

ров. Такой подход позволяет разрабатывать специальные устройства, направленные на решение определенных задач, а не универсальные устройства. Рассматриваются три основных вопроса: анализ (или диагностика системы электроснабжения по качеству электроэнергии); контроль качества электроэнергии; коммерческий учет электроэнергии по тарифам, зависящим от показателя качества электроэнергии.

Диапазон измерения каждого параметра качества электроэнергии должен определяться с учетом диапазонов измерения других параметров. При этом запись измерений должно обеспечиваться до тех пор, пока не достигнется несколько допустимых значений. Например, при отклонении напряжения до +20 % и коэффициенте несинусоидальности кривой напряжения 15 % амплитудное значение может достигать значения  $1,9 \times U_{\text{ном}}$ . Точно так же следует учитывать, что изменение одной из характеристик может повлиять на точность других измерений. Требования к погрешностям измерений отражены в [1, 2]. При этом погрешности измерений необходимо отличать от погрешностей измерительных приборов. Например, предполагается, что точность измеренного тренда напряжения составляет 0,5 %. Учитывая, что измерение в сетях напряжением выше 0,38 кВ проводят не только с применением приборов, но и с помощью трансформатора напряжения, в отчете следует учитывать и погрешность этого трансформатора.

**Заключение.** Современная элементная база, средства обработки данных измерений позволяют создавать программируемые измерительные приборы с высокими техническими характеристиками. Требования к этим характеристикам определяются с учетом того, что диапазон измерения может быть выбран как для нормированных, так и для ненормированных показателей качества электроэнергии [1, 2]. Для нормализованных показателей качества электроэнергии диапазоны могут быть выбраны на основе номинальных значений. Для нестандартизированных показателей могут быть использованы допустимые статистические значения, приведенные в стандарте. Для других параметров диапазоны измерений целесообразно выбирать исходя из опыта, полученного при измерении.

#### Список цитируемых источников

1. Мамедяров, О. С. Влияние качества электроэнергии на электропотребителей и контроль их показателей. / О. С. Мамедяров, Н. Ф. Зарбиева // Сборник докладов X Российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности. ЭМС-2008, — СПб., 2008. — С. 143—146.
2. Мамедяров, О. С. О построении регрессионных моделей для электроэнергетических задач. / О. С. Мамедяров, Н. Ф. Зарбиева // Экоэнергетика. — Баку, 2007. — №1. — С.24—31.

УДК 621.785

А. В. Малевич, Л. Л. Сотник, В. А. Серпухов

Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ СТАЛИ 40ХН2МА НА КАЧЕСТВО АЗОТИРОВАННОГО СЛОЯ

**Введение.** Ионно-плазменное азотирование сталей проводится с целью повышения прочности поверхностному слою и для увеличения устойчивости к коррозии. Одним из научных направлений в данной области является установление закономерностей между диффузионным процессом и механизмом формирования сверхтвердых фаз при азотировании стали. В связи с этим необходимо разрабатывать новые методы ионно-плазменного азотирования и исследование механизмов формирования материалов с модифицированными слоями, которые будут обладать улучшенными свойствами, по сравнению с традиционными методами азотирования, является актуальной.

К числу достоинств ИПА в плазме тлеющего разряда следует отнести следующие: возможность управления процессом насыщения, которая обеспечивает получение покрытия высокого качества, заданного фазового состава и строения; обеспечение абсолютно одинаковой активности газовой среды всей поверхности детали, охваченной тлеющим разрядом, это в конечном итоге обеспечивает получение равномерного по толщине азотированного слоя; снижение трудоемкости местной защиты поверхностей, не подлежащих азотированию, которая производится металлическими экранами; резкое сокращение длительности азотирования деталей (в 2—2,5 раза); снижение деформации деталей. Применение ИПА вместо цементации, нитроцементации, газового или жидкостного азотирования, объемной или ТВЧ закалки позволяет сэкономить основное оборудование и производственные площади, снизить станочные и транспортные затраты, уменьшить расход электроэнергии и активных газовых сред [1].

Технологическими факторами, влияющими на эффективность ионного азотирования, являются температура процесса, продолжительность насыщения, давление, состав и расход рабочей газовой смеси. Однако в литературе, к сожалению, отсутствует методика выбора режима обработки, которая учитывала бы марку стали, из которой изготовлены обрабатываемые изделия и степень загрузки камеры, а также принцип выбора конкретных значений температуры процесса, длительности выдержки, рабочего давления и состава рабочей газовой смеси [2].

В статье представлены результаты сравнения влияния двух различных технологических процессов азотирования на глубину и характеристики азотированного слоя деталей из стали 40ХН2МА.

