

ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЕ И ХИМИКО-ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ СТАЛЕЙ

А.М. Гурьев, Л.Г. Ворошнин, Ю.П. Хараев, Б.Д. Лыгденов,
С.А. Земляков, О.А. Гурьева, А.А. Колядин, О.В. Попова

Для улучшения структуры сталей и повышения их механических свойств разрабатываются различные виды термической обработки металлов, основанные на использовании циклических тепловых воздействий, получивших название термоциклической обработки (ТЦО) [1].

В отличие от других видов термической обработки структурные и фазовые превращения при ТЦО совершаются многократно при изменяющейся температуре нагрева–охлаждения. Необходимость многократного повторения обработки при заданных температурах, как правило, обусловлено стремлением накопить изменения, которые коренным образом улучшают качество изделий и придают им свойства, недостижимые при однофазовой термической обработке [2, 3]. Чаще всего, возникающие изменения от цикла к циклу связывают с изменениями, вызванными пластической деформацией. При ТЦО наклеп осуществляется в процессе термической обработки, но на этой основе разработаны и другие методы упрочнения сталей и сплавов, такие как механико-термическая обработка (МТО) [3] и др. Основное отличие МТО от ТЦО в том, что при МТО предполагается предварительное механическое упрочнение (наклеп), после которого проводят термическую обработку.

Характер фазового взаимодействия компонентов в системе во многом определяет эффективность воздействия ТЦО на изменения структуры и свойств сплавов. В случае полной не смешиваемости компонентов в твердом состоянии термоциклирование не сопровождается изменением количества фаз в системе, а структурные изменения в сплавах этой системы под воздействием ТЦО могут быть связаны лишь с последствиями микропластической деформации и последующей рекристаллизации. Микропластические деформации упрочняют сплавы, а рекристаллизация повышает их пластичность.

В случае наличия растворимости компонентов друг в друге в эвтектической и перитектической системе, характер процессов ТЦО изменяется. Растворимость компонентов приводит к возможности диффузионного массопереноса через твердые растворы. Появляется возможность диффузионного деле-

ния протяженных частиц, как в эвтектике, так и избыточных фаз, а также их сфероидизация и коагуляция.

При ТЦО сплавов, матрица которых претерпевает фазовые превращения (например, сплавы на основе железа) возникают значительные межфазные напряжения при повторных диффузионных превращениях, а также градиенты температур между отдельными элементами матрицы, которые приводят к увеличению центров превращения и, в итоге, к измельчению зерна. Сплавы, со сформированной таким образом структурой, имеют повышенную ударную вязкость, высокую прочность и удовлетворительную пластичность.

В железоуглеродистых сплавах имеет место фазовое превращение, которое играет решающую роль в делении сетки карбидов и значительно упрощает ТЦО. Установлено [4, 5], что ТЦО оказывает существенное влияние на структурное состояние карбидов. Из непрерывной сетки пластинчатого строения в результате ТЦО образуются изолированные дисперсные карбиды глобулярной формы, располагающиеся как по границам аустенитных зерен, так и внутри зерна.

Эффективность влияния ТЦО на структуру и свойства стали во многом определяется режимом ее осуществления, то есть температурами в цикле, количеством циклов, а также скоростью нагрева и охлаждения. Противоречивое понимание их взаимного влияния создало предпосылки для применения широкого спектра способов ТЦО, отличающихся не только принципом воздействия на структуру (с полными фазовыми превращениями, с частичными или без таковых), но и самое главное, различающихся до 20 – 50 раз энергозатратами для получения необходимого результата.

В связи с этим разработка и внедрение новых более эффективных технологий упрочнения инструментальных сталей, повышающих качество готового инструмента и, в конечном итоге – его эксплуатационную стойкость, обеспечивающую значительное снижение энергозатрат, направлены на решение и теоретическое обоснование научной проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение.

ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЕ И ХИМИКО-ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ СТАЛЕЙ

Целью настоящей работы являлась разработка новой высокоэффективной технологии термического упрочнения инструментальных сталей на основе установления обобщенного механизма формирования их структуры и свойств в процессе окончательной термоциклической обработки.

