

З.А. Сатбаева¹, А. Мәуліт^{1,2*}, А. Аманов³, А.С. Рүстемов¹

¹ТОО «Plasma Science», Восточно-Казахстанская область,
г. Усть-Каменогорск, ул. Гоголя, 7 Г

²Университет имени Шакарима города Семей,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А

³Университет прикладных наук Тампере
FI-33520, Финляндия, Тампере, Кунтокату 3,

*e-mail: maulit.almas@gmail.com

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ЭЛЕКТРОЛИТА НА МИКРОСТРУКТУРУ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 45 ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО АЗОТИРОВАНИЯ

Аннотация: В данной работе проведено всестороннее исследование влияния катодного азотирования на структуру и свойства стали 45, обработанной в различных водных электролитах. Анализ, включающий рентгеновские исследования и электронную микроскопию, показал, что азотирование способствует образованию многослойной структуры поверхности, включающей оксидные, нитридные и мартенситные слои. В зависимости от состава использованного электролита, изменения в фазовом составе и толщине модифицированных слоев оказывают значительное влияние на механические свойства стали, что подтверждается различиями в твердости и износостойкости материалов после обработки. В частности, при использовании электролита, содержащего натрий карбонат (Na_2CO_3) и мочевины ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$), была достигнута максимальная микротвёрдость в 986 HV, что обусловлено образованием плотного нитридного слоя. В то же время добавление нитратной селитры в электролит, несмотря на некоторое снижение микротвёрдости до 882 HV, способствовало формированию более сложной и стойкой фазовой структуры, включающей дополнительные нитриды и оксиды, что улучшает коррозионную стойкость. Результаты работы подчеркивают значимость оптимизации состава электролита для достижения улучшенных эксплуатационных характеристик стали, таких как твердость, износостойкость и сопротивление коррозии. Проведенное исследование демонстрирует потенциал катодного азотирования как эффективного метода улучшения механических и поверхностных свойств стали 45, что открывает новые возможности для её применения в условиях повышенных нагрузок и агрессивных сред.

Ключевые слова: электролитно-плазменное азотирование (ЭПА), нитридный слой, водные электролиты, износостойкость, диффузионное насыщение, поверхностная модификация.

Введение

Электролитно-плазменное азотирование (ЭПА) представляет собой инновационную технологию поверхностного упрочнения, которая сочетает в себе преимущества методов плазменной и электролитической обработки. Этот подход обеспечивает формирование высококачественных азотированных слоев на поверхностях различных сталей, включая среднеуглеродистую сталь 45. ЭПА позволяет достичь значительных улучшений в механических свойствах материалов за счет образования защитных нитридных слоев, повышающих их твердость и износостойкость [1]. ЭПА осуществляется в электролитической ванне, где на поверхность стали воздействует плазменный разряд и электролитический раствор. Под воздействием высокого напряжения в растворе образуется плазма, которая ионизирует азот и способствует его диффузии в поверхность стали. Это позволяет значительно увеличить твердость и износостойкость поверхности материала [2]. Электролитно-плазменное азотирование стало развиваться в конце XX века как модернизированный метод упрочнения поверхностей, превосходящий традиционные технологии. Первоначальные исследования показали высокую эффективность этого метода, что послужило стимулом для дальнейших исследований и усовершенствования процесса, включая оптимизацию его параметров. [3].

Среднеуглеродистая сталь 45, содержащая около 0,45% углерода, является широко используемым материалом в машиностроении благодаря сочетанию прочности и

пластичности. ЭПА позволяет значительно улучшить её поверхностные свойства, такие как твёрдость и износостойкость, что делает этот метод особенно привлекательным для обработки данной стали [4]. Исследования показывают, что в результате ЭПА на поверхности стали 45 образуются азотированные слои с мелкозернистой структурой. Эти слои характеризуются высокой твёрдостью и износостойкостью. Образование нитридов железа и других соединений способствует увеличению твёрдости поверхности [5].

Ключевую роль в формировании структуры и свойств азотированных слоев играют такие параметры процесса, как температура, длительность обработки, состав электролита и приложенное напряжение. Исследования показывают, что правильная настройка и оптимизация этих параметров позволяет значительно улучшить характеристики поверхности стали 45, включая повышение твердости, износостойкости и коррозионной стойкости [6]. По сравнению с традиционными методами, такими как цементация и закалка, ЭПА обладает рядом преимуществ, включая более низкую температуру обработки, меньшие энергетические затраты и возможность точного контроля состава и толщины азотированного слоя. Эти преимущества делают ЭПА привлекательным выбором для промышленного применения [7].

