

УДК 669

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВАКУУМНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ В ПРАКТИКЕ ПРЕДПРИЯТИЙ ОПК

Степанов Б.В., Гейн А.М., Корольков С.Б.

Представлен обзор технологии и оборудования для закалки в вакууме газом высокого давления, а также перспективы развития термической обработки в условиях функционирования корпоративного центра вакуумных термических технологий.

Ключевые слова: инновационные технологии; термическая обработка; металл; сплав.

Введение

В 1866 году на Обуховском сталелитейном заводе в городе Санкт-Петербурге сошлись судьбы двух великих ученых-металлургов России П.М. Обухова и Д.К. Чернова (основоположник современного металловедения), представлявших два различных направления развития металлургии и металловедения. П.М. Обухов шел по пути создания сортов стали с заданными свойствами и химическим составом, а Д.К. Чернов – по пути исследования свойств и структуры металла, управляя превращениями стали при использовании нагрева и охлаждения с различной скоростью. В 1868 г. Д.К. Чернов открыл критические точки в сталях, заложив тем самым основы термической обработки металлов и сплавов. Результатом совместной деятельности этих ученых и их последователей того времени на Обуховском сталелитейном заводе возникло то, что академик А.А. Байков назвал «академией металлургических знаний» России [1].

Материаловедение представляет собой совокупность знаний, полученных расчетным и экспериментальным путем, которые позволяют сделать обобщения и выводы, а также предвидеть пути развития науки о материалах.

Наука о материалах – старое развивающееся знание. Но и сегодня есть вопросы, ответы на которые не найти в учебниках. Конкуренция производителей превращает секреты мастерства в товар, поэтому создание новых технологий представляет собой сложную задачу без подсказок.

Условия работы современных машин и приборов выдвигают требования к прочности и стойкости материалов в широком интервале температур. Современным решением для получения гарантированных необходимых эксплуатационных свойств изделий, широко представленным в США и ряде европейских стран, является создание научно-производственных центров, где с применением новых передовых технологий разрабатываются и испытываются новые материалы и изделия из них. Современные технологии позволяют осуществлять в полностью автоматизированном режиме все виды объемной и поверхностной термической и химико-термической обработки (вакуумный отжиг, упрочнение и отпуск в вакууме и атмосфере защитных газов, насыщение поверхности углеродом, азотом, углеродом и азотом), а также упрочнение поверхности с использованием высококонцентрированных источников энергии

(плазменные и лазерные технологии), что обеспечивает высокое качество на каждом этапе технологического процесса.

«Дивиденды металлообрабатывающей фирмы лежат на лезвии режущего инструмента» – основная концепция Ф. Тейлора¹. Поэтому в данной статье делается основной упор на инновационные методы термической обработки инструментальных сталей, т.к. они являются наиболее сложными как по химическому составу, так и по термической обработке.

Требования повышения экономичности металлообработки вызывают усиленные поиски возможностей снижения ее себестоимости, что является одной из актуальных задач науки и практики современного материаловедения.

В передовых современных центрах по термической обработке 85-90% изделий из инструментальных сталей (матрицы, пуансоны, штампы, пресс-формы, калибры, мерительный и металлорежущий инструмент) обрабатываются в вакуумных печах, что позволяет повысить не только механические свойства при объемном упрочнении, но и качество поверхности, в дальнейшем обеспечивающее необходимые свойства поверхностно-упрочненных слоев. Долговечность инструмента зависит не только от свойств материала, определяемых технологией изготовления и объемного упрочнения, но в значительной степени от свойств поверхности. В течение последнего века требования к поверхности постоянно возрастали, что способствовало появлению нового направления – инженерии поверхности методами энергетического и физико-химического воздействия. Реализация этой концепции при выборе материала позволяет улучшить эксплуатационные свойства инструмента и в ряде случаев снижать расход дорогостоящих материалов. Стойкость инструментов с покрытиями возрастает до 3-10 раз. В настоящее время в Германии и США доля инструмента с покрытиями составляет ~ 90 и 95% соответственно, в России – 20-30%.