Была проведена оптимизация режимов окончательной термоциклической обработки для инструментальных сталей У8А, У10, 9ХС, Х12Ф1, 5ХНМ и др. Построены математические модели, связывающие технологические факторы ТЦО (температура нагрева и охлаждения, время выдержки при этих температурах, скорость нагрева и охлаждения) со структурой и механическими свойствами наиболее широко применяемых углеродистых и легированных инструментальных сталей.

Математические модели отчетливо выявили те параметры ТЦО, которые наиболее сильно влияют на механические свойства, а также эффекты их взаимодействия. Установлено, например, что основными критериями, определяющими пластичность и ударную вязкость эвтектоидной стали является температура в термоцикле и время выдержки при максимальной температуре.

В настоящей работе изучено влияние параметров высокотемпературной ТЦО с неполными фазовыми превращениями на структуру и физико-механические свойства инструментальных сталей.

Выполнение ТЦО, по разработанным режимам, позволяет повысить ударную вязкость углеродистых инструментальных сталей при сохранении высокой твердости и прочности (см. таблицу 1 и рисунок 1а, б). Это происходит за счет чередующегося повторения процессов взаимного растворения – выделения между ферритокарбидной смесью и аустенитом способствующего получению благоприятного структурного состояния в конечной структуре стали и возможности протекания процессов коагуляции и сфероидизации частиц избыточных фаз (сульфидов, фосфидов и др.) уменьшающих вредное влияние этих примесей. Кроме того, в разработанном способе ТЦО снижена длительность процесса за счет уменьшения количества циклов нагрева и охлаждения.

Изучены особенности тонкой структуры эвтектоидной стали У8А сформировавшейся в результате различных видов теплового воздействия. Сталь подвергалась различным видам окончательной термической обработки. Показан двойственный эффект воздействия ТЦО: по одним параметрам она увеличи-

вает стабильность структуры стали, по другим – наоборот, удаляет её от равновесия. Это проявляется в увеличении объемной доли карбидов с одновременным уменьшением их размеров (см. рисунок 1 а, б).

Таблица 1 – Механические свойства
углеродистых инструментальных сталей

Вид термической обработки (ТО)	Марка стали	Твердость, HRC ₉	Ударная вязкость КС, Дж/см ²
Закалка+отпуск 2 часа при 200 °С	У8	60	30
	У10А	61	28
ТЦО+отпуск 2 часа при 200 °С	У8	60	179
	У10А	61	118

Установлено, что в результате ТЦО происходят следующие основные изменения: - изменяется структура, размеры и морфология карбидов; -одновременно снижается уровень внутренних напряжений; -основным местом зарождения трещин являются большие частицы карбидов, основным путем распространения трещин – межфазные границы “α-фаза - карбид” и внутрифазовые границы в α-фазе.

Измельчение и перераспределение карбидов затрудняет, во-первых, зарождение микротрещин и, во-вторых, распространение их по указанным выше траекториям. В сочетании с уменьшением внутренних полей напряжений указанные эффекты повышают ударную вязкость в результате ТЦО и последующего низкого отпуска. Высокое сопротивление деформированию стали сохраняется благодаря тому, что параметры мартенситной и дислокационной структуры меняются при ТЦО незначительно.

Экспериментально установлено, что повышение ударной вязкости образцов из стали Х12Ф1 обработанным по оптимальным режимам высокотемпературной термоциклической обработки с неполными фазовыми превращениями происходит уже после двух термоциклов (см. таблицу 2).

Рентгенографические исследования показали, что мартенсит имеет меньшую степень тетрагональности, что объясняется снижением в нем углерода при ТЦО по оптимальным для этой стали режимам. Также отмечено уменьшение интенсивности на углах существования карбидов хрома и молибдена, что можно объяснить измельчением и более равномерным их распределением по объему металла. Это подтверждается и металлогра-

фическими исследованиями, которые кроме измельчения карбидной фазы показали уменьшение исходного зерна. Всеми этими изменениями можно объяснить полученный высокий комплекс физико-механических свойств исследуемой стали.

