

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ

Применение ионного азотирования на производстве

Ионное азотирование может использоваться на производстве взамен газового азотирования, нитрирования (т.е. азотирования в смеси аммиака и природного газа при повышенных температурах), жидкостного азотирования в соляных ваннах, в некоторых случаях вместо цементации (нитроцементации), а также ТВЧ-закалки.

Как показывает мировой и собственный опыт применения технологии ИПА, **экономический эффект** обеспечивается благодаря снижению расхода электроэнергии, рабочих газов, сокращению трудоёмкости изготовления изделий из-за существенного уменьшения (или полного исключения) объёма шлифовальных работ, повышению качества продукции. Применение ИПА вместо перечисленных методов упрочнения позволяет сэкономить основное оборудование и производственные площади, снизить станочные и транспортные затраты, уменьшить расход электроэнергии и активных газовых сред.

Экономический эффект при ИПА **режущего и штампового инструмента** обеспечивается благодаря снижению его расхода ввиду повышения в 4 и более раз его износостойкости и повышению режимов резания.

Для некоторых изделий (**шестерен большого диаметра** для большегрузных автомобилей, экскаваторов и др.) ИПА взамен объемной термообработки является единственным способом получения готового изделия без брака. Сталь перед азотированием должна быть нормализована или улучшена (в поковках, если речь идёт о шестернях или вал-шестернях), либо быть в состоянии поставки. Вид предварительной термообработки зависит от величины нагрузки на азотированный слой и типа нагрузки на изделие. При обработке шестерен из конструкционных сталей поковки улучшаются, как правило, на твердость 241-285 НВ, в некоторых случаях – до 300 НВ (шестерни диаметром более 500 мм).

После ИПА упрочнения **зубчатых колес** предел выносливости зубьев при испытаниях на усталость при изгибе достигает 930 МПа (после ТВЧ-закалки – 600 МПа, цементации и печного азотирования – 690-700 МПа). Ресурс работы упрочнённой поверхности в 2-5 раз выше по сравнению с поверхностью, закаленной методом ТВЧ-закалки. Для сравнения, в случае закалки с нагревом ТВЧ в поверхностном слое возникают интенсивные тепловые поверхностные напряжения, приводящие к образованию микротрещин, которые в дальнейшем выявляются при эксплуатации и приводят к разрушению зуба.

Контактная усталостная прочность нагруженных сталей после азотирования выше, чем после поверхностной ТВЧ-закалки, а **износостойкость** азотированного слоя в **2-4 раза** выше износостойкости цементованного слоя.

Поскольку в процессе насыщения стали азотом имеет место изменение размеров деталей (так называемое «припухание»), то детали, поступающие на азотирование, должны быть окончательно обработаны согласно техническим требованиям чертежа с учётом увеличения размеров при азотировании на 4-6% от глубины слоя, которая для конструкционных сталей составляет величину 0,3-0,5 мм, т.е. на 10 - 15 мкм на сторону.

ИПА является одним из основных методов повышения **предела выносливости** деталей.

Обработка при температурах ниже 500 °С особенно эффективна при упрочнении изделий из **инструментальных легированных сталей для холодной обработки** (X12, X12M, X12MФ), имеющих при отпуске вторичный максимум в районе 500 °С), а также из **быстрорежущих и мартенситно-старяющихся сталей**, т.к. значительно повышает их эксплуатационные свойства при сохранении твёрдости сердцевины на уровне 55-60 HRC.

Кроме того, процесс ИПА обеспечивает **полную экологическую безопасность**.

Пример замены цементации на ионное азотирование. На ГП НПКГ "Зоря" - "Машпроект" (г. Николаев, Украина) проведены работы по сравнительной проверке работоспособности зубчатых колес из стали 18X2H4MA с цементируемыми и азотируемыми (ИПА проводилось на нашей установке) зубьями конических и цилиндрических передач редукторов воздушного винта корабля на воздушной подушке. Редукторы с упрочненными

зубчатыми колесами прошли 100-часовые испытания на номинальном режиме ($N = 7000$ л.с.; $n_{вх} = 7000$ об/мин.; $V = 136$ м/с) на стенде замкнутого контура. Результаты дефектации зубчатых колес после испытаний показали, что зубья после ИПА находятся в удовлетворительном состоянии, без следов натирания, заедания и выкрашивания. Проверка поверхностей зубьев неразрушающими методами контроля (магнитопорошковая дефектоскопия, люминесцентный контроль) дефектов не обнаружила. Твердость поверхностей зубьев соответствовала твердости после азотирования (680 - 700 HV). Геометрический контроль зубчатых колес также не обнаружил каких-либо отклонений по сравнению с исходным состоянием. Сделаны выводы:

1. Цилиндрические и конические зубчатые колеса после упрочнения методом ИПА работоспособны при окружных скоростях в зацеплении до $V=140$ м/с и контактных напряжениях до $G_n=120$ МПа;

2. Зубчатое зацепление с ИПА не уступает по работоспособности цементируемым передачам;

3. При создании новых и модернизации существующих высокоскоростных и средненагруженных редукторов целесообразно заменить цементацию зубьев на их ИПА.

Указанная замена позволит:

- исключить дорогостоящий и длительный процесс шлифовки зубьев после цементации и, следовательно, вероятность их прожогов;

- повысить рабочую температуру в зубчатом зацеплении до ~ 450 °С;

- уменьшить вероятность заедания зубьев.

Таким образом, ИПА в данном случае может заменить технологию цементации.

