

**М.Н. БОСЯКОВ,  
С.В. БОНДАРЕНКО,  
Д.В. ЖУК,  
О.И. НАЗАРОВА,  
М.Ш. АХМЕД,  
И.Л. ПОБОЛЬ, д-р техн. наук (ФТИ НАН Беларуси)**

## **ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ ПУТЕМ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО АЗОТИРОВАНИЯ**

**Введение.** Ионное модифицирование в тлеющем разряде в настоящее время является в промышленно развитых странах мира одним из основных методов поверхностного упрочнения, который заменил традиционные варианты химико-термической обработки ввиду своих неоспоримых преимуществ. По сравнению с газовым азотированием в печах ионно-плазменное азотирование (ИПА) обеспечивает [1]:

- сокращение продолжительности обработки в 2–5 раз как за счет снижения времени нагрева и охлаждения садки, так и за счет уменьшения времени изотермической выдержки;
- снижение хрупкости упрочненного слоя;
- сокращение расхода рабочих газов в 20–50 раз;
- сокращение расхода электроэнергии 1,5–3 раза;
- снижение деформации, что позволяет исключить финишную шлифовку;
- улучшение санитарно-гигиенических условий производства;
- полное соответствие технологии всем современным требованиям по охране окружающей среды.

Возможность проведения регулируемых процессов азотирования с оптимизацией диффузионных слоев по строению и фазовому составу для получения необходимого комплекса эксплуатационных свойств изделия является основным достоинством ИПА.

Большая часть изделий ведущих зарубежных фирм, изготавливаемых из инструментальных сталей (сверла, метчики, штампы, пресс-формы, литевая оснастка, матрицы, пуансоны, развертки,

фрезы, прошивки, протяжки, долбяки, резцы), обрабатывается методом ИПА. Азотирование стали значительно повышает твердость поверхности, увеличивает износостойкость сталей.

Ранее авторами исследованы возможности упрочнения методом ИПА штампового инструмента из полутеплостойких штамповых сталей 5ХНМ, 4Х5МФС, 3Х2В8, и др. для увеличения его долговечности. В результате ИПА для ковочных штампов и пресс-форм для литья металлов и сплавов повышается износостойкость, уменьшается прилипание металла к поверхности инструмента. Вместе с тем, значительно менее изучены возможности ИПА инструментальных сталей холодного деформирования.

**Задача исследований.** Широкое распространение для изготовления инструмента получила сталь 40Х. Возможности ее упрочнения изучаются достаточно давно, в том числе методом ИПА. Тем не менее, как показано в работе [2], имеются резервы существенного повышения эксплуатационных характеристик этой стали, прежде всего, с применением комбинированных технологий.

В ОАО «ИНТЕГРАЛ» в сборочном производстве интегральных микросхем используется более 25 видов вставок в штамповый инструмент, применяемых для вырубki различных корпусных деталей. Используется сталь 9ХС, которая в закаленном состоянии имеет высокую твердость – до 58 HRC, однако при этом отличается хрупкостью.

В условиях эксплуатации вставки штампового инструмента выдерживают от 2 до 25 тысяч операций вырубki и практически не поддаются реставрированию из-за механических повреждений и быстрого износа при попадании пресс-компаундного материала на ножки микросхем.

При выполнении исследований исходили из того, что применение технологии ИПА, как правило, позволяет повысить износостойкость и долговечность штампового инструмента за счет увеличения твердости поверхности и обеспечения контролируемой твердости сердцевины изделия, а также позволяет повысить сопротивление ударным нагрузкам.

Целью работы являлась разработка технологии ИПА вставок штампов из инструментальной стали 9ХС, изучение структуры и механических свойств азотированного слоя.

**Оборудование и методики исследования.** Из стали 9ХС были изготовлены экспериментальные образцы, которые подвергали закалке от температуры 830–850 °С в масле и отпуску при 180–230 °С до твердости 56–60 НRC. Исследования по выбору режимов ИПА образцов проводили на установке ФТИ НАН Беларуси. Установка состоит из вакуумной камеры (основание и колпак), откачной системы, шкафа управления с панелью оператора и силового трансформатора, соединенных электрическими, газовыми, вакуумными и водяными магистралями.