Таблица 2 – Механические свойства стали Х12МФ

Вид термической обработки (ТО)	Твердость, HRC ₃	Ударная вязкость КС, Дж/см ²
Традиционная ТО: закалка в масле от 1030 °С +отпуск 2 часа при T=200 °С	59,5 – 61,5	30 - 40
ТЦО + отпуск 2 часа при T=200 °С	60 – 61	65 - 75

Для улучшения структуры и повышения механических свойств инструментальных сталей нами разработана высокоэффективная технология окончательной термоциклической обработки (ТЦО) на основе установления обобщенного механизма формирования их структуры и свойств в процессе термоциклирования [4, 5].

Повышение ударной вязкости стали Х12Ф1 обработанной по оптимальным режимам высокотемпературной термоциклической обработки происходит уже после двух термоциклов в 1,6 – 2,5 раза при сохранении твердости (см. таблицу 2).

Новая технология термической обработки предназначена для повышения эксплуатационной стойкости инструмента из углеродистых и легированных инструментальных сталей, а именно: для резцов, фрез, холодноштампового инструмента и т.д. По сравнению с известными методами поверхностного упрочнения инструментальных сталей (лазерной и электроннолучевой, нанесением покрытий) предлагаемая технология:

- является более дешевой и простой, т.к. осуществляется только методом термической обработки без проведения последующей поверхностной упрочняющей обработки инструмента;
- более эффективна для инструмента, испытывающего большие ударные нагрузки благодаря более высоким показателям ударной вязкости и прочности стали;
- позволяет многократно перетачивать и в дальнейшем использовать инструмент бла-

годаря не поверхностному, а объемному упрочнению.

При небольшом увеличении длительности процесса предлагаемая технология термообработки по сравнению с традиционной (закалкой и отпуском) обеспечивает повышение эксплуатационной стойкости инструмента в 1,2 – 2 раза и более окончательной ТЦО.

Технологический процесс не требует дополнительного оборудования, материалов и высококвалифицированного персонала по сравнению с традиционной термообработкой. Процесс прост в осуществлении, легко автоматизируется и экологически безопасен.

Разработанная технология термообработки инструмента отличается от традиционной:

- режимом и последовательностью проведения операции закалки;
- режимом операции отпуска;
- большей продолжительностью операции закалки (в 2 – 4 раза).

Остальные операции термообработки (подогрев, охлаждение в закалочной среде, мойка, очистка, контроль) остаются неизменными.

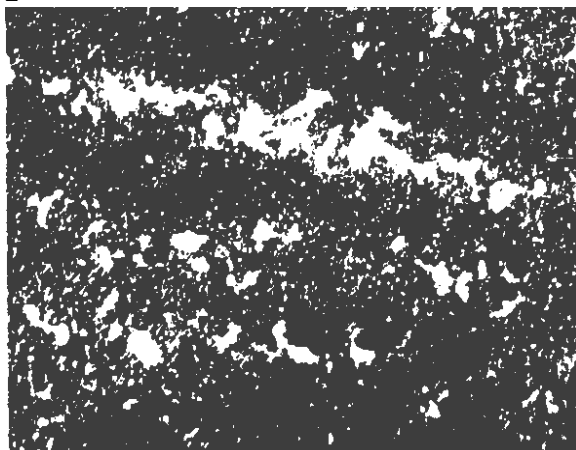
Указанная технология не требует дополнительной обработки поверхности до, и после термообработки. Длительность полного цикла термообработки инструмента разработанным методом, по сравнению с традиционным, возрастает на 3 – 10 %. Стоимость указанной термообработки увеличивается пропорционально удлинению цикла. Такое увеличение составляет 5 – 15 % от стоимости стандартного цикла термообработки.

Разработанная технология термической обработки инструментальных сталей [4 – 11] защищена патентами Российской Федерации на изобретение.