Области применения ИПА

Основные потребители оборудования и технологии ИПА - автомобильные, тракторные, авиационные, судостроительные, судоремонтные, машино- и станкостроительные заводы, заводы по производству сельскохозяйственной техники, насосного и компрессорного оборудования, шестерен, подшипников, алюминиевых профилей, энергетических установок и др.

Наше оборудование используется в Беларуси следующими предприятиями: МАЗ, МЗКТ, Завод самоходных комбайнов ПО «Гомсельмаш», в России – ЗАО «Волжский дизель».

В Беларуси методом ИПА обрабатываются:

- шестерни и другие изделия (Минский завод колесных тягачей, замена ТВЧ-закалки)

- шестерни большого (800 мм и более) диаметра (БелАЗ, замена ТВЧ-закалки);

- шестерни и другие детали (МАЗ, замена ТВЧ-закалки и газовой цементации);

- валы, шестерни, поддоны и другие детали («Гомсельмаш», замена ТВЧ-закалки, объемной закалки и цементации);

- проводится упрочняющая обработка изделий широкой номенклатуры - шкивов, муфт, шестерен, инструментальной оснастки, деталей термопластавтоматов, втулок для колёсных пар подвижного состава, элементов рулевого управления, деталей гидронасосов, деталей микроскопов и др. по заказам ОАО «Борисовский завод пластмассовых изделий», ОАО «Экран» (Борисов), Волковысского и Лидского локомотивных депо, ОАО "Белкоммунмаш", ГСКБ гидроаппаратуры, г. Гомель, ОАО "Бобруйскагромаш", СП "БелОМО-Цейсс", РУП завод «Могилевлифтмаш», ОАО «Барановичский завод станкопринадлежностей», Барановичского станкостроительного завода ЗАО «АТЛАНТ», ОАО «Торгмаш» (Барановичи), ОАО «Барановичский автоагрегатный завод, ОАО "558 Авиационный ремонтный завод" (Барановичи), ОАО «Минский завод «Термопласт», ОАО «Белкоммунмаш», ОАО «БелАЗ» (Жодино), МЗШ, ОАО «МТЗ», ОАО «МЗОР» (Минск), РУПП «Витязь» (Витебск), ЗАО «Фидмаш» (Витебск, Минск).

Из опыта применения технологии ИПА конкретных групп деталей **техно-экономический эффект** обеспечивается благодаря следующим преимуществам.

Ответственные детали машин, двигателей, станков, гидравлики, точной механики, передаточных механизмов-различные виды зубчатых колес, валы, оси, прецизионные цилиндры, гильзы, диски, винты, пиноли, клапаны, шаровые пальцы, кольца синхронизатора, штоки, червяки, различные детали вспомогательных механизмов и бытовых инструментов – повышаются твёрдость, износо-задиристость, усталостная и контактная прочность, антикоррозионные свойства, исключается шлифование в связи с бездеформационным

упрочнением деталей. При упрочнении изделий из низколегированных углеродистых сталей и чугунов вследствие азотирования существенно повышаются стойкость к истиранию и схватыванию в условиях недостаточной смазки – в данном случае на поверхности должен быть сформирован нитридный слой.

Шестерни, упрочненные методом ИПА, практически не подвержены короблению по сравнению с цементованными (нитроцементованными) шестернями, а также шестернями, прошедшими ТВЧ-закалку, и могут использоваться без дополнительной обработки (шлифования), что сокращает трудозатраты при их производстве.

В нефтегазовом и химическом машиностроении – роторы, плунжеры и цилиндры насосов, резьбовые замки, штоки, штанги, муфты, корпусные детали, запорная арматура, оси, валы и др. – повышается надёжность и долговечность и их межремонтный период при эксплуатации.

Экструзионные шнеки, цилиндры экструдера, стержни, дорны и другие детали машин для переработки пластмасс – увеличивается ресурс работоспособности изделий и повышается качество пластмассовой продукции.

Штампо-прессовый инструмент – пресс-формы, матрицы, штампы, пуансоны для холодной и горячей обработки металла, пластмасс, стекла и резины – повышается износостойкость, сопротивляемость трещинообразованию, уменьшается налипание металла, увеличивается долговечность в 2-6 раза.

Режущий инструмент – сверла, метчики, развертки, фрезы, протяжки, резцы – улучшаются режущие свойства, повышается стойкость в 2-4 раза и производительность мехобработки.

ИПА наиболее эффективно при обработке крупносерийных партий однотипных деталей: шестерен, валов, осей, зубчатых валов, зубчатых вал-шестерен и др.

Эксплуатационные затраты при проведении упрочняющей обработки ИПА:

- 1. Удельная мощность разряда** на стадии выдержки – 15-30 Вт/кг.
- 2. Удельный расход охлаждающей оборотной воды** (при температуре 15 – 30 °С) – 20-40 л на 1 кг изделия.
- 3. Удельный расход электроэнергии** (вместе с подготовкой поверхности) – 1,0-1,25 кВт·ч/кг.
- 4. Удельный расход питьевой воды** на обезжиривание деталей – 0,8-1 л на 1 кг изделия.
- 5. Удельный расход моющего средства** – 6 - 7,5 мг на 1 кг изделия.
- 6. Удельный расход газов** на 1 кг изделия:
 - азот – 0,2 – 0,5 л,
 - аргон – 0,1 – 0,3 л,
 - водород – 0,09 – 0,15 л (0,8-1 литр деионизованной воды для его получения на 1 т обрабатываемых изделий).
- 7. Производительность** – до 16 тонн изделий в месяц.

Экономическая эффективность применения оборудования и технологий ИПА

Опыт эксплуатации нашего оборудования полностью подтвердил высокую энергосберегающую эффективность отечественного оборудования и технологий ИПА.

