

# СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ДИФфуЗИОННОГО СЛОЯ ПРИ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМ И СОВМЕСТНОМ НАГРЕВЕ

**В. М. Константинов, Г. А. Ткаченко**

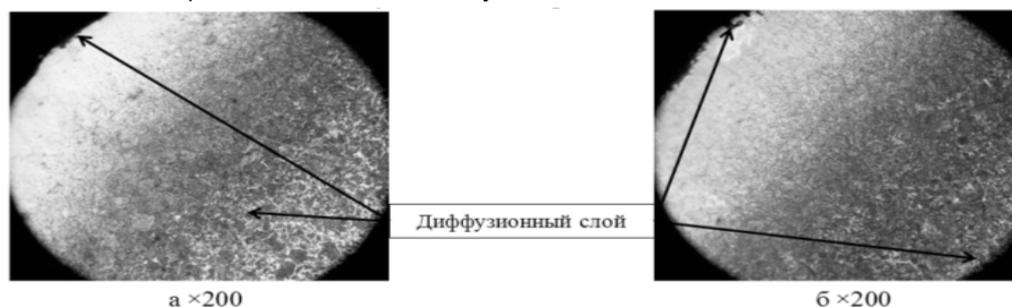
Белорусский национальный технический университет  
г. Минск, Беларусь

Стационарные процессы термической и химико-термической обработки металлов и сплавов наиболее распространены в промышленном производстве. Цементация, азотирование, закалка и отпуск отработаны, изучены и обеспечивают требуемые окончательные свойства сплава. Недостатком стационарных процессов является их ограниченное влияние на микро- и субструктуру материала, а следовательно на комплекс эксплуатационных свойств готового изделия. В настоящее время активно проводятся исследования по структурообразованию сталей и цветных сплавов в условиях циклической химико-термической и термической обработки. В научно-исследовательских работах рассмотрены изменения в процессах диффузионного насыщения, структурного состояния и конструкционной прочности стальных изделий под действием многократных фазовых превращений с печным нагревом. Однако не в полной мере изученными остаются процессы структурообразования диффузионных слоев с использованием циклического индукционного нагрева.

Влияние циклического нагрева на цементацию изучали на процессе высокотемпературного насыщения из паст на образцах из стали 40X. Технологический процесс заключался в обезжиривании поверхности образцов, приготовлении пасты, нанесении пасты на подготовленную поверхность образца, сушке слоя пасты. Подготовленные по описанной методике образцы помещали в индук-

тор, где нагрев осуществляли до температуры  $1050 \pm 50$  °С с последующей изотермической выдержкой до 120 с.

В силу специфики процессов, происходящих в условиях непрерывного изменения температуры, в стали происходит изменение кинетики и механизмов структурообразования, а также меняются свойства стали, а следовательно, надежность и долговечность изделия. Исследования и практический опыт показали эффективность использования ТЦО для повышения прочности, пластичности, вязкости и других механических свойств стали. В наших исследованиях удалось установить факт ускорения диффузии углерода в процессе высокотемпературной цементации из паст. В ходе циклического нагрева, заключающегося в перегреве образцов стали 40X на 200 °С выше точки  $A_3$  и охлаждении до температуры ниже точки  $A_1$  на 100 °С, происходила интенсификация диффузионных процессов, увеличивалась дисперсность слоя и основного металла, а также наблюдалось равномерное распределение микротвердости по толщине слоя. Кинетика диффузионного насыщения с циклическим нагревом имела сложную зависимость от количества циклов за единицу времени. Было установлено, что за один цикл с изотермической выдержкой равный 2 минутам, толщина высокоуглеродистого слоя составила 280 мкм, за четыре цикла теплосмен продолжительностью по 30 секунд – толщина слоя 340 мкм (рисунок 1).



а – после 4 циклов; б – после 6 циклов

Рисунок 1 - Микроструктура стальных образцов после цементации с циклическим

## ТЕХНОЛОГИИ ДИСПЕРСНОГО УПРОЧНЕНИЯ ЛИТОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКИ

Интенсификация процесса насыщения при ТЦО обусловлены следующим. В процессе скоростного индукционного нагрева формируется мелкозернистый аустенит с большой протяженностью границ зерен, что увеличивает коэффициент диффузии. Микропластическая деформация зерен из-за фазового наклепа [1], сопровождаемая рекристаллизацией [4]. Известно, что значительный эффект ускорения наблюдается, если процесс диффузии атомов внедрения сопровождается пластической деформацией выше температуры рекристаллизации [3, 4].

