

УДК 621.785.532

**А. В. Малевич<sup>1</sup>,****М. Н. Босяков<sup>2</sup>,** кандидат физико-математических наук, доцент,**Л. Л. Сотник<sup>3</sup>,** кандидат технических наук, доцентУчреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21,  
225404 Барановичи, Республика Беларусь, <sup>1</sup>+375 (29) 202 20 64, malevich-95@mail.ru

## ОГРАНИЧЕНИЯ В ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО АЗОТИРОВАНИЯ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ С ГАЗОВЫМ АЗОТИРОВАНИЕМ

На основе анализа работы Т. А. Бенгиной, посвященной постановке задачи оптимального управления процессом газового азотирования, рассмотрена применимость её выводов к процессу ионно-плазменного азотирования. Показано, что часть ограничений (по концентрации азота в фазах, температурному режиму, термо-напряжениям) сохраняют свою актуальность и в условиях тлеющего разряда. В то же время ряд положений, связанных с азотным потенциалом атмосферы и ограничением теплового потока, требуют принципиальной корректировки. Обоснованы специфические ограничения для ионно-плазменного азотирования, связанные с устойчивостью разряда, диапазоном плотности тока, равномерностью распределения плазмы по поверхности детали и риском перехода в дуговой режим.

**Ключевые слова:** ионно-плазменное азотирование; тлеющий разряд; оптимальное управление; фазовые превращения; ограничения процесса.

Рис. 3. Библиогр.: 4 назв.

**A. V. Malevich<sup>1</sup>,****M. N. Bosyakov<sup>2</sup>,** PhD in Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor,**L. L. Sotnik<sup>3</sup>,** PhD in Technical Sciences, Associate ProfessorInstitution of Education "Baranavichy State University", 21 Voykova Str., 225404 Baranavichy,  
the Republic of Belarus, <sup>1</sup>+375 (29) 202 20 64, malevich-95@mail.ru

## LIMITATIONS IN THE CONTROL OF THE ION-PLASMA NITRATION PROCESS: COMPARATIVE ANALYSIS WITH GAS NITRATION

Based on an analysis of T. A. Bengina's work on the optimal control problem for gas nitriding formulation, the applicability of her findings to ion-plasma nitriding (IPN) has been examined. It is shown that some limitations (regarding nitrogen concentration in the phases, temperature conditions, and thermal stresses) remain relevant even under glow discharge conditions. At the same time, several provisions related to the nitrogen potential of the atmosphere and heat flux limitations require fundamental adjustments. Specific limitations for IPN related to discharge stability, current density range, uniformity of plasma distribution over the part surface, and the risk of transition to arc mode are substantiated.

**Key words:** ion-plasma nitriding; glow discharge; optimal control; phase transformations; process limitations.

Fig. 3. Ref.: 4 titles.

**Введение.** Азотирование является одним из наиболее распространённых методов химико-термической обработки, обеспечивающих значительное повышение эксплуатационных свойств деталей машин. В результате диффузионного насыщения азотом формируется поверхностный слой с повышенной твёрдостью, износо- и коррозионной стойкостью, а также улучшенной усталостной прочностью. Наиболее изученным и традиционно применяемым процессом остаётся газовое азотирование, для которого разработаны математические модели тепломассопереноса, введено понятие азотного потенциала атмосферы и предложены методы управления формированием структуры слоя [1].

Согласно источнику [1] рассмотрены ограничения в задаче оптимального управления процессом газового азотирования. Автором выделены ключевые факторы, определяющие качество упрочнённых слоев: концентрационные градиенты азота в фазах, температурный

режим обработки, термонапряжения, а также ограничения по мощности нагрева и предельным значениям азотного потенциала. Эти выводы представляют собой важную основу для построения систем автоматизированного управления процессом химико-термической обработки.

В то же время в последние десятилетия все большее распространение получает технология ионно-плазменного азотирования (далее — ИПА), осуществляемая в условиях тлеющего разряда в газовой среде. В отличие от газового метода здесь перенос азота обеспечивается не только диффузией, но и ионной бомбардировкой поверхности, что существенно изменяет кинетику и термодинамику процесса. ИПА позволяет проводить обработку при относительно низких температурах (450...580 °С), формировать более равномерные и адгезионно прочные слои, однако одновременно предъявляет новые требования к системе управления: необходимо учитывать устойчивость тлеющего разряда, распределение плотности тока и возможность перехода в дуговой режим [2—4].