Одним из основных преимуществ ЭПА является значительное увеличение микротвердости стали 45. В ряде исследований показано, что после ЭПА микротвердость поверхностного слоя может достигать 1050-1130 HV, что обусловлено образованием нитридных фаз, таких как γ' -Fe₄N и ϵ -Fe₂-3N [8,9]. Эти твердые фазы формируются в результате насыщения поверхности стали азотом при высоких температурах, что приводит к повышению сопротивляемости материала механическим нагрузкам [10, 14].

Износостойкость среднеуглеродистой стали 45 значительно возрастает после применения ЭПА. Исследования демонстрируют, что коэффициент трения снижается с 0,61 до 0,52 после обработки, а стойкость к износу увеличивается более чем в 70 раз. [9,15,18]. Это связано с образованием на поверхности стали твердого нитридного слоя, который обеспечивает высокую устойчивость к абразивному износу и снижает скорость износа даже при интенсивных механических нагрузках [11, 21].

Фазовые превращения в процессе ЭПА включают образование нитридов железа (γ' -Fe₄N и ϵ -Fe₂-3N), которые существенно повышают механическую прочность стали и улучшают её устойчивость к термическим воздействиям [14,18,19]. Эти фазовые структуры остаются стабильными даже после последующей термической обработки, что обеспечивает долговечность улучшенных характеристик [10, 16].

Коррозионная стойкость стали 45 после ЭПА значительно повышается за счет образования защитного слоя, состоящего из оксидов и нитридов железа. В исследованиях показано, что плотность коррозионного тока снижается с 23 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ для необработанной стали до 8 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ после ЭПА [8, 9, 20]. Это подтверждает эффективность ЭПА в улучшении коррозионной стойкости стали, что делает её более пригодной для использования в агрессивных средах [12, 17].

Электролитно-плазменное азотирование демонстрирует высокую эффективность в улучшении эксплуатационных характеристик среднеуглеродистой стали 45. Улучшение микротвердости, износостойкости, фазовых превращений и коррозионной стойкости делает ЭПА перспективным методом для использования в различных промышленных применениях. Результаты исследований подтверждают значимость этого метода и его потенциал для дальнейшего развития.

Методы

Для проведения ЭПА были подготовлены образцы из стали 45, размером 15 мм x 15 мм x 10 мм. Перед началом процесса поверхности образцов подверглись предварительной обработке на шлифовально-полировальном станке НУМР-2, уровня Ra $1,0 \pm 0,1$ мкм. После завершения полировки образцы тщательно промывались проточной водой для удаления остатков абразивных материалов и любых загрязнений.

Эксперимент проводился на установке для ЭПА, оснащенной выпрямителем постоянного тока мощностью 40 кВт и специализированной камерой обработки, в которой размещен плазмотрон. В ходе эксперимента использовались два типа электролита:

Первый электролит содержал 10% натрий карбонат (Na_2CO_3), 20% мочевины ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) и 70% дистиллированной воды.

Второй электролит включал 10% натрий карбонат (Na_2CO_3), 15% мочевины ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$), 5% аммиачная селитра и 70% дистиллированной воды.

На представленном рисунке 1 представлено схема установки для электролитно-плазменного азотирования стали, где каждый элемент играет ключевую роль в процессе.

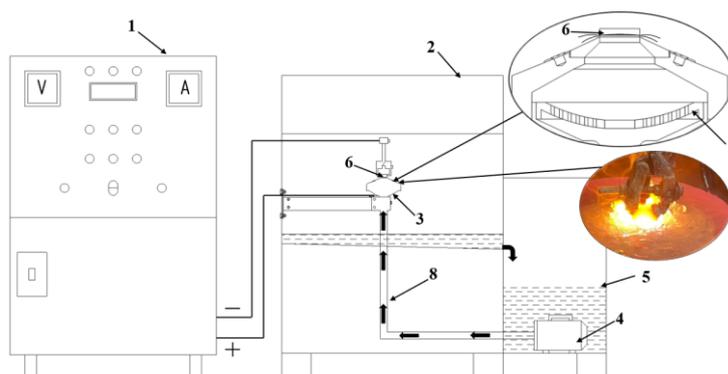


Рисунок 1 – Установка для электролитно-плазменной модификаций

Процесс начинается с подачи напряжения от источника питания (1), который обеспечивает необходимый ток и напряжение для создания электроплазменной дуги. Обрабатываемая деталь (3), погруженная в ванну с электролитом (2), подключена к отрицательному полюсу источника питания. Электролит, циркулирующий в системе с помощью насоса (4), представляет собой водный раствор, содержащий ионы азота, которые необходимы для формирования нитридных слоев на поверхности стали.

