

УДК 621.785.532

В. В. БУДИЛОВ, Р. Д. АГЗАМОВ, К. Н. РАМАЗАНОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНО ФАЗОВОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ СИЛЬНОТОЧНЫМИ РАЗРЯДАМИ В ВАКУУМЕ

Рассматриваются теоретические и экспериментальные результаты по исследованию фазовых и структурных превращений в конструкционных и инструментальных сталях при модифицировании сильноточными разрядами в вакууме. Предлагаются новые методы химико-термической обработки основанные на эффекте полого катода и несамостоятельных сильноточных диффузионных разрядах. *Ионное азотирование; кристаллическая структура; фазовый состав; эффект полого катода; высокотемпературное модифицирование; сильноточный разряд в вакууме*

ВВЕДЕНИЕ

Потребность обеспечения высокого уровня эксплуатационных свойств и конструктивной прочности деталей и инструментов делает актуальной задачу разработки высокоэффективных технологий поверхностного упрочнения.

Для повышения прочности и получения высокой твердости поверхности конструкционных и инструментальных сталей и сплавов широко применяются различные методы термической и химико-термической обработки [1, 2].

Азотированию конструкционных и инструментальных материалов в тлеющем разряде уделяется большое внимание, однако, физические процессы, происходящие при таком упрочнении, изучены недостаточно полно. Весьма мало сведений о структуре и свойствах инструментальных сталей, прошедших высокотемпературное азотирование, причем экспериментальные данные недостаточно систематизированы и часто весьма противоречивы.

Задачей, на решение которой направлены предлагаемые исследования, является разработка новых методов проведения поверхностной термической обработки (светлой закалки) и химико-термической обработки (высокотемпературного азотирования) в вакууме с использованием тлеющего разряда с эффектом полого катода (ЭПК) [3], а также несо-

стоятельного диффузионного сильноточного разряда.

В результате высокотемпературного азотирования инструментальные стали приобретают:

- высокую твердость на поверхности, не изменяющуюся при нагреве до 500–600°С;
- высокую износостойкость;
- низкую склонность к задирам;
- высокий предел выносливости;
- высокую кавитационную стойкость;
- хорошую сопротивляемость коррозии.

Высокотемпературное азотирование получило широкое распространение для повышения эксплуатационных свойств инструмента горячего деформирования, к примеру, для штампов, работающих при повышенных температурах, больших удельных нагрузках, в условиях развития усталостных процессов.

В последнее время все больший интерес проявляется к процессу светлой закалки, сущность которого заключается в нагреве и обработке изделий в защитной газовой среде, для предотвращения окисления и обезуглероживания обрабатываемой стали.

Эффективным способом нагрева обрабатываемой поверхности в вакууме до необходимой температуры обработки является использование:

- несамостоятельных сильноточных диффузионных разрядов, поддерживаемых дополнительными источниками, генерирующими

ми плазменные, электронные или ионные потоки

- метастабильной формы тлеющего разряда с использованием эффекта полого катода.

В данной работе рассматривается способ обработки стальных изделий, включающий светлую закалку в тлеющем разряде, для осуществления которого проводят вакуумный нагрев изделий в плазме аргона повышенной плотности, формируемой между деталью и экраном за счет создания эффекта полого катода, при температурах на $30-50^\circ\text{C}$ выше A_{C3} для доэвтектоидных сталей и на $30-50^\circ\text{C}$ выше A_{C1} для заэвтектоидных сталей, выдержке для завершения фазовых превращений и последующее охлаждение в потоке инертных газов со скоростью, превышающей критическую скорость закалки стали [4].

Использование способа светлой закалки и высокотемпературного азотирования в вакууме конструкционных сталей и сплавов, основанных на воздействии плазменных и электронных потоков позволит получить следующие преимущества:

- возможность проведения термической обработки в отсутствие дорогостоящих защитных или закалочных средах (различные масла, растворы солей);

- экологическая чистота процесса за счет отсутствия вредных производственных выбросов в атмосферу;

- возможность регулирования параметров обработки в широком интервале режимов от нагрева до активного плавления, а за счет этого — структуры, твердости, износостойкости, шероховатости;

- простота схемы обработки, не требующая просктирования специальных приспособлений и сравнительно невысокая стоимость оборудования [5, 6].

В работе также исследовалось влияние комбинированной технологии — высокотемпературного азотирования и светлой закалки на свойства поверхностей обрабатываемых материалов [7].

Нагрев до температур светлой закалки ($790-950^\circ\text{C}$) от температуры азотирования проводится в той же камере и атмосфере, что и высокотемпературное азотирование. Такой процесс более технологичен, чем азотирование и последующая закалка с нагревом в другой печи. Образование азотисто-углеродистого аустенита в диффузионном слое при совмещении азотирования со светлой закалкой задерживает начало мартенситного превращения на поверхности по сравнению с серд-

цевиной. Это приводит к увеличению остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое и как следствие этого, повышению предела выносливости.

