

ИНДУКЦИОННАЯ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА, КАК СПОСОБ КОМПЛЕКСНОГО ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ УЛУЧШАЕМЫХ СТАЛЕЙ

Константинов В.М., Ткаченко Г.А.

*Белорусский национальный технический университет
г.Минск, Республика Беларусь, vm.konstantinov@bntu.by*

Одной из актуальных задач современного металловедения является повышение конструкционной прочности стальных изделий. Традиционные пути упрочнения в многом исчерпаны. Решение этой проблемы лежит в области применения новых методов обработки наряду с уже существующими способами термической и химико-термической обработки стали. К перспективным методам упрочнения можно отнести термоциклическую обработку металла (ТЦО). Под ТЦО в общем случае следует понимать процесс термического воздействия, который осуществляется с заданной периодичностью теплосмен и определенной скоростью.

Многочисленные исследования и практический опыт показали, что метод ТЦО является весьма эффективным для повышения прочности, пластичности, вязкости, контактной прочности и других механических свойств стали. Результаты исследований свидетельствуют о значительном повышении пластичности и вязкости стали при сохранении прочности: для среднеуглеродистой стали после ТЦО предел текучести повышается на 6...15 %, пластичность – на 10...20 %, ударная вязкость – на 75...110 % по сравнению с традиционной термической обработкой [1,2]. Повышение указанных характеристик после ТЦО обусловлено измельчением микроструктуры. Степень измельчения зависит от температурно-скоростных параметров циклической обработки.

Целью настоящей работы является изучение путей повышения эксплуатационных свойств изделий из конструкционных улучшаемых сталей за счет ранее установленных закономерностей структурообразования поверхности и сердцевины сталей при термоциклических режимах ТО и ХТО.

Основными параметрами термоциклической обработки, как правило, 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. Соответственно нагрев осуществляют до температур A_{C1} или A_{C3} . 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. Ранее распространенное мнение, что чем больше количество превращений, тем выше дисперсность конечной структуры в последние годы претерпело изменения. Сейчас принято считать, что число теплосмен не должно быть более 5. В противном случае процессы рекристаллизации будут доминировать над процессами фазового наклепа и связанного с ним диспергирования структуры. Печное термоциклирование позволяет получить структуру 10-13 баллов за 6-8 циклов. Однако, этот процесс весьма длителен и энергоемкий. Он нашел определенное применение в промышленности, например применяют маятниковый отжиг для сфероидизации перлита инструментальных сталей.

Повысить интенсивность измельчения структуры и сократить продолжительность цикла обработки можно за счет скоростного индукционного нагрева. Известно, что чем выше скорость нагрева, тем мельче формируется аустенитное зерно, поэтому число циклов может быть сокращено. Немаловажным является условие сохранения мелкой структуры на

стадии охлаждения. Эта характеристика 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 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.

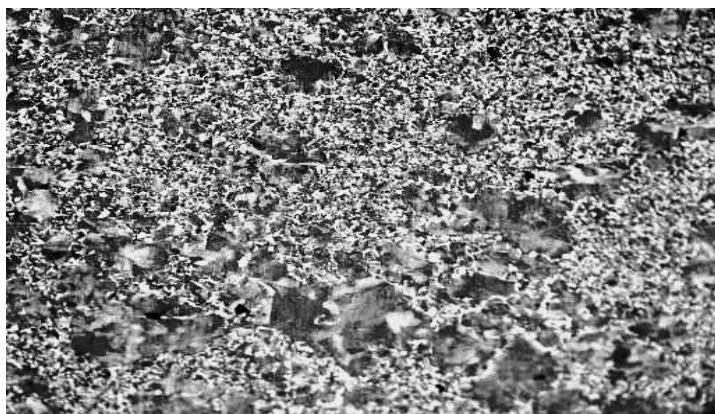
Изучение процессов структурообразования в условиях циклического индукционного нагрева проводили образцах конструкционных сталей марок 40X и 20. Предварительно все образцы были подвергнуты диффузионному отжигу с целью формирования крупнозернистой структуры.

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 от 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.

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 разнотерности структуры (рисунок 1). Это явление обусловлено объемными полиморфными превращениями, вызывающими напряжения, накопление которых происходит от цикла к циклу. Накопление напряжений вызвано их не полной релаксацией в цикле нагрева и охлаждения.