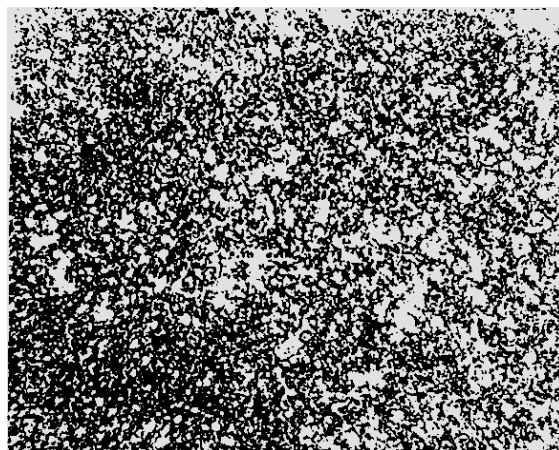
Одним из основных и наиболее перспективных методов поверхностного упрочнения сталей является химико-термическая обработка. Ее применение особенно эффективно, когда необходимо получить детали с заранее заданными свойствами: коррозионно- и износостойкостью, жаропрочностью и т.д. Это экономически более выгодно, чем получение сталей с такими же свойствами [12, 13]. К перспективным методам относится диффузионное борирование, которое позволяет повысить коррозионную стойкость деталей машин и инструмента, а также их износостойкость [14, 15].

ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЕ И ХИМИКО-ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ СТАЛЕЙ