1 Общая схема технологии вакуумной закалки инертным газом

Преимуществами вакуумной закалки являются:

- снижение экологически неблагоприятной нагрузки на окружающую среду;
- улучшение условий труда;
- достаточно быстрая окупаемость (за 3-3,5 года) и экономическая эффективность после этого срока (до 40 тыс. руб. в год за счет отсутствия вредных отходов, снижения брака по термической обработке на 5-7%);
- повышение эксплуатационной стойкости изделий за счет улучшения качества поверхностного слоя. Качество поверхности определяется степенью вакуумирования рабочего пространства. Начиная с $1,33 \cdot 10^3$ Па, эвтектоидные и заэвтектоидные стали практически не окисляются;
- нет окалины – отсутствует окисление поверхности;
- не происходит обезуглероживание поверхности;
- чистые и сухие детали после закалки;

¹ Фредерик Тейлор (1856-1915 гг.) – выдающийся американский учёный, создатель быстрорежущей стали, автор фундаментального труда «Искусство обработки металлов резанием». В России этот труд был опубликован в 1908 г. в переводе Р. Полякова.

- контроль температуры на поверхности и в центре деталей;
- реализация ступенчатой закалки в цикле термообработки;
- высокая равномерность нагрева и охлаждения;
- минимальные поводки; уменьшение припусков на термообработку;
- сокращение часов механообработки;
- однородность закалки – минимальный разброс твердости и свойств;
- увеличение срока службы инструмента, его работоспособности и износостойкости;
- полная автоматизация и документирование процесса;
- повторяемость процесса, минимизация роли человеческого фактора.

Для проведения термообработки партия деталей помещается в вакуумную печь, представляющую собой камеру, работающую под давлением и оснащенную теплоизоляцией и системой нагрева.

После загрузки камера вакуумируется так, что воздух удаляется из камеры, что исключает риск окисления деталей. Предварительно камера промывается инертным газом – азотом особо чистым. Детали нагреваются в вакууме или конвективно. При конвективном нагреве инертный газ при давлении до 2 бар подается в камеру после вакуумирования. Путём перемешивания газа во время нагрева достигается высокая равномерность температуры в деталях и садке, что снижает возможность появления короблений.

После соответствующей выдержки при заданной температуре закалки детали охлаждаются инертным газом. Большинство деталей из инструментальных сталей для пресс-форм, штампов холодного и горячего деформирования, а также быстрорежущих сталей могут закаливаться в инертном газе (азот, аргон, гелий) при давлении до 20 бар.

Особенности технологии вакуумной закалки иллюстрируются рисунками 1-3 [5].

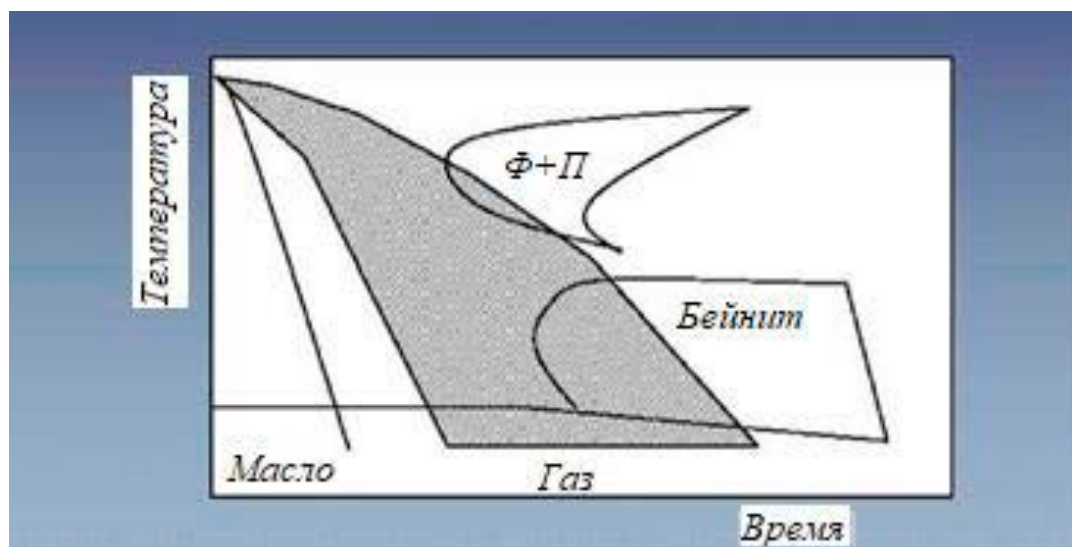


Рисунок 1 – Общая схема контролируемого охлаждения стали в зависимости от среды охлаждения