При подаче напряжения между деталью и электролитом создается электрическая дуга (5), которая ионизирует газ вблизи поверхности детали, формируя плазму. В процессе плазменного разряда азот из электролита проникает в поверхность стали, образуя нитриды, что значительно увеличивает твердость и коррозионную стойкость материала. Форсунки (6) обеспечивают подачу электролита к обрабатываемой поверхности, что способствует равномерному азотированию.

Эта технология позволяет получать улучшенные эксплуатационные свойства стальных изделий, такие как повышенная износостойкость и улучшенная коррозионная стойкость, что делает ее востребованной в промышленности.

Рентгенофазовый анализ осуществлялся с использованием устройства Xpert PRO PANalytical. В ходе эксперимента на медный анод подавались напряжение 40 кВ и ток 30 мА. Исследование проводилось с использованием $\text{Cu-K}\alpha$ излучения ($\lambda = 1,541 \text{ \AA}$) в диапазоне от 30 до 100 градусов с шагом 0,02 градуса и временем счета 0,5 секунды на шаг. Фазовый анализ по полученным дифрактограммам проводился с применением программного обеспечения HighScore Plus. Подготовка образцов, выбор условий съемки и обработка дифрактограмм выполнялись в соответствии с методиками, подробно изложенными в источнике [23].

Морфология поверхности и структура модифицированного поверхностного слоя изучались с использованием оптического металлографического микроскопа OLYMPUS VX53M (Olympus Corporation, Токио, Япония). Для наблюдения структуры поперечного сечения образцов после травления 3% азотной кислоты использовали сканирующей электронной микроскоп TESCAN MIRA3 LMN (TESCAN, Брно, Чешская Республика).

Коэффициент трения был определен с помощью универсального трибометра TRB3 (Anton Paar, Австрия) по методу "шар на диске". Испытания проводились в условиях сухого трения, при которых образцы скользили по стальной поверхности контртела со скоростью 0,05 м/с при температуре окружающей среды $25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. Вертикальная нагрузка на образцы составляла 10 Н, а в качестве материала контртела применялась сталь марки 100Cr6. Измерение коэффициента трения осуществлялось после прохождения образцом пути длиной 60 метров [24].

Измерение микротвердости образцов проводилось с использованием прибора Metolab 502 по методу Виккерса (HV) [25]. Для проведения измерений использовались следующие параметры: нагрузка 10 г и время выдержки 10 секунд. Расчет микротвердости осуществлялся с использованием уравнения Eq 2.

Результаты и обсуждение

Катодное азотирование стали 45 в различных водных растворах приводит к образованию сложных многослойных структур на поверхности, включающих как оксиды, так и нитриды железа. Рентгеновский анализ показал, что в обоих случаях, представленных на рис. 2, образуются оксидные слои, состоящие из FeO, Fe₂O₃ и Fe₃O₄, что свидетельствует о высокотемпературном окислении поверхности.

Различия в составе нитридных слоев напрямую зависят от химического состава электролита. При катодном азотировании стали 45 в водном растворе, содержащем 10% карбоната натрия и 20% карбамида (рис. 2b), образуется нитридно-мартенситный слой, состоящий преимущественно из соединений FeN и Fe₄N. Эти нитридные фазы обеспечивают основную защиту поверхности от коррозии, а также улучшают её механические свойства.

Когда в качестве электролита использовался водный раствор с натрий карбонат, мочевиной и аммиачная селитра (рис. 2a), рентгеновский анализ показал более сложную структуру нитридного слоя, включающую фазы FeN, Fe₃N и Fe₄N. Увеличенное содержание нитридов Fe₃N и FeN может быть связано с добавлением нитрата аммония, который способствует увеличению концентрации азота в поверхностных слоях. Это, в свою очередь, положительно сказывается на механических свойствах и повышает коррозионную стойкость поверхности.

Таким образом, добавление нитрата аммония в состав электролита приводит к формированию более сложного и насыщенного нитридного слоя, что значительно улучшает эксплуатационные характеристики модифицированной поверхности стали 45.