В ПО «Гомсельмаш» при обработке одной детали конкреккер (КВС-1-0148910) массой 34,6 кг в случае цементации затрачивается 3 кВт ч электрической энергии на 1 кг изделия. В случае ИПА эти затраты не превышают 0,85 кВт ч. Таким образом, при обработке лишь одной детали КВС-1-0148910 экономия электроэнергии на одну деталь составляет 74,39 кВт ч. Другая статья экономии – это снижение затрат на приобретение стали, так как при переходе на азотирование стала использоваться более дешевая сталь 20Х вместо 18ХГТ.

Краткая характеристика оборудования ИПА производства ФТИ НАН Беларуси

Установка ионного азотирования состоит из рабочей вакуумной камеры, шкафа управления, системы откачки, системы водяного охлаждения, соединительных кабелей и магистралей и персонального компьютера. Применяются вакуумные камеры колпакового либо

шахтного типа в зависимости от типа изделий, подлежащих упрочняющей обработке.

Для реализации в промышленных условиях технологии ионного азотирования нами разработан ряд моделей установок серии "УА" с различными размерами рабочего пространства камеры колпакового (или шахтного) типа. Установки спроектированы, исходя из комплектования их серийными силовыми трансформаторами с габаритной мощностью 25, 40, 63 и 100 кВА.

Тип установки	Максимальная мощность разряда, кВт	Размеры рабочего пространства, мм		Максимальная масса садки, кг	Максимальный расход рабочих газов, л/ч
		Диаметр	Высота		
УА-25	18	550	800	300	30
УА -40	30	750	1000	800	50
УА -63	45	950	1250	1000	80
		950	1800	1500	
		950	2200	1800	
		950	3000- секционная	2000	
		1150	1400	2000	
УА -100	70	1150	1700	2500	100
		1400	2000		
		950	3500 - шахтная		

Технические характеристики:

1. Рабочие газы - аргон, азот, водород:

- азот газообразный по ГОСТ 9293-74, сорт первый, повышенной чистоты (баллонный);
- аргон газообразный по ГОСТ 10157-79, высший сорт (баллонный);
- водород технический по ГОСТ 3022-80 марки А (автономно);
- вода дистиллированная (бидистиллированная, деионизованная) – для генератора водорода;

2. Расход рабочих газов, л/ч: N₂ – 1-90, Ar – 1-90, H₂ – 1-25.

3. Охлаждение рабочей камеры – водяное, принудительное, в замкнутом цикле с доливом холодной воды из цеховой магистрали.

Расход охлаждающей воды – не более 1,5 м³ в час при температуре воды 25 °С.

Охлаждающая вода должна удовлетворять следующим требованиям:

- давление – не менее 1 атм;
- температура – 10 - 30 °С;
- общая жёсткость - ≤ 4 мгэquiv/л;
- отсутствие взвесей твёрдых частиц размером более 0,063 мм. Производительность насоса АВЗ-20Д – 20 л/с. Производительность насоса ДВН-50 – 50 л/с.

Натекание в камеру – не более 5 · 10⁻⁴ м³Па/с.

Измерение температуры деталей – посредством хромель-алюмелевой термопары.

Количество каналов измерения температуры – 1 .

Расчётная длительность обработки шестерен, валов-шестерен и других изделий - до 24 ч (одна садка, от загрузки до выгрузки).

Описание составных частей установки

Рабочая камера

Рабочая камера колпакового типа состоит из неподвижного основания и съёмного колпака. В основании камеры размещены откатной патрубков, подвод электропитания, термопарный ввод, газопровод и штуцера системы охлаждения.

Катод установлен на опорах, имеющих диэлектрические вставки.

На боковой стенке колпака имеется смотровое окно со шторкой, а на крышке – узел

подвеса и смотровое окно. Колпак оборудован лестницей для доступа к узлу подвеса и тремя опорами для установки его в снятом положении на пол.

Практика промышленной эксплуатации установок с камерой колпакового типа показала их достаточно высокую универсальность при обработке различных изделий. По желанию Заказчика может быть изготовлена камера шахтного типа, например, при обработке коленчатых валов, шнеков, экструдеров и других длинномерных изделий.

Газоснабжение

Обеспечение установки азотом и аргоном – из баллонов.

Источником водорода является генератор водорода (электролизёр), оснащённый системой осушки и очистки водорода. Газовая система для получения водорода располагается в отдельном отсеке шкафа управления.

Электролизёр потребляет свежеприготовленную дистиллированную, (бидистиллированную или деионизованную) воду. Расход воды на процесс – не более 2 л.

Управление техпроцессом

Управление работой установки и контроль за ходом процесса обработки осуществляется автоматически по заданной программе посредством специализированного контроллера и персонального компьютера, который может располагаться в отдельном помещении либо быть встроенным в шкаф управления.

Все этапы работы установки (вакуумирование камеры, разогрев садки, выдержка и остуживание) автоматизированы. Переход от одного шага процесса к другому осуществляется либо по истечении заданного интервала времени (на выдержке), либо по достижении определённого заданного значения некоторого параметра - температуры либо давления (на разогреве садки).

При обработке постоянных садок деталей режим обработки выбирается автоматически, в зависимости от типа и количества загруженных деталей.

В ходе технологического процесса на установке осуществляется контроль следующих параметров, которые отображаются на дисплее ПК в виде графического протокола процесса:

- рабочее давление;
- температура садки;
- расходов трех рабочих газов;
- напряжение и ток разряда.

