

Реализация представленных способов интенсификации диффузионных процессов цинкования позволит сократить время обработки изделия, а также снизить энергозатраты при реализации данных процессов в производственных условиях.

Литература

1. **Ворошнин, Л.Г.** Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО / Л.Г. Ворошнин, Ф.И. Пантелеенко, В.М. Константинов. – Минск: ФТИ; Новополоцк: ПГУ, 2001. – 148 с.
2. **Пантелеенко, Ф.И.** О классификации способов интенсификации процессов химико-термической обработки металлов и сплавов / Ф.И. Пантелеенко, Л.С. Ляхович, Б.С. Кухарев // *Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр.* – Минск, 1980. – Вып. 14. – С. 5–6.
3. **Пантелеенко, Ф.И.** Интенсификация диффузионного хромирования углеродистых сталей / Ф.И. Пантелеенко // *Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр.* – Минск, 1980. – Вып. 14. – С. 7–8.
4. **Баландин, Ю.А.** Диффузионное комплексное цинкование в виброкипящем слое как способ повышения коррозионной стойкости деталей машин / Ю.А. Баландин, А.С. Колпаков, Е.В. Жаров // *Автомобильная промышленность.* – 2006. – № 11. – С. 31–32.
5. **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.

УДК 621.7

В.М. КОНСТАНТИНОВ, д-р техн. наук,
Г.А. ТКАЧЕНКО, канд. техн. наук (БНТУ)

АНАЛИЗ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ ПРИ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИИ

Широко используемые процессы термической и химико-термической обработки металлов и сплавов, основанные на однократном нагреве и охлаждении, наиболее распространены в про-

мышленном производстве. Процессы цементации, азотирования, закалки и отпуска к настоящему времени достаточно изучены, отработаны и обеспечивают требуемые окончательные свойства сплава. Вместе с тем, недостатком стационарных процессов является их ограниченное влияние на микро- и субструктуру материала, а, следовательно, на комплекс эксплуатационных свойств готового изделия. В связи с этим в настоящее время активно проводятся исследования по структурообразованию сталей и цветных сплавов в условиях циклической химико-термической и термической обработки.

Процесс термоциклирования основан на чередовании стадий нагрева и охлаждения, которые могут повторяться с разной интенсивностью в количестве от двух и более раз. Основными параметрами термоциклической обработки являются скорость нагрева и охлаждения, интервал температур, в которых осуществляется процесс. Применительно к сталям, циклический нагрев можно проводить с полной фазовой перекристаллизацией или с неполным превращением ферритоперлитной структуры в аустенит. Схема с полной фазовой перекристаллизацией основана на протекании полиморфной реакции образования аустенита из феррита, а также диффузионном превращении перлита в аустенит на стадии нагрева. Стадия охлаждения заключается в снижении температуры до полного распада аустенита на ферритокарбидную смесь (рисунок 1). Схема термоциклирования целесообразна для получения мелкого (10–13 баллов) действительного зерна аустенита и применима к доэвтектоидным сталям [1–5].

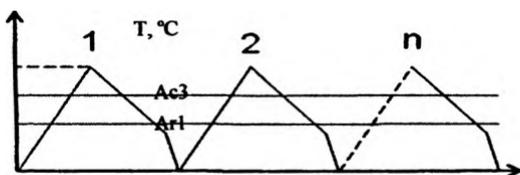


Рисунок 1 – Схема термоциклической обработки (ТЦО) с полной фазовой перекристаллизацией

Термоциклирование выше критической точки A_{c1} и охлаждение ниже точки A_{r1} эффективно для заэвтектоидных сталей. Такой нагрев обеспечивает неполное растворение вторичных карбидов, что

способствует получению мелкозернистого аустенита и исключает рост зерна (в случае изотермической выдержки). В силу специфики процессов структурообразования (фазовый наклеп, напряжения, неполная растворимость карбидов, неоднородность аустенита), карбидная составляющая стали претерпевает процесс измельчения и сфероидизации [1–5]. Доэвтектоидные стали при циклическом нагреве с неполным превращением испытывают большие внутренние напряжения (рекристаллизация зерен проходит не полностью), требуется большее число циклов для формирования мелкого зерна (в процесс не задействовано превращение феррита в аустенит).

