая закалка в расплаве селитры и щелочи		65 - 70	25 - 30	-	50 - 55
Изотермическая закалка в расплаве селитры и щелочи + обработка холодом		30 - 35	25 - 30	30 - 40	59 - 62

Влияние охлаждения на структуру и твердость стали P18 [11]

Таблица 26

Условия охлаждения при закалке	Содержание структурных составляющих, %			Твердость, HRC
	карбиды	аустенит	мартенсит	
Закалка с непрерывным охлаждением в масле или на воздухе и ступенчатая закалка в расплавах селитры и щелочи или в расплавах солей	13	25 - 30	57 - 62	62 - 64
Закалка с непрерывным охлаждением в масле или на воздухе и ступенчатая закалка в расплавах селитры и щелочи или в расплавах солей + обработка холодом		10 - 15	72 - 77	63 - 65

Схема закалки и отпуска крупного инструмента из быстрорежущей стали P6M5 приведена на рис. 2.

В результате криогенной обработки твердость быстрорежущей стали P6M5 повышается на 4–5 единицы HRC, а после однократного отпуска несколько понижается, однако инструмент после отпуска становится менее хрупким и получает более стабильные размеры. Во многих случаях криогенная обработка повышает производительность инструмента из быстрорежущей стали на 10–20%, так как переход остаточного аустенита в мартенсит при отрицательной температуре не сопровождается обеднением углеродом и частичным распадом основной мартенситной структуры, как это происходит по технологии с многократным отпуском [5].

Применение охлаждения до криогенных температур непосредственно после закалки приводит к сокращению продолжительности производственного цикла термической обработки инструмента из стали P6M5 и уменьшению расхода электроэнергии за счет сокращения количества и длительности операций отпуска и старения.

Сравнительные испытания на абразивный износ образцов из стали P6M5, обработанных по различным технологическим схемам, показали:

- износостойкость образцов с криогенной обработкой выше на 33% по сравнению с термообработанными образцами из стали P6M5;

- износостойкость образцов с PVD-покрытием выше на 63% по сравнению с термообработанными образцами и на 44% выше по сравнению с образцами, прошедшими криогенную обработку;

- износостойкость образцов с наибольшей добавленной стоимостью с PVD-покрытием и дополнительной криогенной обработкой (PVD+KO) выше на 32% относительно износостойкости образцов с PVD-покрытием и на 75% превышает износостойкость термообработанных образцов [7].

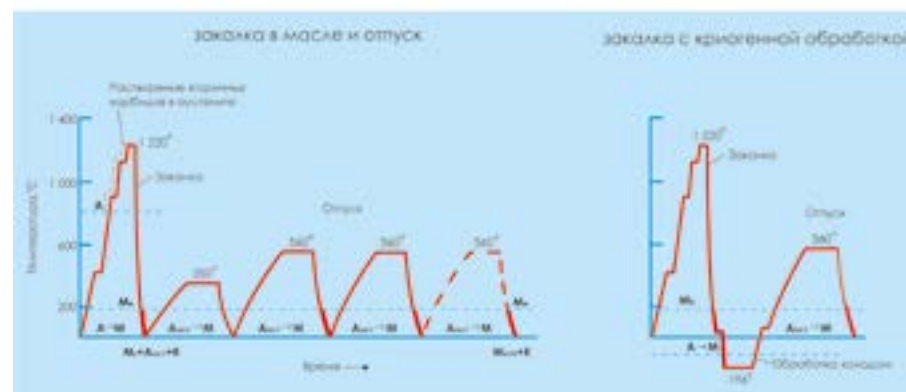


Рис. 2 - Схема закалки и отпуска крупного инструмента из стали P6M5 [5]

Высокопроизводительные быстрорежущие стали P9K10, P9M4K8, P18K5Ф2, P12Ф2K8M3 для резания трудно обрабатываемых титановых сплавов, нержавеющей, жаропрочных и высокопрочных сталей с повышенной твердостью до 50 единиц HRC отличаются повышенным содержанием кобальта. Криогенную обработку данных сталей применяют для стабилизации размеров таких инструментов, как червячные фрезы и протяжки.