Высокотемпературное азотирование, совмещенное со светлой закалкой, обеспечивает получение высокой твердости, предела выносливости, сопротивления контактной усталости, износостойкости и сопротивления коррозии. Этот метод обработки позволит значительно повысить долговечность инструмента.

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА АЗОТИРОВАНИЯ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ С ЭПК

Рассмотрим модель азотирования в тлеющем разряде с ЭПК (рис. 1) на основе энергетической модели азотирования в тлеющем разряде И. М. Пастуха [8].

На рис. 1 приняты условные обозначения: III — падающий поток, Me — компонент поверхности, две concentрические окружности — любой компонент газа, N, N_2 — атомарный или молекулярный азот. Дополнительно обозначены энергетические уровни: ϵ_A , ϵ_{XC} — энергии физической и химической адсорбции; ϵ_E — энергия электрона, вылетевшего из поверхности в результате ионно-электронной эмиссии; ϵ_{TE} — энергия электрона, вылетевшего из поверхности в результате термоэлектронной эмиссии; ϵ_{iN} — энергия ионизации молекулы или атома азота; ϵ_T — энергия термического воздействия падающего потока на поверхность; ϵ_{pH} — энергия резонансной перезарядки; ϵ_d — энергия диссоциации молекулы; ϵ_{Nd1} , ϵ_{Nd2} — энергии преобразования нитридов.

При модификации поверхности в тлеющем разряде происходят следующие процессы:

- адсорбция частиц газа на поверхности с формированием практически сплошного слоя и частичная десорбция их в результате как теплового влияния, так и бомбардировки частицами падающего потока;

- передача энергии от частиц падающего потока частицам поверхности с нагреванием ее до рабочей температуры процесса, стимулирующим термоэлектронную эмиссию;

- стимулирование ионно-электронной и ударно-электронной (от нейтральных частиц падающего потока) эмиссий;

- распыление атомов и фрагментов поверхности с последующим осаждением их под действием направленного движения потоков на поверхностях обрабатываемых деталей;

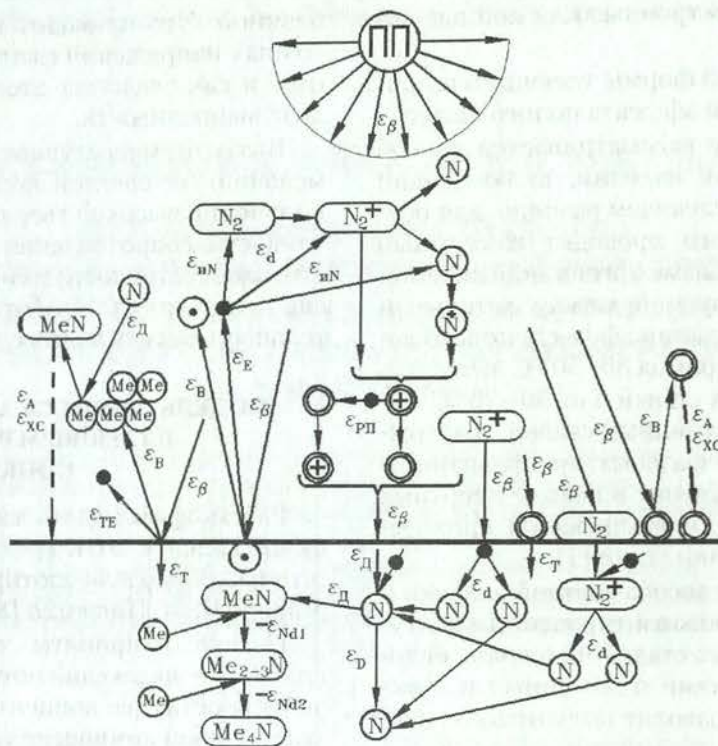


Рис. 1. Энергетическая модель процесса азотирования в тлеющем разряде с ЭПК [8]

- столкновения атомарных ионов диффузанта с атомами поверхности или атомами, которые входят в распыленные фрагменты поверхности, и последующее образование диффунидов;

- столкновения молекулярных ионов с поверхностью и в зависимости от энергетического уровня, возможными рекомбинацией или диссоциативной рекомбинацией, образованием атомарных диффузанта и на их основе созданием диффунидов или твердых растворов;

- ударная диссоциация или ионизация молекулярных частиц, адсорбированных поверхностью, с последующей диссоциативной рекомбинацией, образованием атомарных диффузанта и на их основе созданием диффунидов или твердых растворов;

- преобразование диффунидов в направлении от низших к высшим по схеме притяжения атомов матрицы;

- диффузия атомарных частиц и диффунидов в глубину поверхности;

- упругие столкновения заряженных частиц падающего потока с поверхностью и отражение их в газовую среду, вторичная бомбардировка поверхности, включая возможность вышеперечисленных процессов, характерных для частиц определенного вида и энергии;

- ударная имплантация частиц газовой среды и проникновение их и частиц компонентов поверхности под действием падающего потока в глубину поверхностного слоя с образованием твердых растворов;

- резонансная перезарядка на металле с диссоциативной рекомбинацией молекулярного иона диффузанта и созданием диффунида [9].