Скорость нагрева является определяющим фактором, оказывающим влияние на эффективность циклической обработки сталей. Известно [1], что чем выше скорость нагрева, тем мельче формируется аустенитное зерно, поэтому число циклов может быть сокращено. Скорость на стадии охлаждения должна быть такой, чтобы исключить мартенситное, бейнитное превращение. Распад аустенита должен всегда завершаться образованием ферритокарбидной смеси. Слишком медленное охлаждение (большая садка) может привести к неравномерному увеличению зерен аустенита. Быстрое снижение температуры сохранит мелкозернистую структуру, но при этом фазовые напряжения, возникающие при нагреве, будут наследоваться, накапливаться от цикла к циклу. В результате мелкозернистая структура будет наклепана и металл упрочнится, что при определенных условиях может привести к снижению ударной вязкости.

Термоциклирование может быть применено для сплавов, где нет полиморфных превращений. Нагрев до температур максимальной растворимости элементов, а затем ускоренное охлаждение приводит к фиксации высокотемпературного состояния. Это сказывается на изменении химического состава фаз, начале и окончании превращений. Изменение растворимости элементов достаточно для проведения циклического нагрева, обеспечивающего улучшение зеренной структуры [1, 2].

Авторами [3, 4] разработана технология термоциклического упрочнения инструментальных сталей при нагреве в соляных печеваннах. Рассмотрено структурообразование инструментальных сталей марок У10А, Х12Ф1, 5ХНМ, для которых применено термоциклирование с неполным фазовым превращением. На углеродистых и легированных инструментальных сталях удалось повысить ударную

вязкость хрупкой мартенситной структуры при сохранении высокой твердости и прочности. На стали марки У8 после закалки и низкого отпуска формировалась структура мартенсита отпуска с твердостью 60 HRC и ударной вязкостью 12 Дж/см², после предварительного термоциклирования твердость сохранилась, а работа по разрушению образца повысилась до 30 Дж/см².

Повышение свойств обусловлено измельчением зерна аустенита. Чередование процессов растворения и выделения углерода между ферритокарбидной смесью и аустенитом способствует возможности протекания коагуляции и сфероидизации частиц избыточных фаз (сульфидов, фосфидов), что уменьшает вредное влияние этих примесей. Установлено, что циклический нагрев оказывает существенное влияние на структурное состояние карбидов. Из непрерывной сетки пластинчатого строения образуются изолированные дисперсные карбиды глобулярной формы, располагающиеся как по границам, так и внутри зерен.

Экспериментально было установлено, что повышение ударной вязкости стали X12Ф1 наблюдается уже после двух термоциклов. Закалка и низкий отпуск обеспечивают твердость 60 HRC и ударную вязкость 14 Дж/см², циклические фазовые превращения обеспечивают прирост вязкости до 33 Дж/см².

Рентгеноструктурные исследования показали, что мартенсит имеет меньшую степень тетрагональности, что объясняется снижением концентрации углерода в нем при ТЦО. Уменьшение интенсивности пиков на рентгенограмме от углов существования карбидов хрома и молибдена свидетельствует об измельчении и равномерном распределении карбидов по стали. Дополнительно отмечено измельчение зерна аустенита, что привело к мелкодисперсному мартенситу.

Технология печного термоциклического нагрева была разработана для различного рода инструментов: фрез, резцов, холоднотампового инструмента. Преимущества данной технологии перед поверхностным упрочнением (лазерная закалка, наплавка, покрытия) заключаются в объемном упрочнении, высокой ударной вязкости. Это позволяет многократно перетачивать инструмент и повышать его надежность.

В работах [3, 4] приведены результаты исследований морфологии борированных слоев, сформированных на углеродистых и леги-

рованных инструментальных сталях в условиях циклического и стационарного нагрева. Технология борирования заключалась в диффузионном насыщении из паст (состав B_4C , графит, бентонит, NaF). Стационарный режим насыщения проводили при температуре $970^\circ C$ с выдержкой в течение 2 ч. Во втором случае схема обработки состояла из четырех циклов в диапазоне температур $970\text{--}730^\circ C$. Время циклирования составляло 2 ч.

Установлено, что циклический нагрев приводит к увеличению толщины слоя до 80 % на углеродистых и 20 % на легированных сталях. Фазовый состав слоев, полученных в разных условиях, не отличался. Основные фазы в слое – это Fe_2B и FeB . Морфология сформированных слоев отличалась более разветвленными иглами бористых фаз. При циклическом нагреве толщина переходной зоны более чем в 1,5 раза превосходит зону, полученную в стационарном режиме. Термоциклирование привело к существенным качественным изменениям переходной зоны. В образцах на глубине 2,5 мм от поверхности присутствуют два карборида $Fe_3(C, B)$ и $Fe_{23}(C, B)_6$, что свидетельствует о значительной диффузионной подвижности атомов бора в процессе термоциклического нагрева. Основной причиной интенсификации является развитая граничная область. Способ термоциклического борирования был применен для упрочнения штампового и режущего инструмента из углеродистых и легированных сталей.