По завершении процесса определяется суммарный расход каждого из компонент газовой смеси и расход электроэнергии, затраченной на формирование разряда в процессе обработки. Графический протокол процесса и его ход (время запуска, старт каждого шага, сообщения о неполадках и т.д.) сохраняется с возможностью его просмотра и распечатки на принтере.

После отключения установки графический протокол процесса остаётся в памяти компьютера. Программа процесса может быть изменена в ходе выполнения любой стадии процесса после ввода кодового слова.

Программируются:

- количество шагов на стадии разогрева и стадии выдержки;
- длительность каждого шага;
- давление;
- расход каждого из 3-х газов;
- температура садки;
- скважность импульсов напряжения;
- скорость разогрева (на стадии разогрева садки);
- частота вращения ротора насоса ДВН (при необходимости);
- граничные значения тока и напряжения на каждом шаге.

Кроме того, компьютер контролирует состояние установки (газы, вода в электролизёре, охлаждающая вода, КЗ в камере, охлаждение шкафа управления и др.) и в случае неполадок подаёт световой и звуковой сигналы, а также текстовое сообщение на экране ПК. В случае несвоевременного принятия мер по устранению неполадок, либо при возникновении аварийной ситуации обеспечивается безаварийный выход из режима обработки на любом этапе процесса. После устранения нештатной ситуации обеспечивается выход в режим, предшествовавший аварийному отключению и далее обработка продолжается в заданном режиме.

Комплектность установки ионного азотирования

В комплект поставки установки с камерой колпакового типа входят:

1	Камера колпакового типа (основание камеры, колпак). Габариты и рабочий объем рабочей камеры определяет Заказчик	1 шт.
2	Агрегат вакуумный (насос вакуумный золотниковый АВЗ-20Д + насос вакуумный двухроторный ДВН-50)	1 комплект
3	Арматура вакуумной магистрали	1 комплект
4	Насос водяной циркуляционный	1 шт.
5	Арматура системы водоохлаждения	1 комплект
6	Шкаф управления с системой электропитания и элементами газовакуумной магистрали и кондиционером	1 комплект
7	Компьютер персональный	1 шт.
8	Источник водорода (электролизёр + система очистки и осушки)	1 шт.
9	Силовой трансформатор	1 шт.
10	Силовой дроссель	1 шт.
11	Силовой фидер	1 шт.
12	Газовая магистраль «шкаф-камера» (включая подвод N ₂ и Ar от баллонов)	1 шт.
13	Соединительные кабели	1 комплект
14	Внутрикамерная оснастка для формирования садки	1 комплект
15	Запчасти, дополнительные материалы *	1 комплект
16	Эксплуатационная документация *	1 комплект
*	<p>Запчасти, дополнительные материалы, документация и сервис включают:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 1 комплект быстроизнашивающихся частей (резиновые уплотнения, термопары); - 1 комплект запчастей (1 IGBT-транзистор, 3 тиристора, 1 электрод-токоввод с комплектом изоляционных материалов, 1 термопарный ввод с комплектом изоляционных материалов, изоляционные материалы к опорному изолятору катода – 2 комплекта, стекло к смотровому окну – 2 шт., уплотнительный шнур к камере – 2 шт.); - технологические программные комплекты для обработки деталей из марок сталей, заявленных Заказчиком в ТЗ; - комплект технической документации (паспорт на установку, паспорта на покупные узлы и агрегаты, руководство по эксплуатации установки); - шефмонтаж и обучение персонала Заказчика; - авторское сопровождение в течение первого года эксплуатации оборудования (посещение участка ИПА Заказчика два раза в год, текущее техническое обслуживание оборудования, текущее консультирование специалистов Заказчика). 	

Возможна транспортировка оборудования на место монтажа на условиях СІР (Инкотермс 2000).

Гарантии и ответственность - гарантийный срок на поставляемое оборудование составляет 12 месяцев (кроме покупных изделий, на которые предприятием-изготовителем устанавливается свой гарантийный срок) и исчисляется с момента приемки оборудования Заказчиком. В случае задержки приемки по причинам, не зависящим от Изготовителя, гарантийный срок начинает исчисляться по истечении 1 месяца с момента сообщения о готовности к отгрузке.

Сравнительный анализ характеристик оборудования производства ФТИ НАН Беларуси и установок зарубежных производителей

Жирным шрифтом выделены преимущества по потребительским критериям оборудования (белорусского и некоторых проанализированных нами представителей зарубежных производителей), курсивом – его недостатки.

1. Анализ по критерию получения качественных азотированных слоев на изделиях из сталей и чугунов.

Мировой опыт показывает, что для обеспечения возможности упрочнения изделий из разных марок сталей и чугунов при ИПА должна использоваться **газовая смесь водорода и азота**. При необходимости, возможна добавка **метана (CH₄)** или **пропан -бутана (C₃H₈ - C₄H₁₀)**. Обязательным условием качественной обработки изделий является независимое регулирование расхода каждого из компонентов рабочей газовой смеси. Эти рабочие среды используются в наших установках, а также в установках следующих европейских производителей:

- «Eltro» (Германия): H₂+N₂+Ar+CH₄;
- «PlaTeG» (Германия): H₂+N₂+CH₄.

Водород вырабатывается автономно - путем электролиза воды, что в значительной степени упрощает требования по взрыво- и пожаробезопасности к помещениям, где эксплуатируется оборудование ИПА.