При использовании в тлеющем разряде ЭПК, между обрабатываемой поверхностью и экраном формируется плазма с повышенной концентрацией заряженных частиц. В катодной полости, образованной поверхностью детали и экраном, увеличивается генерация заряженных частиц осциллирующими электродами, возрастает число ионов, бомбардирующих поверхность, скорость распыления обрабатываемой поверхности и как следствие, многократное усиление вышеописанных процессов.

Принципы энергетической модели позволяют формулировать факторы влияния на процессы азотирования и высокотемпературного азотирования в тлеющем разряде с ЭПК, включая конечные результаты, а также прогнозировать оптимальные характеристики технологических режимов.

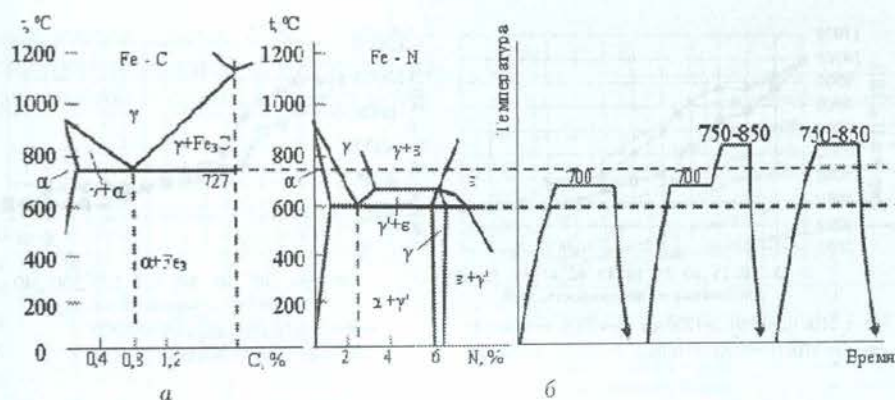


Рис. 2. Диаграммы состояния Fe-C и Fe-N (а) и схема высокотемпературного азотирования совмещенного со светлой закалкой (б)

На диаграмме состояния Fe-C и Fe-N (рис. 2) рассмотрены процессы высокотемпературного азотирования и высокотемпературного азотирования совмещенного со светлой закалкой.

Высокотемпературное азотирование проводится при 700–720°C — температурах превращения ферритно-цементитной смеси в аустенит, когда диффузионная подвижность элементов резко возрастает, а время азотирования сокращается до 2–3 часов (рис. 2).

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для нагрева поверхности были использованы несамостоятельный сильноточный диффузионный разряд и тлеющий разряд с полым катодом.

Эмиссия заряженных частиц из плазмы обеспечивается путём подачи на обрабатываемую поверхность необходимого потенциала. При этом практически вся разность потенциалов между обрабатываемой поверхностью и плазмой сосредотачивается в двойном электрическом слое, в котором заряженные частицы приобретают энергию, соответствующую этой разности потенциалов.

Кинетическая энергия частиц, при взаимодействии с обрабатываемой поверхностью, переходит в тепловую, приводя к равномерному и быстрому нагреву поверхности.

Для повышения эффективности нагрева тлеющим разрядом нами было предложено использовать ЭПК.

Сущность способа заключается в том, что с помощью специального экрана, в виде сетки, между обрабатываемой поверхностью и экраном, формируется плазма с повышенной концентрацией заряженных частиц. Поверхность детали непосредственно становится поверх-

ностью полого катода, что приводит к образованию вблизи обрабатываемой поверхности структуры из плазмы и слоя пространственного заряда между обрабатываемой поверхностью и границей плазмы.

Для определения основных закономерностей тлеющего разряда был проведен ряд экспериментов. Эксперименты проводились на образцах из материалов ХВГ, У10, 13Х11Н2В2МФ-III, 38ХМЮА, ВТ-22, в качестве рабочего газа использовался аргон, а также смесь азота, аргона и ацетилен (N_2 50–80%, Ar 25–10%, C_2H_2 25–10%).

Для снятия температурных зависимостей в камере была установлена «хромель-капелевая» термопара.

При этом аналоговый сигнал с термопары поступал в систему ввода-вывода аналоговых и дискретных сигналов серии RealLab, которая является внешним по отношению к компьютеру блоком.

В дальнейшем вся информация, поступающая с системы, обрабатывалась на компьютере с помощью программного обеспечения RLDataView, которая предназначена для работы с системами серии RealLab и позволяет выполнять сбор данных, их просмотр во время сбора или после сохранения в файл. Затем данные можно экспортировать в текстовый формат, что позволяет легко использовать программы MatLab, MathCad и Excel для их математической обработки.

Замеры поверхностной твердости обрабатываемых образцов осуществлялись с помощью прибора ПМТ-3.

