

## Литература

1. **Промышленное** применение упрочняющей обработки деталей машин и механизмов методом ионного азотирования / М.Н. Босьяков [и др.] // Сварщик. – 2011. – № 5. – С. 28–33.

2. **Олешук, И.Г.** Исследование влияния комбинированного ионно-плазменного и электронно-лучевого воздействия на структуру и механические свойства стали 40X / И.Г. Олешук, И.Л. Поболь, С.В. Юревич // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–21 сентября 2012 г. / ФТИ НАН Беларуси. – Минск, 2012. – Кн. 2. – С. 370–374.

УДК 621.785.5

**Н.Г. КУХАРЕВА**, канд. техн. наук,  
**В.Ф. ПРОТАСЕВИЧ**, канд. техн. наук,  
**И.А. БАСАЛАЙ**, канд. техн. наук,  
**С.Н. ПЕТРОВИЧ** (БНТУ)

### **КАРБОНИТРАЦИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ 4Х5МФС В КИПЯЩЕМ СЛОЕ**

Одним из вариантов решения проблемы повышения надежности и долговечности деталей машин, инструментальной и технологической оснастки является использование энергосберегающих технологий, предполагающих получение на поверхности изделий защитных покрытий. К таким технологическим процессам можно отнести процесс получения на поверхности сложнолегированных сталей карбонитридных покрытий, обеспечивающих многократное повышение эксплуатационных характеристик изготовленных из них изделий.

Целью работы явилось совершенствование технологии нанесения карбонитридных покрытий на сталь 4Х5МФС из порошковых насыщающих сред с использованием кипящего слоя.

Использование кипящего слоя в различных областях техники, в том числе при термической и химико-термической обработке, из-

вестно давно [1, 2]. Эффективность этого экологически чистого метода доказана многочисленными работами исследователей стран ближнего и дальнего зарубежья [3–6].

В данной работе использован метод химико-термической обработки стали, в котором кипящий слой (порошковая смесь специального состава) не только выполняет функции нагревательной среды [1, 2], но, в первую очередь, является источником насыщающих элементов. Преимущество этой технологии, по сравнению с ранее использовавшимися традиционными методами ХТО (в печах циркуляционных, прямоточных, вакуумных и других), заключается в том, что детали в любое время могут быть загружены либо удалены из печи. Это означает, что в одной печи можно независимо проводить параллельную обработку деталей, требующих разного времени выдержки (в зависимости от требований технологии), не дожидаясь завершения процесса на других деталях.

Металлографические исследования проводили при использовании оптического микроскопа Olympus 1X70 и электронного микроскопа Hitachi S-3500N, оборудованного энерго-дисперсионным рентгеновским спектрометром EDS фирмы «Thermo Noran», который использовали для определения химического состава поверхности диффузионных слоев, полученных на образцах, с помощью характеристического рентгеновского излучения атомов. Для металлографических исследований использовали также микроскоп Axiovert 200 MAT фирмы «Carl Zeiss».

Анализ микроструктуры полученных диффузионных слоев и измерение их толщины выполнено на металлографическом микроскопе на поперечных шлифах. Вырезанные образцы заливали акриловой смолой (Duracryl Plus), а затем шлифовали на шлифовальной бумаге с уменьшением размера зерна. Шлифованные поверхности полировали с использованием алмазной пасты. Приготовленные шлифы подвергали химическому травлению (3 % раствор  $\text{HNO}_3$  в  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ).

Дифракционные картины снимали на двух дифрактометрах: D8Advance и Simens D500 при использовании медного и кобальтового характеристического излучения с монохроматизацией  $\text{CuK}\alpha$ . Использовали метод Брэгг-Брентано для фокусировки лучей в рентгеновском гониометре и метод малоуглового рассеяния рентгенов-

ских лучей при скользящих углах падения луча с постоянным углом падения  $\alpha = 5^\circ$  или  $\alpha = 3^\circ$ .

Поверхностную твердость и распределение твердости в диффузионных слоях определяли методом Vickers. Фотографии поверхности образцов выполнены с использованием сканирующего микроскопа РЭМ (SEM).

Карбонитрацию инструментальной стали 4Х5МФС осуществляли в активной засыпке порошковой среды, содержащей  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{C}$ ,  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ ,  $\text{NaHCO}_3$ . Температура процесса насыщения была на 20–30 °С ниже температуры отпуска и составляла 580 °С, продолжительность обработки – 2 и 4 ч. Перед химико-термической обработкой образцы из стали 4Х5МФС были подвергнуты улучшению, включая закалку с 1040 °С и двукратный отпуск (в вакууме при температуре 530 °С в течение 2 ч и при температуре 600 °С в течение 2 ч) на твердость ~53 HRC.

Псевдооживление химически активной засыпки, в качестве которой использовали порошковую среду для карбонитрации, достигалось механической вибрацией. Схема установки для осуществления процесса карбонитрации в виброкипящем слое представлена на рисунке 1.

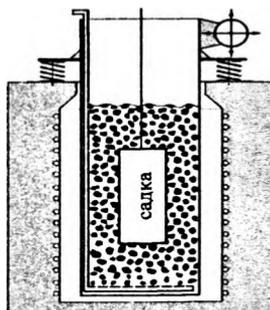


Рисунок 1 – Схема действия печи с виброкипящим слоем

С использованием метода конечных элементов [7] было рассчитано и экспериментально подтверждено время прогрева порошковой смеси и обрабатываемых образцов до рабочей температуры печи при проведении карбонитрации в виброкипящем слое и при традиционном печном нагреве (соответственно, 2 мин и 60 мин).