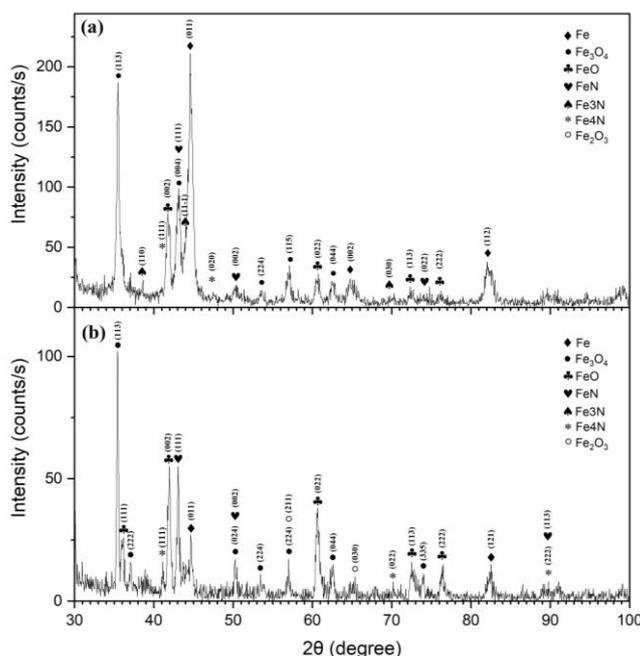


Рисунок 2 – Дифрактограмма поверхностного слоя стали 45 после ЭПА:

a) образец, азотированный в растворе с натрий карбонат (Na₂CO₃), мочевиной (CH₄N₂O), аммиачная селитра (NH₄NO₃);

b) образец, азотированный в водном растворе с натрий карбонат (Na₂CO₃) и мочевиной (CH₄N₂O)

На предоставленных микроструктурных изображениях (рис. 3) показаны результаты металлографического анализа поверхности стали после процесса ЭПА. Изображения демонстрируют последовательность слоев, образовавшихся в результате обработки. На верхней части изображений (a) и (b) виден тонкий светлый слой, который идентифицируется как оксидный слой. Данный слой формируется в результате высокотемпературного окисления поверхности стали в процессе азотирования. Присутствие оксидных фаз, таких как FeO, Fe₂O₃ и Fe₃O₄, было подтверждено с помощью рентгеновского анализа, который зафиксировал образование этих оксидов при воздействии высоких температур.

Под оксидным слоем находится темный слой с мелкозернистой структурой, представляющий собой азотированный слой. Этот слой состоит из нитридов железа (FeN, Fe₃N, Fe₄N), а также мартенсита, который формируется в результате насыщения поверхности

азотом и последующего охлаждения. Под нитридным слоем можно наблюдать формирование мартенситной структуры, которая образуется в результате проникновения азота на определенную глубину и последующей структурной трансформации под воздействием термической обработки. Мартенситный слой обычно отличается повышенной твердостью по сравнению с исходной структурой, что значительно улучшает механические характеристики материала. Этот слой обеспечивает дополнительную прочность и износостойкость, тем самым увеличивая общую долговечность стали.

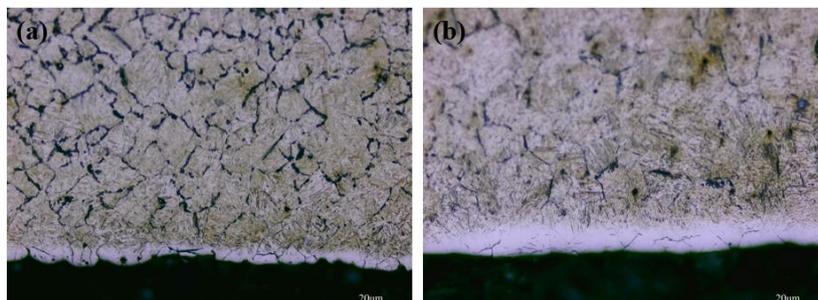


Рисунок 3 – Микроструктура стали 45 после ЭПА:

а) образец, азотированный в растворе с натрий карбонат (Na_2CO_3), мочевины ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$), аммиачная селитра (NH_4NO_3);

б) образец, азотированный в водном растворе с натрий карбонат (Na_2CO_3) и мочевины ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$)

Измерение микротвердости стальных слоев после модификации выявило значительные вариации в зависимости от состава использованного электролита. Наибольшая микротвердость, достигнутая в процессе, составила 986 HV и была зафиксирована для слоя, сформированного в электролите, содержащем карбонат натрия (Na_2CO_3) и мочевины ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$). В то время как добавление 5% аммиачной селитры (NH_4NO_3) к составу электролита (10% карбоната натрия (Na_2CO_3), 15% мочевины ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) и 5% аммиачной селитры (NH_4NO_3)) привело к некоторому снижению максимальной микротвердости, которая составила 882 HV (см. рис. 4).