Возникает вопрос: в какой мере ограничения, сформулированные для газового азотирования, применимы к процессу ионно-плазменного? Часть положений (например, критичность температурного режима и предельные концентрации азота в фазах) сохраняют свою актуальность, в то время как другие (такие как азотный потенциал атмосферы или ограничения мощности нагрева) требуют пересмотра в условиях плазмы. Кроме того, для ИПА необходимо формулировать новые ограничения, отсутствующие в газовом процессе, включая стабильность разряда, диапазон допустимых токов и равномерность распределения плазмы по поверхности детали.

Цель настоящей работы заключается в сравнительном анализе ограничений, сформулированных для газового азотирования (по данным Т. А. Бенгиной), и их применимости к процессу ИПА. Сравнительная схема ограничений (диаграмма Венна) представлена на рисунке 1. Левая область — газовое азотирование (азотный потенциал, мощность печи); правая область — ИПА (устойчивость разряда, плотность тока, распределение плазмы); пересечение — общие ограничения (концентрации в фазах, температура, термонапряжения).

На основе такого сопоставления предлагается уточнить базовые условия постановки задачи оптимального управления ИПА, выделив общие и специфические факторы, влияющие на формирование структуры упрочненного слоя.

**Материалы и методы исследования.** Как отмечает Т. А. Бенгина [1], при газовом азотировании ключевую роль в формировании эксплуатационных характеристик детали играет распределение концентрации азота по глубине слоя. Появление фаз  $\gamma'$  (нитрид железа  $Fe_4N$ ),  $\epsilon$  (нитрид  $Fe_{2-3}N$ ) и азотистого мартенсита  $\alpha(N)$  связано с предельными значениями растворимости азота в соответствующих фазах. Нарушение этих границ приводит к образованию нестабильных структур, ухудшению механических свойств и возникновению внутренних напряжений.

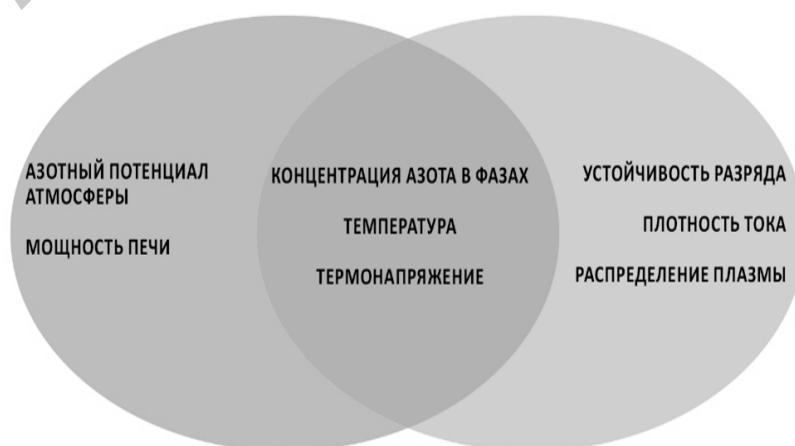


Рисунок 1. — Сравнительная схема ограничений (диаграмма Венна)

Для ИПА данный фактор также имеет принципиальное значение, однако природа насыщения отличается. В условиях тлеющего разряда азот поступает на поверхность не только в результате диссоциации молекул, но и в виде ионов, ускоряющихся в катодном падении потенциала. Ионная бомбардировка вызывает активацию поверхности, образование дефектов кристаллической решётки и повышает коэффициент диффузии азота в приповерхностной зоне [2—4]. В результате фазовые превращения протекают быстрее, а слои  $\gamma'$  и  $\epsilon$  стабилизируются при более низких температурах по сравнению с газовым процессом. Тем не менее ограничения по предельным концентрациям азота в фазах сохраняют свою актуальность. При чрезмерном насыщении азотированного слоя  $\epsilon$ -фазой возрастает его хрупкость и риск отслоения при эксплуатации изделия, особенно на сталях с высоким содержанием легирующих элементов [5]. В то же время недостаточная концентрация азота в  $\gamma'$ -фазе не позволяет достичь требуемой твёрдости и износостойкости. Таким образом, диапазоны допустимых концентраций должны рассматриваться как универсальные ограничения, общие для всех видов азотирования.