Во время циклической цементации установлено, что с увеличением интенсивности теплосмен (до 8) и уменьшением времени изотермической выдержки в аустенитной области при каждом цикле (выдержка 15 секунд) приводит к снижению скорости насыщения 30 мкм за 15 секунд.

При термоциклической обработке происходит фазовый наклеп [3, 4] и одновременно протекает процесс рекристаллизации зерен аустенита достигающий стадии полигонизации и в отдельных случаях вторичной рекристаллизации [2].

Известно [5, 6], что процесс предварительной холодной деформации снижает диффузионную подвижность атомов внедрения на углеродистых сталях с увеличением степени предшествующей деформации. Так в работах [4-6], при цементации стали 10 в течение 1 часа, установлено уменьшение толщины диффузионного слоя до 2 раз с ростом степени предшествующей деформации.

Уменьшение подвижности атомов внедрения обусловлено формированием термически устойчивой полигональной структуры, способствующей образованию вакансий, которые замедляют процесс диффузии атомов внедрения [3-6]. Полигональная структура может сохраняться до высоких температур [5], конкурируя с процессами рекристаллизации, снижающими повышенную плотность дефектов. В работах [4-6] отмечено, что при полигонизации и формировании субструктуры происходит перераспределение и аннигиляция дислокаций, сопровождаемая образованием значительного числа избыточных вакансий. Взаимодействие атомов внедрения с вакансиями приводит к замедлению их подвижности.

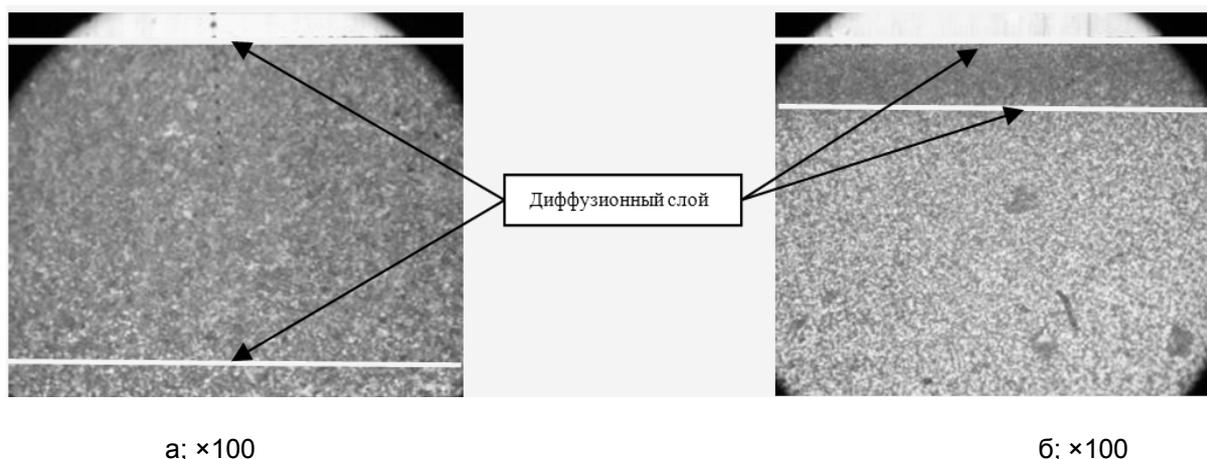
Для подтверждения предположения о том, что при циклических фазовых превращениях, сопровождаемых фазовым наклепом, могут образовываться термически

устойчивые дефекты кристаллической структуры, которые препятствуют диффузии атомов внедрения, были проведены дополнительные исследования по структурообразованию диффузионных слоев на конструкционных сталях во время цементации.

Изучение влияния предварительного термоциклирования на последующее диффузионное насыщение проводили на стали 40Х. Режимы предварительного термоциклирования заключались в многократном переходе через критические точки на 50 °С выше и на 100 °С ниже точек  $A_3$  и  $A_1$ .