Эти различия можно объяснить влиянием состава электролита на процесс формирования модифицированного слоя. Электролит с повышенным содержанием карбамида способствует более интенсивному насыщению поверхности азотом, что приводит к формированию плотных нитридных слоев с увеличенной твердостью. Добавление нитрата аммония в электролит, хотя и повышает содержание азота в слое, может способствовать образованию более толстых оксидных слоев. Эти оксидные слои, несмотря на некоторое снижение общей твердости поверхности, повышают её износостойкость за счет увеличенной плотности и улучшенной адгезии слоев.

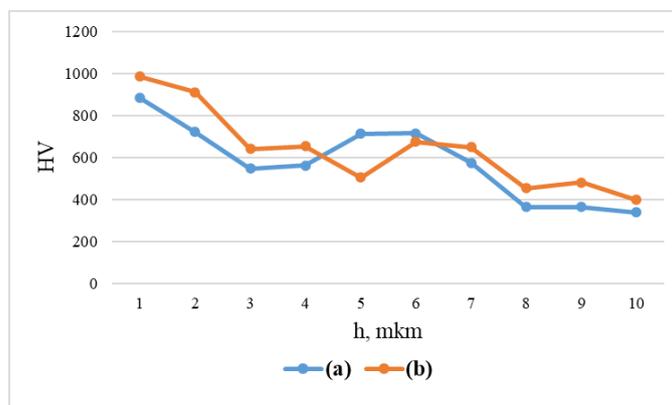


Рисунок 4 – Распределение микротвердости по глубине:

а) образец, азотированный в растворе с натрий карбонат (Na_2CO_3), мочевины ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$), аммиачная селитра (NH_4NO_3);

б) образец, азотированный в водном растворе с натрий карбонат (Na_2CO_3) и мочевины ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$)

СЭМ исследование структуры модифицированного слоя стали 45 после азотирования в различных электролитах показало формирование сложной многослойной микроструктуры. Верхний слой, имеющий толщину примерно 10 мкм, представляет собой нитридную зону, которая отличается высокой плотностью и однородностью, что указывает на эффективное насыщение поверхности азотом. В этом слое формируются железные нитриды, такие как Fe₂-3N, а также наблюдаются оксиды железа, включая Fe₃O₄, что указывает на сопутствующий процесс окисления поверхности. Этот оксидный слой играет важную роль в обеспечении дополнительной защиты от коррозии, хотя его наличие может оказывать влияние на механические свойства поверхности.

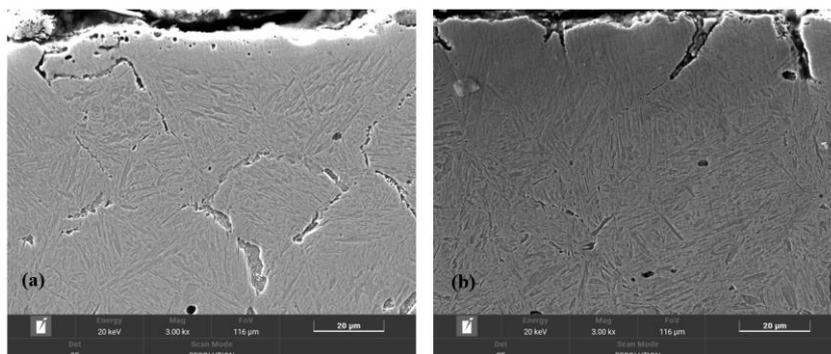


Рисунок 5 – Поперечное сечение азотированной стали 45, полученное с помощью РЭМ:

- а) образец, азотированный в растворе с натрий карбонат (Na₂CO₃), мочевиной (CH₄N₂O), аммиачная селитра (NH₄NO₃);
- б) образец, азотированный в водном растворе с натрий карбонат (Na₂CO₃) и мочевиной (CH₄N₂O)

Под нитридной зоной образуется нитридно-мартенситный подслой, который формируется в результате глубокой диффузии азота и его взаимодействия с железом. В этом слое наблюдается грубозернистая структура, состоящая из дисперсных нитридов и мартенсита, что свидетельствует о значительных изменениях в микроструктуре. Присутствие остаточного аустенита указывает на неполное мартенситное превращение, что может быть связано с понижением температуры закалки в условиях присутствия азота.

