

Процесс термодиффузионной карбонитрации осуществляли при температуре 580 °С в течение 2 часов на сталях 4Х5МФС и Х12МФ из порошковых сред, содержащих оксиды хрома и алюминия, железистосинеродистый калий, уголь и бикарбонат натрия. Псевдоожигение достигалось использованием механической вибрации. Время прогрева порошковой засыпки и образцов до температуры проведения процесса (580 °С) составляло 3 минуты.

При вышеуказанных условиях на стали 4Х5МФС формировался диффузионный слой, состоящий из зоны карбонитридов толщиной ~ 16 мкм и следующей за ней диффузионной зоны толщиной 50 мкм. Поверхностная твердость составила 980 HV<sub>0,2</sub>. Увеличение продолжительности процесса карбонитрации с 2 до 4 часов практически не повлияло на толщину поверхностной зоны карбонитридов: в обоих случаях она составляла около 16 мкм. Общая толщина диффузионной зоны при этом увеличилась соответственно с 50 до 100 мкм. Увеличение продолжительности процесса с 2 до 4 часов привело к увеличению поверхностной твердости стали 4Х5МФС, соответственно с 980 до 1100 HV<sub>0,2</sub> и к более плавному изменению микротвердости по толщине карбонитридного слоя от поверхности к сердцевине образца.

На стали Х12МФ диффузионный слой также состоял из двух зон толщиной, соответственно, 15 и 45 мкм при продолжительности процесса насыщения равном 2 часа и, соответственно, 25 и 120 мкм при 4-х часовом процессе. Поверхностная твердость карбонитрированной стали Х12МФ не изменилась от увеличения времени насыщения и составила 1120 HV<sub>0,2</sub>.

По данным анализа EDS содержание азота в поверхностной зоне карбонитрированного слоя на сталях 4Х5МФС и Х12МФ с повышением температуры и времени выдержки увеличивается.

Проведенные исследования показали, что структура и микротвердость карбонитридных слоев, формирующихся при обработке в кипящем слое, аналогичны слоям, формирующимся при традиционном печном нагреве.

УДК 621.785

### **Влияние циклических фазовых превращений на дисперсность конечной структуры**

Ткаченко Г.А.

Белорусский национальный технический университет

Традиционная термоциклическая обработка с печным нагревом (скорость 5 °С/с) направлена на измельчение зерна стали и не имеет ограничений по количеству циклов. Мелкодисперсное строение получают много-

кратными фазовыми превращениями ферритоперлитной структуры в аустенит с последующим распадом в ферритокарбидную смесь. Чем больше количество превращений, тем выше дисперсность конечной структуры.

В условиях индукционного циклического нагрева (до 100 °С/с) происходит измельчение микроструктуры стали, карбидной фазы, но за меньшее число циклов. Перегретая структура материала при печном нагреве измельчается до 11 баллов за 6...8 циклов, а при индукционном нагреве необходимо 2...4 цикла.

Интенсивное уменьшение размера зерна обусловлено особенностью фазовых превращений в условиях скоростного нагрева, заключающейся в повышении температуры начала превращения и сокращении продолжительности образования зародышей аустенита. В результате скорость зарождения центров преобладает над скоростью роста зерна, что приводит к мелкодисперсной структуре.

Особенность индукционного нагрева заключается в том, что длительное термоциклирование (от 4 циклов) не приводит к увеличению дисперсности микроструктуры стали, а наоборот на поверхности проявляется разнородность, которая сопровождается увеличением диаметра отдельных зерен (с 8 до 90 мкм) и снижением твердости (с  $178 \pm 10$  HV до  $157 \pm 10$  HV). Такое явление было вызвано фазовыми напряжениями, которые непрерывно возникали и релаксировали путем микропластической деформации зерен. В результате произошла вторичная рекристаллизация зерен.

Установлено, что при термоциклической обработке цементованного слоя происходит измельчение карбидов (с 15 мкм до 2 мкм) и увеличение их количества в 1,5 раза. Это обусловлено выделением цементита во время охлаждения и ограниченной растворимостью при максимальной температуре из-за высокой скорости нагрева и непродолжительной выдержки.

УДК 621.785

### **Исследование структуры диффузионных слоев при насыщении углеродом коррозионностойких сталей**

Стефанович В.А., Белько О.С., Борисов С.В.  
Белорусский национальный технический университет

Насыщение высокохромистой стали углеродом широко используется при изготовлении штампов для холодной ОМД. В результате цементации и последующей закалки с низким отпуском формируется диффузионный слой состоящий из мартенсита с включениями карбидов, обладающих высокой твердостью (65-68HRC) и износостойкостью. Обычно цементацию