

# АНАЛИЗ СХЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ И КОНСТРУКЦИЙ КАМЕР ДЛЯ КРИОГЕННОЙ ОБРАБОТКИ

ЭФФЕКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ РЯДА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗАДАЧ С ПОМОЩЬЮ ТЕРМООБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ДИКТУЕТ НЕОБХОДИМОСТЬ СОЗДАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ И УСТРОЙСТВ НА ИХ БАЗЕ.

Применение криогенных температур до минус 190°C при термической обработке металлов позволяет стабилизировать размеры прецизионных деталей, получать требуемую структуру материалов, повышать механические и эксплуатационные свойства деталей, в технологических процессах машиностроения и приборостроения — восстанавливать размеры стальных изношенных деталей, обеспечивать неподвижные посадки при сборке, придавать требуемую форму сплавов с эффектом памяти, проводить механическую обработку стальных, дуралюминиевых и резиновых деталей [1].

В отличие от многих отраслей промышленности, использующих охлаждение, например пищевой, химической, строительной и других, термическая обработка стали в большинстве случаев требует достижения более низких температур: минус 100 — минус 190°C. Применяемое холодильное оборудование оказывается недостаточным для этой цели, и термические, механические, и сборочные цеха машиностроительных и приборостроительных предприятий нуждаются в создании современных специальных высокопроизводительных охлаждающих устройств.

Охлаждение детали до низких температур осуществляется в два этапа. Первый этап заключается в приготовлении хладагента и сопряжен с затратами внешней работы. Второй этап состоит в отнятии теплоты от обрабатываемой детали путем передачи хладагенту и не требует затрат работы.

Методы подготовки хладагентов подробно освещены в специальной литературе [2] и не являются предметом данной статьи, поэтому не рассматриваются. Подробнее необходимо остановиться на операции отнятия тепла от обрабатываемой детали.

Известны различные методы доведения деталей до необходимой температуры обработки. Все они основаны на термодинамических принципах теплопередачи. Оборудование для криогенной обработки подразделяют на две широкие категории: прямого или косвенного охлаждения.

Прямое охлаждение позволяет эффективно использовать жидкий азот для достижения температур, необходимых для криогенной обработки.

Жидкий азот представляет собой прозрачную жидкость с удельным весом 0,81 г/см<sup>3</sup>, кипящую при атмосферном давлении при температуре минус 196°C. При испарении 1 кг жидкого азота поглощается около 48 ккал тепла, а общая холодопроизводительность для 1 кг указанного вещества составляет 95 ккал/час (при подогреве паров до 0°C).

При погружении охлаждаемых деталей непосредственно в жидкий азот хладагент начинает усиленно кипеть из-за интенсивного парообразования. При выравнивании температур охлаждаемых деталей и хладагента интенсивность парообразования резко снижается. Это обстоятельство используют для контроля конечной температуры охлаждаемых деталей. Время такого экстремального охлаждения в азоте составляет от нескольких минут до половины часа, в зависимости от размеров деталей и требуемой температуры обработки.

Для предотвращения образования мартенситных пятен на поверхности охлаждаемых деталей и снижения термических напряжений при резком (интенсивном) охлаждении не рекомендуется погружать детали в жидкий азот. Кроме того, по некоторым литературным данным, при использовании холодных паров азота для охлаждения деталей вместо погружения их в жидкий азот экономия хладагента составляет примерно 30–40%.

Одна из самых распространенных технологий заключается в применении системы коллектора с распыляющими соплами, превращающими жидкий азот в очень холодный газ, который охлаждает деталь. В этом случае с поверхностью охлаждаемой детали должен контактировать именно холодный газ, а не мелкие капельки жидкого азота, во избежание образования «пятен мартенсита». Таким образом, основная часть отнимаемой от изделия теплоты расходуется на испарение хладагента и затем на нагревание образовавшихся паров. Минимальная температура охлаждения детали при этом определяется



## ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КРИОГЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ

ООО «НПЦ «КриоТехРесурс»  
426028, Удмуртская Республика  
г. Ижевск, ул. Пойма, 3а  
[www.cryotech.ru](http://www.cryotech.ru), [info@cryotech.ru](mailto:info@cryotech.ru)  
(3412) 33-44-55



температурой хладагента (минус некоторый градиент, зависящий от конструкции камеры). Интенсивность охлаждения, т. е. скорость падения температуры загруженной садки деталей, может регулироваться массой хладагента или скоростью его протекания вдоль поверхности охлаждаемой детали. Контроль температуры при такой схеме охлаждения сводится к измерению температуры в камере, где расположена охлаждаемая деталь. Таким образом, схема непосредственного или прямого охлаждения является самым эффективным средством получения криогенных температур для управляемой обработки.