В установках фирмы «Ionitech» (Болгария) *в качестве рабочей среды используется аммиак NH₃*, что создает определенные проблемы:

- для обеспечения высокого качества азотирования требуется *очистка аммиака от остатков влаги и масла, для чего применяется дополнительное оборудование;*
- при диссоциации аммиака образуется некоторое количество *метана*, неконтролируемое *присутствие* которого в рабочей атмосфере во многих случаях *недопустимо;*
- возникают *сложности по обеспечению техники безопасности контроля экологической обстановки.*

В установках российских производителей в качестве исходного газа – источника молекулярного азота - также *используется аммиак*, который в диссоциаторе разлагается на смесь H₂+N₂ с соотношением водорода к азоту 3:1, что *исключает возможность целенаправленно управлять формированием рабочих слоев* по структуре и свойствам при обработке изделий из различных марок сталей.

В нашем оборудовании и оборудовании фирм «Eltro» и «PlaTeG» **существует возможность независимого регулирования расхода каждого из компонентов рабочей газовой смеси и давления в камере**, что обеспечивает получение устойчивых результатов по ИПА. Например, на стадии очистки и разогрева используются только H₂ и Ar – этим обеспечивается глубокая очистка и активирование поверхности, а на стадии выдержки – смесь H₂+N₂ +Ar. Применение смесей этих газов **существенно расширяет номенклатуру обрабатываемых сталей**: можно успешно обрабатывать высоколегированные, быстрорежущие, мартенситностареющие, коррозионно-стойкие и др. стали.

Автоматизированное управление процессом ХТО позволяет для каждого этапа процесса задавать и выдерживать оптимальный температурный диапазон, состав газовой среды, давление и другие параметры, характеризующие процесс.

Оператор может запустить процесс по любому заранее запрограммированному режиму или же запрограммировать процесс самостоятельно. Посредством заложенной в ПК специализированной управляющей программы процесс обработки проводится полностью в автоматическом режиме – от момента закрытия камеры до её развакуумирования и открытия.

Параметром, характеризующим процесс ИПА, является **плотность потока диффундирующего в сталь элемента – азота**, которая является функцией параметров разряда и заданного расхода и **может изменяться в ходе процесса по любому алгоритму**, в зависимости от марки обрабатываемой стали и требований КД.

Эти характеристики обеспечиваются выбором режима обработки по давлению в камере, концентрации азота в рабочей газовой смеси, параметрами разряда и алгоритмом изменения концентрации азота в ходе процесса – такое управление процессом обработки реализовано только на нашем оборудовании.

Опыт ионного азотирования различных марок сталей показал, что, изменяя плотность потока азота в ходе процесса оптимальным образом, можно формировать глубокие слои, причём **использование смеси N_2+N_2+Ar даёт лучшие результаты**, чем, применение аммиака NH_3 . Кроме того, существенным фактором, обеспечивающим получение качественных азотированных слоев, является **использование импульсного питания разряда** («пульсирующий» ток). Это реализовано в наших установках, а также в установках фирм «Eltro», «PlatG» и «Ionitech». Применение системы импульсного питания разряда с управляемой длительностью импульсов тока позволяет исключить локальную концентрацию энергии в разряде. При этом исключается перегрев острых кромок и углов деталей, плазме придается максимальная «подвижность и проникающая способность», что позволяет обрабатывать достаточно узкие пазы, отверстия малых и особо малых размеров, углубления.

Минимальный разброс характеристик обрабатываемых в одной садке изделий обеспечивается однородностью температурного поля в камере. С этой целью установки фирм «Eltro» и «PlatG» выполнены с «горячими» стенками и для нагрева внутренней стенки камеры необходим дополнительный внешний источник энергии.

В наших установках задача обеспечения температурной однородности садки решается более простым и экономичным методом: в камере имеются **теплозащитные экраны**, а для получения однородного температурного поля на высоте садки используется **система плазменного «подогрева»**, что, кроме того, позволяет в одной садке обрабатывать детали различной геометрии и массы.

2. Анализ по критерию экономичности в использовании электроэнергии, рабочих газов, охлаждающей воды и моющих средств.

Благодаря применению в нашем оборудовании оптимальной системы теплозащиты **удельные энергозатраты существенно ниже, чем в зарубежных установках** (на 30–90% по сравнению с болгарскими и российскими и на 15–20% - с немецкими установками с «горячими» стенками) и составляют величину 0,6-1,6 кВт·ч/кг в зависимости от загрузки камеры при температуре садки 525 – 530 °С (рис. 1).

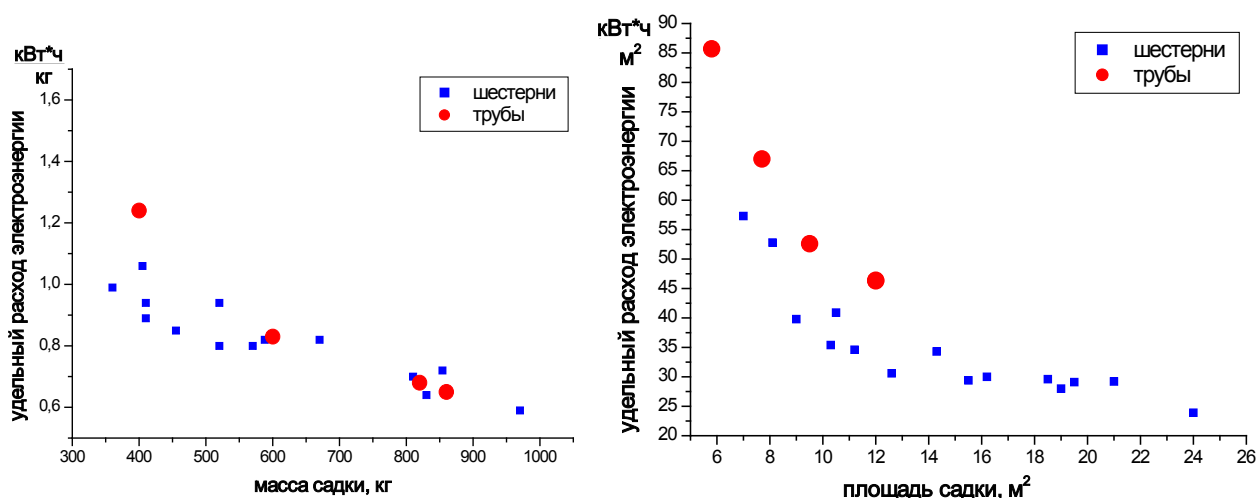


Рис. 2. Удельный расход электроэнергии при азотировании в зависимости от степени загрузки камеры