Для выявления структуры азотированного слоя конструкционных сталей применялся 4%-й раствор азотной кислоты в этиловом спирте.

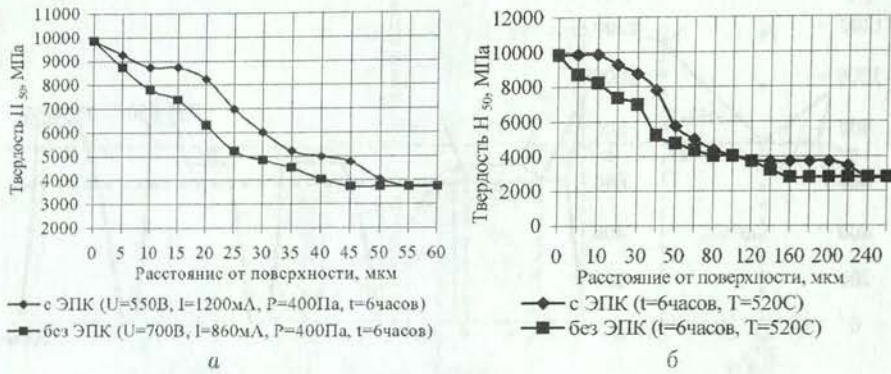


Рис. 3. Изменение микротвердости по глубине поверхностного слоя после обработки в тлеющем разряде: а — ВТ-22, среда N_2 -Ar; б — 38ХМЮА, среда N_2 -Ar- C_2H_2

Общая толщина азотированного слоя определялась на травленном шлифе под микроскопом при увеличении в 50 раз, толщина карбонитридной зоны определялась при увеличении в 300–500 раз. За общую толщину азотированного слоя принимался весь слой, обнаруженный под микроскопом в виде темной полосы с заметным переходом к сердцевине.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования влияния состава рабочих газов и режимов азотирования в тлеющем разряде на твердость и глубину азотированных слоев показали, что азотирование в чистом азоте малоэффективно для сталей. Это объясняется тем, что при распылении обрабатываемой поверхности происходит разрушение оксидной пленки с диссоциацией кислорода, который препятствует проникновению азота вглубь обрабатываемой поверхности.

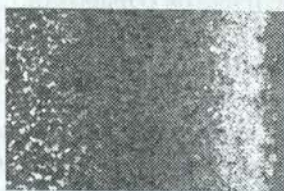
Азотирование титанового сплава ВТ-22 в азоте и смеси азота и аргона позволяет увеличить твердость на поверхности в 2,3–2,5 раза (рис. 3, а), а для стали 38ХМЮА в смеси газов азота, аргона и ацетилена в 3,5–4 раза (рис. 3, б).

Анализ зависимостей изменения микротвердости по глубине поверхностного слоя позволяет сделать вывод, что применение ЭПК при азотировании в тлеющем разряде приводит к увеличению скорости насыщения поверхности азотом до 2 раз по сравнению с обработкой в тлеющем разряде с плоским катодом при равных параметрах процесса (время, давление, температура). Данный вывод подтверждается также анализом структуры поверхностного слоя.

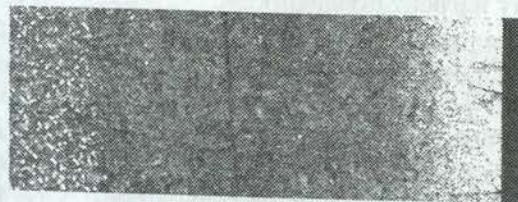
Из рис. 4 видно, что азотирование в условиях проявления ЭПК приводит к увеличению карбонитридной зоны в 2–3 раза и диффузионной зоны твердого раствора азота в α -железе на 50–70%.

Увеличение скорости азотирования объясняется более высокой степенью ионизации в тлеющем разряде с ЭПК, что приводит к интенсификации процессов, происходящих при азотировании. Кроме того, было замечено, что при азотировании с ЭПК вероятность перехода тлеющего разряда в дуговой резко сокращается.

Для увеличения эффективности ионно-плазменной обработки самостоятельным сильноточным диффузионным разрядом, реализуемым плазменным источником «ПИПК», было предложено использовать смесь газов аргона, азота и ацетилена.



с плоским катодом



с ЭПК

Рис. 4. Структура образцов из стали 38ХМЮА, обработанных в тлеющем разряде

Применение смеси газов 25%Ar-50%N₂-25%С₂Н₂ позволяет повысить ток разряда на 50–70% по сравнению с током разряда в чистом азоте.



Рис. 5. Изменение микротвердости по глубине азотированного слоя стали 38ХМЮА после обработки несамостоятельным сильноточным диффузионным разрядом

На рис. 5 представлены графики изменения микротвердости по глубине азотированного слоя стали 38ХМЮА. Обработка проводилась в чистом азоте и смеси азота, аргона и ацетилена при следующих режимах: $U_{II} = 400$ В, $P = 0,133$ Па, $t = 3$ час.