Сталь 40ХН2МА применяется для изготовления цельнокатаных колец, коленчатых валов, клапанов, шатунов, крышек шатунов, ответственных болтов и других крепежных деталей, специального крепежа, шестерней, кулачковых муфт, дисков и других тяжело нагруженных деталей, для производства валков для холодной прокатки металлов, для изготовления деталей трубопроводной арматуры, деталей авиастроения (валов ротора, коленчатых валов, валов редуктора, шатунов двигателя воздушного охлаждения, ответственных болтов, шпилек, деталей винта, массивных и силовых деталей РД), работающих при температуре до +500 °.

Сталь 40ХНМА по сравнению со сталью 18ХНВА менее легирована, но содержит больше углерода и нечувствительна к отпускной хрупкости. Конструкционная сталь 40ХН2МА не подвержена хрупкому разрушению после отпуска, что обусловлено присутствием молибдена. Благодаря высокой прочности можно использовать материал для производства конструкций, применяемых на производстве и работающих под большой нагрузкой. Широкое распространение получили изделия: валки для холодного проката сплавов; диски и нагруженные детали; кронштейны; кулачковые муфты; метизы; цельнокатаные кольца; арматура для трубопроводов; изделия для авиастроительной отрасли, работающие при +500 градусах.

Целью данной работы является определение взаимосвязи между параметрами процесса ионно-плазменного азотирования стали 40ХН2МА и качеством, глубиной азотированного слоя.

**Основная часть.** Исследование проводилось на установке ионно-плазменного азотирования (ИПА) с конструкцией камеры дверного исполнения модели УА-25-400 / 400 производства ФТИ НАН Беларуси. Данная установка располагается в лаборатории высокоэнергетических методов упрочнения, кафедры технологии и оборудования машиностроения, Барановичского государственного университета.

Установка ионно-плазменного азотирования (ИПА) с конструкцией камеры дверного исполнения модели УА-25-400 / 400 производства ФТИ НАН Беларуси ионного азотирования имеет рабочую камеру с так называемой «холодной» стенкой, охлаждаемой водой и расположенными внутри теплозащитными экранами из листового металла.

Разогрев садки в таких установках осуществляется тлеющим разрядом. Мощность разряда, необходимая для поддержания нужной температуры садки на стадии выдержки, определяется геометрическими размерами камеры и системой теплоизоляции, т. е. тепловыми потерями камеры. Теплоизоляция таких камер, как правило, экранная, но иногда и комбинированного типа, когда, например, на основании камеры и на крышке колпака имеется дополнительно волокнистый теплоизоляционный материал. Остывание садки происходит в вакууме [2].

Эксперименты по азотированию проводились следующим образом:

Для исследования использовались образцы-свидетели из стали 40ХН2МА изготовленные из круглого проката диаметром 20 мм. Для сравнения параметров ионно-плазменного азотирования образцы-свидетели были разделены на две группы. Первую группу образцов-свидетелей обработали по базовой методике, вторую группу по измененной методике. Использование двух методик необходимо для сравнения результатов исследования и определения зависимости между параметрами азотирования и качеством азотированного слоя.

По первоначальной методике ионно-плазменного азотирования технологический режим имеет следующий вид: смесь азота, аргона, водорода ( $N_2$  — 25 %,  $Ar$  — 70 %,  $H_2$  — 5 %)  $P = 200$  Па; напряжение горения разряда  $U = 500$  В; ток разряда  $I = 500$  мА, плотность тока разряда  $j = 15$  мА / см<sup>2</sup>. Температура обрабатываемых образцов составляла  $T = 510$  °С, а длительность азотирования  $t = 15$  часов.

Вторая группа образцов свидетелей обрабатывается по методике, имеющей основное изменение, заключающееся в обработке не в один шаг, а в несколько шагов с различными параметрами технологических режимов.

Параметры обработки по измененной имеют следующий вид: На первом шаге выдержки температура составляет 530 °С, время выдержки 60 минут,  $Ar$ , 17 л / ч,  $N$  10 л / ч,  $H$  3,5 л / ч. На втором шаге выдержки температура была увеличена до 540 °С, время выдержки увеличено до 120 минут,  $Ar$ , 18 л / ч,  $N$  8 л / ч,  $H$  3,5 л / ч. На третьем шаге время выдержки увеличено до 900 мин., температура снова сброшена до 530 °С, увеличен расход аргона до  $Ar$ , 20 л / ч, расход азота уменьшен до 5 л / ч, расход водорода остается неизменным.