Следует отметить, что в стоимости расходных материалов (газы + электроэнергия) доля электроэнергии составляет 90-95%, поэтому **максимальная загрузка камеры и оптимальное время обработки обеспечивают минимальные затраты на проведение процесса ИПА.**

Низкий удельный расход электроэнергии на стадии выдержки, а также автоматизированная система управления расходом обуславливают **малое потребление охлаждающей воды.** Так, при обработке садки массой 515 кг расход воды составляет от 0,5 до 0,8 м³ в час (в зависимости от ее температуры). При этом наружная стенка камеры установки имеет температуру 43-45⁰С. В установках российских производителей расход воды – до 7 м³ /ч.

Используемая в наших установках независимое регулирование расхода каждого из компонентов рабочей газовой смеси и давления в камере обеспечивают **экономный расход газов**. В пересчете на единицу площади обрабатываемой садки он почти вдвое ниже, чем например, на установке PP200 фирмы «PlaTeG», которая эксплуатируется на ОАО «БелАЗ».

Предлагаемая нами технология **отмывки деталей с использованием биоразлагаемого моющего средства** перед процессом азотирования обеспечивает малый расход моющего средства – 0,25 л на 1 м² обрабатываемой площади или 7,5 л на 1000 кг изделий.

3. Анализ по критерию удобства в эксплуатации.

Удобство эксплуатации установок ионного азотирования в значительной мере зависит от типа рабочей камеры. Для обработки шестерен, режущего и штампового инструмента, а также других изделий наиболее удобной является **колпаковая конструкция камеры**, когда колпак камеры поднимается вверх и отводится в сторону с помощью кран-балки (либо автономного подъемника), и садка является доступной со всех сторон. При этом детали на катод можно укладывать вручную либо с помощью кран-балки или тельфера.

Колпаковая конструкция камеры позволяет **использовать различные виды спецоснастки** для укладки обрабатываемых изделий на катод либо для их вывешивания на специальную оснастку. Использование спецоснастки обеспечивает создание **наиболее эффективных режимов обработки** изделий различной конфигурации.

4. Анализ по критерию надежности в эксплуатации.

Для обеспечения надежности эксплуатации в нашем оборудовании и установках немецких компаний применен ряд передовых конструктивно-технологических решений:

- применение **современных программируемых логических контроллеров (PLC)** для управления установкой ИПА

- наличие **независимых аппаратных блокировок** при возникновении внештатных ситуаций

- аварийное прекращение подачи энергоносителей **не приводит к повреждению оборудования и деталей** в садке. После устранения нештатной ситуации процесс может быть восстановлен с момента прерывания.

- использование только **апробированных комплектующих изделий** отечественного и зарубежного производства;

5. Анализ по критерию экологической безопасности.

При использовании в установках в качестве рабочего газа *аммиака*, помимо взрыво- и пожароопасности, возникает также угроза и *экологического загрязнения*.

В этом отношении **неоспоримые преимущества имеет наше оборудование** и установки немецких компаний, где аммиак не используется.

Для обеспечения высокого качества обработки изделия перед процессом ИПА подвергаются очистке. Мы применяем отмывку с использованием экологически чистых моющих средств, которые утилизируются в стандартную заводскую канализацию смазочно-охлаждающих жидкостей. Аналогичные моющие средства используют и немецкие компании.

Таким образом, с точки зрения экологической безопасности, наиболее предпочтительным является оборудование ФТИ НАН Беларуси, а также фирм «Eltro» и «PlaTeG». В нем **не используется рабочий газ аммиак и хлорсодержащие вещества** (трихлорэтилен или перхлорэтилен), которые часто применяются для обезжиривания деталей перед азотированием в установках других производителей (например, фирмы «Ionitech»).

Пример модернизации зарубежного оборудования

В течение ряда лет в ОАО «МАЗ» (Минск) эксплуатировались две установки ИПА моделей ИОН-100 и ИОН-100И. Подобными установками оснащен также ряд предприятий в России. В качестве рабочей среды в установках используется аммиак NH₃. Такому оборудованию присущ целый ряд недостатков:

- проблемы по экологической безопасности;
- при диссоциации NH₃ образуется некоторое количество метана, неконтролируемое присутствие которого в рабочей атмосфере во многих случаях недопустимо с точки зрения формирования качественного азотированного слоя;

- для обеспечения высокого качества азотирования требуется очистка NH_3 от остатков влаги и масла, что требует использования специального оборудования.

Отсутствие в установках возможности независимого управления расходом NH_3 и давлением в камере исключает возможность обработки деталей при полной загрузке камеры, т.к. при этом для обеспечения температурной однородности садки требуется снижение рабочего давления. А это приводит к уменьшению активности рабочей среды и необходимости увеличения длительности выдержки, в результате чего снижаются производительность оборудования и качественные показатели азотированного слоя.

Питание разряда на установке ИОН-100 осуществляется постоянным током, что существенно затрудняет выход на режим выдержки из-за интенсивного дугообразования.