Анализ зависимостей показывает, что насыщение поверхности в смеси газов более эффективно, чем в чистом азоте. Это объясняется и более высоким током насыщения при обработке в смеси газов и вероятно наличием водорода, дезактивирующего кислород, который выделяется при распылении обрабатываемой поверхности.

Способ высокотемпературного азотирования и последующей светлой закалки изделий в тлеющем разряде с эффектом полого катода, осуществлялся с помощью вакуумного нагрева в плазме повышенной плотности, формируемой между деталью и экраном, и последующего охлаждения детали потоком аргона со скоростью, превышающей критическую скорость закалки, на модернизированной установке ЭЛУ-5.

На рис. 6 приведены зависимости скорости нагрева и температуры поверхности при нагреве в тлеющем разряде с ЭПК.

Анализ зависимостей температуры поверхности от времени показывает, что использование тлеющего разряда с эффектом полого катода позволяет увеличить температуру и скорость нагрева поверхности по сравнению с процессом обработки в тлеющем разряде без применения эффекта полого катода.

Были проведены эксперименты по определению скорости охлаждения поверхности образцов в вакууме.

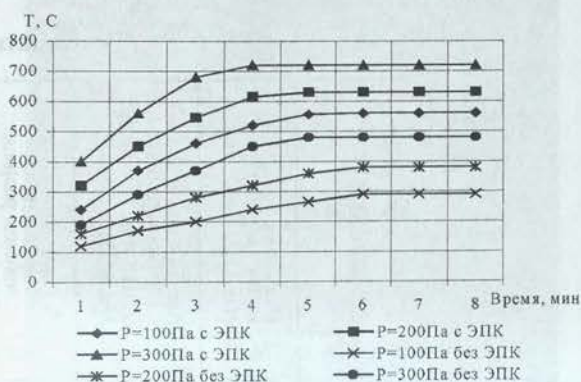


Рис. 6. Зависимость температуры поверхности от времени нагрева ($U = 500$ В)

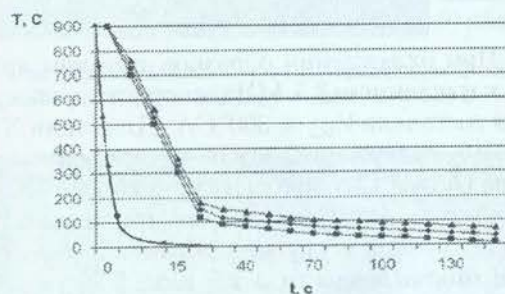


Рис. 7. График зависимости температуры поверхности от времени охлаждения при различном давлении P в вакуумной камере: \blacktriangle — $P = 100$ Па (при давлении аргона 0,2 МПа); \blacklozenge — $P = 200$ Па (при давлении аргона 0,2 МПа); \blacksquare — $P = 300$ Па (при давлении аргона 0,2 МПа); \bullet — $P = 100$ Па (при давлении аргона 2,5 МПа)

На рис. 7 приведены зависимости температуры поверхности от времени при охлаждении в струе газа (давление аргона 0,2 МПа и 2,5 МПа).

Анализ зависимостей температуры поверхности от давления (при давлении охлаждающего газа 0,2 МПа и 2,5 МПа) показывает, что с ростом давления в камере происходит увеличение скорости охлаждения поверхности.

Проведенные исследования позволили установить технологические режимы для термической и химико-термической обработки конструкционных и инструментальных сталей.

Необходимо отметить, что при охлаждении образцов потоком аргона с давлением 0,2 МПа, скорость охлаждения составила $V_{охл} \leq 40^\circ\text{C}/\text{с}$. Данная скорость является недостаточной для получения структуры мартенсита большинства сталей и, соответственно, недостаточна для проведения процесса светлой закалки.

Таблица 1

Результаты экспериментов

Материал	Исходная микротвердость, H_v , МПа	Азотирование в тлеющем разряде с ЭПК при $T = 550^\circ\text{C}$, H_v , МПа	Высокотемпературное азотирование в тлеющем разряде с ЭПК при $T = 720^\circ\text{C}$, H_v , МПа	Температура нагрева образцов под светлую закалку, $T^\circ\text{C}$	Азотирование и последующая светлая закалка в тлеющем разряде с ЭПК, H_v , МПа	Высокотемпературное азотирование и последующая светлая закалка в тлеющем разряде с ЭПК, H_v , МПа
30ХГСА	2850	13800	6400	950	17670	11400
P6M5	3350	11600	8770	950	19430	17080
XBG	3450	7040	6210	840	16700	10200
У10	3750	10870	8600	790	18100	15700
X12	3000	10870	7850	890	15600	12600

При охлаждении образцов потоком аргона с давлением 2,5 МПа, скорость охлаждения составила $V_{\text{охл}} \leq 300^\circ\text{C}/\text{с}$. Для стали ХВГ и У10, содержащей высокий процент углерода (более 1%), критическая скорость охлаждения $\approx 400^\circ\text{C}/\text{с}$, которая приводит к закалке, в нашем случае произошло увеличение микротвердости в 2,5 раза (см. табл. 1). Для сталей, содержащих углерода менее 0,2%, критическая скорость охлаждения составляет $\approx 1000^\circ\text{C}/\text{с}$. Для обеспечения скорости охлаждения $\geq 1000^\circ\text{C}/\text{с}$, необходимо использовать в качестве охлаждающего газа гелий, либо дополнительное охлаждение оснастки.