В работе [5] были выполнены исследования, направленные на изучение влияния различных режимов термоциклической обработки с печным нагревом на структурообразование диффузионных слоев при цементации и азотировании.

Основные результаты заключаются в установлении и обосновании новых режимов термоциклической обработки. При цементации конструкционных сталей (20, 20X, 20ХН и др.) в интервале температур $600\text{--}950^\circ C$ за равное время насыщения толщина цементованного слоя при ХТЦО в 2,0–2,5 раза больше, чем при изотермическом режиме. При этом установлено отсутствие дефектов слоя (цементитной сетки, структурно свободного феррита), имеющих место при изотермической цементации. Азотирование конструкционных сталей (40X, 20ХН3А и др.) в интервале температур $300\text{--}600^\circ C$ приводит к сокращению продолжительности диффузионного насыщения в 8–10 раз по сравнению с изотермическим азо-

тированием. Металлографически установлено отсутствие хрупкой составляющей ϵ -фазы и нитридной сетки по границам зерен.

Расчет параметров диффузии углерода и никеля и анализ их температурных зависимостей для различных структурно-фазовых состояний стали и различных режимов химико-термоциклической обработки (ХТЦО) позволили установить, что эффективный коэффициент диффузии углерода в стали 20 составляет $(1,7-2,5) 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$. Это в 3 раза выше, чем при изотермической цементации сталей.

Циклический нагрев в сталях вызывает внутренние (структурные, фазовые и температурные) напряжения, релаксация которых приводит к локальной межзеренной микропластической деформации при одновременном сохранении стабильности размеров образцов и деталей. Установлено, что для термоциклированных сталей свойственны более высокая скорость и большая степень релаксации напряжений, чем для закаленных и нормализованных: наиболее активный характер релаксации напряжений наблюдается при $750-800 \text{ }^\circ\text{C}$, когда релаксирует до 96 % напряжений в течение 3 мин.

Разработана эффективная технология химико-термоциклической обработки сталей, включающая операции термоциклического воздействия и диффузионного насыщения в едином процессе. Оптимальными режимами операций являются: предварительная ТЦО в интервале температур на $30-50 \text{ }^\circ\text{C}$ выше A_{c1} и ниже A_{t1} , скорости нагрева и охлаждения $2-5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ при числе термоциклов 3-5, затем диффузионное насыщение углеродом в интервале на температур $100 \text{ }^\circ\text{C}$ выше A_{c3} , окончательная ТЦО по режиму аналогично предварительной.

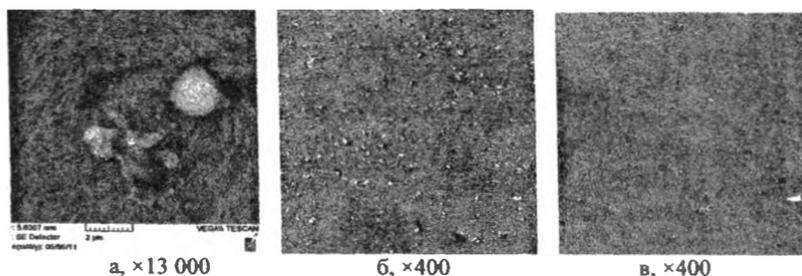
Традиционная термоциклическая обработка с печным нагревом направлена на измельчение зерна стали и не имеет ограничений по количеству циклов. Мелкодисперсное строение получают многократными фазовыми превращениями ферритоперлитной структуры в аустенит с последующим распадом в ферритокарбидную смесь. Чем больше количество превращений, тем выше дисперсность конечной структуры.

При изучении структурообразования при индукционном циклическом нагреве было установлено, что индукционная ТЦО (4 и более циклов) измельчает перегретую структуру 5 баллов до 9 (сталь 20) и 13 (сталь 40Х) баллов. Однако из-за объемных полиморфных превращений происходит накопление напряжений второго рода, которые вызывают микропластическую деформацию зе-

рен, сопровождающуюся рекристаллизацией на поверхности и в сердцевине стального образца [6–8].