1

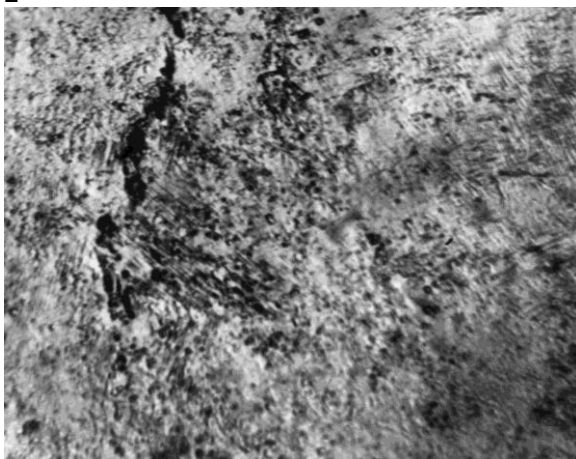


а

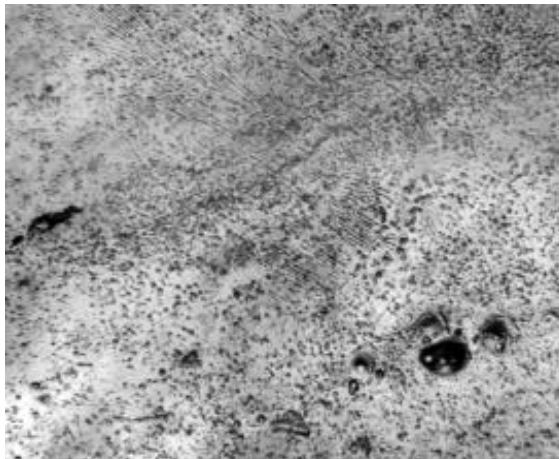


б

2

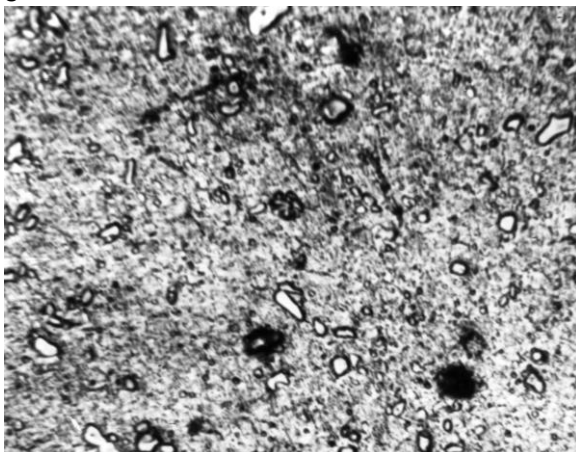


в

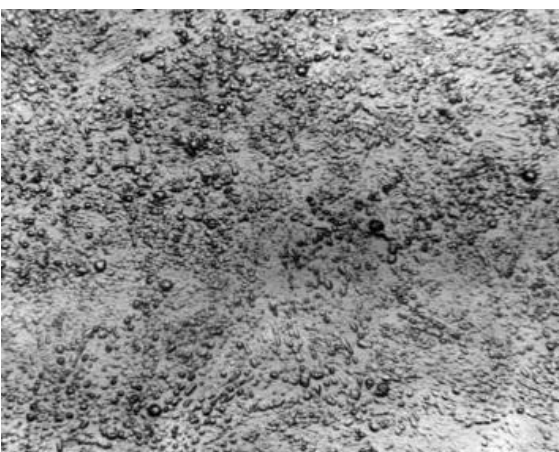


г

3



д



е

Рисунок 1 – Структура сталей после традиционной ТО (а, в, д,) и после окончательной ТЦО (б, г, е): 1 – сталь У8, 2 – 5ХНМВ, 3 – 45Х2МНВФКЮ (х 650)

Недостатками процессов традиционной ХТО являются их энергоёмкость и продолжительность. Диффузионное насыщение поверхности стали чаще всего производят при высокотемпературной изотермической или изотермически-ступенчатой выдержке с полной перекристаллизацией стали в аустенитное состояние. Это приводит к перегреву – структура и механические свойства, кроме твёрдости и износостойкости, ухудшаются. Есть и другие недостатки в технологии ХТО с высокотемпературной выдержкой в процессе насыщения: коробление от обычной ползучести, высокая энергоёмкость и т.д.

Указанные недостатки можно устранить при диффузионном насыщении поверхности сплава в режиме термоциклирования.

Известно [14 - 16], что химико-термическая обработка (ХТО) сталей при некоторых циклически изменяющихся температурных режимах (ХТЦО) более эффективна, чем при постоянной температуре насыщения. ХТЦО позволяет получить упрочнённый диффузионный слой необходимой толщины за более короткое время, а разработанные нами новые способы ТЦО и ХТЦО, позволяют реализовывать их на стандартном оборудовании любого термического участка. Новые способы ТЦО и ХТЦО совмещены с закалкой в последнем цикле, последующий отпуск дает необходимую твёрдость, как «сердцевины», так и поверхности детали т.е. формирует окончательные свойства изделия.

Применение термоциклической и химико-термоциклической обработок представляет значительный интерес с точки зрения повышения эксплуатационной стойкости деталей машин, за счёт улучшения структуры и комплекса физико-механических свойств стали. Причём, как указывалось выше, ТЦО позволяет улучшить механические свойства не только по рабочей поверхности, но и по всему объёму детали, что позволяет значительно повысить его работоспособность. Нами разработан новый способ ХТЦО, который позволяет получить упрочнённый слой необходимой глубины за более короткое время с сохранением высоких физико-механических свойств основного металла. Разработанные технологии ТЦО и ХТЦО позволяют реализовывать их на традиционном оборудовании (соляные ванны, камерные и шахтные печи) термического цеха без использования дополнительных приспособлений и создания специализированных участков. Более того, ТЦО и ХТЦО возможно совместить с закалкой в

последнем цикле, последующий отпуск дает необходимую твёрдость.

Исследовали структуру борированных углеродистых (см. рисунок 2) и инструментальных сталей (см. рисунки 3, 4). Борирование проводили по традиционной технологии и в режиме ТЦО из насыщающей обмазки (пасты) толщиной 2–5 мм (состав обмазки: B_4C , графит, NaF, бентонит), нанесенной на поверхность цилиндрических образцов (длина - 30мм, диаметр-15 мм) по двум схемам. В первом случае проводили борирование при температуре 970°C с выдержкой в течение 2 часов. Во втором случае схема обработки состояла из четырех циклов $970 \leftrightarrow 730^\circ C$. Время циклирования составляло 2 часа.

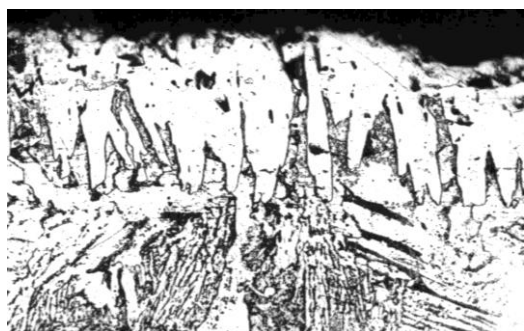
Установлено, что термоциклирование при борировании приводит к увеличению толщины слоя до 80% на углеродистых сталях, с увеличением степени легированности эффект снижается с 70% (литая сталь 5ХНМ) до 20% (сталь Х12М). С увеличением содержания углерода в стали снижается глубина борированного слоя, как после изотермического высокотемпературного борирования, так и после термоциклического борирования.