Результаты экспериментов по ионному азотированию, высокотемпературному азотированию и высокотемпературному азотированию с последующей закалкой представлены в табл. 1.

В результате азотирования в тлеющем разряде с ЭПК образцов из инструментальных сталей, произошло значительное увеличение микротвердости в 2–5 раз. Максимальное значение получено на образцах из стали 30ХГСА, микротвердость поверхности составила 13800 МПа.

Результатом влияния процесса высокотемпературного азотирования на инструментальные стали стало увеличение микротвердости поверхности в 2,5 раза, за счет образования нитридов легирующих элементов.

Максимальная микротвердость при высокотемпературном азотировании составила 8770 МПа для стали Р6М5, так как данный материал содержит большое число нитридообразующих легирующих элементов (W, Mo, Cr, V).

Необходимо отметить, что в результате использования комбинированного метода обработки (высокотемпературное азотирование и последующая светлая закалка) достигается максимальная микротвердость на поверхности всех образцов.

Структура обработанных образцов представлена на рис. 8–15



Рис. 8. 30ХГСА — традиционное азотирование при $T = 550^\circ\text{C}$, $t = 3$ час, $P = 150$ Па, $I = 0,4$ А, $U = 400$ В

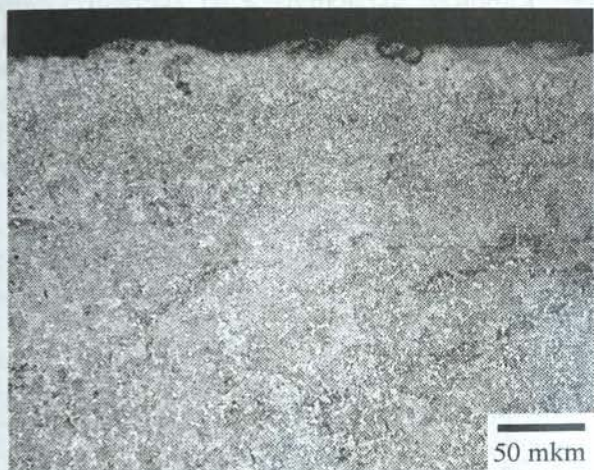


Рис. 9. 30XГСА — высокотемпературное азотирование при $T = 720^{\circ}\text{C}$, $t = 1$ час, $P = 200$ Па, $I = 0,5$ А, $U = 450$ В



Рис. 10. 30XГСА — светлая закалка от $T = 950^{\circ}\text{C}$, $P = 200$ Па, $I = 0,6$ А, $U = 500$ В

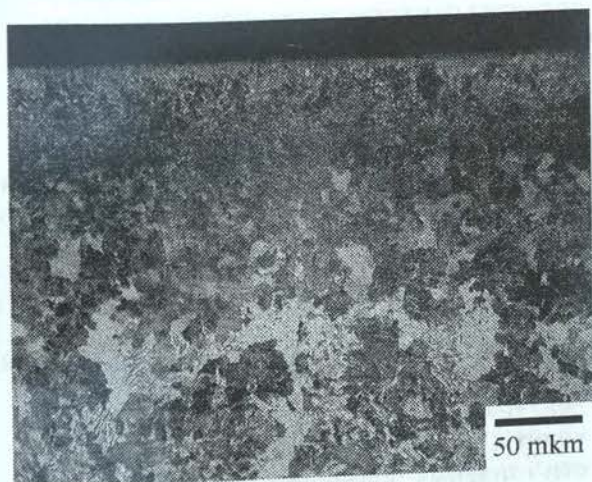


Рис. 11. 38ХМЮА — высокотемпературное азотирование при $T = 720^{\circ}\text{C}$, $t = 1$ час, $P = 200$ Па, $I = 0,5$ А, $U = 450$ В

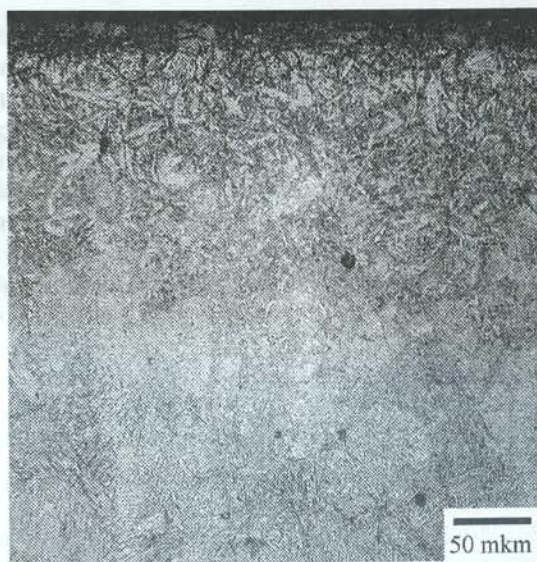


Рис. 12. 38ХМЮА — светлая закалка от $T = 930^{\circ}\text{C}$, $P = 200$ Па, $I = 0,6$ А, $U = 500$ В