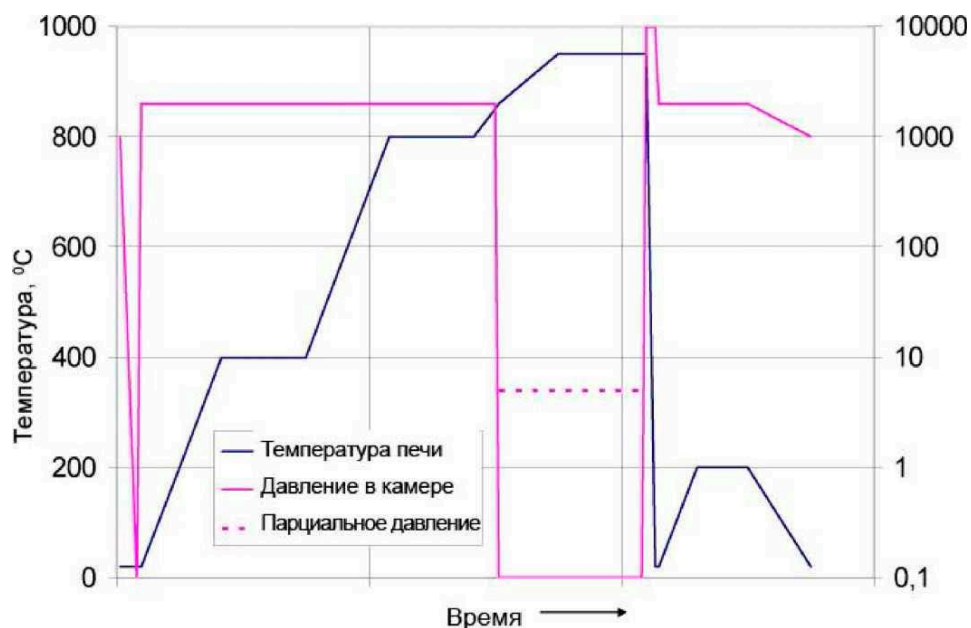


Рисунок 2 – Общая схема процесса закалки стали в вакуумной печи

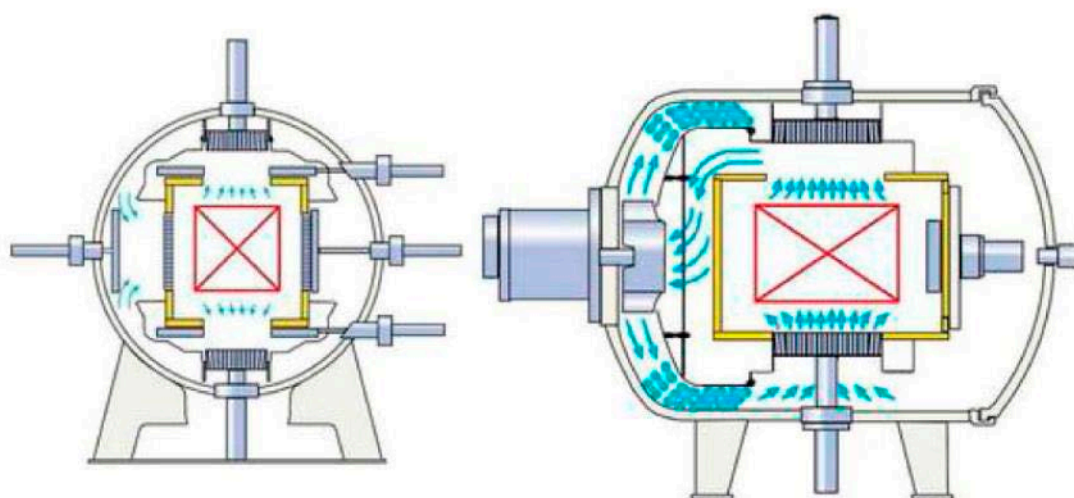


Рисунок 3 – Общая схема охлаждения деталей при закалке в вакуумной печи

2 Анализ направлений реализации перспективных технологий

Изучение современной практики в области разработки передовых технологий металловедения показывает, что важной составляющей успеха является организационная структура, обеспечивающая функционирование исследовательских коллективов. Плодотворное развитие данного направления, как правило, осуществляется в рамках Корпоративных центров вакуумных термических технологий (КЦВТТ).

