

- цинковании // Промышленное и гражданское строительство. – 2009. – №5. – С. 28–31.
3. Константинов В.М., Булойчик И.А. Особенности реализации процессов термодиффузионного цинкования при антикоррозионной защите термообработанных стальных изделий // Материалы 3-го Республиканского научно-технического семинара «Создание новых и совершенствование действующих технологий и оборудования нанесения гальванических и их замещающих покрытий». – Минск: БГТУ, 2013. – С. 66–70.

УДК 621.785.5

Г.А. Ткаченко

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

ОСОБЕННОСТИ ИНДУКЦИОННОЙ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Широко используемые процессы термической и химико-термической обработки металлов и сплавов, основанные на однократном нагреве и охлаждении, наиболее распространены в промышленном производстве. Цементация, азотирование, закалка и отпуск изучены, отработаны 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.

Целью настоящей работы является создание технологии повышения эксплуатационных свойств изделий за счет установленных закономерностей структурообразования поверхности и сердцевины сталей при термоциклическом режиме ТО и ХТО стальных изделий.

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, диапазон 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.

Термоциклирование выше критической точки A_{c1} и охлаждение ниже точки A_{g1} эффективно для заэвтектидных 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]. Доэвтектидные 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 процессе не задействовано превращение феррита в аустенит).

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. Печное термоциклирование позволяет получить структуру 10–13 баллов за 6–8 циклов. Этот процесс весьма длительный и энергоемкий.

Повысить интенсивность измельчения структуры и сократить продолжительность цикла обработки можно за счет индукционного нагрева. 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. Немаловажным условием сохранения мелкой структуры является скорость на стадии охлаждения. Эта характеристика должна быть такой, чтобы исключать 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 индукционном 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 [6].

Главные задачи изучения структурообразования при индукционном циклическом нагреве:

- динамика измельчения структуры;
- механические характеристики структуры;

Изучение процессов структурообразования в условиях циклического индукционного нагрева проводили на образцах конструкционных сталей марок 40X и 20. Предварительно все образцы были подвергнуты диффузионному отжигу с целью формирования крупнозернистой структуры.

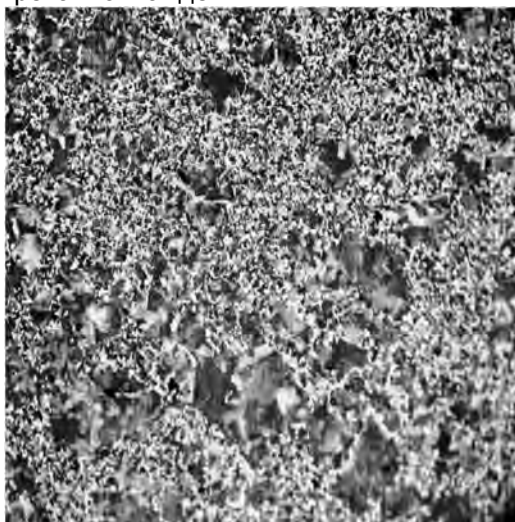
Термоциклирование проводили с применением индукционного нагрева в режиме полной фазовой перекристаллизации. Скорость нагрева 30–40°С/с и охлаждения в циклах составила 5°С/с. Установлено, что индукционная ТЦО (4 и более циклов) измельчает перегретую структуру 5 баллов до 9 (сталь 20) и 13 (сталь 40X) баллов. Динамика измельчения зерна при термоциклировании с индукционным нагревом сложна и не определяется зависимостью 1 цикл = 1 балл структуры. Интенсивность измельчения определяется количеством карбидной составляющей. Структура низкоуглеродистых сталей измельчается медленно. Наиболее интенсивно процесс протекает в первых 2 циклах, где каждый цикл обеспечивает уменьшение структуры на 1–2 балла. Дальнейшая обработка уменьшает балл зерна менее интенсивно (1 цикл = 1 балл). В среднеуглеродистых сталях за 1 цикл зерно уменьшается на 2–3 балла, но только в первых 3–4 циклах. В высокоуглеродистых сталях желательно

проводить термоциклирование с неполными фазовыми превраще-превращениями, так как при полной аустенизации интенсивность измельчения зерна резко снижается. Структура долго остается крупнодисперсной.

Авторские исследования позволили определить, что индукционная ТЦО в выбранном диапазоне скоростей нагрева и охлаждения имеет ограничение по числу циклов. Низкоуглеродистые и среднеуглеродистые стали не следует подвергать индукционному ТЦО свыше 4–6 циклов. Ограничение вызвано накоплением в структуре напряжений.