Выбранный диапазон температур позволил получить равномерный прогрев всего сечения образца за один цикл индукционного нагрева. Этому способствовал интенсивный теплоотвод с поверхности в сердцевину образца, а также возрастающая глубина проникновения тока в сталь после перехода точки Кюри. Равномерность распределения температуры по сечению способствовала одновременному превращению ферритоперлитной структуры в аустенит по всему сечению. Нагрев и охлаждение в циклах осуществляли с постоянной скоростью 30...40 °С/с и 3...5 °С/с. Температуру контролировали при помощи пирометра. Образцы перед термоциклированием были подвергнуты полному отжигу. Предварительная циклическая обработка проводилась в количестве 6 циклов. Как было установлено ранее после 4 и более циклов скоростного индукционного нагрева в структуре металла возникают наклепанные зерна, появляется полигональная структура, которая весьма устойчива при последующем нагреве. Сохраняющаяся полигональная структура задерживает скорость перемещения атомов внедрения, тем самым мешая их движению [2].

Диффузионное насыщение проводили при 850 °С в течение 1 часа в науглероживающей среде. Сопоставление кинетики насыщения осуществляли на образцах без предварительного термоциклирования (отжиг) и после 6-ти кратного термоциклирования. Было установлено, что в крупнозернистом металле, предварительно отожженном, диффузия протекает быстрее, чем в мелкозернистом металле (наклепанное зерно в результате фазовых превращений). Подобное явление обусловлено задержкой развития рекристаллизационных процессов структуры металла из-за сформированной полигональной структуры при предварительной ТЦО (рисунок 2).



а – отожженный образец; б – предварительная ТЦО шесть циклов

Рисунок 2 – Микроструктура диффузионного слоя на стали 40X после цементации в течение 1 часа 850 °С

**Выводы:**

Интенсификация диффузии в среднеуглеродистой стали достигается за счет периодической микропластической деформации и одновременной рекристаллизации зерен в процессе многократных фазовых превращений. Фазовые превращения сопровождаются измельчением структуры, что увеличивает протяженность границ зерен и блоков – легких путей диффузии.

Замедление диффузии наблюдается только при количестве циклов более 4, это обусловлено накоплением степени микропластической деформации зерен и формированием устойчивой полигональной структуры, которая препятствует протеканию рекристаллизационных процессов в полном объеме. Так как диффузия не сопровождается рекристаллизацией зерен, поэтому и происходит снижение интенсивности роста диффузионного слоя. Данный факт убедительно доказан при совместном воздействии на металл диффузии углерода и циклических фазовых превращений, а также при предварительной термоциклической обработке стали перед цементацией. В обоих случаях наблюдается снижение толщины слоя. Общеизвестный факт, что в мелкозернистом материале скорость диффузии выше справедлив, если зерно металла не имеет дефектов кристаллического строения (оно не наклепано).

**Список литературы:**

1 Федюкин, В.К. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин / В.К.

Федюкин, М.Е. Смагоринский. – Л.: Знание, 1989. – 241 с.

2 Константинов, В.М. Образование структуры рекристаллизации при термоциклической обработке конструкционных сталей / Константинов В.М., Ткаченко Г.А. // Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штамповочного производств : материалы X Междунар. научн.-практ. конф., Барнаул, 19-20 ноября 2009 г. / АлтГТУ ; рекол.: А.М. Гурьев [и др.]. – Барнаул, 2009. – С. 61–65.

3 Матосян, М.А. Влияние предварительной холодной пластической деформации на диффузию углерода в сплавах на железной основе / М.А. Матосян, В.М. Голиков // Физика металлов и металловедение, 1968. – Т. 25. – Вып. 2. – С. 377–381.

4 Долженков, И.Е. Влияние пластической деформации на насыщение железа углеродом / И.Е. Долженков, И.Н. Лоцманов, И.И. Андрианова // Металловедение и термическая обработка металлов, 1973. – № 3. – С. 2–5.

5 Бутаков, Б.И. Влияние поверхностной пластической деформации на степень упрочнения и диффузию химических элементов в поверхностном слое / Б.И. Бутаков, Д.Д. Марченко // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, 2009. – № 46. – С. 17–21.

6 Герцрикен, Д.С. Некоторые закономерности миграции атомов в условиях скоростной пластической деформации / Д.С. Герцрикен, В.Ф. Мазанко // Металлофизика, 1983. – Т. 5. – № 4. – С. 74–84.