5. ЧУГУНЫ

(СЧ 10 – СЧ 15, ВЧ40, ТПХН-60)

Оценка влияния глубокой криогенной обработки (минус 180°С) на износостойкость тормозных роторов из серого чугуна проведена учеными университета Шеффилда (Великобритания). Результаты показали улучшение износостойкости серого чугуна на 9,1 – 81,4% за счет глубокой криогенной обработки, при отсутствии значительных изменений твердости и микроструктуры материала [12].

Серый чугун имеет широкое применение при изготовлении деталей тормозной системы пассажирских и грузовых транспортных средств. Функциональная надежность дисковых и барабанных тормозов имеет критическое значение системы безопасности транспортных средств. Около 90% кинетической энергии транспортного средства поглощается тормозными дисками или барабанами в виде тепла, при этом барабаны и диски должны мгновенно рассеивать энергию в окружающую среду и иметь равномерный износ на протяжении всего срока эксплуатации. Поэтому вопросы повышения износостойкости тормозных дисков или барабанов технологическими методами являются актуальными.

Нами проведено комплексное исследование влияния криогенной обработки на структуру, твердость и абразивную износостойкость серого чугуна разных производителей. Для изготовления образцов взяты автомобильные тормозные диски из серого перлитного чугуна импортного и отечественного производства. Особенности микроструктуры исследуемых чугунов до и после криогенной обработки приведены на рис. 3.

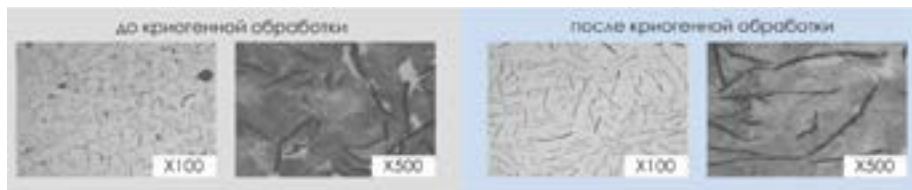


Рис. 3 – Микроструктура серого чугуна до и после криогенной обработки

Измерение твердости чугунов до и после криогенного воздействия по шкале Викерса приведено в таблице 27.

Прирост твердости серых чугунов в результате криогенной обработки

Таблица 27

№ п/п	Условное обозначение чугуна	Твердость средняя, HV		Прирост твердости, HV
		до криогенной обработки	после криогенной обработки	
1	A	219,8	222,4	2,6
2	B	182,1	184,5	2,4
3	C	237,0	239,8	2,8
4	D	206,3	218,1	11,8
5	среднее	211,3	216,2	4,9

Таким образом, твердость в результате криогенной обработки на трех исследуемых чугунах прироста незначительно, а у чугуна D прирост не превышает 5%.

Для изучения влияния криогенной обработки на абразивную износостойкость серого чугуна исследуемые образцы подвергались изнашиванию по закрепленному абразиву по стандартной схеме «палец – диск», но с заменой наиболее часто используемой траектории движения по архимедовой спирали на прямолинейные участки [13]. Результаты испытаний на абразивный износ представлены в таблицах 28 и 29.

В результате криогенного воздействия наблюдается прирост абразивной износостойкости на всех исследуемых чугунах, как при истирании в условиях мелкозернистого, так и в условиях крупнозернистого абразива. Наибольший прирост износостойкости в результате криогенной обработки имеет материал B, что составляет 52% при испытаниях в условиях мелкозернистого абразива и 36% при крупном абразивном зерне [14].