Исследовали структуру и процессы диффузионного борирования ферритно-перлитной стали в условиях термоциклирования. Это позволило иметь детальную картину протекающих в ходе борирования процессов.

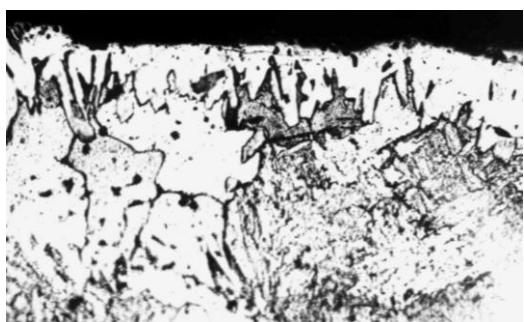
Исследования проводились методами оптической и электронной дифракционной микроскопии и рентгеноструктурного анализа. Идентификация фазового состава и определение размеров и объемной доли выделений проводилось по изображениям, подтвержденным микродифракционными картинками и темнопольными изображениями, полученными в соответствующих рефлексах.

Исследования показали, что фазовый состав образцов подвергнутых изотермическому (образец №1, рисунок 2а) и термоциклическому насыщению (образец №2, рисунок 2б) одинаков. Термоциклирование привело только к увеличению боридной зоны. Боридная зона в термоциклированном образце более плотная, иглы более разветвленные, плотность малоугловых границ, образованных в переходной зоне в результате диффузии бора и вытеснения углерода с поверхности образца оказалась выше. Глубина переходного слоя возросла (в 1,5 раза). Наиболее интенсивные изменения происходят в переходной зоне до глубины 500 мкм.

ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЕ И ХИМИКО-ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ СТАЛЕЙ



а

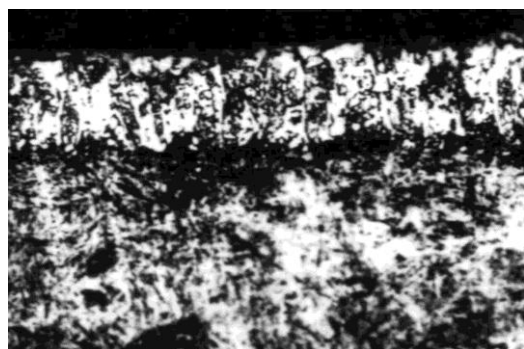


б

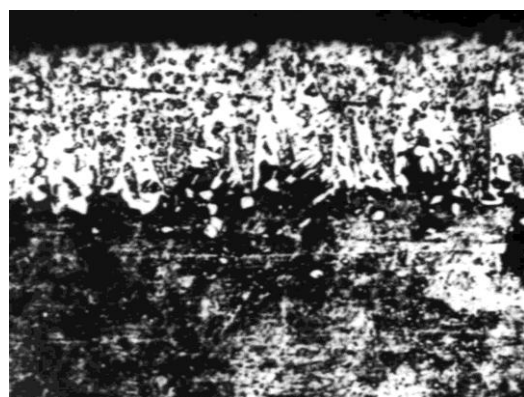
Рисунок 2 – Структура диффузионного слоя стали 10 после борирования из обмазки (х 200): а – после ХТЦО (2 часа), б- изотермическое борирование (2 часа)