Задачей модернизации установок явилось обеспечение производительности на уровне 50 кг/ч, что возможно при полной загрузке камеры (120 шестерен суммарной массой 1056 кг, азотируемая площадь - 24 м²), при общей длительности цикла не более 20-21 ч.

Второй задачей модернизации стало снижение удельных энергозатрат при обработке благодаря:

- переводу установки ИОН-100 из режима работы на постоянном токе в режим работы на пульсирующем токе;

- использованию вместо аммиака рабочей смеси газов (аргон+азот+водород), причем Н вырабатывается автономно (его источником является электролизер, работающий на дистиллированной воде), Ar - баллонный и N_2 – из централизованной заводской магистрали либо баллонный;

- усовершенствованию системы откачки камеры для управления ее скоростью;

- оптимизации путем автоматизации режима обработки на всех стадиях (разогрева, выдержки и остуживания);

- усовершенствованию системы тепловой защиты камеры и конструкции загрузочного электрода (катода).

На этом принципе в ФТИ НАН Беларуси в 2012 г. созданы два комплекса оборудования с использованием вакуумных камер установок ИОН-100 и ИОН-100И.

В шкафу управления (рис. 2 а) размещены электросиловое и электронное оборудование. В соответствии с техническим заданием ОАО «МАЗ» система управления изготовлена на базе электронных компонентов производства фирмы "Mitsubishi". (Следует добавить, что возможно использование и отечественного специализированного контроллера, что дает ряд преимуществ, особенно при обработке широкой номенклатуры изделий. Такие комплексы успешно функционируют на установках, эксплуатируемых на МЗКТ, заводе самоходных комбайнов ПО «Гомсельмаш» и ряде других предприятий).



а



б

Рис. 2. Шкаф управления установки (а), шестерни 5440-2405050 в камере установки (б)

Таким образом, после модернизации установки обеспечивают следующие характеристики:

- импульсный режим работы источника питания с управлением частотой следования импульсов в пределах 0,5 – 8 кГц,

- максимальная мощность разряда – до 60 кВт,
- максимальный ток разряда – до 100 А,
- максимальное напряжение – до 700 В,
- давление в рабочей камере - до 300 Па,
- расходы рабочих газов: аргона и азота 0 – 90 л/ч, водорода 0 – 25 л/ч.

Пример полной загрузки рабочей камеры деталями типа «шестерня ведомая 5440-2405050» после модернизации показан на рис. 2 б.

На рис. 3 приведены типичные профили распределения микротвердости по глубине азотированного слоя для сталей 40Х и 18ХГТ, полученные при обработке серийных садок с общей азотируемой площадью 24 м² в условиях крупносерийного производства шестерен.

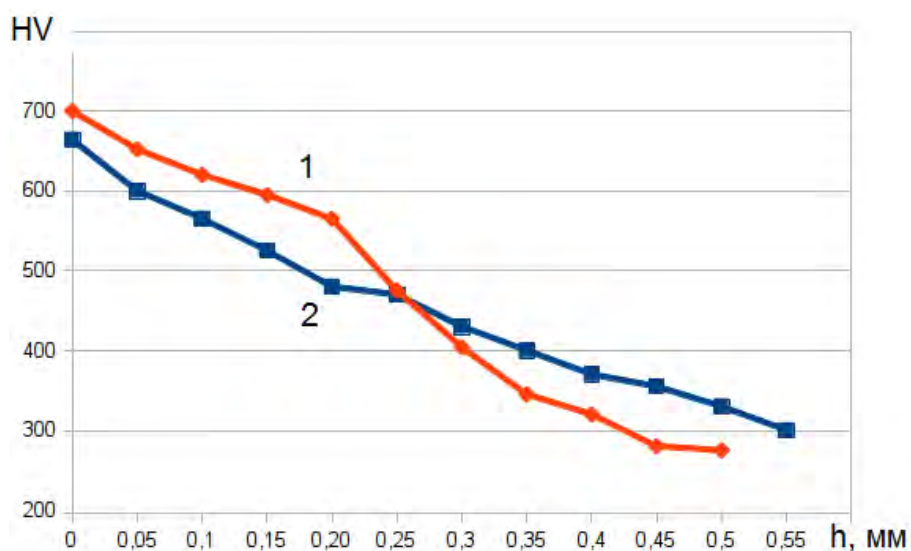


Рис. 3. Распределение микротвердости по глубине упрочненных слоев для сталей 25ХГТ (1) и 40Х (2)

С целью качественной подготовки поверхности изделий к азотированию, используется ультразвуковая отмывка в подогретом водном растворе экологически безопасного биоразлагаемого средства «Прималюкс» (ТУ РБ 37430824.002-97) с последующим ополаскиванием в проточной подогретой воде и сушкой горячим воздухом в специальной сушильной камере. Все эти компоненты оборудования составляют линию обезжиривания, которая предлагается Заказчику вместе с установкой, при отсутствии оборудования для подготовки поверхности деталей.



Выводы

Выявлены следующие основные конкурентные преимущества установок производства ФТИ НАН Беларуси.

- **Применение в качестве рабочей среды газовой смеси N_2+H_2+Ar (с добавлением, при необходимости, метана или пропан-бутана)** позволяет обрабатывать изделия из любых марок азотируемых сталей, чугунов и сплавов, формируя на них упрочненные слои любого заданного состава, глубины и твердости.

- **Отсутствие аммиака в качестве рабочего газа** обеспечивает безопасность процесса и дает возможность обрабатывать детали из разных марок сталей, в том числе сложнолегированных.