Вместе с тем для ИПА необходимо учитывать, что концентрация азота на поверхности детали определяется не азотным потенциалом атмосферы, как при газовом азотировании, а совокупностью параметров разряда — давлением газа, напряжением и током, а также составом смеси ( $N_2$ , Ar,  $H_2$ ). Это требует иной постановки задачи управления: вместо регулирования химического потенциала насыщающей среды приходится обеспечивать баланс между ионной бомбардировкой, температурой и равномерностью распределения плазмы по поверхности детали.

Таким образом, ограничения по концентрациям азота в фазах, выделенные Т. А. Бенгиной для газового азотирования, полностью применимы к ИПА, но в условиях плазменного процесса требуют иной физической интерпретации и иного набора управляющих параметров.

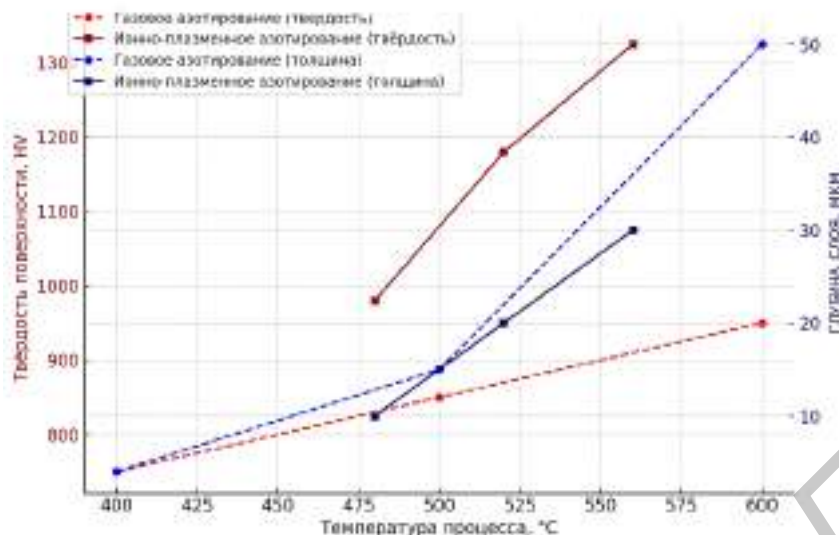
**Результаты исследования и их обсуждение.** В классическом газовом азотировании температура процесса является определяющим фактором, влияющим как на скорость диффузии азота, так и на фазовый состав упрочнённого слоя. Источник [1] указывает, что отклонение температуры от оптимального диапазона (500...580 °С для конструкционных сталей) приводит к укрупнению зерна, росту хрупкости и формированию нежелательных фаз. Снижение температуры ниже минимально допустимой замедляет процесс диффузии и делает слой недостаточно глубоким, а её превышение повышает риск образования чрезмерно толстой  $\epsilon$ -фазы и снижения вязкости материала.

Для ИПА температурный фактор играет не меньшую, а порой даже большую роль. Однако природа нагрева деталей в ИПА принципиально иная: он обеспечивается не столько внешними нагревателями, сколько энергией ионной бомбардировки. В зоне катодного падения потенциала ионы азота и аргона приобретают значительную кинетическую энергию и при ударе о поверхность детали преобразуют её в тепловую. В результате температура поверхности определяется комбинацией параметров разряда — плотностью тока, напряжением, давлением газа и составом смеси [2—4].

Это обстоятельство накладывает ряд специфических ограничений.

*Риск локальных перегревов.* При сложной геометрии деталей плотность плазмы распределяется неравномерно, что приводит к различию температур на разных участках поверхности. В локальных зонах перегрева формируются толстые хрупкие  $\epsilon$ -слои, которые снижают износостойкость поверхности и могут вызывать их отслоение [5].

*Необходимость непрямого контроля.* В отличие от газового азотирования, где температура задается печью и контролируется термопарами в рабочем объёме, в ИПА измерение температуры осуществляется косвенными методами: пирометрией через смотровые окна или использованием контрольных образцов с установленными термопарами. Это требует более сложных систем регулирования. Зависимость свойств слоя от температуры процесса изображена на рисунке 2.



**Рисунок 2. — Влияние температуры процесса на твердость и глубину слоя при газовом азотировании и ИПА**

Таким образом, температурные ограничения, сформулированные для газового азотирования, сохраняют свою значимость и при ИПА, но приобретают дополнительное измерение, связанное с особенностями нагрева в тлеющем разряде. Для обеспечения воспроизводимости процесса в плазменных условиях необходимо учитывать распределение температуры по поверхности, динамику нагрева при изменении плотности тока и возможность перехода режима в область недопустимых температур.

