

ТЕРМООБРАБОТКА ПОРОШКОВЫХ СТАЛЕЙ

В статье рассмотрены вопросы термической обработки порошковых сталей с использованием скоростного нагрева в расплаве солей и ТВЧ.

В порошковой металлургии используются различные виды термической обработки порошковых материалов как для улучшения физико-механических характеристик, так и для придания материалам специальных свойств. Однако на машиностроительных заводах закалка с отпуском не получила еще широкого распространения при упрочнении порошковых сталей вследствие окисления изделий.

Работа посвящена разработке технологического процесса термической обработки порошковых сталей в соляных ваннах, а также изысканию режимов термической обработки при нагреве током высокой частоты (ТВЧ).

Как известно, расплавы солей обеспечивают безокислительный нагрев. Однако при этом возможны проникновение расплавов в поры, коррозия изделий и вследствие этого их разупрочнение. Для предотвращения возникновения подобных явлений были проведены работы по оптимизации составов ванн, определению глубины проникновения солей в материалы разной пористости, а также коррозионные испытания. Наименьшее проникновение солей при закалке обеспечивается в ванне состава: 80-85% BaCl₂; 20-15% NaCl.

По данным качественного химического анализа на катионы Ba²⁺, Na⁺, K⁺ и фазового рентгеноструктурного анализа проникновение солей в образцы толщиной 5-6 мм при пористости 25% является сквозным; при пористости 20% и меньше соли проникают на глубину 0,3-0,4 мм; при пористости 15% – на 0,05 мм. Эти результаты позволяют сделать вывод о возможности применения соляных расплавов при термообработке порошковых сталей.

Влияние пористости и гранулометрического состава порошков на проникновение солей при термообработке изучалось на имитационной модели весовым методом.

По результатам экспериментов было составлено уравнение

$$R = (ah + b\eta + c) / (c\eta + d), \quad (1)$$

где R – величина относительного привеса;

a, b, c, d – задаваемые параметры уравнения;

η – плотность;

h – средний размер частиц порошка.

Обработка экспериментальных данных на ЭВМ позволила вывести следующую зависимость:

$$R = 0,15000 \cdot \left[\eta - (31,33h + 102,27) \cdot 10^{-3} \right] / \sqrt{(507,23 - 51,13h) \cdot 10^{-3}}. \quad (2)$$

Допустив, что R равно нулю, получим зависимость между гранулометрическим составом и плотностью, позволяющую рассчитать плотность порошковых сталей, при которой соли не проникают в образец.

$$\eta = (31,33h + 102,37)10^{-3}. \quad (3)$$

Как видно из уравнения, влияние величины среднего размера частиц порошка на величину η незначительно. С учетом микропор, оксидов и других типов дефектов, обычно имеющих место в изделиях, пористость, при которой соль не проникает в образец, составит примерно 15%.

Испытания образцов различной пористости (использовался весовой метод) после термической обработки показывают, что скорость их коррозии при относительной влажности воздуха 45% и 90% практически равна скорости коррозии аналогичных образцов после операции спекания. Склонность спеченных и термообработанных сталей к коррозии стабильно увеличивается с ростом их пористости. Из образцов, прошедших термическую обработку в расплавах солей, наибольшую склонность к коррозии проявляют прошедшие отпуск в ваннах состава:

50%NaNO₃+50%KNO₃ и
50%KNO₃+35%NaNO₃+15%NaOH,

наименьшую – в составах:
50%KNO₃+50%NaNO₂ и
50%KNO₃+35%NaNO₂+15%NaOH.

В целях уменьшения коррозии порошковых деталей при длительном хранении были отработаны условия отмывки термообработанных деталей. Установлено, что коррозионная стойкость термообработанных порошковых сталей с введением операций пассивации и пропитки

не меньше, чем аналогичных спеченных сталей. Сравнительные исследования различных защитных сред при термообработке порошковых сталей позволили сделать заключение, что свойства материалов лучше и стабильнее при применении соляных ванн, чем при нагреве в газовых атмосферах (рисунок 1).

Ниже приведены свойства материалов, полученных при нагреве в соляных ваннах и в среде водорода.