Устройство для реализации прямого охлаждения в целом с термодинамической точки зрения представляет собой машину, отбирающую теплоту охлаждаемых деталей и рассеивающую ее в окружающей среде за счет потребления внешней электрической энергии. Традиционными готовыми хладагентами для термической обработки стали при низких (отрицательных) температурах помимо жидкого азота (иногда кислорода или воздуха) служит твердая углекислота («сухой лед»).

Твердая углекислота пригодна для достижения температур до минус 78°C. Указанная температура является точкой сублимации твердой CO<sub>2</sub> (образование жидкой фазы не происходит). При сублимации 1 кг сухого льда поглощается 137 ккал тепла, а общая холодопроизводительность 1 кг сухого льда составляет 159 ккал/час. Промышленный сухой лед — это весьма хрупкое вещество белого цвета, легко дробящееся на куски. Удельный вес его колеблется в зависимости от способа получения и находится в пределах от 1,0 до 1,5 г/см<sup>3</sup>.

Прямое охлаждение с использованием твердой углекислоты не всегда удобно, так как твердый хладагент трудно равномерно распределить по охлаждаемому объему камеры. Дробление сухого льда на мелкие куски, производимое для лучшего заполнения рабочего пространства камеры, многократно увеличивает его суммарную поверхность, следовательно, ускоряет сублимацию и резко повышает расход твердой углекислоты.

В этом случае более удобным является косвенный метод охлаждения деталей, предусматривающий приготовление жидкого охлаждающего раствора. В качестве жидкого наполнителя можно использовать любую жидкость с температурой затвердения при атмосферном давлении ниже температуры сублимации твердой углекислоты. Имеется много подобных жидкостей, которые относятся к спиртам или органическим растворителям. Однако выбираемая для этой цели жидкость должна удовлетворять следующим требованиям: быть неядовитой, не слишком летучей, достаточно пожаробезопасной, не раздражать кожу при случайном попадании, недорогой по стоимости. Температура затвердения (плавления) некоторых жидкостей приведена в **таблице 1**.

**Таблица 1. Температура затвердения (плавления) некоторых веществ**

№ п/п	Наименование наполнителя	Температура затвердения, °C
1	Изопропиловый спирт	– 89,0
2	Ацетон	– 95,0
3	Метиловый спирт	– 97,8
4	Эфир	– 117,6
5	Этиловый спирт	– 130,0

Наиболее удобными жидкими наполнителями, отвечающими перечисленным требованиям, являются денатурированный спирт, в меньшей мере — ацетон.

Приготовление охлаждающей смеси для косвенного охлаждения деталей достаточно просто: дробленую твердую углекислоту помещают в сосуд с денатурированным спиртом. Вначале происходит бурное парообразование, вызываемое быстрой возгонкой углекислоты в жидкости, затем, по мере понижения температуры смеси, процесс затихает. Гранулы углекислоты при этом перемешивают в смеси деревянной мешалкой. Получающаяся спиртово-углекислотная смесь имеет минимальную температуру около минус 78°C. Эта смесь становится более вязкой и наполняется поднимающимися пузырьками газообразной углекислоты.

Добавление сухого льда производят и после достижения минимальной температуры, чтобы создать в смеси запас хладагента. Приготовление смеси можно считать законченным после образования вязкой массы (консистенции, напоминающей тяжелые сорта минерального масла) из гранул углекислоты в охлажденном денатурированном спирте [3]. Такая охлаждающая смесь при хорошей теплоизоляции довольно долго (часами) сохраняется при температуре около минус 78°C за счет постепенной сублимации избыточной углекислоты.

Однако непосредственное погружение охлаждаемых деталей в ванну с охлаждающей смесью не всегда оправдано, так как подобное охлаждение может быть излишне интенсивным. Кроме того, в этих случаях часть жидкости уносится с деталями и загрязняет помещение.

Охлаждение стальных деталей косвенным методом до криогенных температур не представляется возможным из-за высоких температур затвердения наполнителя (**таблица 1**).

Выбор метода охлаждения (прямого или косвенного) определяет размеры и конфигурацию оборудования, используемого для охлаждения металлопродукции. Существует большое разнообразие размеров и конфигураций криогенных камер. Традиционно криогенные камеры конструируют для обработки партии деталей определенной массы и размеров с учетом периодичности загрузки. По способу загрузки камеры подразделяют на фронтальные и вертикальные. Как и в случае с другим оборудованием для термообработки, соответствующая конструкция зависит от производственных объемов и конфигурации обрабатываемых деталей и заготовок.