*Термонапряжения.* В работе Т. А. Бенгиной [1] подчёркивается, что в процессе газового азотирования одним из критических факторов являются термонапряжения, возникающие при неравномерном нагреве и охлаждении детали. Основным источником этих напряжений — перепад температуры между поверхностным слоем и сердцевиной изделия. Превышение допустимого градиента приводит к образованию трещин и потере эксплуатационных свойств.

Для ИПА данное ограничение сохраняет актуальность, однако характер его проявления значительно сложнее. В условиях тлеющего разряда термонапряжения формируются под воздействием двух факторов:

1) температурный перепад между поверхностью и сердцевиной. Как и при газовом азотировании, при ИПА нагрев происходит поверхностной зоны деталей, покрытой свечением тлеющего разряда. Однако поскольку тепло вносится ионной бомбардировкой, локальные температурные пики могут быть более выраженными. При этом сердцевина детали прогревается медленнее, что создаёт условия для значительных термических напряжений;

2) структурные и фазовые превращения. При ИПА, как и при газовом азотировании, рост нитридных фаз ( $\gamma'$ ,  $\epsilon$ ) сопровождается изменением удельного объёма искажённых областей кристаллической решётки. Эти изменения усиливаются за счёт высокой концентрации дефектов, индуцированных ионной бомбардировкой [2; 3]. В результате поверхностные напряжения оказываются выше, чем при газовом процессе.

Особое внимание следует уделять формированию  $\epsilon$ -фазы. Известно, что её чрезмерное развитие приводит к образованию хрупкого слоя с внутренними растягивающими напряжениями [3; 4]. При ИПА это явление может проявляться более резко из-за высокой скорости насыщения. Если параметры разряда подобраны неправильно, существует риск возникновения трещин ещё на стадии упрочнения.

Кроме того, в плазменных условиях возможны дополнительные источники напряжений:

1) ионное распыление поверхности, при котором часть материала удаляется, формируя нестабильное состояние баланса;

2) эффект сложной геометрии детали, когда распределение плотности тока приводит к образованию зон с различной глубиной слоя и, как следствие, неоднородными напряжёнными состояниями. На рисунке 3 изображены распределения плазмы вокруг сложной детали (зубчатое колесо): видно, где концентрируется плазма (горячие зоны на вершинах зубьев) и где образуются «тенивые» участки с недонасыщением во впадинах. Это прямо иллюстрирует риски локального перегрева/недонасыщения и необходимость ограничений по плотности тока и геометрии подвеса.

Таким образом, хотя в основе ограничений по термонапряжениям лежат универсальные физические механизмы, общие для газового и плазменного азотирования, при ИПА они проявляются с большей интенсивностью и разнообразием. Для постановки задачи оптимального управления данным процессом необходимо учитывать не только температурный градиент, но и факторы, связанные с ионной активацией поверхности и фазовыми превращениями в условиях высоких локальных концентраций азота.

*Ограничения по азотному потенциалу и параметрам среды.* Одним из ключевых ограничений, выделенных в источнике [1] для газового азотирования, является азотный потенциал печной атмосферы. Эта величина напрямую связана с парциальными давлениями аммиака и водорода, определяет химический состав газовой среды и устанавливает условия равновесия между насыщаемым металлом и атмосферой. Управление процессом в газовой технологии, по сути, сводится к регулированию азотного потенциала и температуры, что позволяет задавать скорость и глубину диффузионного слоя. Изменение азотного потенциала достигается за счет увеличения/уменьшения расхода аммиака через печь.

При ИПА понятие азотного потенциала в классическом термодинамическом смысле отсутствует. Насыщение поверхности азотом осуществляется не через химическое равновесие газовой среды, а посредством ионной бомбардировки поверхности ионами азота с их последующей диссоциативной рекомбинацией с образованием двух атомов азота, а также поступления на поверхность атомов азота, образующихся в зоне катодного свечения разряда. Это фундаментальное отличие приводит к тому, что ограничения по азотному потенциалу оказываются неприменимыми.