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

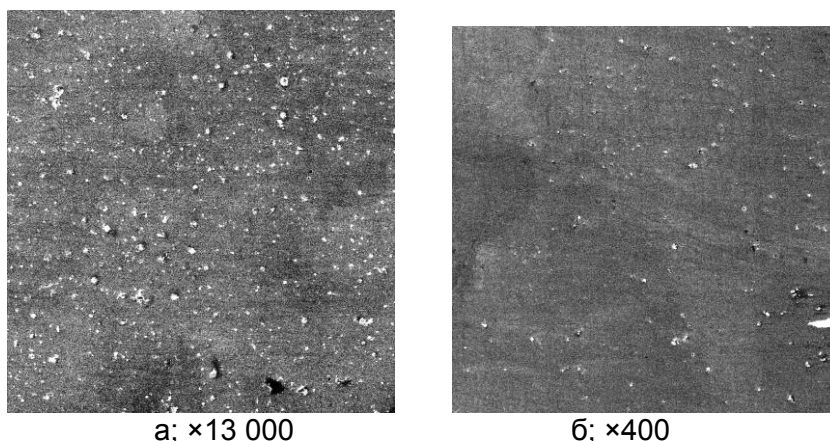


×100

Рисунок 1 – Микроструктура стали 40X после восьми циклов ТЦО

Образование структуры с микронапряжениями подтверждает параметр решетки. 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 (фазовый наклеп). 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 (рисунок 1) на поверхности образца можно заметить укрупнение отдельных зерен перлита на фоне мелких зерен размером $10 \dots 16 \text{ мкм}$.

В работе было установлено, что циклический индукционный нагрев оказывает существенное влияние на количество избыточной цементитной фазы в диффузионных слоях. В результате после ТЦО площадь цементитной фазы в диффузионном слое заметно больше (4 цикла), нежели в слое после стационарного режима насыщения. Наименьший размер цементитных включений составил 2 мкм (рисунок 2). Факт активизации диффузионных процессов при термоциклической обработке хорошо известен. Однако, процессы интенсификации карбидообразования в диффузионном слое требуют дальнейших исследований. В результате мелкодисперсный цементит в прочной мартенситной матрице обеспечивает твердость диффузионному слою до $66 \dots 68 \text{ HRC}$. Известно, что высокая твердость, как правило, сопровождается падением ударной вязкости. Однако индукционный нагрев (до 4 циклов) обеспечивает ненапряженную мелкодисперсную структуру, которая хорошо сопротивляется ударным нагрузкам.



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

Рисунок 2 – Электронная сканирующая микроскопия диффузионного слоя стали 40X

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 обработкой без ТЦО. Излом стали получается фарфоровидный мелкокристаллический. Максимальная ударная вязкость была получена за 2-4 цикла нагрева. Это хорошо согласуется с литературными данными. Установлено [3,4], что дальнейшее термоциклирование проводить нецелесообразно. Измельчающее действие фазового наклепа в этом случае компенсируется активизацией рекристаллизационных процессов. Имею место начальные стадии собирательной и вторичной рекристаллизации. Это приводит к разнотерности в структуре, что снижает механические характеристики.

Результатом описываемых структурных изменений при индукционной индукционной циклической термической обработке перед закалкой и низким отпуском является повышение ударной вязкости мартенситной структуры (сталь 40X) до 225 Дж/см^2 .

Выводы:

Индукционный циклический нагрев эффективно измельчает перегретую микроструктуру конструкционной улучшаемой стали. За 3-4 цикла можно получить зерно 12-14 баллов. При печном нагреве аналогичный результат получить за аналогичное число циклов крайне сложно.

Индукционный циклический нагрев после цементации позволяет увеличить число карбидной составляющей в диффузионном слое. Твердость слоя достигает 66...68 HRC.

При индукционной ТЦО число циклов не должно быть больше 4-6. В случае превышения количества теплосмен возможно проявление разнотерности структуры.

Литература:

1. Федюкин, В.К. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин / В.К. Федюкин, М.Е. Смагоринский. – Л.: Знание, 1989. – 241 с.
2. 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 л.
3. Константинов, В.М. Циклическое воздействие индукционных токов на конструкционную сталь при цементации / Константинов В.М., Ткаченко Г.А. // Энергоэффективные : материалы Междунар. молодежного форума, 19-23 сентября 2011 г. / ГЭТУ «ЛЭТИ», Спб. – С. 21-25
4. Ткаченко, Г.А. Конструкционная прочность и структурообразование углеродистых сталей при термоциклической обработке / Ткаченко Г.А. // Респб. Межведом. сб. научн. тр. Металлургия / БНТУ. – 2011. – Вып. 33. Ч 2. – С. 119 – 133.