Задачами КЦВТТ является вакуумная термообработка как основа передовых технологий в инструментальном производстве, автомобилестроении, радиоэлектронной промышленности, машиностроении, аэрокосмической, медицинской и других отраслях промышленности.

Вакуумная термообработка включает в себя ряд технологических операций в вакуумной печи с целью изменения внутренней или поверхностной структуры детали и получения заданных качеств. Благодаря вакуумной среде минимизирован риск окисления детали. В процессе вакуумной термообработки варьируется температура (например, ступенчатый нагрев/охлаждение), вакуум, напуск определенных газов и время выдержки каждой из стадий. Процессы термической обработки в КЦВТТ: цементация, отжиг, закалка, отпуск, старение, криогенная обработка (холодом). Сегодня вакуумная термообработка стала идеальной альтернативой традиционным технологиям термообработки, таких как закалка в масле или соляных ваннах, термообработка в среде инертного/защитного газа. В традиционных процессах, без использования вакуума, на поверхностях деталей могут образовываться окислы и другие нежелательные образования.

Вакуумная закалка сталей является одной из ведущих передовых технологий в термической обработке для инструментальной промышленности. После проведения любого процесса термообработки на поверхности детали появляется окисление, связанное с воздействием воздуха. Это приводит к последующей трудоёмкой и достаточно дорогостоящей механической обработке. Способом решения данной проблемы является проведение термообработки в бескислородной атмосфере. В начале своего развития вакуумные технологии применялись только для специальных материалов в авиационной и аэрокосмической промышленности, в настоящее же время вакуумные технологии широко применяются для закалки инструментальных сталей в производстве пресс-форм для изделий из пластмасс и быстрорежущих сталей, а также для штампов холодного и горячего деформирования.



Рисунок 4 – Вакуумная печь VFIA 4466 OG88 для закалки в инертном газе и масле [6]

На рисунке 3 представлена вакуумная печь VFIA 4466 OG88 для закалки в инертном газе и масле в базовой комплектации, которая в дополненном составе будет

установлена на территории предприятия. Это оборудование является практически уникальным и стоит на одной ступени с известными мировыми брендами, вакуумные печи которых представлены в России. Состав вакуумной печи обоснован и разработан специалистами Отдела главного технолога АО «ЗРТО» совместно с АО «Интек Аналитика».

Основные технические параметры высоковакуумной печи для закалки в масле и газе:

- вид вакуумной печи: горизонтальная, трёхкамерная;
- рабочее пространство: 400×400×600 мм (Ш*В*Д);
- максимальный вес садки: 150-200 кг (включая оснастку);
- максимальная температура: 1300 °С;
- рабочая температура: 1250 °С;
- материал нагревательного элемента: молибден-лантановый сплав;
- однородность температуры: ± 5 °С (800 °С в вакууме, 9 точек замера);
- точность контроля температуры: $\leq \pm 1,0$ °С;
- рабочий вакуум: $\leq 1,0 \times 10^{-4}$ мбар (камера нагрева);
- натекание: $\leq 1,0 \times 10^{-2}$ мбар/ч (камера закалки в масло),
 $\leq 5,0 \times 10^{-3}$ мбар/ч (камера нагрева);
- максимальное давление газа: 6 бар (абсолютно давление, камера закалки газом).



Рисунок 5 – Высоковакуумная электропечь ЭСКВЭ-3.6.3/12,5 М2 [7]

В целях решения оперативно возникающих задач по термической обработке сравнительно небольших изделий на месте штатной установки была произведена модернизация имеющегося оборудования - высоковакуумной электропечи ЭСКВЭ-3.6.3/12,5 М2 (400*400*600 мм), что позволило избавиться от использования воды и сократить время технологической операции до 30% (рисунок 5). Помимо этого ведёт-

ся проработка модернизации и другого термического оборудования в целях повышения экологичности процесса термической обработки, уменьшения трудоёмкости, снижение энергозатрат – шкафа вакуумного СНВС-4,3,4,3,4,9/5 и СНВС-4,3,4,3,4,9/3, печь вакуумного отжига СНВЭ 16/13 (рисунок 6).



Рисунок 6 – Высоковакуумная печь СНВЭ 16/13 [7]

КЦВТТ позволит производить следующие виды термической обработки:

- традиционная (атмосферные электропечи);
- инновационная (в высоковакуумных электропечах);
- криогенная термическая обработка (низкие температуры, до -86°C).