Последовательность операций при осуществлении процесса карбонитрации стали 4Х5МФС представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Последовательность отдельных операций проведения процесса карбонитрации

Последовательность обработки образцов
1. Нагрев порошковой смеси до температуры обработки с псевдооживлением механической вибрацией – 2 мин. Выключение вибрации.
2. Загрузка образцов в засыпку и включение псевдооживления механической вибрацией
3. Через 2 ч выемка образцов из засыпки на спокойный воздух
4. Через 4 ч выемка образцов из засыпки на спокойный воздух

Микроструктуры стали 4Х5МФС, карбонитрированной при температуре 580 °С в течение 2 и 4 ч, и распределение микротвердости по толщине диффузионного слоя представлены на рисунках 2–4. Как видно из представленных данных, в диффузионном слое можно различить две зоны, причем увеличение продолжительности процесса карбонитрации с 2 до 4 ч практически не повлияло на толщину поверхностной зоны карбонитридов: в обоих случаях она составляла около 16 мкм. Общая толщина диффузионной зоны при увеличении продолжительности процесса с 2 до 4 ч увеличилась соответственно с 50 до 100 мкм.

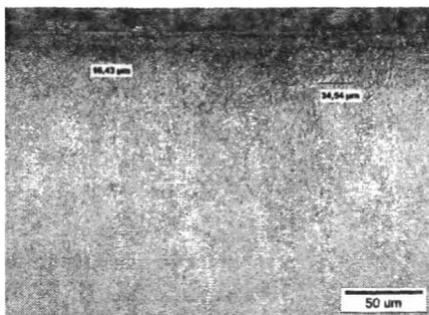


Рисунок 2 – Микроструктура карбонитридного слоя на стали 4Х5МФС (время насыщения 2 ч)

Увеличение продолжительности процесса с 2 до 4 ч приводит к повышению поверхностной твердости стали 4X5МФС с 980 HV<sub>0,2</sub> до 1100 HV<sub>0,2</sub> и, соответственно, к более плавному изменению микротвердости по толщине карбонитридного слоя от поверхности к сердцевине образца (рисунок 3).



1 – время насыщения 2 ч; 2 – время насыщения 4 ч  
Рисунок 3 – Распределение микротвердости по толщине диффузионного слоя

Данные микрорентгеноспектрального анализа свидетельствуют, что содержание углерода и азота в поверхностной зоне диффузионного слоя при увеличении продолжительности процесса также повышается.

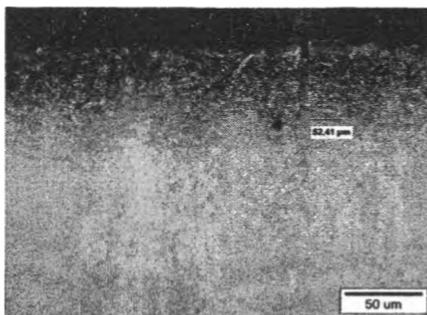


Рисунок 4 – Микроструктура карбонитридного слоя на стали 4X5МФС (время насыщения 4 ч)

Проведенные исследования показали, что формирование карбонитридных слоев в кипящем слое происходит аналогично формированию слоев при традиционном печном нагреве [8]. Однако применение описанной в настоящей работе технологии позволяет интенсифицировать процесс диффузионной карбонитрации за счет сокращения времени проведения процесса насыщения с 6–8 ч, (традиционный печной нагрев) до 2–4 ч (псевдооживление методом вибрации), а также времени прогрева порошковой смеси и образцов до рабочей температуры печи с 60 мин до 2 мин.

### Литература

1. Баскаков, А.П. Скоростной безокислительный нагрев и термическая обработка в кипящем слое / А.П. Баскаков. – М.: Металлургия, 1968. – 271 с.
2. Антифеев, В.А. О некоторых теплотехнических особенностях печей с 2-ступенчатым сжиганием газа в кипящем слое / В.А. Антифеев, А.П. Баскаков // Электротермия. – 1966. – № 49. – С. 25–28.
3. Заваров, А.С. Химико-термическая обработка в кипящем слое / А.С. Заваров, А.П. Баскаков, С.В. Грачев. – М.: Машиностроение, 1985. – 160 с.
4. Баландин, Ю.А. Комплексное насыщение стальной поверхности бором, азотом и медью в псевдооживленном слое / Ю.А. Баландин // Изв. вузов. Машиностроение. – 2004. – № 9. – С. 39–42.
5. Алиев, А.А. Цементация и нитроцементация автотракторных деталей в кипящем слое / А.А. Алиев, А.Ю. Ампилогов, Ак.А. Алиев // Металловед. и терм. обраб. мет. – 2009. – № 4. – С. 31–33.
6. Babul, T. Badania wpływu składu proszków na strukturę i budowę fazową warstw borowanych dyfuzyjnie / T. Babul [etc.] // Surface Engineering. – 2010. – № 4. – P. 49–58.
7. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
8. Кухарева, Н.Г. Структура и свойства диффузионных карбонитридных покрытий на быстрорежущих и нержавеющей сталях / Н.Г. Кухарева, Т. Бабуль, Я. Сенаторски // Металлообработка. – 2002. – № 1. – С. 21–24.