При нагреве в соляных ваннах

$$Y_1(\sigma_B) = -1,92 \cdot \bar{X} \cdot 10^{-3} + 1,44 \cdot \bar{X} + 110, \quad (4)$$

$$Y_2(HB) = \frac{0,193 \cdot \bar{X} + 50,667}{133,333 + \bar{X}} \cdot 100, \quad (5)$$

$$Y_3(\delta) = \frac{0,34 \cdot \bar{X} + 14,00}{100,00 + \bar{X}}. \quad (6)$$

При нагреве в среде водорода:

$$Y_1(\sigma_B) = -1,078 \cdot \bar{X} \cdot 10^{-3} + 0,996 \cdot \bar{X} + 105, \quad (7)$$

$$Y_2(HB) = \frac{0,107 \cdot \bar{X} + 22,667}{66,667 + \bar{X}} \cdot 100, \quad (8)$$

$$Y_3(\delta) = \frac{0,47 \cdot \bar{X} + 25,333}{133,33 + \bar{X}}, \quad (9)$$

где $\bar{X} = X - 373$,

X – температура отпуска.

Кроме того, время термообработки в соляных ваннах в 5-10 раз меньше, чем при печном нагреве, и процесс легко поддается автоматизации.

Технологическая последовательность термической обработки спеченных деталей приведена в таблице 1.

Для исследования влияния режимов термической обработки на физико-механические свойства спеченных материалов были выбраны материалы марок СП100; СП130Д25; СП150Д2,5НЗ. Для всех указанных материалов были составлены матрицы планирования факторных уравнения факторного эксперимента, таблица 2.

Образцы, изготовленные из указанных выше материалов в соответствии с техническими условиями Броварского завода порошковой металлургии, подвергали термообработке в соляных ваннах: нагрев под закалку в ванне состава 85% BaCl₂ + 15% NaCl и в отпускной ванне

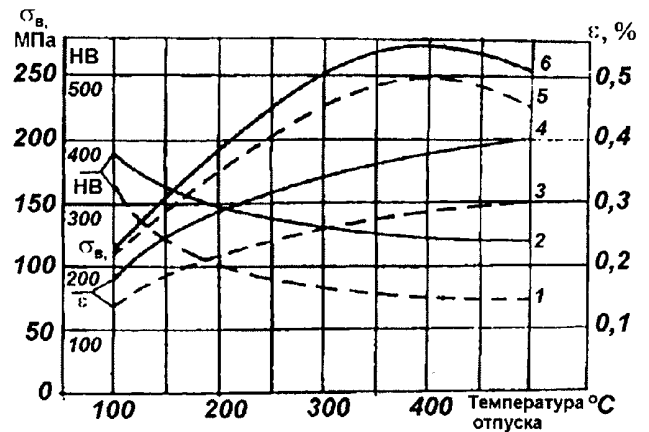


Рисунок 1. Изменение твердости (1, 2), относительного удлинения (3, 4) и предела прочности при растяжении (5, 6) в зависимости от температуры отпуска для материала СП150Д2,5 при термообработке в соляных ваннах (-) и в среде водорода (---)

Таблица 1. Технология термической обработки спеченных материалов при нагреве в соляных ваннах

| Операция | Среда | Температура, °С | Время, мин |
|---------------------|--|-----------------|------------|
| Нагрев под закалку | Соляная ванна 80-85 % BaCl ₂ + 20-15 % NaCl | 750-900 | 3-6 * |
| Закалка | Вода + NaCl (до 0,5 %) или масло | 20 | 3-6 |
| Сушка после закалки | Сжатый подогретый воздух | 70-100 | 3-6 |
| Отпуск | Соляная ванна 50 % KNO ₃ + 50 % NaNO ₂ | 180-500 | 30 |
| Охлаждение | Вода | 20 | 3-6 |
| Нейтрализация | 3%-ный раствор HCl | 20 | 3-6 |
| Промывка | Вода | 20 | 3-6 |
| Сушка | Воздух | 70-100 | 3-6 |
| Пропитка | Масло + солидол | 60-80 | 3-6 |