Повышение износостойкости исследуемых чугунов в результате криогенной обработки (зернистость P400)

Таблица 28

№ п/п	Условное обозначение чугуна	Износостойкость, грамм		Повышение износостойкости, грамм
		до криогенной обработки	после криогенной обработки	
1	A	0,00065	0,00030	0,00035
2	B	0,00095	0,00045	0,00050
3	C	0,00070	0,00065	0,00005
4	D	0,0017	0,0012	0,00050
5	среднее	0,00076	0,00046	0,00030

Повышение износостойкости исследуемых чугунов в результате криогенной обработки (зернистость P240)

Таблица 29

№ п/п	Условное обозначение чугуна	Износостойкость, грамм		Повышение износостойкости, грамм
		до криогенной обработки	после криогенной обработки	
1	A	0,00150	0,00110	0,00040
2	B	0,00190	0,00120	0,00070
3	C	0,00155	0,00147	0,00008
4	D	0,0019	0,0018	0,00050
5	среднее	0,00165	0,00125	0,00040

Уровень износа наименее износостойкого серого чугуна после криогенной обработки равен износу наилучшего по триботехническим свойствам чугуна без криогенной обработки. Криогенная обработка является эффективным средством повышения абразивной износостойкости серого чугуна.

Установлено, что повышение абразивной износостойкости серого чугуна объясняется произошедшими структурно-фазовыми изменениями в исследуемом материале в результате криогенного воздействия. На рис. 4 представлена зависимость влияния размера включений графита в структуре чугуна на абразивный износ. До криогенной обработки

исследуемые чугуны имели уровень износа, соответствующий размеру включений графита, равному 90 мкм. В результате криогенного воздействия на всех исследуемых чугунах размер включений графита вырос до 180 мкм. С увеличением размера включений графита износ исследуемых чугунов уменьшился (рис. 4).

Отдельно хочется обратить внимание на тот факт, что чугуны В, С и D имеют точку пересечения прямых износа (рис. 4), соответствующую размеру включений графита, примерно равному или большему 155-160 мкм. И примерно при этом уровне структурно-фазовых изменений в отечественных чугунах они становятся конкурентоспособными с зарубежным аналогом по критерию износостойкости.

Проведена криогенная обработка передних тормозных дисков автомобиля «Газель». При эксплуатации тормозных дисков из серого чугуна установлено, что ресурс в среднем увеличился в 1,7 раза, с 70 000 км до 120 000 км пробега автомобиля с упрочненными тормозными дисками.

Прирост износостойкости формующего барабана пельменного автомата из серого чугуна в результате криогенной обработки составит 43%.

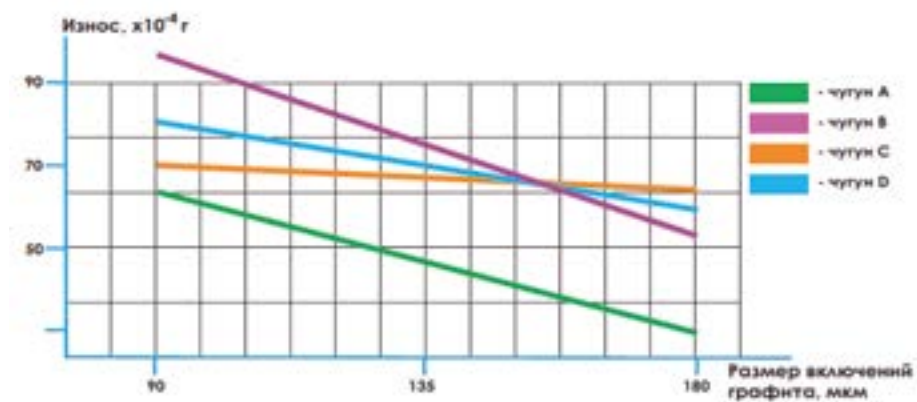


Рис. 4 – Влияние размера включений графита в структуре чугуна на абразивную износостойкость

Высокопрочный чугун получается присадкой в жидкий чугун магния или сплава магния и никеля в небольшом количестве. По содержанию остальных элементов высокопрочный чугун не отличается от серого чугуна. Под действием магния графит принимает шаровидную форму. Шаровидный графит значительно меньше ослабляет металлическую основу чугуна, поэтому он обладает наилучшим комплексом прочностных свойств и высокой пластичностью. Из высокопрочного чугуна изготавливают оборудование прокатных станов, кузнечно-прессового оборудования, коленчатые валы и другие ответственные детали, работающие при высоких циклических знакопеременных нагрузках и в условиях изнашивания. Для улучшения механических свойств и особенно износостойкости детали из высокопрочных чугунов подвергают упрочняющей криогенной обработке. В результате криогенной обработки повышается твердость и снижается разброс твердости (таблица 30).