Вместо этого для ИПА формулируются иные ограничения, определяющие режимы устойчивой работы тлеющего разряда:

1. Давление рабочего газа. Процесс азотирования устойчиво протекает в диапазоне давлений  $p = 80 \dots 400$  Па. При давлениях ниже нижнего предела плотность тока разряда может оказаться недостаточной для генерации необходимой концентрации атомарного азота, а при превышении верхнего возникает вероятность, с одной стороны, перехода разряда из аномальной формы тлеющего в дуговой и, с другой стороны, перехода в нормальный, когда разряд может отсутствовать на некоторой части деталей, являющихся катодом.

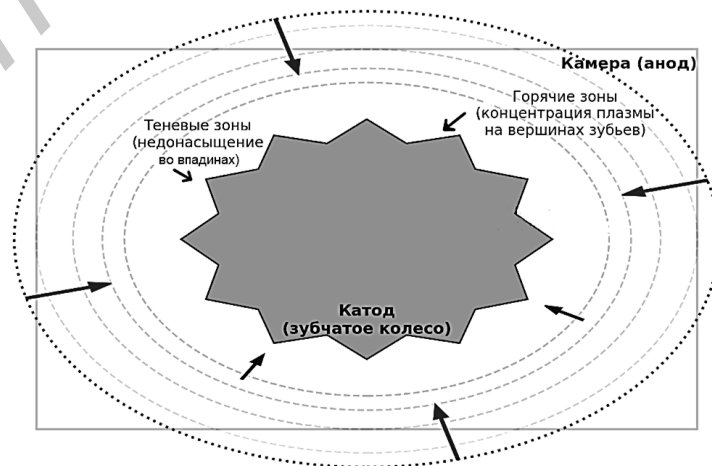


Рисунок 3. — Распределение плазмы вокруг сложной детали

2. Состав газовой смеси. Типичные смеси включают  $N_2$ , Ar и  $H_2$ . Добавление аргона повышает стабильность разряда и улучшает ионную активацию, а водород снижает вероятность окисления поверхности. Ограничения связаны с допустимой долей каждого компонента: избыток аргона ведёт к недостаточному насыщению азотом, а избыток водорода — к нежелательному травлению поверхности.

3. Плотность тока и напряжение разряда. Эти параметры напрямую определяют интенсивность ионной бомбардировки поверхности, а следовательно, скорость насыщения поверхности и её температуру. Слишком низкая плотность тока не обеспечивает формирование упрочнённого слоя, слишком высокая плотность вызывает перегрев и переход тлеющего разряда в дуговой режим.

4. Устойчивость тлеющего разряда. Для ИПА критически важно сохранять режим тлеющего разряда. Переход в искровой или дуговой разряд приводит к локальному разрушению поверхности, оплавлению детали и срыву всего процесса. Аналогичным образом повышение давления и уменьшение плотности тока могут привести к переходу разряда из режима аномального в нормальный, что также нежелательно.

Таким образом, если для газового азотирования главными управляющими параметрами выступают азотный потенциал и температура, то для ИПА — давление газа, состав смеси, напряжение и ток разряда. Эти параметры определяют устойчивость плазмы, интенсивность ионной бомбардировки и в конечном счёте качество формируемого слоя.

Следовательно, выводы автора работы [1] об ограничениях по азотному потенциалу атмосферы не могут быть напрямую перенесены в плазменную технологию. Вместо этого необходимо формировать новую систему ограничений исходя из закономерностей функционирования тлеющего разряда и взаимодействия ионов с поверхностью металла.

*Ограничения по мощности нагрева.* В газовом азотировании, как отмечает Т. А. Бенгина [1], мощность нагрева ограничивается возможностями оборудования: тепловым потоком печи, мощностью электрических нагревателей или производительностью радиационных горелок. Эти ограничения накладываются на процесс как внешние, определяя предельные значения температуры и скорость выхода на режим.

В ИПА характер ограничения принципиально иной. Поскольку нагрев деталей осуществляется в первую очередь за счёт энергии ионов, ускоряющихся в зоне катодного падения потенциала, мощность нагрева садки и удержания ее температуры на заданном значении тлеющего разряда процесса напрямую связана с параметрами разряда (напряжением и плотностью ионного потока), а также с параметрами теплообмена садки со стенками камеры. Таким образом, именно электрические характеристики плазмы (а не мощность внешних нагревателей) определяют пределы процесса [3; 4].

