

гиба и образование поверхностных трещин ползучести, которые впоследствии приобрели роль концентраторов напряжений при развитии магистральной трещины. Это достаточно типичный случай структурного изменения металла и повреждений.

Большинство повреждений пароперегревателей, не связанных с заводским технологическим браком и дефектами монтажа и ремонта, вызваны перегревами труб из-за тепловых разверток в пакетах, в этом случае фактическая температура металла намного превышает ее расчетное значение.

Литература

1. **Баранов, П.А.** Предупреждение аварий паровых котлов / П.А. Баранов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 272 с.

2. **Либерман, Л.Я.** Справочник по свойствам сталей, применяемых в котлотурбостроении / Л.Я. Либерман, М.И. Пейсихис. – М.–Л.: Машгиз, 1955. – 408 с.

3. **Кругасова, Е.И.** Надежность работы металла пароперегревателей в процессе длительной эксплуатации при высокой температуре: Учеб. пособие / Е.И. Кругасова – М.: ВИПКЭнерго, 1988. – 80 с.

4. **Металл паросилового** оборудования электростанций. Методы металлографического анализа в условиях эксплуатации: ОСТ 34-70-690-96. – Введ. 01.07.1997. – Министерство энергетики и электрификации СССР, 1996. – 44 с.

УДК 669

**В.М. КОНСТАНТИНОВ, д-р техн. наук,
Д.В. ГЕГЕНЯ (БНТУ),
А.Н. ДРОБОВ (ФТИ НАНБ)**

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ В ВИБРОКИПАЮЩЕМ СЛОЕ*

Одними из наиболее энергоемких операций традиционного технологического процесса на машиностроительных предприятиях являются операции термической и химико-термической обработки.

Повышение энергоэффективности указанных операций являлось актуальным вопросом всегда, однако особую остроту проблема приобрела в современных условиях. Повышение энергоэффективности операций термической и химико-термической обработки позволяет снизить себестоимость выпускаемой продукции и повысить ее конкурентоспособность.

Примером таких перспективных и энергосберегающих методов термического воздействия является нагрев и обработка в псевдодожигенном слое. Применение этого метода позволяет интенсифицировать процессы термической и химико-термической обработки, снизить энергоемкость обработки, уменьшить время обработки без снижения комплекса механических свойств обрабатываемых изделий [1, 2]. В научно-исследовательской лаборатории упрочнения стальных изделий (БНТУ) по инициативе Н.Г. Кухаревой на протяжении последних лет проводятся работы по указанному направлению. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности обработки и качестве получаемых покрытий [3]. Однако собственного оборудования для обработки до недавнего времени не было. Поэтому была поставлена и успешно решена задача создания такого лабораторного оборудования.

Известны три основных вида кипящего слоя (рисунок 1) [1, 2, 4, 5]:

- аэродинамический кипящий слой (псевдоожигение достигается пропусканием газа через нижнюю решетку аппарата);
- вибрационный кипящий слой (псевдоожигение создается вибрацией рабочей камеры с определенной частотой и амплитудой);
- центробежный способ псевдоожигения (кипящий слой создается вращением контейнера с порошковой засыпкой с определенной скоростью).

Аэродинамический кипящий слой наиболее технологичен, так как обеспечивает высокую равномерность температуры по слою и хорошее качество обработки. Однако такой вид псевдоожигения является самым дорогим, поскольку требует дорогого оборудования, систем пылеулавливания, качественной вытяжной вентиляции и внешнего подвода ожимающего газа. Виброкипящий слой лишен этих недостатков, однако сохраняет преимущества аэродинамического кипящего слоя. Установки виброкипящего слоя не требуют систем вытяжной вентиляции, внешнего подвода газа, при этом оборудование для вибрационного псевдоожигения стоит заметно

дешевле. Единственным недостатком таких установок по сравнению с аэродинамическим кипящим слоем является некоторая потеря производительности, которая будет критична только в условиях крупных предприятий с массовым типом производства. Центробежный метод является самым низкопроизводительным среди описанных выше методов, однако и самым простым по конструкции, не требующим дорогостоящего оборудования. Такой способ псевдоожигения получил распространение в качестве лабораторного оборудования на мелких машиностроительных предприятиях с единственным типом производства.