Совокупная мощность термического производства в настоящее время составляет 10-15 единиц основного оборудования (вакуумные, атмосферные, криогенная электропечи), что обеспечивает ряд конкурентных преимуществ:

- уникальность оборудования VFIA 4466 OG88 (термообработка в двух охлаждающих средах: масло и инертный газ), перемешивание газа во время нагрева даёт высокую равномерность температуры в деталях, что снижает возможность появления короблений;

- после соответствующей выдержки при определенной температуре закалки детали охлаждаются газом. Тип используемого газа и необходимое давление зависят от детали (материал, форма), а также от требуемых результатов термообработки, и может выбираться заранее. Большинство деталей из инструментальных сталей для штампов холодного и горячего деформирования, а также быстрорежущих сталей могут закаливаться в азоте при давлении до 6 бар (VFIA 4466 OG88);

- высокий вакуум (до 10^{-6} мм.рт. ст.) вакуумных электропечей даёт возможность обработки широкой линейки обрабатываемых материалов и изделий (СНВЭ 16/13 и ЭСКВЭ-3.6.3/12,5 М2);

- потенциал формирования специализированного технологического центра по разработке технологий традиционной и инновационной термической обработки;

- наличие широкого спектра термического оборудования позволяет разработать оптимальный технологический процесс термической обработки для изготавливаемых изделий из металла различного химического состава;

- при производстве большого количества мелких деталей (крепеж, контакты, пружины и т.д.) с высокими требованиями к физико-механическим свойствам наличие инновационной термической обработки в вакууме является неоспоримым преимуществом перед традиционной термической обработкой, так как позволяет получить гарантированный результат в полном объёме термически обрабатываемой продукции (повторяемость физико-механических свойств).

В качестве общих технических возможностей корпоративного центра вакуумных и термических технологий можно выделить следующие компетенции:

а) закалка в вакууме в масле или газом высокого давления сталей: мартенситного, ферритного, мартенситно-ферритного, аустенитного, аустенитно-ферритного классов);

б) отпуск металлов в вакууме (высокий, средний и низкий);

в) снятие внутренних остаточных напряжений металла в вакууме;

г) старение, отжиг (1, 2 рода) металла в вакууме;

д) термическая обработка в вакууме по Р4.054.004-89 «ТТП на детали и сплавы чёрных и цветных металлов, термическая и химико-термическая обработка» следующих материалов: группа высоколегированных сталей – 20Х13, 40Х13, 95Х18, 14Х17Н2, 12Х18Н10Т, 12Х18Н9; группа инструментальных сталей: Х12, Х12М, Х12МФ, 3Х2В8Ф, 4Х5МФ1С, 5ХНМ, Р9, Р18, Р6М5, стальные сплавы с заданным ТКЛР, МО, М1, М3 и т.д.;

е) термическая обработка в вакууме по ОСТ4.054.055-80 «Магнитно-мягкие сплавы» магнитно-мягких материалов;

ж) термическая обработка в вакууме по ОСТ4.054.035-78 «Элементы пружинные из сплавов чёрных и цветных металлов. Термическая обработка. ТТП» : низкий отпуск деталей из БРБ2 и БрКМц3-1, БрОФ6,5-015, 30ХГСА, 65 Г, 50ХФА, 60С2А, 36НХТЮ;

з) термическая обработка в вакууме по ОСТ4 ГО.054.103 «Детали приборов высокоточные металлические стабилизация размеров термической обработкой: стабилизационное старение сталей и сплавов в безокислительной среде, титановые сплавы;

и) термическая обработка в вакууме по Р4.054.004-89 «ТТП на детали и сплавы чёрных и цветных металлов, термическая и химико-термическая обработка»: вакуумная закалка в масле 30ХГСА, 40Х, 65 Г, 50ХФА, 60С2А, ШХ15, 9ХС, ХВГ, 30ХГТ, 40ХН, ХВ5, 9ХВГ, 40ХН2МА, 12ХН3А, группа низколегированных сталей;

к) термическая обработка в вакууме прецизионных магнитно-мягких сплавов по ГОСТ 10160-75 «Сплавы прецизионные магнитно-мягкие» и ОСТ4 ГО.054.103;

л) отжиг, нормализация, закалка, отпуск, старение, стабилизирующий отпуск, стабилизирующее старение, обезводородивание сталей и сплавов на основе железа - по Р4.054.004-89 и ОСТ4 ГО.054.103 в электрических печах;