Влияние термоциклического индукционного нагрева на структурообразование диффузионных слоев было рассмотрено на сталях 40X, 65Г, подвергнутых предварительной нитроцементации при 850 °С в течение 7 ч. В работе было установлено, что циклический индукционный нагрев с полными фазовыми превращениями позволяет получить в диффузионном слое мелкоигльчатый мартенсит с длиной наибольших игл 4–8 мкм, а в сердцевине стального образца – 8–12 мкм. Это сопровождается повышением твердости слоя и увеличением ударной вязкости [8].

Новой важной особенностью структурообразования диффузионных слоев стало то, что циклический нагрев оказывает существенное влияние на форму, размеры и количества цементитной фазы. При многократных фазовых превращениях, сопровождаемых растворением и выделением цементита, в высокоуглеродистом аустените происходят процессы перераспределения углерода и выделения цементита во время охлаждения. При повторном нагреве выделившиеся частицы цементита практически не растворяются при максимальной температуре, так как скорость нагрева высока и времени для их растворения недостаточно. В результате площадь цементитной фазы в диффузионном слое заметно больше (4 цикла), нежели в нитроцементованном слое после стационарного режима насыщения. Наименьший размер цементитных включений составил 2 мкм (рисунок 2)



а, б – циклическая ТО, закалка; в – закалка, низкий отпуск
Рисунок 2 – Электронная сканирующая микроскопия диффузионного слоя стали 40X

Технология индукционной термоциклической обработки разработана для упрочнения деталей почвообрабатывающих машин, от которых требуется высокая вязкость в сочетании с максимальной твердостью.

Выводы

Наиболее общие результаты, достигнутые к настоящему времени в ходе изучения термоциклического нагрева сталей, заключаются в следующем:

- циклический нагрев от 2 и более циклов вызывает измельчение микроструктуры и фаз;
- наблюдается повышение ударной вязкости хрупкой структуры – мартенсита, сформированной на стали с любым количеством углерода;
- наблюдается эффективная сфероидизация и измельчение карбидной фазы;
- мелкодисперсная структура повышает твердость;
- многократные фазовые превращения при химико-термической обработке способствуют повышению скорости насыщения;
- продолжительность процесса борирования и цементации сокращается в 2–3 раза по сравнению со стационарным режимом;
- диффузионные слои не имеют дефектов, наблюдаемых при традиционных способах насыщения.

Особенности индукционного циклического нагрева заключаются в следующем:

- циклический индукционный нагрев (30–40 °С/с) до 4 циклов измельчает структуру, а большее число циклов приводит к микропластической деформации зерен, в которых протекает рекристаллизация, сопровождаемая разнотерностью;
- благодаря высокой скорости нагрева измельчение перегретой структуры с 5 до 13 баллов происходит за 1–3 цикла, при печном нагреве требуется от 4 и более циклов;
- скоростной многократный нагрев приводит к повышению количества карбидной составляющей диффузионного нитроцементованного слоя до 1,5 раз. Наибольшая дисперсность карбидной фазы составила 2 мкм.

Литература

1. Федюкин, В.К. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин / В.К. Федюкин, М.Е. Смагоринский. – Л.: Знание, 1989. – 241 с.

2. Тихонов, А.С. Термоциклическая обработка сталей, сплавов и композиционных материалов / А.С. Тихонов, В.В. Белов. – М.: Наука, 1984. – 168 с.

3. Гурьев, А.М. Термоциклическое и химико-термоциклическое упрочнение сталей / А.М. Гурьев, Л.Г. Ворошнин, Ю.П. Хараев // Ползуновский вестник. – 2005. – № 2, ч. 2. – С. 36–44.

4. Гурьев, А.М. Циклическое тепловое воздействие при ТО и ХТО инструментальных сталей / А.М. Гурьев, Л.Г. Ворошнин // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – Барнаул : АГТУ, 2005. – № 3. – С. 37–46.

5. Забелин, С.Ф. Основы технологии и кинетической теории процессов диффузионного насыщения сталей в условиях термоциклического воздействия на материал : дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.01 / С.Ф. Забелин. – Чита, 2004. – 254 с.

6. 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.

7. Константинов, В.М. Циклическое воздействие индукционных токов на конструкционную сталь при цементации / Константинов В.М., Ткаченко Г.А. // Энергоэффективные электротехнологии : материалы Междунар. молодежн. форума, 19–23 сентября 2011, г. Санкт-Петербург / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – СПб, 2011. – С. 21–25

8. Ткаченко, Г.А. Конструкционная прочность и структурообразование углеродистых сталей при термоциклической обработке / Ткаченко Г.А. // Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр.: в 2 ч. – Минск: БНТУ, 2011. – Вып. 33, ч. 2. – С. 119–133.