Влияние криогенной обработки на твердость высокопрочного чугуна

Таблица 30

Наименование показателя	Состояние чугуна ВЧ40		Изменение показателя
	до криогенной обработки	после криогенной обработки	
Твердость средняя, HRC	40,8	42,5	1,7
Разброс твердости, HRC	11	7	- 4

Чугун марки ТПХН-60 применяют для изготовления валков для горячей прокатки металла в чистовых и черновых клетях крупносортовых, рельсобалочных и трубопрокатных станов. В результате криогенной обработки повышается твердость и снижается разброс твердости (таблица 31). В результате эксплуатационных испытаний трех валков редуцированного стана изготовленных из чугуна ТПХН-60 и упрочненных криогенной обработкой установлено превышение срока службы валков на 20%.

Влияние криогенной обработки на твердость чугуна ТПХН-60

Таблица 31

Наименование показателя	Состояние чугуна ТПХН-60		Изменение показателя
	до криогенной обработки	после криогенной обработки	
Твердость средняя, НВ	544	583	39
Разброс твердости, НВ	120	70	- 50



6. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИЕ ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ

(ВК6, ВК8, ВКС, Т15К10, МС146, МС221)

Титановольфрамовые и вольфрамовые сплавы изготавливаются в виде пластинок и стержней спеканием и используются в качестве металлообрабатывающего инструмента. Они обладают высокими показателями твердости (HRA 82 – 92) и износостойкости при температурах 800 – 1 000°C. Сплавы с повышенным содержанием кобальта имеют несколько пониженную твердость (HRA 88) и износостойкость, но обладают высокой эксплуатационной прочностью и сопротивляемостью ударам и вибрациям. С целью сохранения высокой эксплуатационной прочности и сопротивляемости ударам и вибрациям, повышения износостойкости (таблица 32) применяют криогенную обработку.

В производстве режущего инструмента из титановольфрамовых и вольфрамовых сплавов PVD-покрытия являются средством дополнительного повышения износостойкости за счет высокой твердости, низкого коэффициента трения, высокой химической устойчивости, повышения теплопроводности. Стойкость инструмента с PVD-покрытием повышается в 1,5-2 раза. Мониторинг ресурса упрочненных криогенной обработкой твердосплавных фрез с PVD-покрытием диаметром от 6 до 16 мм, используемых для обработки деталей с поверхностной твердостью до 50 единиц HRC, на протяжении нескольких лет, показал увеличение стойкости фрез от 25 до 30% [16].

Влияние криогенной обработки на износостойкость твердосплавного металлообрабатывающего инструмента [1]

Таблица 32

Марка сплава	Износ, мм				Относительный износ не обработанного к криогенно обработанному	
	до КО	после КО	до КО	после КО		
	основной	кратерный	основной	кратерный	основной	кратерный
T15K10	0,34	0,37	0,25	0,3	1,36	1,23
BK8	0,16	-	0,14	-	1,14	-
MC146	0,31	0,31	0,23	0,28	1,35	1,11
MC221	0,3	0,4	0,27	0,34	1,11	1,18

Криогенная обработка позволяет производить объемное упрочнение твердосплавного и алмазного породоразрушающего инструмента. При термической обработке в области низких отрицательных температур происходит изменение тонкой кристаллической структуры твердых сплавов и композиционных материалов за счет пластической деформации кобальтовой или иной связки в локальных областях по периметру включений (карбид вольфрама, карбид титана, алмазы, релит и др.) и имеет структурный характер. Это положительно сказывается на эксплуатационных характеристиках коронок с твердосплавными резцами (коронки типа «СА») (таблицы 33 и 34), коронок, армированных твердосплавными резцами, предназначенных для бурения скважин ударно-вращательным способом с использованием ударников и перфораторов (коронки типа «КГ», «ГПИ», «КП», «КДП» и др.), шарошечных долот с твердосплавными резцами, алмазного породоразрушающего инструмента.