м) отжиг, закалка, старение сплавов цветных металлов на основе алюминия - по Р4.054.004-89 и ОСТ4 ГО.054.103 в электрических печах;

н) отжиг, закалка, старение титана и сплавов на основе титана по Р4.054.004-89 и ОСТ4 ГО.054.103 в электрических печах;

о) закалка углеродистых и низколегированных сталей по ОСТ4.054.035-78, отпуск по ОСТ4.054.035-78 в электрических печах;

п) закалка высоколегированных сталей и сплавов на основе железа и никеля по ОСТ4.054.035-78, отпуск и старение по ОСТ4.054.035-78 в электрических печах;

р) закалка сплавов на основе меди по ОСТ4.054.035-78 в электрических печах;

с) отжиг по ОСТ4.054.055-80 и отжиг по Р4.054.004 электротехнических сталей, сплавов типа пермаллой и сплавов с особыми тепловыми свойствами в электропечах с конвективным нагревом.

Классы изделий, элементы конструкций:

а) ось, втулка, ролик, зубчатое колесо, кулачок, корпус, основание, рычаг, опора, кронштейн, винт, гайка, шайба, заклёпка и т.д.;

б) упругие элементы приборов (пружина, фиксатор, мембрана, гнездо, губка контактная и т.п.);

в) элементы с особыми свойствами (магнитопровод, пластина трансформаторная, экран, волновод, корпуса микросхем и т.д.);

г) пресс-формы для литья пластмасс,

д) выдувные пресс-формы,

е) штампы холодного деформирования, штампы горячего деформирования,

ж) пресс-формы для литья алюминия под давлением,

з) инструменты из быстрорежущей стали.

В повестке дня стоит вопрос создания специализированного отдела по разработке инновационных технологий, что является необходимым условием для освоения новых видов и режимов термической обработки. Помимо прочего это позволит осваивать изготовление новых изделий из материалов, не входящих в вышеперечисленный список.

3 Научно-производственный потенциал КЦВТТ

С учетом имеющихся технологического, методического и кадрового заделов КЦВТТ способен выступать в роли исполнителя научно-исследовательских, опытных и опытно-конструкторских работ для создания новых инновационных технологий термической обработки в вакууме и получения новых материалов с целью:

а) внедрения их в производство предприятий Концерна ВКО «Алмаз-Антей»;

б) выхода на рынок России с новыми инновационными материалами, разработанными с использованием инновационных технологий (3D-печать металл + термическая обработка и т.д.).

Использование имеющегося современного оборудования для определения химического состава материалов дает возможность своевременно и правильно, согласно полученным данным, корректировать научно-исследовательские работы для создания новых инновационных технологий термической обработки.

Совокупность твердомеров различных типов (Роквелл, Викерс, Бриннель) позволяет в процессе проведения технологического процесса термической обработки получить заданные свойства материала, что является востребованной компетенцией как для внутреннего применения, так и для сторонних организаций (проведение анализов на химический состав и механические свойства).

Наличие инновационного высокотехнологичного оборудования вакуумной термообработки позволяет решать самые сложные задачи на уникальном для региона

уровне качества. В сочетании с высококвалифицированными кадрами гарантируется своевременный и качественный выпуск деталей. Оказание услуг по межзаводской кооперации расширяет возможности при разработке новых материалов и позволяет персоналу приобретать неоценимый опыт, который позволит впоследствии использовать его при выполнении заказов концерна и заказов сторонних организаций.

Современный уровень кадрового обеспечения предприятия АО «ЗРТО» подтверждается участием сотрудников в РОМИТ (Российское общество металловедения и термообработки), которое входит в Международную Федерацию Термообработки и Инженерии Поверхности (IFHTSE). Основными ежегодными площадками для публичных мероприятий РОМИТ являются выставки «Термообработка» и «МеталлЭкспо» (г.Москва). Широкие контакты данных обществ позволяют консультироваться с ведущими научными деятелями не только в России, но и за рубежом. Налаженное взаимодействие с ФГУП «ЦНИИЧермет им.И.П.Бардина» позволяет участвовать в программах института и повышать свою квалификацию.

Уникальным направлением деятельности может стать Центр по подготовке и обучению специалистов по традиционной и вакуумной термообработке в инструментальном производстве. Данное направление может решить вопросы с подготовкой кадров не только для Концерна, но и для широкого круга российских предприятий ОПК. Потенциал площадки СЗРЦ, объединяющий компетенции и возможности научных, производственных и учебных коллективов позволяет в короткие сроки сформулировать и воплотить организационные решения по реализации замысла формирования КЦВТТ.