Камеры с фронтальной загрузкой (криогенный шкаф) имеют горизонтальное неподвижное дно шкафа и боковую дверь на петлях (**рис. 1**). Высота камеры может быть



**Рис. 1. Криогенная камера с фронтальной загрузкой**

отрегулирована в соответствии с механическим оборудованием подачи деталей таким образом, что может быть частью технологической линии термообработки. Загрузка камеры может осуществляться с помощью ручной загрузочной тележки, ручным толкателем или загрузочно-выгрузочной машиной. При обработке мелкие детали загружают в лотки или неглубокие корзины и помещают на стеллажи, установленные внутри шкафа.

Камеры с вертикальной загрузкой (в виде ванны) наиболее полно используют производственное пространство и представляют собой экономичное решение для небольших производственных объемов. Используя жидкий азот в качестве хладагента, в камере выполняют операции обеспечения неподвижных посадок, механической обработки деталей при низких температурах, восстановления и стабилизации размеров стальных деталей, криогенной обработки. Загрузочное окно камеры расположено сверху, что позволяет использовать цеховые механизмы для загрузки и выгрузки обрабатываемых деталей (рис. 2). Камера загружается вручную, или посредством грузоподъемных механизмов, или мостовым краном, крановой балкой, монорельсом с электрическим подъемником. Внутреннюю часть камеры изготавливают из нержавеющей стали. Внутреннее пространство камеры может иметь цилиндрическую форму или форму параллелепипеда.



Рис. 2. Криогенная камера с вертикальной загрузкой

На предприятиях серийного, крупносерийного производства, где налажено непрерывное поточное производство, применяют автоматизированные установки туннельного типа (рис. 3).

В установках туннельного типа обрабатывают кольца подшипников качения, пильные диски, промышленные ножи, буровые сверла, фрезы, вкладыши клапанов ДВС и другие детали. Обрабатываемые детали укладывают на ленту транспортера, движущегося навстречу парам хладагента, которые поступают из охлаждающего устройства. Отработавшие (нагретые) пары выходят наружу через загрузочное окно. Окончательно охлаж-



Рис. 3. Установка для низкотемпературной обработки туннельного типа

денные детали попадают на наклонную плоскость окна выгрузки. Двигаясь по наклонной плоскости, детали открывают шарнирно подвешенные заслонки, которые закрываются под действием собственного веса и препятствуют выходу холодных паров из установки. Регулируя подачу жидкого азота в установку туннельного типа, можно установить постоянный температурный режим охлаждения деталей.

В настоящее время на рынке представлен широкий спектр отечественных и зарубежных камер для низкотемпературной обработки, в том числе камер для обработки холодом металлических изделий и климатических камер «тепло-холод» для температурных испытаний. Выпускаются камеры различных объемов: от самых маленьких лабораторных (0,02 м<sup>3</sup>) до промышленных образцов объемом до 2,0 м<sup>3</sup>. У большинства производителей установок для низкотемпературного воздействия имеется линейка моделей камер по объему, например: 0,063; 0,125; 0,250; 0,500; 1,000; 1,600; 2,000 м<sup>3</sup>.

Основная масса камер работает с использованием фреона в качестве хладагента. Такие двухкаскадные камеры имеют нижний предел рабочих температур: минус 45°С, минус 70°С, минус 85°С. Наибольшие значения рабочих температур колеблются от плюс 100°С до плюс 180°С. Диапазон скоростей изменения рабочих температур у разных производителей колеблется от 1,0 до 5,00 град С/мин. Таким образом, фреоновые камеры имеют серьезные ограничения по наименьшим рабочим температурам и значениям скоростей изменения температуры в камере. Только азотные камеры не имеют указанных выше ограничений.

Установки, использующие в качестве хладагента азот, на рынке позиционируются как климатические камеры, изготовленные по индивидуальным проектам. Известна установка АДБ7, предназначенная для климатических испытаний фотодиодов и фотоприемных устройств в интервале температур от минус 60°С до плюс 85°С. Данное устройство работает на жидком азоте, с расходом 3,5 л/час. Использование азота позволяет преодолеть диапазон рабочих температур в 145°С со скоростью 3,60 град С/мин., например, аналогичная по назначению фреоновая камера КХТ-74 работает со скоростью 10 С/мин. Таким образом, азотные камеры обеспечивают большую производительность (в 3,6 раза) по сравнению с фреоновыми. Вопросы снижения текущих затрат азотных камер являются актуальной инженеринговой задачей.