Влияние криогенной обработки на износостойкость твердосплавных коронок СА [15]

Таблица 33

Категория горных пород	Диаметр коронок, мм	Углубка на коронку, м		Увеличение износостойкости, %
		до КО	после КО	
VI	93	7,01	9,84	40
VII	76	4,94	7,33	48
	93	5,94	8,32	40
VIII	76	2,64	3,64	54
	93	3,74	5,87	49
IX	76	1,20	2,05	71

Влияние криогенной обработки на производительность бурения твердосплавными коронками СА [15]

Таблица 34

Категория горных пород	Диаметр коронок, мм	Механическая скорость бурения, см / мин		Повышение производительности бурения, %
		до КО	после КО	
VI	93	3,6	4,5	25
VII	76	3,2	4,0	30
	93	2,9	3,8	30
VIII	76	2,0	2,8	40
	93	1,9	2,6	36
IX	76	1,4	2,1	50



Список литературы:

1. Кокорин Н.А. Термическая обработка при криогенных температурах / Кокорин Н.А.; ООО «НПЦ «КриоТехРесурс». – Ижевск : Шелест, 2019. – 136 с.: ил.
2. Кокорин Н.А. Стабилизация размеров и формы деталей криогенным воздействием // РИТМ машиностроения. № 1. 2020. С. 10 – 14.
3. Воробьев, В.Г. Термическая обработка стали при температуре ниже нуля. - М. : Оборонгиз, 1954. – 306 с.
4. Кокорин Н.А. Криогенная обработка – технологическое средство повышения ресурса горнодобывающего оборудования //Добывающая промышленность. 2018. №4. С. 112-117.
5. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов: учебник / Ю.М. Лахтин. - М.: Металлургия, 1979. - 320 с.
6. СТП 26.260.484-2004. «Термическая обработка коррозионностойких сталей и сплавов на железоникелевой основе в химическом машиностроении».
7. Кокорин Н.А. Криогенное упрочнение – гарантия оптимизации инструмента.// РИТМ машиностроения. №4. 2018. С. 80-84.
8. 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.
9. Михайлов Ю.О., Кокорин Н.А., Тарасов В.В., Князев С.Н., Трифонов И.С. Криогенное упрочнение для повышения эффективности технологий обработки инструмента из стали Х12МФ.//Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2017. №4, С. 23-25.
10. Строеие и свойства авиационных материалов: Учебник для вузов/ Белов А.Ф., Бенедиктова Г.П., Висков А.С. [и др.]. - М.: Металлургия, 1989. - 368 с.
11. Гуляев А.П. Инструментальные стали: Справочник / Гуляев А.П., Малинина К.А., Саверина С.М. - М.: Машиностроение, 1975. - 272 с.
12. R. Thornton, T. Slatter, A.H. Jones, R. Lewis, The effects of cryogenic processing on the wear resistance of grey cast iron brake discs. Wear 271 (2011) 2386-2395.
13. Тарасов В.В., Данилов И.А., Кокорин Н.А., Кондратенков М.С., Трифонов И.С. Исследование абразивной износостойкости серого чугуна с криогенным упрочнением.// Механика и физико-химия гетерогенных сред, наносистем и новых материалов. - Ижевск: ИМ УрО РАН, 2015. С. 190-198.
14. Данилов И.А., Кокорин Н.А., Кондратенков М.С. Повышение абразивной износостойкости чугуна криогенным воздействием //Литейное производство. №12. 2015. С 7-10.
15. Рябчиков С.Я. Повышение работоспособности породоразрушающего инструмента методами криогенной обработки и радиационного облучения / С.Я. Рябчиков, А.П. Мамонов, В.И. Власюк. – М. : Геоинформмарк, 2001. – 92 с.
16. Кокорин Н.А. Оптимизация инструмента криогенным воздействием. //Промышленные страницы Сибири. №10. 2019. С. 60-63.