Выводы

Современное состояние и перспективы развития высокотехнологичных производств требуют соответствующего уровня обеспеченности в направлении металловедения, одним из важнейших направлений которого сегодня является наука и практика немеханической обработки металлов.

Уровень технической оснащенности и развития технологий вакуумной закалки на площадке предприятий Концерна позволяет в качестве перспективного направления определить создание КЦВТТ, призванного обеспечить опережающее развитие возможностей предприятий по созданию современной конкурентоспособной техники различного назначения.

Литература

- 1 Чернов Д.К. Взгляд сквозь время. – СПб.: Первый издательско-полиграфический холдинг, 2019. – 248 с.
- 2 Тихонов А.К. Металловедение и термическая обработка в автомобилестроении. В 2 ч. – М.: Металлургиздат, 2018. – 784 с.
- 3 Заславский А.Я. Современные автоматные стали. Состав, включения, свойства. – Челябинск: Изд.-во ЮУрГУ, 2005. – 206 с.
- 4 Инструментальные материалы: Учебное пособие / Г.А. Воробьева, Е.Е. Складнова, А.Ф. Леонов, В.К. Ерофеев. – СПб.: Политехника, 2005. – 268 с.
- 5 Материалы НТС «Термообработка металлов и сплавов. Новые решения и возможности технологии и оборудования. Опыт организации и внедрения технологий в производственные процессы предприятия». 26 – 29 мая 2015 г. АНО «НТФ «Технокон» им. В.М. Критского». <http://www.NTFTK.ru>.
- 6 Коммерческое предложение АО «Интек Аналитика» на вакуумную печь «VFIA 4466 OG88 для закалки в инертном газе и масле».
- 7 Степанов Б.В. Трудовые будни термического производства АО «ЗРТО» // Корпоративное издание АО «ЗРТО». – 2019. – №32. – С. 4-5.

Степанов Борис Владимирович – Ведущий инженер-технолог, АО «ЗРТО» г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: инновационные технологии и оборудование для термической обработки металлов и сплавов, цифровизация производства, оптимизация производственных процессов.

E-mail: b.stepanov@zrto.spb.ru

Гейн Александр Маркович – Ведущий инженер-технолог, АО «ЗРТО» г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: новые инновационные технологии термической обработки металлов и сплавов в вакууме, цифровизация производства, оптимизация производственных процессов.

E-mail: geyn@zrto.spb.ru

Корольков Сергей Борисович – Ведущий специалист, АО «СЗРЦ Концерна ВКО «Алмаз – Антей» – Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: история металловедения в России, новые инновационные технологии термической обработки металлов и сплавов в вакууме, цифровизация производства, оптимизация производственных процессов.

E-mail: museam@goz.ru

Почтовый адрес: 192012, Санкт-Петербург, проспект Обуховской обороны, дом 120.

STATE AND PROSPECTS OF THE APPLICATION OF VACUUM HEAT TREATMENT IN THE PRACTICE OF THE OPK ENTERPRISES

An overview of the technology and equipment for quenching in vacuum with high-pressure gas, as well as the prospects for the development of heat treatment under the conditions of the functioning of the corporate center of vacuum thermal technologies, is presented.

Key words: innovative technologies; heat treatment; metal; alloy.

Stepanov Boris Vladimirovich - Leading Process Engineer, ZRTO JSC, Saint Petersburg.

Research interests: innovative technologies and equipment for heat treatment of metals and alloys, digitalization of production, optimization of production processes.

E-mail: b.stepanov@zrto.spb.ru

Geyn Aleksandr Markovich – Leading Process Engineer, ZRTO JSC, Saint Petersburg.

Research interests: new innovative technologies for heat treatment of metals and alloys in vacuum, digitalization of production, optimization of production processes.

E-mail: geyn@zrto.spb.ru

Korolkov Sergey Borisovich – Leading specialist, JSC “NWRC Concern VKO “Almaz-Antey” – Obukhovsky plant”, St. Petersburg.

Research interests: history of metallurgy in Russia, new innovative technologies for heat treatment of metals and alloys in vacuum, digitalization of production, optimization of production processes.

E-mail: museam@goz.ru