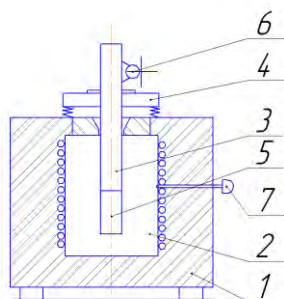


Рисунок 1 – Классификация видов псевдоожигения для термической и химико-термической обработки

Разработанная в НИЛ «Упрочнения стальных изделий» установка для химико-термической обработки в виброкипящем слое представляет собой футерованную теплоизоляционным материалом камеру 1 (рисунок 2).

В камеру сверху помещается реторта 3 с креплением на упругих элементах 4. С помощью затяжки пружин устанавливается амплитуда колебаний от 0,5 до 5 мм. Упругие элементы также предотвращают распространение вибрации на корпус печи, тем самым увеличивая срок эксплуатации карбидкремниевых нагревательных элементов. Электровибратор 6 служит для виброожигения механической вибрацией засыпки. Частота вибрации регулируется при по-

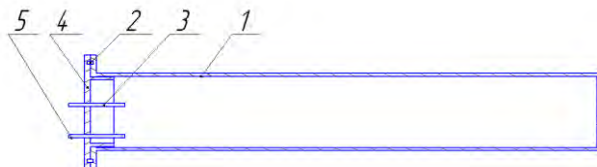
мощи частотного преобразователя и составляет 15–70 Гц. Контроль температуры двухзонный.



1 – корпус печи с нагревательными элементами; 2 – нагревательная камера; 3 – реторта (флюидизатор); 4 – опора реторты с пружинами; 5 – засыпка исследуемой порошковой среды; 6 – электровибратор для псевдосжижения механической вибрацией; 7 – термопары, контролирующие нагрев печи

Рисунок 2 – Схема установки химико-термической обработки в виброкипящем слое

Герметизация контейнера обеспечивается фланцевым соединением с медными уплотнителями (рисунок 3). Для предотвращения диффузионной сварки резьбовые соединения необходимо смазывать графитовой смазкой.



1 – цилиндр; 2 – медные уплотнения; 3 – подводящая трубка; 4 – фланцевая крышка; 5 – отводящая трубка

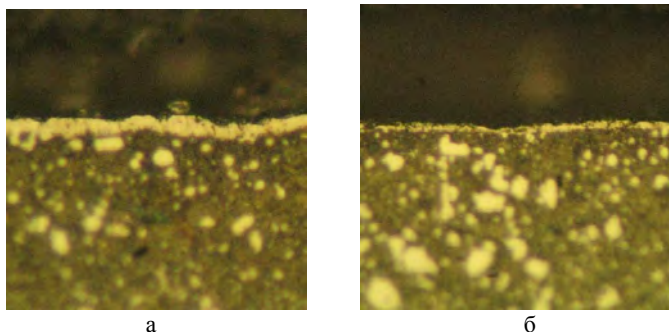
Рисунок 3 – Контейнер

Конструкция контейнера предусматривает возможность проведения химико-термической обработки при различных режимах: с инертным газом, с предварительным разряжением. Также предусмотрена

возможность для проведения химико-термической обработки в смешанном режиме, т.е. наведение псевдокипящего слоя одновременно вибрацией и продувкой газом.

Таким образом, за счет взаимодействия вышеуказанных узлов и выполнения заданных режимов, установка химико-термической обработки в виброкипящем слое характеризуется высокой надежностью и возможностью модернизации в процессе проведения исследовательских работ. Данное оборудование позволяет наводить виброкипящий слой при частотах от 15 до 70 Гц, амплитуде от 0,5 до 5 мм и в температурном диапазоне от 300 до 1100 °С, в зависимости от фракционного состава засыпки и вида химико-термической обработки.

Для проведения исследований при карбонитрации в установке для нагрева деталей в виброкипящем слое образцы из стали Х12Ф были подвергнуты карбонитрации при температуре 580 °С в течение 2 ч. Смесь для карбонитрации состояла из 10 % регенерата и 90 % основной смеси. Насыщение первой партии образцов проводилось в созданной установке для нагрева деталей в виброкипящем слое. Насыщение второй партии образцов проводили в камерной лабораторной печи в стационарном герметичном контейнере (рисунок 4).