После процесса обработки на данных режимах было проведено исследование поверхностной твердости образцов-свидетелей при помощи микро-твердомера *Microscan AC1*, а также исследование микро-структуры поверхностного слоя. Толщина азотируемого слоя определялась методом травления прямым микрошлифа.

В результате проведенных исследований для стали 40ХН2МА были получены следующие результаты:

Группа свидетелей, обработанных по методике обработки в 1 шаг: глубина слоя 0,1—0,12 мм; твердость 42—44 *HRC*. Группа свидетелей, обработанных по измененной методике: глубина слоя 0,5—0,6 мм; твердость 48—53 *HRC*.

Повышение температуры на 20—30 °С способствует увеличению твердости и глубины диффузионного слоя стали 40ХН2МА. Данное повышение температуры возможно ввиду того, что температура отпуска должна на 50—100 °С превышать максимальную температуру ионного азотирования (для данной стали отпуск составляет 620 °С).

Время ионного азотирования при низкой температуре (500—520 °С) практически не влияет на размер, форму и плотность распределения нитридной фазы. При повышении температуры до 540 °С увеличение времени азотирования оказывает значительное влияние на размер нитридной фазы и структуру матрицы. Размер нитридной зоны увеличивается, а плотность распределения выделившихся частиц уменьшается [3].

**Заключение.** Повышение микротвердости и глубины диффузионного слоя было достигнуто изменением состава рабочих газов, изменением температуры, времени выдержки. Следует сделать вывод о преимуществах второй методики в сравнении с первой ввиду значительного увеличения микро-твердости (на 20 %) и глубины (в 5 раз) азотированного слоя при увеличении времени выдержки на 50 % и изменении состава рабочих газов.

#### Список использованных источников

1. Ионно-плазменное азотирование как один из современных методов поверхностного упрочнения материалов : дис. / Т. П. Говорун [и др.] — Изд-во СумГУ. — 2011.
2. Босьяков, М. Н. Выбор режима упрочняющей обработки на установках ионного азотирования промышленного типа / М. Н. Босьяков, А. Н. Моисеенко // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : материалы VIII МНТК. — Минск : ФТИ НАН Беларуси. — 2016. — С. 50—58.
3. Будилов, В. В. Технология ионного азотирования в тлеющем разряде с полым катодом / В. В. Будилов, Р. Д. Агзамов, К. Н. Рамазанов // МиТОМ. — 2007. — № 7

УДК 004.94; 621.373

**В. В. Малеронок<sup>1</sup>, А. В. Алифанов<sup>2</sup>, И. А. Богданович<sup>2</sup>**

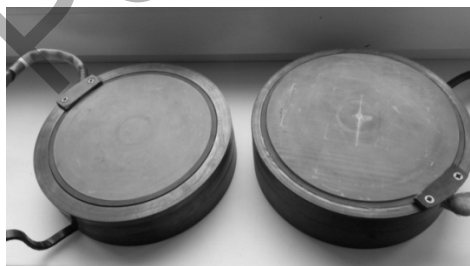
<sup>1</sup> Учреждение образования «Белорусская государственная академия авиации», Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь

## СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКТОРСКИХ РЕШЕНИЙ В СРЕДЕ ANSYS

**Введение.** Магнитно-импульсная обработка (далее — МИО) является инновационным методом модификации поверхностных слоев инструментов и деталей машин. Хотя воздействие магнитным полем на изделия и расплавы известно еще в 60—80 годах, а отдельные примеры можно встретить и в патентах 40-х годов [1]. Современным и инновационным методом МИО делают подходы ученых (с 2000-х годов) к изучению механизмов упрочнения, улучшения физико-механических свойств, формообразования и других протекающих процессов в иных областях производства (деревообрабатывающей, авиастроении) [2—4]. Что позволяет оптимизировать режимы обработки и вносить эффективные конструкторские решения. Однако, это приводит к росту трудозатрат и задействованию производственных мощностей при проведении масштабного эксперимента. Экономически выгодным и научно обоснованным решением является использование имитационного моделирования для оценки конструкторских решений и анализа результатов процессов обработки. Так для моделирования МИО и последующей оценки эффективности конструкторских решений используется пакет программных модулей ANSYS, который прошел многократную верификацию в различных областях производства (машиностроение, авиастроение, материаловедение, акустика и т. д.) [5].

**Основная часть.** Рабочим органом установок для магнитно-импульсной обработки является индуктор (плоской или цилиндрической формы) (рисунок 1).



а)



б)

Рисунок 1 — Индукторы для установок МИУ: а — плоский; б — цилиндрический