Тлеющий разряд формируется между катодом (на котором размещены обрабатываемые детали) и анодом (собственно камера). После загрузки обрабатываемых деталей и установки съемного колпака проводится откачка камеры с помощью механического вакуумного насоса до начального давления 20 Па, затем включают разряд. Температура деталей регистрируется с помощью хромель-алюмелевой термопары. Температура деталей и скорость их нагрева определяются мощностью разряда, давлением и расходами рабочих газов. Управление нагревом и непосредственно насыщением на стадии выдержки осуществляется по заданной программе, контроль необходимых для проведения азотирования параметров и состояния энергоносителей проводится с помощью специализированного контроллера. Стенки рабочей камеры охлаждаются водой с помощью циркуляционного водяного насоса. Тройной теплозащитный экран минимизирует термические потери от излучения садки. Система подачи и регулирования расхода рабочих газов обеспечивает необходимый расход и состав рабочей газовой смеси в процессе азотирования с помощью регуляторов расхода газа.

Откачка камеры установки осуществляется с помощью откачного агрегата, в состав которого входят два насоса (вакуумный золотниковый и двухроторный). Для поддержания заданного давления в камере в установке предусмотрено изменение скорости откачки, которое проводится управлением скоростью вращения двухроторного насоса с помощью частотного преобразователя.

После проведения процесса автоматически отключается разряд и прекращается подача рабочих газов в камеру. Разгерметизация камеры и ее открытие может быть проведено после остывания садки обработанных деталей до температуры ниже 200 °С.

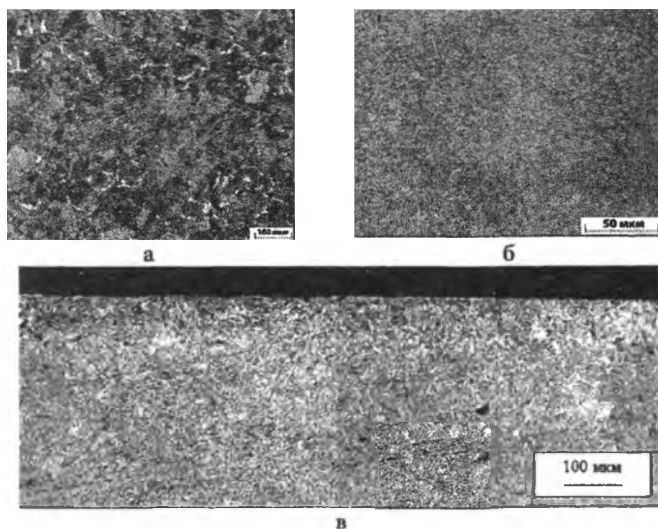
При работе установки используется три технологических газа – азот, аргон, водород. Управление компонентами газовой и вакуумной системы при проведении процесса осуществляется в автоматическом режиме. Водород получают путем электролиза бидистиллированной (деионизованной) воды. Основное преимущество этого метода – взрывобезопасность, так как отсутствует необходимость эксплуатации сосудов с водородом под давлением, а весь получаемый водород поступает в вакуумную систему установки. Шкаф управления предназначен для размещения электросилового и электронного оборудования установки.

Для изучения структуры образцы подвергали шлифовке, полировке и травлению. В качестве травителя использовали 4%-й раствор  $\text{HNO}_3$  в этиловом спирте. Исследования микроструктуры проводили на оптическом микроскопе Микро 200-01.

Измерение твердости поверхностных слоев образцов после предварительной термообработки выполняли методом Роквелла в соответствии с ГОСТ 9013-59 по шкале С. Измерение микротвердости осуществляли на поперечных шлифах образцов с помощью прибора ПМТ-3 по ГОСТ 9450-76 (нагрузка на индентор 100 г). Измерения шероховатости проводили на профилометре модели 296, при этом выполняли не менее 5 замеров для каждого образца.

**Результаты исследований.** Сталь 40Х в исходном состоянии имеет полосчатую структуру, состоящую из пластинчатого перлита с ферритной сеткой по границам зерен (рисунок 1, а). Полосчатая структура стали обусловлена ликвацией легирующих элементов при выплавке.

Образцы перед проведением поверхностного упрочнения подвергали объемной закалке по стандартному режиму и отпуску при температуре 600 °С. С повышением температуры отпуска игольчатость мартенсита уменьшается, а при температуре 600 °С мартенсит распадается на феррит с карбидами и образуется сорбит отпуска (рисунок 1, б). Полосчатость структуры исчезает. Азотированный слой состоит из диффузионной зоны толщиной 0,4–0,5 мм, представляющей собой твердый раствор азота в  $\alpha$ -железе с дисперсными включениями нитридов железа и хрома (рисунок 1, в). Сплошной нитридный слой на поверхности не образуется.