- **Автономная система получения чистого водорода, отсутствие водорода в баллонах** позволяет организовать безопасную работу с водородом и упрощает требования к помещениям, где будет эксплуатироваться оборудование.

- **Применение пульсирующего напряжения с регулируемой длительностью импульсов тока для формирования плазмы** минимизирует стадию микродуговой очистки, присущую российскому оборудованию, работающему на постоянном токе. Также обеспечивается равномерность распределения температуры по всему объему садки и оптимальный энергозатрат на каждой стадии процесса, что способствует формированию равномерного азотированного слоя требуемого состава, глубины и твердости.

- **Наличие оптимальной системы теплозащиты камеры** обеспечивает равномерность температуры деталей в садке, экономный расход электроэнергии (на стадии разогрева и на стадии выдержки) и пониженный расход охлаждающей воды.

- **Полностью автоматизированное компьютерное управление оборудованием на всех этапах процесса по всем основным параметрам – температуре, составу газа, давлению** обеспечивает серийную устойчивость технологии и воспроизводимость результатов обработки, позволяет минимизировать отрицательную роль «человеческого фактора».

Таким образом, при схожих технологических и технических решениях и высоких результатах обработки, уровень цен на наше оборудование ниже, чем на немецкое оборудование. И при гораздо более совершенной технологии и более высоком качестве обработки, он примерно равен уровню цен на болгарское оборудование.

В целом, указанные технические и технологические преимущества позволяют на оборудовании ФТИ НАН Беларуси проводить упрочняющую обработку изделий с высоким качеством, обеспечивая заданный состав, глубину и твердость азотированного слоя.

В 2013 г. ФТИ НАН Беларуси поставит комплексы ИПА трем предприятиям, одно из которых принадлежит к числу крупнейших в мире в своей области.

Примеры обработки различных изделий



Шестерни массой 10,1 кг, 51 шт.

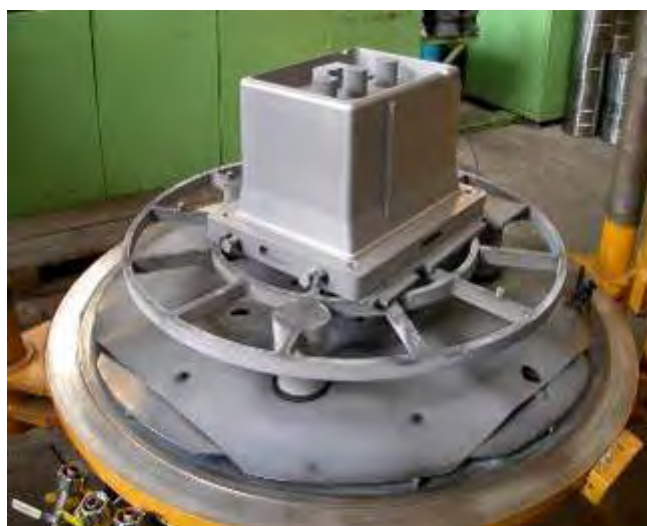


Шестерни массой 4,6 кг, 108 шт.

Минский завод колесных тягачей (МЗКТ)



Форма для отливки панелей телевизора
«Витязь»



Форма для отливки контейнера к
холодильнику «Атлант»



Шестерни для автомобиля БелАЗ (сверху) и «Комацу» (снизу)



Шестерни для автомобиля БелАЗ



Рейки для протяжных станков



Шестерни для автомобиля БелАЗ



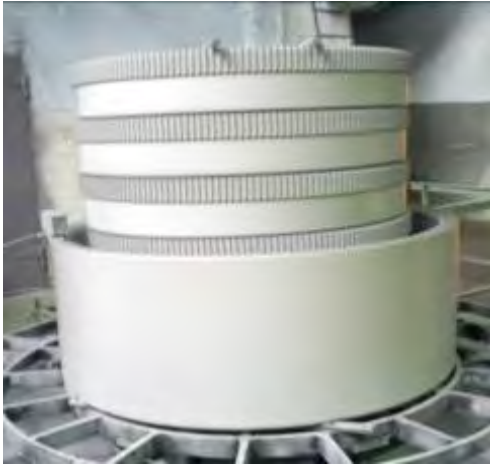
Скалки для термопластавтоматов и косозубые шестерни, сталь 38Х2МЮА



Направляющие рейки для прокатных станов, сталь45



Валы для самоходного комбайна, сталь18ХГТ



Шестерни для экскаватора (слева, нижняя шестерня) и большегрузных карьерных самосвалов, сталь 38Х2МЮА



Шестерни для автомобилей МЗКТ различных моделей, обрабатываемые в одной садке, сталь 40Х



Загрузка коленчатых валов в камеру шахтного типа, сталь 38ХНЗМА, ЗАО «Волжский дизель» (Балаково)

Примеры участков ионного азотирования



Физико-технический институт НАН Беларуси
Минск, ул. Купревича, 10



Участок ИПА, оснащённый установкой УА-63-950/3400 с изменяемой геометрией рабочей камеры (высота 1,7 или 3,4 м) (2012 г.)



ЗАО «Волжский дизель» (Россия, г. Балаково)



Участок ИПА, оснащённый установкой УА-63-1150/1400 (2005 г.)



Участок ИПА, оснащённый двухкамерной установкой:
шахтной диаметром 950 мм и глубиной 3500 мм (слева) и колпаковой
диаметром 2000 мм и высотой 1400 мм (справа) (2011 г.)



ОАО «Минский автомобильный завод»



Участок ИПА, оснащённый двумя установками:
модернизированная камера ИОН-100 и шкаф управления с панелью
Mitsubishi (2012 г.)