Рис. 13. X12 — традиционное азотирование при $T = 550^{\circ}\text{C}$, $t = 3$ час, $P = 150$ Па, $I = 0,4$ А, $U = 400$ В



Рис. 14. X12 — высокотемпературное азотирование при $T = 720^{\circ}\text{C}$, $t = 1$ час, $P = 200$ Па, $I = 0,5$ А, $U = 450$ В



Рис. 15. XВГ — азотирование совмещенное со светлой закалкой. Режимы азотирования: $T = 550^{\circ}\text{C}$, $t = 3$ час, $P = 200$ Па, $I = 0,4$ А, $U = 400$ В. Режимы светлой закалки: $T = 840^{\circ}\text{C}$, $P = 200$ Па, $I = 0,6$ А, $U = 480$ В

На рис. 8, 9, 11 показана структура сталей 38ХМЮА и 30ХГСА, подвергнутых азотированию, анализ структуры показывает наличие карбонитридной и нитридной зоны, состоящей из нитридов легирующих элементов (к примеру $(Cr, Fe)_2N$) и карбонитридных фаз ($M_{23}(C,N)_6$, $M_3(C,N)$), а также α -фазу, насыщенную азотом. На рисунках видно, что структура карбонитридной и нитридной зоны ультрамелкозернистая. Переход от азотированного слоя к нижележащим слоям плавный, что является одним из основных требований к микроструктуре азотированной стали. Толщина диффузионной зоны изменяется от 50 до 100 мкм.

Структура закаленной стали 30ХГСА — скрытокристаллический мартенсит, остаточный аустенит и карбиды (рис. 10). Отсутствует игольчатость, в отличие от структуры стали 38ХМЮА (рис. 12), которая служит признаком перегрева. Наблюдаются светлые поля — смесь мартенсита и аустенита, эти участки более легированы вследствие структурной неоднородности стали.

Сталь Х12 — инструментальная штамповая сталь, в исходном (отожженном) состоянии сталь Х12 состоит из ферритной основы и большого количества карбидов (рис. 13).

Феррит представляет собой твердый раствор хрома в α -железе.

Карбидной фазой в отожженной стали Х12, по данным рентгеноструктурного анализа, является тригональный карбид типа Cr_7C_3 . (его химический состав: 9,2% С, 47,8% Cr, 2,5% V и 40,5% Fe при периодах решетки $a = 4,496 \text{ \AA}$ и $c = 13,94 \text{ \AA}$).

Увеличение температуры обработки ведет к растворению хромистых карбидов в аустените и уменьшению избыточных, не перешедших в раствор карбидов (рис. 14). Это может привести к изменению состава твердых растворов (аустенита, мартенсита), фиксируемых к примеру в результате светлой закалки, т. е. может привести к увеличению содержания в растворе хрома и углерода.

Сталь ХВГ является сложнoleгированной инструментальной сталью, эта сталь в большей степени отвечает условиям рационального легирования.

Из-за несколько пониженного содержания хрома и вольфрама сталь имеет более однородное распределение карбида, чем другие стали этой группы. Вследствие влияния ванадия и вольфрама сталь устойчива против перегрева и сохраняет мелкое зерно (рис. 15).

Карбиды выделяются из аустенита (вторичные карбиды) и присутствуют в перлите (эвтектоидные), размеры карбидов меньше (5–6 мкм) и они распределены в металлической основе равномернее, чем у ледобуритных инструментальных сталей. Количество карбидов не превышает 10–12%.

При закалке стали ХВГ сохраняется повышенное количество аустенита (15–18%) (рис. 15), вследствие чего снижается деформация инструментов.

По результатам работы был разработан технологический процесс высокотемпературного ионно-плазменного азотирования с последующим нанесением покрытия композиции Ti-TiN на матрицы и пуансоны холодновысадочного автомата из материала Р6М5 применяемые в производстве авто-нормалей на заводе БелЗАН (г. Белебей, РБ). Были проведены исследования влияния высокотемпературного азотирования на стойкость штамповой оснастки.

Проведенные производственные испытания матриц и пуансонов показали:

- матрицы для обрезки шестигранников — стойкость серийных 15000 изделий, с многослойным покрытием и азотированным слоем 25000;

- матрицы для обрезки четырехгранников — стойкость серийных 9000 изделий, с многослойным покрытием и азотированным слоем 18000;

- пуансоны для операции редуцирования — стойкость серийных 50000 изделий, с многослойным покрытием и азотированным слоем 90000.