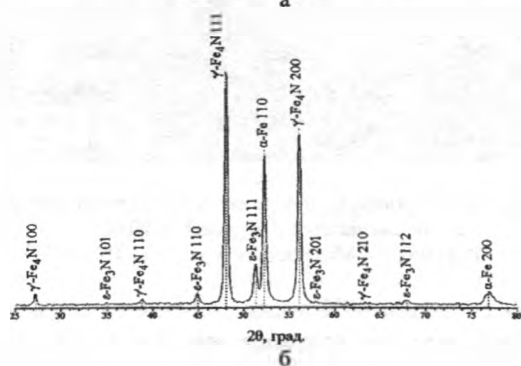
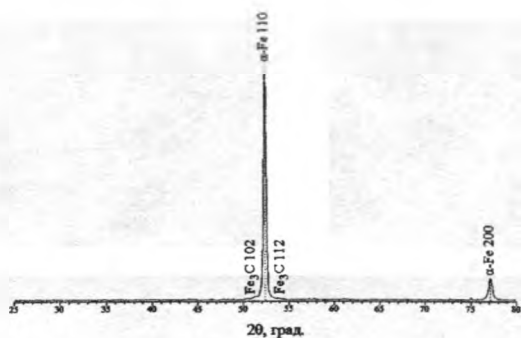


а – в исходном состоянии; б – после закалки и отпуска при 600 °С;  
 в – после закалки с отпуском и ИПА  
 Рисунок 1 – Микроструктура стали 40Х

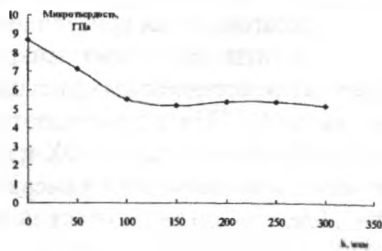
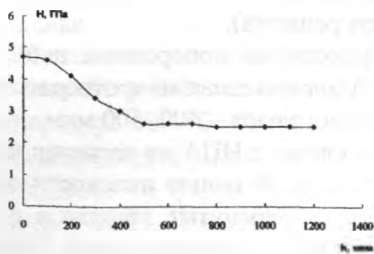
Фазовый состав стали 40Х после улучшения:  $\alpha$ -Fe и  $Fe_3C$  (рисунок 2, а). Процесс ионного азотирования стали 40Х проводили при температуре 530°С в течение 13 ч. В результате ИПА фазовый состав стали стал существенно иным (рисунок 2, б):  $\alpha$ -Fe (ОЦК кристаллическая решетка);  $\gamma'$ - $Fe_4N$  (ГЦК кристаллическая решетка),  $\epsilon$ - $Fe_3N$  (гексагональная кристаллическая решетка).

Результаты измерения микротвердости на поперечном шлифе образца представлены на рисунке 3. Максимальная микротвердость составила 4,7 ГПа, глубина азотированного слоя – 400–500 мкм.

На образцах из стали 40Х изучено влияние ИПА на характер изменения шероховатости поверхности. С этой целью плоскости серии образцов цилиндрической формы, повергнутые закалке и отпуску при температуре 600 °С, обрабатывали шлифовальной бумагой с различной зернистостью для получения шероховатости поверхности в диапазоне 0,03–1,65 мкм. Затем все образцы азотировали при 530 °С в течение 13 ч, и проводили измерения шероховатости. Часть полученных данных, отражающих тенденции изменения последней, сведена в таблицу 1.



а – после закалки и отпуска при  $T = 600^\circ\text{C}$ ; б – после закалки с отпуском и ИПА  
 Рисунок 2 – Фрагмент дифрактограммы (CoK $\alpha$ ) стали 40X



а – из стали 40X после закалки с отпуском и ИПА;  
 б – из стали 9ХС после ИПА при температуре  $425^\circ\text{C}$  в течение 12,5 ч

Рисунок 3 – Распределение микротвердости по глубине образца

Таблица 1 – Изменение шероховатости поверхности образцов из стали 40Х в различном состоянии после ИПА

Состояние	Шероховатость Ra, мкм					
	Исходная	0,033	0,041	0,764	0,889	1,400
После ИПА	0,103	0,282	0,828	0,781	1,378	1,634
Изменение	+0,070	+0,241	+0,064	-0,108	-0,022	-0,016

Азотирование по использованным режимам в случае образцов с низкой исходной шероховатостью, как правило, ее повышает. При обработке же поверхностей с исходной шероховатостью Ra в диапазоне 0,8–0,9 мкм наблюдается как ее рост, так и снижение. В случае исходных поверхностей с более высоким значением Ra после ИПА их шероховатость снижается. Эти процессы, безусловно, связаны с характером и механизмом высокоэнергетического воздействия плазмы тлеющего разряда на приповерхностный слой металла. Они требуют дополнительного более тщательного изучения. Если для машиностроительных деталей процесс ИПА, как финишная обработка с приданием поверхности значения Ra 1–1,6 мкм, вполне приемлема, то для инструмента часто требуется меньшая шероховатость.