Можно выделить несколько ключевых ограничений:

1) недостаточная мощность разряда. При низкой плотности тока поверхность детали прогревается медленно, температура может не достигать уровня, необходимого для устойчивого формирования нитридных фаз. В результате азотирование протекает неэффективно: слой имеет малую глубину и пониженную твёрдость;

2) избыточная мощность разряда. Чтобы избежать слишком высокой плотности тока на стадии разогрева, обычно на начальной фазе, когда отток тепла от садки незначителен, скорость разогрева задается на уровне 2,5...4,0 градуса в минуту с постепенным ее снижением к фазе завершения разогрева. Для обеспечения однородности прогрева садки на заключительном этапе она может составлять всего 0,2...0,5 градуса в минуту;

3) неравномерное распределение мощности. В отличие от газового азотирования, где нагрев относительно равномерен по всему объёму печи, в ИПА локальные различия в распределении плазмы и плотности тока могут приводить к неравномерному нагреву различных участков детали. Это создаёт дополнительный фактор риска для формирования неоднородной структуры слоя и возникновения термонапряжений.

Таким образом, если в газовом азотировании мощность нагрева выступает как ограничение внешнего энергетического ресурса, то в ИПА — как ограничение устойчивости

самого разряда. Управление мощностью здесь сводится к поддержанию оптимального диапазона тока и напряжения, обеспечивающего достаточный прогрев без перехода в разрушительные режимы.

Следовательно, ограничения, описанные Т. А. Бенгиной для газового процесса, могут быть лишь частично применены к ИПА: общим остаётся сам факт необходимости контроля энергетического баланса, однако природа этого ограничения в плазменной технологии связана не с возможностями нагревателя, а с физикой взаимодействия компонент разряда с поверхностью.

**Заключение.** Сравнительный анализ показал, что ограничения, сформулированные Т. А. Бенгиной для задачи оптимального управления процессом газового азотирования, в значительной степени применимы и к ИПА, однако требуют иной трактовки. Универсальными остаются положения, связанные с предельными концентрациями азота в фазах, критичностью температурного режима и влиянием термонапряжений на качество упрочнённых слоёв. Вместе с тем в плазменном процессе природа этих факторов приобретает дополнительные особенности: температура регулируется параметрами разряда и может распределяться неравномерно, а напряжения формируются не только из-за градиента температуры, но и вследствие ионной бомбардировки и фазовых превращений в условиях высокой дефектности поверхности.

Принципиальное отличие заключается в том, что ключевое ограничение газового процесса — азотный потенциал атмосферы — не применимо к ИПА. Здесь определяющими параметрами выступают давление газа, состав смеси, напряжение и ток разряда, обеспечивающие устойчивость тлеющего разряда. Ограничения по мощности нагрева также приобретают иной характер: если при газовом азотировании они связаны с техническими возможностями печи, то в плазменном процессе определяются пределами стабильности разряда и риском перехода в дуговой режим.

Таким образом, подходы, предложенные Т. А. Бенгиной, могут быть использованы в качестве методологической базы, однако их применение в условиях плазменного азотирования требует корректировки и дополнения. Новизна проведённого анализа заключается в выявлении специфических факторов, ограничивающих процесс ИПА, и в уточнении критериев управления, что позволяет рассматривать данный метод обработки не только как технологическую альтернативу газовому азотированию, но и как объект для разработки адаптированных систем оптимального управления.

#### Список цитируемых источников

1. Бенгина, Т. А. Об ограничениях в задаче оптимального управления процессом газового азотирования / Т. А. Бенгина // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». — 2016. — № 2 (50). — С. 178—183.
2. *Mittemeijer, E. J.* Fundamentals of nitriding and nitrocarburizing / E. J. Mittemeijer, M. A. J. Somers // ASM Handbook. Heat Treating. — Vol. 4A. — Materials Park, OH : ASM International, 2013. — P. 619—646.
3. *Menthe, E.* Structure and properties of plasma nitrided stainless steel / E. Menthe, K.-T. Rie // Surface and Coatings Technology. — 1999. — Vol. 116—119. — P. 199—204.
4. *Поболь, И. Л.* Ионное азотирование: твёрдость, выносливость, стойкость / И. Л. Поболь // Технологии материалов. — 2012. — № 6. — С. 17—21. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ionnoe-azotirovanie-tverdost-vynoslivost-stoykost> (дата обращения: 01.10.2025).

Поступила в редакцию 20.10.2025.