Таким образом, было установлено, что термоциклирование от 4 и более циклов приводит к разнорзерности структуры (рис. 1). Это явление обусловлено объемными полиморфными превращениями, вызывающими напряжения, накопление которых происходит от цикла к циклу. Накопление напряжений вызвано их неполной релаксацией в цикле нагрева и охлаждения [6–8].

Дополнительно от цикла к циклу накапливаются и термические напряжения. Наличие термических напряжений обусловлено разностью температур по сечению образца, разностью коэффициента термического расширения фаз, скоростью нагрева и охлаждения.



×100

Рис. 1. Микроструктура стали 40X после восьми циклов ТЦО

Подтверждением образования структуры с микронапряжениями подтверждает параметр решетки (рис. 2). Фазовые превращения приводят к увеличению микроискажений кристаллической решетки с каждым циклом от 0,02 (отжиг) до 0,06 (6 циклов). При циклическом нагреве наблюдается тенденция к уменьшению параметра кристаллической решетки на $0,0003 \text{ \AA}$ в сравнении с отожженным образцом. Таким образом, можно говорить о том, что зерна подвергаются микропластической деформации, степень которой зависит от количества циклов. При многократной ТЦО (верхняя температура цикла постоянна) снижение температуры рекристаллизации отдельных зерен может привести не только к первичной, но и вторичной рекристаллизации. В структуре стали 40X после 4 циклов (см. рис. 1) на поверхности образца можно заметить укрупнение отдельных зерен перлита на фоне мелких зерен размером 10–16 мкм. Эффект разнотерности был установлен и изучен на низкоуглеродистой стали марки 20 [6–8].

Таким образом, было установлено, что циклический нагрев стали эффективнее измельчает действительное зерно аустенита, чем печной циклический нагрев. Однако длительное термоциклирование (более 6 циклов) может вызывать фазовый наклеп и рекристаллизацию зерен. Что в значительной мере влияет на формирование структуры и механических свойств.

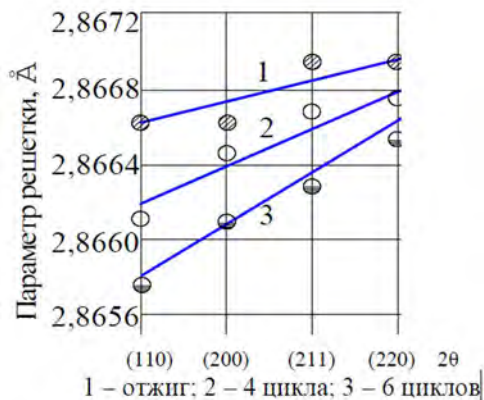


Рис. 2. Параметр решетки стали после ТЦО

Влияние циклического нагрева на физико-механические свойства в отличие от стационарных процессов обеспечивает практически двукратное увеличение характеристик. Индукционный циклический нагрев не исключение.

В работе было установлено, что циклический индукционный нагрев оказывает существенное влияние на количество избыточной цементитной фазы в диффузионных слоях. 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 слое после стационарного режима насыщения. Наименьший размер цементитных включений составил 2 мкм (рис. 3).

В результате мелкодисперсный цементит в твердой мартенситной матрице обеспечивает твердость диффузионному слою 66–68 HRC. Таких результатов не удастся получить при печной термоциклической обработке. Высокая твердость, как правило, сопровождается падением ударной вязкости. Однако индукционный нагрев (до 4 циклов) обеспечивает ненапряженную мелкодисперсную структуру, которая хорошо сопротивляется ударным нагрузкам.

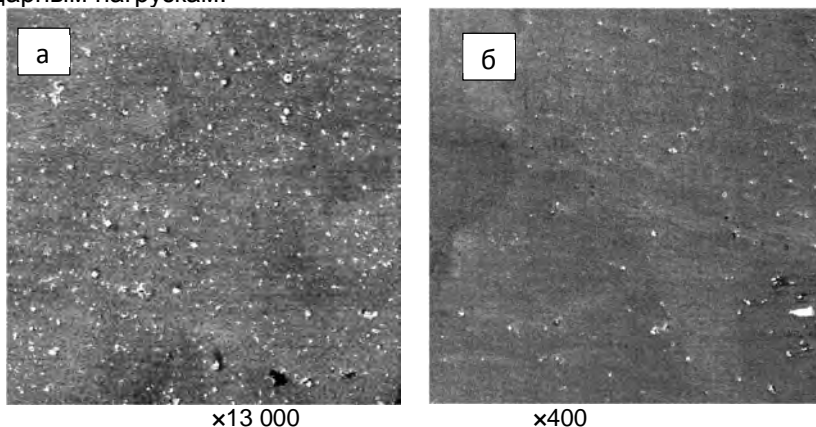
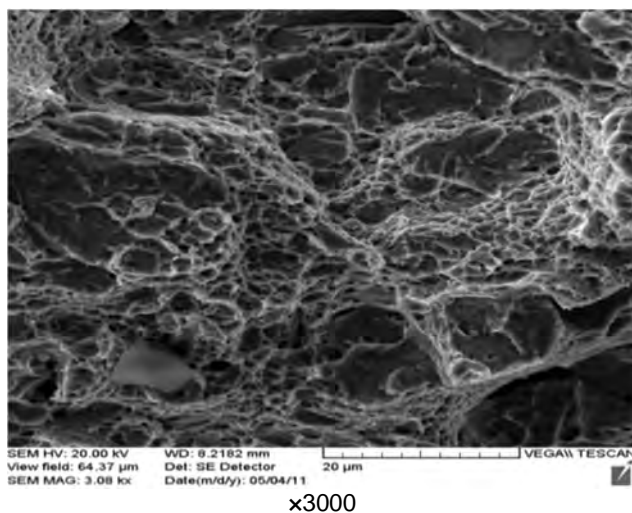