Вообще на диффузию азота вглубь материала существенно влияет характер механической обработки поверхности перед азотированием. Такой фактор механической обработки, как шероховатость поверхности, также может влиять на образование и рост азотированного слоя. После шлифования диффузия азота вглубь металла облегчается, так как на поверхности имеют место растягивающие напряжения. Обработка точением, долблением, фрезерованием, магнитоабразивная, дробеструйная и пескоструйная обработка или поверхностная пластическая деформация формируют различные виды эпюры остаточных напряжений в приповерхностном слое и могут влиять на диффузию азота. Эти моменты в литературе изучены недостаточно, но на практике они имеют существенное значение.

Процесс ионного азотирования стали 9ХС проводили по нескольким вариантам: при температуре 410 °С в течение 6,5 ч (ре-

жим 1), при температуре 425 °С в течение 10 (режим 2) и 12,5 ч (режим 3).

Структура 9ХС после закалки и низкого отпуска представляет собой мартенсит отпуска с небольшим количеством остаточного аустенита (до 5–8 %) и карбидами типа  $(Fe, Cr, Mn)_3C$  размером 1–3 мкм. Также возможно образование в небольших количествах карбидов легирующих элементов (титана и молибдена). Микротвердость стали после обработки по режиму 1 составляет 5,5–6,4 ГПа.

В случае ИПА формировались упрочненные слои толщиной 25–30 мкм по режиму 1 и 70–100 мкм – по режиму 2 (рисунок 4, а), представляющие собой твердый раствор азота в  $\alpha$ -железе с включениями нитридов и карбидов легирующих элементов. Микротвердость у поверхности образца после азотирования по режиму 2 возросла до 8 ГПа. Твердость сердцевины в результате дополнительного высокотемпературного (при 425 °С) отпуска в процессе азотирования снизилась до 50–52 HRC.

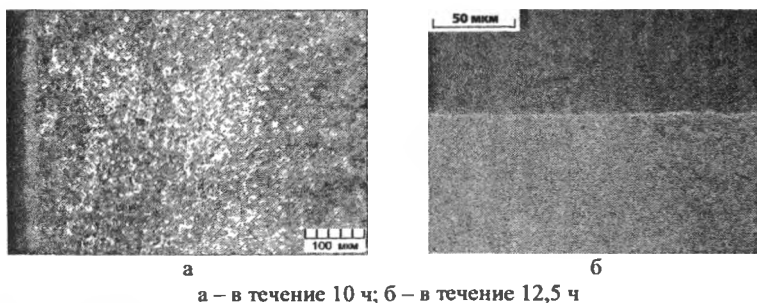


Рисунок 4 – Микроструктура стали 9ХС после закалки, отпуска и ионно-плазменного азотирования при температуре 425 °С

При ИПА по режиму 3 на поверхности образца образуется светлая нитридная зона толщиной 3–4 мкм, представляющая собой твердый раствор на основе  $Fe_4N$ , диффузионная зона при травлении выявляется слабо (рисунок 4, б).

Диффузионный слой можно охарактеризовать как твердый раствор азота в  $\alpha$ -железе с включениями нитридов и карбидов леги-



~~использования~~ элементов. Глубина азотированного слоя, как и в случае использования режима 2, составила 70–100 мкм.

Результаты исследования распределения микротвердости по глубине образца представлены на рисунке 3. Максимальная микротвердость у поверхности составляет 8,7 ГПа, а глубина азотированного слоя – до 100 мкм. При этом твердость сердцевины снизилась до 49 HRC.

На основе проведенных исследований выбраны параметры технологического процесса ИПА вставок штампов из стали 9ХС: температура 425 °С, время выдержки – 10 ч, давление 200 Па, газовая среда – смесь азота, водорода, аргона. Указанные параметры процесса обеспечивают образование диффузионного слоя с микротвердостью у поверхности до 8 ГПа, обладающего высокой стойкостью к ударным нагрузкам, при этом сохраняется высокая твердость сердцевины 50–52 HRC. С использованием разработанной технологии изготовлена опытная партия вставок штампов для ОАО «ИНТЕГРАЛ».