а – подвижная смесь; б – неподвижная смесь

Рисунок 4 – Образцы из стали Х12Ф после карбонитрации (×1000)

Установлено, что при проведении карбонитрации в виброкипящей смеси получается более толстый и плотный диффузионный

слой, чем в случае использования неподвижной смеси. Средняя толщина диффузионных слоев после карбонитрации в подвижной и неподвижной смесях соответственно равна 4,16 и 2,77 мкм. Это обусловлено интенсификацией ряда стадий химико-термической обработки. В частности, ускоряются стадии подвода насыщаемого элемента к поверхности металла и диффузия насыщающего элемента в металле. Вследствие этого происходит ускорение тепло- и массопереноса в газовой среде и интенсификация диффузионных процессов в металле [6]. Кроме этого, есть основания предполагать, что в режиме псевдооживления возможна микропластическая деформация поверхностного слоя обрабатываемого изделия. Ранее было показано, что эти процессы развиваются при борировании в порошковых металлических системах [7]. Для низкотемпературных процессов ($T_{\text{пр}} \approx T_{\text{рекр}}$ или $T_{\text{пр}} < T_{\text{рекр}}$) данный эффект также возможен.

Заключение. Проанализированы некоторые пути создания подвижной порошковой среды при термической и химико-термической обработке. Разработана лабораторная установка для обработки деталей в виброкипящем слое. Проведенные опыты по карбонитрации стали Х12Ф подтвердили эффективность разработанного оборудования. Высказана гипотеза о том, что наряду с известными факторами ускорения ХТО в виброкипящем слое реализуется микропластическая деформация поверхностного слоя стали, что увеличивает интенсивность формирования диффузионного слоя.

Литература

1. **Заваров, А.С.** Химико-термическая обработка в кипящем слое / А.С. Заваров, А.П. Баскаков, С.В. Грачев. – М.: Металлургия, 1985. – 160 с.
2. **Баландин, Ю.А.** Диффузионное многокомпонентное цинкование стали 40Х в виброкипящем слое / Ю.А. Баландин, А.С. Колпаков, Е.В. Жарков // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2009. – № 1. – С. 46–49.
3. **Цементация** и нитроцементация стали 20 в псевдооживленном слое / Н.Г. Кухарева [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2013. – № 3. – С. 62–68.
4. **Бобок, А.Н.** Практика применения кипящего слоя в термических производствах машиностроительного комплекса в условиях

конкурирующего рынка / А.Н. Бобок // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2005. – № 3. – С. 20–26.

5. Файншмидт, Е.М. Теория и практика термической обработки в кипящем слое изделий из металлов и сплавов / Е.М. Файншмидт // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2005. – № 3. – С. 4–19.

6. Ворошнин, Л.Г. Теория и технология химико-термической обработки: учеб. пособие / Л.Г. Ворошнин, О.Л. Менделеева, В.А. Сметкин. – Минск: Новое знание, 2010. – 304 с.

7. Константинов, В.М. Ускоренная диффузия легирующих элементов в железе при химико-термической обработке порошков во вращающемся контейнере / В.М. Константинов // *Доклады НАН Беларуси.* – 2007. – Т. 51, № 2. – С. 103–107.

УДК 539.2+539.3

**Б.Б. ХИНА, д-р физ.-мат. наук,
В.М. КОНСТАНТИНОВ, д-р техн. наук (БНТУ)**

ОПЫТ ПОВЫШЕНИЯ НАУЧНОЙ КВАЛИФИКАЦИИ МАГИСТРАНТОВ И АСПИРАНТОВ-МАТЕРИАЛОВЕДОВ В ВОПРОСАХ ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ И ДИСЛОКАЦИОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ*

Введение. Современный уровень развития материаловедения, бурное развитие нанотехнологий и материалов настоятельно требует расширения глубины понимания магистрантами и аспирантами физической и химической сути процессов, имеющих место при получении, обработке и использовании новых материалов. Актуальность связана также и с необходимостью создания новых ресурсо- и энергосберегающих технологических процессов термической (ТО) и химико-термической обработки (ХТО), что требует от материаловедов более глубокого понимания как механизмов превращений в сталях и сплавах, так и связей между получаемой структурой и конечными свойствами.