Таким образом, выполненные испытания матриц и пуансонов для холодновысадочного автомата показали экономическую эффективность и целесообразность применения разработанной технологии высокотемпературного азотирования с последующим нанесением многослойного покрытия композиции Ti-TiN на поверхность матриц и пуансонов, при этом стойкость штамповой оснастки повысилась в 2 раза.

ВЫВОДЫ

Установлено, что азотирование в тлеющем разряде в чистом азоте неэффективно для сталей. Введение ацетилена и аргона в азот приводит к эффективному насыщению поверхности стальных образцов азотом как при обработке в тлеющем разряде, так и в несамостоятельном сильноточном диффузионном разряде (твердость на поверхности увеличивает

ся 3,5–4 раза). Азотирование титановых сплавов в азоте и смеси азота и аргона увеличивает твердость на поверхности в 2,3–2,5 раза.

Предложены методы термической и химико-термической обработки конструкционных и инструментальных сталей в вакууме с использованием самостоятельного сильноточного диффузионного разряда, а также тлеющего разряда с эффектом полого катода. Установлено, что результатом проведения процесса светлой закалки сталей ХВГ и У10 стало увеличение микротвердости в 2,5 раза, при проведении процесса высокотемпературного азотирования было отмечено увеличение микротвердости в 2 раза для образцов из стали ХВГ и У10, и увеличение в 3 раза для стали 13Х11Н2В2МФ-Ш. Также было установлено, что максимальное значение микротвердости было получено в результате обработки поверхности образцов комбинированным методом, состоящим из высокотемпературного азотирования с последующей светлой закалкой.

Разработанные технологические процессы позволяют проводить локальную обработку поверхностей, что не требует дополнительного экранирования. Сокращается время обработки в 2–3 раза, снижается расход насыщающих газов и электроэнергии, снижается себестоимость детали. Отсутствует необходимость использования балластов для равномерного нагрева, практически исключаются капитальные затраты на разработку и приобретение нового оборудования, так как обработка ведётся в печах для ионного азотирования и требуется лишь модернизация установок и оснастки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лахтин, Ю. М.** Теория и технология азотирования / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган, Г. Й. Шпис, Э. Бемер. М.: Металлургия, 1991. 320 с.
2. **Арзамасов, Б. Н.** Химико-термическая обработка металлов в активизированных газовых средах / Б. Н. Арзамасов. М.: Машиностроение, 1979. 224 с.
3. **Будилов, В. В.** Использование разряда с полом катодом для обработки поверхности конструкционных материалов / В. В. Будилов, С. Р. Шехтман, Р. М. Киреев // Физика и химия обработки материалов. 2001. № 2. С. 31–35.
4. **Пат. на изобр. № 2277592** МПК 7, С21D1/06. Способ светлой закалки изделий в тлеющем разряде с эффектом полого катода / В. В. Будилов, Р. Д. Агзамов, К. Н. Рамазанов. 12.07.2004.

5. **Пат. на изобр. № 2275433** МПК 7, С21D1/09, С21D1/38. Способ поверхностного упрочнения деталей / В. В. Будилов, Р. Д. Агзамов, К. Н. Рамазанов. 16.11.2004.
6. **Пат. на изобр. № 2276201** МПК 7, С23С8/36, С23С8/80. Способ азотирования изделий в тлеющем разряде с эффектом полого катода / В. В. Будилов, Р. Д. Агзамов, К. Н. Рамазанов. 09.11.2004.
7. **Рамазанов, К. Н.** Технология высокотемпературного азотирования и светлой закалки инструментальных сталей в вакууме / К. Н. Рамазанов // Вакуумные нанотехнологии и оборудование: сб. док. Харьковск. нанотехнол. ассамблеи, Харьков: ННЦ ХФТИ, 2006. С. 19–22.
8. **Пастух, И. М.** Модель поверхностных процессов при азотировании в тлеющем разряде / И. М. Пастух // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов: сб. док. ОТТОМ–7. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2006. С. 218–228.
9. **Пастух, И. М.** Энергетическая концепция азотирования в тлеющем разряде / И. М. Пастух // Вакуумные нанотехнологии и оборудование: сб. док. Харьковск. нанотехнол. ассамблеи. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2006. С. 6–14.

ОБ АВТОРАХ

Будилов Владимир Васильевич, проф. каф. технол. машиностроения. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1969). Д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА (защ. в МАИ, 1995). Иссл. физических процессов в низкотемпературной плазме, вакуумных ионно-плазменных технологий обработки деталей ГТД.



Агзамов Рашид Денисламович, ст. преп. каф. техн. машиностр. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 1999). Канд. техн. наук (УГАТУ, 2004). Иссл. в обл. вакуумных ионно-плазменных технологий.



Рамазанов Камилъ Нуруллаевич, аспирант каф. технологии машиностроения. Дипл. инж.-технолог машиностроит. производств (УГАТУ, 2004). Готовит дис. о вакуумных ионно-плазм. методах модифицирования поверхности.