Рис. 3. Электронная сканирующая микроскопия диффузионного слоя стали 40X:

а – циклическая ТО, закалка; в – закалка, низкий отпуск

При проведении механических испытаний (ГОСТ 9454-78) было установлено, что ударная вязкость образцов сталей 40X после нитроцементации, индукционного ТЦО, закалки и низкого отпуска повышается в 1,5 раза в сравнении с обработкой без ТЦО. Излом стали получается фарфоровидный, мелкокристаллический (рис. 4). Максимальная ударная вязкость была получена за 2–4 цикла нагрева. Дальнейшее термоциклирование проводить нецелесообразно, так как появляется разнотернистость в структуре, что снижает механические характеристики [7].



ХТО с последующей ТЦО, закалкой и низким отпуском (40X)
Рис. 4. Фактографии изломов конструкционных сталей

Таким образом, индукционная циклическая термическая обработка перед закалкой и низким отпуском позволяет повысить ударную вязкость мартенситной структуры (сталь 40X) до 35–45 Дж/см².

Технология индукционной циклической термической обработки была практически реализована для упрочнения оборотных долот и крепежных элементов корпусов плугов, а также для ножей газонокосилок. Технология внедрена в производство в 2011 году на РУП «МЗШ», где до сих пор работает участок упрочнения деталей почвообрабатывающих машин.

Выводы:

1. Индукционный циклический нагрев эффективно измельчает перегретую микроструктуру стали. За 3–4 цикла можно получить зерно 12–14 баллов. При печном нагреве аналогичный результат получить за аналогичное число циклов невозможно.

2. Индукционный циклический нагрев после цементации позволяет увеличить число карбидной составляющей в диффузионном слое. Твердость слоя достигает 66–68 HRC. Такой высокой твердости обычная обработка не обеспечивает.

3. Среднеуглеродистая сталь после цементации, индукционного циклического нагрева, закалки и низкого отпуска имеет высокую ударную вязкость 35–45 Дж/см².

4. При разработке технологии индукционной циклической обработки следует учитывать установленный и теоретически обоснованный факт. Число циклов не должно быть больше 4–6. Большее число циклов сопровождается образованием рнззернистости структуры.

Список литературы

1. Федюкин В.К., Смагоринский М.Е. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин. – Л.: Знание, 1989. – 241 с.
2. Тихонов А.С., Белов В.В. Термоциклическая обработка сталей, сплавов и композиционных материалов. – М.: Наука, 1984. – 168 с.
3. Гурьев А.М., Ворошнин Л.Г., Хараев Ю.П. Термоциклическое и химико-термоциклическое упрочнение сталей // Ползуновский вестник. – Ч. 2. – 2005. – №2. – С. 36–44.
4. Гурьев А.М., Ворошнин Л.Г. Циклическое тепловое воздействие при ТО и ХТО инструментальных сталей // 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. – Чита, 2004. – 254 с.
6. Константинов В.М., Ткаченко Г.А. Образование структуры рекристаллизации при термоциклической обработке конструкционных сталей // 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., Ткаченко Г.А. Циклическое воздействие индукционных токов на конструкционную сталь при цементации // Энергоэффективные: материалы Междунар. молодежного форума, 19–23 сентября 2011 г. / ГЭТУ «ЛЭТИ». – СПб., 2011. – С. 21–25.
 8. Ткаченко Г.А. Конструкционная прочность и структурообразование углеродистых сталей при термоциклической обработке // Респб. межведом. сб. науч. тр. Металлургия / БНТУ. – 2011. – Вып. 33. Ч 2. – С. 119 – 133.