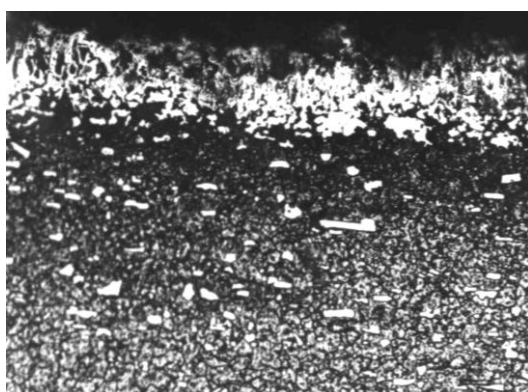
а



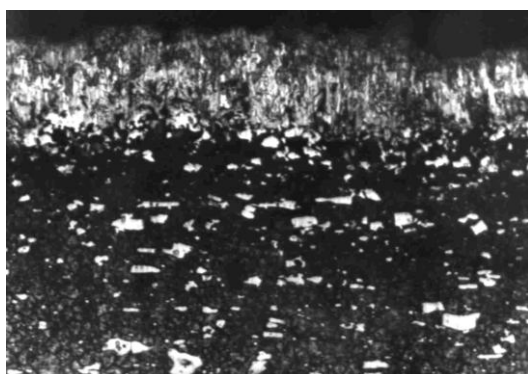
б



в



а



б

Рисунок 3 – Структура диффузионного слоя стали X12M после борирования из обмазки (х200): а – после ХТЦО (2 часа), б- изотермическое борирование (4 часа)



г

Рисунок 4 – Структура диффузионного слоя стали У8 после борирования из обмазки (х 200): а – после двух циклов, б - после трех циклов, в - после четырех циклов, г - изотермическое борирование

Установлено, что истинная картина структуры поверхностно борированного материала более сложная, чем предполагалось в ранее описанных исследованиях, а переходную зону следует называть карбоборидной. Фазовый состав внутри всей карбоборидной (переходной) зоны не меняется. Однако механизм формирования в различных ее участках (слоях) различен [17].

Термоциклирование привело и к существенным качественным изменениям в структуре стали. Бор более активно проникает при термоциклировании на большую глубину в больших количествах. В частности, фазовый состав на глубине 2,5мм в первом образце содержит один карбоборид железа $Fe_{23}(C,B)_6$, в то время как во втором образце присутствуют два карбоборида - $Fe_3(C,B)$ и $Fe_{23}(C,B)_6$. Чистого (не борированного) цементита даже на глубине 2,5мм после термоциклического борирования нет, в то время как в первом образце он начал появляться на глубине 500мкм. Кроме того, о более активной диффузии бора в объем материала во втором случае свидетельствует несколько повышенная суммарная плотность границ зерен, как исходных, так и возникающих в процессе борирования в режиме ТЦО. Эти границы служат основными каналами проникновения бора в глубь стали.

Проведенные исследования впервые позволили детально изучить кинетику образования борированного слоя и выявить механизм его формирования на стали простого химического состава.

Таким образом, разработан новый способ термоциклической обработки углеродистых и легированных инструментальных сталей и способ химико-термоциклической обработки сталей для штампового и режущего инструмента.

В настоящее время нами ведутся исследования по изучению влияния различных легирующих элементов на процесс образования диффузионных покрытий при ХТО и ХТЦО среднелегированных и высоколегированных сталей в литом и деформированном состоянии.

Более полное изучение кинетики формирования окончательной структуры легированных сталей в процессе проведения ТЦО с использованием тонких методов исследований позволит предложить обобщенный механизм формирования структуры и свойств этих сталей при окончательной ТЦО, а понимание механизма формирования свойств и структуры, их определяющей, позволит сформули-

ровать принципы и возможные направления оптимизации параметров ТЦО в целях повышения качества инструмента, стабилизации его свойств и повышения эксплуатационной стойкости.

Новая технология термической обработки предназначена для повышения эксплуатационной стойкости штампового и режущего инструмента из этих сталей и наиболее эффективна для инструмента, испытывающего большие ударные нагрузки, в частности для мелкогабаритного и длинномерного инструмента, а также для инструмента применяемого при вырубке- пробивке, благодаря более высоким показателям ударной вязкости и прочности.

Применение предлагаемого способа термоциклической обработки позволяет повысить ударную вязкость углеродистой инструментальной стали в 4 – 6 раз по сравнению с традиционной закалкой при сохранении высокой твердости и прочности. Улучшение комплекса физико-механических свойств позволяет повысить эксплуатационную стойкость инструмента, особенно испытывающего динамические нагрузки.