Таблица 2. Условия проведения и результаты опытов по термической обработке материала СП 100

| Факторы | Пористость, % | Температура нагрева под закалку, °С | Скорость охлаждения, °С/град/с | Температура отпуска, °С | Временное сопротивление, Н/мм ² | Твердость, HB | Относительное удлинение, % | Ударная вязкость, кДж/см ² |
|---------------------|----------------|-------------------------------------|--------------------------------|---|--|----------------|----------------------------|---------------------------------------|
| Основной уровень | 20 | 800 | 400 | 300 | 20,1 | 1090 | 2,6 | 94 |
| Предел варьирования | 5 | 50 | 200 | 150 | | | | |
| Верхний уровень (+) | 25 | 850 | 600 | 450 | | | | |
| Нижний уровень (-) | 15 | 750 | 200 | 150 | | | | |
| Код | X ₁ | X ₂ | X ₃ | X ₄ =X ₁ X ₃ | У ₁ | У ₂ | У ₃ | У ₄ |
| Номер опыта: | | | | | | | | |
| 1 | + | + | + | + | 199,2 | 136 | 0,7 | 69 |
| 2 | + | - | + | + | 153,2 | 139 | 0,65 | 30 |
| 3 | - | + | - | + | 376,0 | 106 | 2,5 | 59 |
| 4 | - | - | - | + | 343,9 | 98 | 2,63 | 112 |
| 5 | - | + | + | - | 392,3 | 138 | 1,3 | 40 |
| 6 | - | - | + | - | 447,3 | 281 | 1,3 | 73 |
| 7 | + | + | - | - | 162,6 | 115 | 1,9 | 99 |
| 8 | + | - | - | - | 187,0 | 105 | 0,6 | 91 |

50% KNO₃ + 50% NaNO₂. Температуру контролировали с точностью ±10° С. Образцы охлаждали в воде при 18-20° С (скорость охлаждения 600 град/с) и масляной ванне (скорость охлаждения 200 град/с).

При закалке резко возрастает плотность линейных дефектов железуглеродистых материалов. Она выше в образцах после закалки в среднем на два порядка. Рост микронапряжений при закалке объясняется активно протекающим процессом межфазного наклепа, который сопровождается повышением дисперсности субструктуры, путем быстрой перестройки малоугловых границ.

Соотношение основных фазовых составляющих в закаленных материалах зависит от пористости и содержания углерода. С увеличением пористости уменьшается количество мартенсита, растет количество остаточного аустенита. Увеличение содержания углерода действует в обратном направлении. С уменьшением пористости и увеличением содержания углерода растут междублетное расстояние, тетрагональность мартенсита, что говорит об увеличении растворенного углерода в твердом растворе (рисунок 2).

Свойства некоторых спеченных и термообработанных порошковых материалов приведены в таблице 3.

Порошковые стали необходимо защищать от окисления при нагреве под термообработку. Одним из малоокислительных способов нагрева заготовок является индукционный нагрев.

Нагрев под закалку порошковых сталей ТВЧ сокращает время термообработки и позволяет отказаться от использования защитных сред, так как поверхность деталей за 3-5 с нагрева не успевает окислиться. Кратковременность нагрева обеспечивает мелкозернистую структуру и повышение механических свойств, тогда как нагрев в газовых средах приводит к длительным выдержкам при нагреве изделий под закалку, обезуглероживанию поверхностных слоев, росту зерна и снижению механических свойств.

Нагрев под закалку ТВЧ образцов из материала СП150Д2,5-2 проводили с использованием высокочастотного генератора ВЧГ-60/0,06у4. Время выдержки определяется требованием к

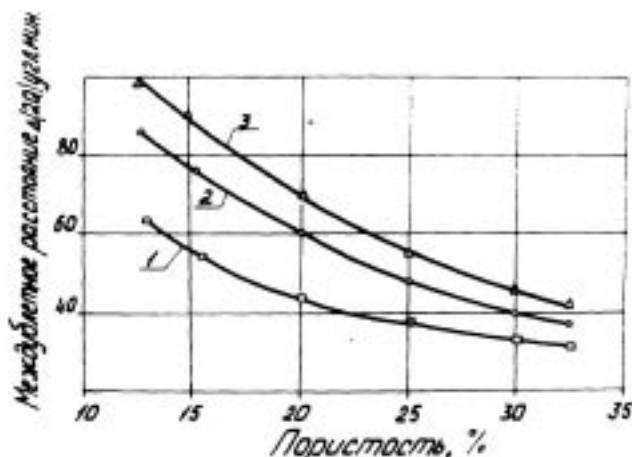


Рисунок 2. Тетрагональность мартенсита (110)-(101) при закалке от температуры 1123 К в воде железуглеродистых материалов в зависимости от пористости: 1 – СП80; 2 – СП100; 3 – СП150