Конструктивно все камеры аналогичны. Представлены модели по типу шкафов (горизонтальная загрузка) и типу ванн (вертикальная загрузка). Используются примерно одинаковые материалы теплоизоляции (пенополиуретан) с толщиной стенок камер 150 мм. Материал облицовки внутренних поверхностей камер — нержавеющая сталь. Электропитание лабораторных устройств малого объема однофазное напряжением 220 В, а камерах среднего и большого объема трехфазное 380 В. В конструкциях всех рассмотренных устройств предусмотрена принудительная циркуляция атмосферы внутреннего пространства камеры со скоростью не менее 0,5 м/с. Система управления устройств микропроцессорная с русифицированным интерфейсом с возможностью записи результатов температурного воздействия и загрузки программ с внешнего носителя. В большинстве камер заложена возможность удаленного управления и объединения камер в сеть.





Рис. 4. Криогенная камера модели КП-0,8

Масса фреоновых камер в 2 раза больше массы обрабатываемых изделий, а масса азотных камер в 2 раза меньше массы обрабатываемых изделий. Таким образом, весовое совершенство азотных камер в 4 раза выше весового совершенства фреоновых камер.

Энергоэффективная камера криогенной обработки стальных и чугунных изделий (рис. 4) разработана при финансовой поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере». Технической задачей разработки являлось снижение расхода хладагента на 25–50% по сравнению с аналогичными камерами. Конструкция камеры криогенной обработки защищена патентом на полезную модель РФ [4].

Оценку энергоэффективности криогенной камеры проводили в сравнении с криогенной камерой модели 921 производства компании 300Below Inc (США). Расход хладагента при работе по одинаковому циклу загруженной камеры модели 921 балластовой массой в 100 кг составил 170,6 кг, а криогенной камеры модели КП-0,8 № 001 энергоэффективнее камеры модели 921 производства компании 300Below Inc на 26%. На основе конструкции энергоэффективной камеры криогенной обработки разработан модельный ряд.

Таким образом, анализ схем охлаждения и конструкций камер для криогенной обработки показал, что метод непосредственного, или прямого охлаждения является самым эффективным средством получения криогенных температур для управляемой обработки металлопродукции. Такой способ охлаждения требует минимальных затрат на оборудование и весьма экономичен из-за сравнительно небольшого расхода азота. Разработка и совершенствование оборудования, направленные на дополнительное снижение эксплуатационных затрат при сохранении качества обработки и безопасности, являются важной инженерной задачей.

**Николай Анатольевич Кокорин,**  
кандидат технических наук, доцент,  
директор по науке и развитию ООО «НПЦ «КриоТехРесурс»  
e-mail: info@cryotech.ru.

#### Литература

1. Кокорин Н. А. Термическая обработка при криогенных температурах // РИТМ машиностроения. 2018. № 2. С. 24–28.
2. Архаров А. М., Марфенина И. В., Микулин Е. И. Криогенные системы. Т. 1. — М.: Машиностроение, 1996. — 576 с.
3. Воробьев В. Г. Термическая обработка стали при температуре ниже нуля. — М.: Оборонгиз, 1954. — 307 с.
4. Кондратенков М. С. Камера криогенной обработки чугунных или стальных изделий // Патент на полезную модель РФ № 162822. 2016. Бюл. № 18.

- ✓ Комплектующие лучших мировых производителей, ЧПУ и сервоприводы «Mitsubishi»
- ✓ Поддержка изготовителя на протяжении всей жизни станка

ЛАЗЕРНЫЕ РАСКРОЙНЫЕ  
СТАНКИ С ВОЛОКОННЫМИ  
ЛАЗЕРАМИ IPG



ДЛИННОМЕРНЫЕ  
И КРУПНОФОРМАТНЫЕ  
ЛАЗЕРНЫЕ СТАНКИ



ЛАЗЕРНЫЕ СТАНКИ  
С ВОЛОКОННЫМИ ЛАЗЕРАМИ  
IPG МАЛОЙ МОЩНОСТИ  
ДЛЯ РАСКРОЯ ТОНКОЛИСТОВОЙ  
И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ



ЛАЗЕРНЫЕ РАСКРОЙНЫЕ  
КОМПЛЕКСЫ С МОЩНЫМИ  
CO<sub>2</sub>-ЛАЗЕРАМИ ROFIN-SINAR



ЛАЗЕРНЫЕ СТАНКИ С  
CO<sub>2</sub>-ЛАЗЕРАМИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ  
ДЛЯ РЕКЛАМНОГО, ШВЕЙНОГО,  
МЕБЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА



СКОРОСТНЫЕ СТАНКИ  
ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ  
«РАПИД Плазма»



КООРДИНАТНЫЕ СТОЛЫ С ЧПУ  
ПОЗИЦИОНЕРЫ



КРУПНОФОРМАТНЫЕ  
ПЛАНШЕТНЫЕ ПЛОТТЕРЫ,  
ГРАФОПОСТРОИТЕЛИ,  
КООРДИНАТОГРАФЫ