Следует отметить, что термическое оборудование для осуществления процесса – стандартное: соляные ванны для подогрева и закалки (рабочие температуры 250 – 1300 °С), закалочный бак, отпускные печи (рабочие температуры 150 – 600 °С) и моечное оборудование.

Разработанная технология термоциклического упрочнения инструментальных сталей является окончательной операцией термической обработки деталей машин и инструментов и защищена патентами Российской Федерации на изобретения [4 - 7].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 05-08-50241)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1.Федюкин В.К. Термоциклическая обработка сталей и чугунов. – Л.: Машиностроение, 1977. – 384 с.
- 2.Федюкин В.К., Смагоринский М.Е. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин. – Л.: Машиностроение. Ленинград. отделение. 1989. – 255 с.
- 3.Термоциклическая обработка сталей, сплавов и композиционных материалов/ А.С. Тихонов, И.Г. Леушин и др. - М.: Наука, 1984. – 186 с.

ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЕ И ХИМИКО-ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ СТАЛЕЙ

4. Гурьев А.М., Ворошнин Л.Г. и др. Способ термоциклической обработки инструментальных сталей // Патент №2078440, РФ, кл. С 21 Д 1/78 от 27. 04.97.

5. Гурьев А.М., Кириенко А.М., Рубцов А.А. Способ термоциклической обработки углеродистых инструментальных сталей // Патент №2090629, РФ, кл. С21 Д 1/78 от 20.09.97.

6. Гурьев А.М., Околович Г.А., Чепрасов Д.П., Земляков С.А. Способ термоциклической обработки инструментальной стали // Патент на изобретение РФ №2131469 10.06.99 Бюл.№ 16 По заявке №98108775/02 (009879), приоритет от 06.05.98.

7. Околович Г.А., Евтушенко А.Т. Гурьев А.М. и др. Способ термоциклической обработки высокохромистой инструментальной стали на вторичную твердость // Патент на изобретение РФ №2192485 (ФИПС, 10. 10. 2002г., приоритет от 09.11.2000г.)

8. Гурьев А.М. Влияние упрочняющей термоциклической обработки на свойства литых штамповых сталей // Пути повышения качества и надежности деталей машин и инструмента: Сб. тез. НК. Барнаул – Рубцовск, 1991.- С. 151.

9. Гурьев А.М., Ворошнин Л.Г., Земляков С.А. и др. Высокоэффективная технология термоциклического упрочнения сталей. // Ползуновский альманах.- 2004.- №4.- С. 79 - 81.

10. Гурьев А.М., Чепрасов Д.П., Рубцов А.А. Кинетика изменения структуры и свойств углеродистой стали эвтектоидного состава при термоциклической обработке // Прогрессивные методы получения и обработки конструкционных материалов и покрытий, повышающих долговечность деталей машин: Сб.

тез. докл. Международной НПК. Волгоград, 1996. - С. 81-82.

11. Гурьев А.М. Новые материалы и технологии для литых штампов. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2000. – 216 с.

12. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов. -М.: Металлургия, 1985.-256 с.

13. Ворошнин Л.Г. Антикоррозионные диффузионные покрытия.- Мн.: Наука и техника, 1981.- 296с.

14. Бондарь Б.С. Влияние термоциклирования при борировании на ударную вязкость углеродистых сталей // Химико-термическая обработка металлов и сплавов. Минск, 1977. С. 185 – 186.

15. Руфанов Ю.Г., Бирук Н.Г., Бордюг Г.К., Фомичёв О.И. Влияние термоциклической обработки на структуру и свойства боридного слоя. // МиТОМ. - 1983. - № 12. – С. 13 – 14.

16. Лыгденов Б.Д., Гурьев А.М. // Изв. Вузов. Физика №11. - 2000.- Т.43.- С. 269 - 270.

17. Гурьев А.М., Козлов Э.В., Игнатенко Л.Н., Попова Н.А. Физические основы термоциклического борирования. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2000. – 216 с., ил.

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова.

Белорусский национальный технический университет

Восточно-Сибирский государственный технологический университет