Таблица 3. Свойства спеченных и термически обработанных материалов

| Марка материала | Пористость, % | Содержание углерода общее, % | Температура нагрева под закалку, °С | Охлаждающая среда | Температура отпуска, °С | Предел прочности при растяжении, МПа | Увеличение предела прочности при растяжении | Твердость, НВ | Увеличение твердости |
|-----------------|---------------|------------------------------|-------------------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------------------|---|---------------|----------------------|
| СП100 | 15 | 0,8 | 750 | Вода | 150 | 447/185 | 1,92 | 80/281 | 2,94 |
| СП150Д2,5 | 15 | 0,68 | 850 | Вода | 150 | 291/590 | 1,72 | 77/316 | 4,10 |
| СП100Д2,5 | 15 | 0,67 | 850 | Масло | 450 | 283/570 | 1,49 | 120/194 | 1,61 |
| СП100Д2,5Н3 | 12 | 0,92 | 800 | Вода | 300 | 400/740 | 1,85 | 140/306 | 2,18 |
| СП100Н0,4Х0,6 | 18 | 0,85 | 820 | Вода | 300 | 205/470 | 2,23 | 98/380 | 3,88 |
| СП125Н0,4М0,6 | 16 | 0,76 | 800 | Вода | 350 | 270/410 | 1,50 | 97,5/382 | 3,92 |

Примечание: в числителе – свойства спеченных, в знаменателе – свойства термообработанных материалов.

Таблица 4. Влияние длительности и среды охлаждения на механические свойства порошковой стали СП150Д2,5-2

| Вид стали | Среда охлаждения | Время охлаждения, с | Твердость, НВ | Разрушающая нагрузка при изгибе, Н/мм ² |
|-----------------------|----------------------------------|---------------------|---------------|--|
| Порошковая, спеченная | | | 1000-1200 | 800-1000 |
| | Порошковая, после термообработки | Масло | 3-5 | 260-280 |
| 10 | | | 280-290 | 1500-1600 |
| Вода | | 600 | 300-320 | 1200-1300 |
| | | 3-5 | 340-360 | 1700-1800 |
| | 10 | 360-370 | 1600-1700 | |
| | 600 | 380-420 | 1300-1400 | |

прокаливаемости деталей. Термическая обработка осуществлялась по режиму: напряжение анодное 4,5 кВт, ток анодный 2,5 А, частота 66 кГц, выдержка при нагреве под закалку 3-5 с, температура 950-980 °С. Охлаждение на воздухе, в воде или масле 3-5, 10 и 600 с.

Как видно из полученных данных (таблица 4), самоотпуск после охлаждения в масле или воде повышает прочность, но снижает твердость по сравнению с закалкой без самоотпуска.

При охлаждении деталей в масле с выдержкой в течение 3-5 с образуется трооститно-сорбитная структура с микротвердостью троостита 3500-4000 МПа, при выдержке 10 с – сорбито-перлитная структура с микротвердостью сорбита 2500-3000 МПа, перлита 1800-2200 МПа.

При охлаждении в воде с выдержкой 3-5 с образуется бесструктурный мартенсит с микротвердостью 4000-4500 МПа и троостит с микротвердостью 3500-4000 МПа.

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1) наиболее эффективными способами повышения физико-механических свойств порошковых материалов являются: снижение общей пористости, легирование, термическая обработка;

2) свойства термически обработанных порошковых сталей в расплавах лучше, чем в других средах;

3) термическая обработка с использованием ТВЧ обеспечивает более высокую твердость по сравнению с термической обработкой в расплавах солей.

Список использованной литературы:

1. Анциферов В.Н., Богодухов С.И., Буланов В.Я., Гревнов Л.М. Термохимическая обработка порошковых сталей. Екатеринбург: УрО РАН, 1997. 421 с.
2. Богодухов С.И. Упрочнение порошковых сталей с использованием скоростного нагрева // *Машиностроитель*, 1999, №10, С. 38 – 40.
3. Богодухов С.И. Термическая обработка порошковых сталей с нагревом в расплаве солей. Сборник «Проблемы современных материалов и технологий». Пермь. 1992, С. 118-128.