**Промышленное использование результатов.** Результаты выполненных исследований использованы при модернизации оборудования ИПА ОАО «МАЗ». Каждая из двух установок имеет следующие технические характеристики:

- размеры полезного рабочего пространства камеры: диаметр – 1300 мм, высота – 1200 мм;
  - номинальная масса садки – 2000 кг;
  - максимальная потребляемая от сети мощность – 100 кВт;
  - температура садки – 450–600 °С;
  - диапазон рабочего давления – 10–600 Па;
  - максимальная мощность тлеющего разряда – 50 кВт;
  - ток тлеющего разряда – 120 А;
  - напряжение тлеющего разряда – 650 В;
  - расходы рабочих газов: азот – 1–60, аргон – 1–60, водород – 1–25 л/ч;
  - максимальный расход воды – 1,5 м<sup>3</sup>/ч;
  - частота пульсирующего тока разряда – 1,0–6,6 кГц.
- На установках выполняется обработка шестерен (рисунок 5).

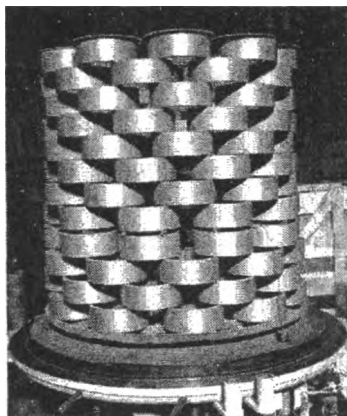


Рисунок 5 – Шестерни 5440-2405050 в вакуумной камере установки ОАО «МАЗ»

### **Выводы**

В Республике Беларусь освоено производство современного, конкурентоспособного, импортозамещающего и энергосберегающего оборудования для ионно-плазменной химико-термической обработки разнообразных деталей. Технологии ионно-плазменного азотирования обеспечивают возможность формирования твердых слоев, гарантирующих высокий ресурс работы упрочненных изделий из конструкционных и инструментальных сталей.

При исследовании методов поверхностного упрочнения хорошо изученных и широко применяемых в производстве сталей (в частности, 40Х) открываются резервы существенного повышения их эксплуатационных характеристик, связанные, прежде всего, с применением комбинированных технологий.

Вопросы зависимости шероховатости поверхности от режимов ионно-плазменного азотирования, параметров упрочненного слоя от методов окончательного формообразования деталей связаны с характером и механизмом высокоэнергетического воздействия плазмы тлеющего разряда на приповерхностный слой металла. Эти вопросы требуют дополнительного тщательного изучения.

## Литература

1. **Промышленное** применение упрочняющей обработки деталей машин и механизмов методом ионного азотирования / М.Н. Босьяков [и др.] // Сварщик. – 2011. – № 5. – С. 28–33.

2. **Олешук, И.Г.** Исследование влияния комбинированного ионно-плазменного и электронно-лучевого воздействия на структуру и механические свойства стали 40Х / И.Г. Олешук, И.Л. Поболь, С.В. Юревич // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–21 сентября 2012 г. / ФТИ НАН Беларуси. – Минск, 2012. – Кн. 2. – С. 370–374.

УДК 621.785.5

**Н.Г. КУХАРЕВА**, канд. техн. наук,  
**В.Ф. ПРОТАСЕВИЧ**, канд. техн. наук,  
**И.А. БАСАЛАЙ**, канд. техн. наук,  
**С.Н. ПЕТРОВИЧ** (БНТУ)

### **КАРБОНИТРАЦИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ 4Х5МФС В КИПЯЩЕМ СЛОЕ**

Одним из вариантов решения проблемы повышения надежности и долговечности деталей машин, инструментальной и технологической оснастки является использование энергосберегающих технологий, предполагающих получение на поверхности изделий защитных покрытий. К таким технологическим процессам можно отнести процесс получения на поверхности сложнолегированных сталей карбонитридных покрытий, обеспечивающих многократное повышение эксплуатационных характеристик изготовленных из них изделий.

Целью работы явилось совершенствование технологии нанесения карбонитридных покрытий на сталь 4Х5МФС из порошковых насыщающих сред с использованием кипящего слоя.

Использование кипящего слоя в различных областях техники, в том числе при термической и химико-термической обработке, из-