Глубинные слои, расположенные ниже нитридно-мартенситного подслоя, демонстрируют наличие зерен мартенсита и перлита, что свидетельствует о сохранении элементов первоначальной ферритно-перлитной структуры. Это указывает на то, что процесс азотирования затронул только верхние слои материала, оставив основные структурные элементы исходной стали в неизменном виде.

Неполная закалка, зафиксированная в этих слоях, может быть связана с недостаточной термической обработкой или недостаточным временем воздействия азота на образец, однако даже частичная трансформация структуры способствует улучшению механических свойств стали.

Трибологические испытания показали, что образцы, подвергнутые азотированию в водном растворе карбоната натрия и карбамида, продемонстрировали лучшие результаты: средний коэффициент трения составил 0,248, что почти в два раза ниже по сравнению с исходным образцом, у которого коэффициент трения был 0,51. В то же время, образцы, азотированные в растворе с добавлением нитрата аммония, показали коэффициент трения 0,41, что также свидетельствует о значительном снижении трения по сравнению с необработанными образцами, хотя и не столь эффективно, как при использовании раствора без нитрата аммония.

Так же как видно на рисунке 6 примерно после 3 метра пути исходном образце имеется пик, это объясняется с тем, что исходный образец подвергался стандартному закаливанию. После азотирования поверхность образцов становится менее шероховатой и, а также за счет азотированного слоя коэффициент трения на всем продолжительности пути не сильно меняется и это доказывает что износостойкость образцов.

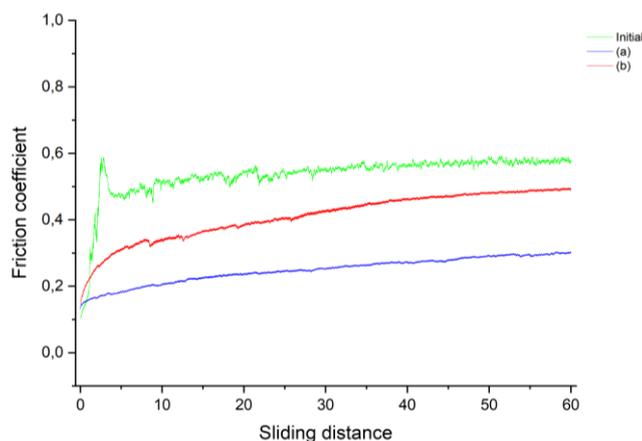


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента трения от пути скольжения для необработанной и азотированной стали 45:

а) образец, азотированный в растворе с натрий карбонат (Na_2CO_3), мочевиной ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$), аммиачная селитра (NH_4NO_3);

б) образец, азотированный в водном растворе с натрий карбонат (Na_2CO_3) и мочевиной ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$)

Вывод

Результаты данного исследования показали, что катодное азотирование стали 45 в водных электролитах с различным составом, приводит к значительным изменениям в микроструктуре и механических свойствах поверхности. Формирование многослойной структуры, включающей оксидный, нитридный и мартенситный подслои, обеспечивает улучшенные эксплуатационные характеристики стали. Исследования показали, что использование электролита, состоящего из 10% карбоната натрия (Na_2CO_3) и 20% мочевины ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$), способствует формированию плотного нитридного слоя с максимальной микротвёрдостью 986 HV, что значительно улучшает износостойкость поверхности стали. Однако добавление 5% аммиачной селитры (NH_4NO_3) в состав электролита приводит к снижению микротвёрдости до 882 HV, но в то же время способствует формированию более сложной фазовой структуры. Эта структура включает дополнительные нитридные и оксидные фазы, которые повышают коррозионную стойкость и долговечность материала. Таким образом, выбор состава электролита и параметров азотирования позволяет точно управлять фазовым составом и микроструктурой стали 45, что расширяет возможности её использования в ответственных узлах и деталях, работающих в условиях высоких механических нагрузок и агрессивных сред. Данное исследование подтверждает, что катодное азотирование является эффективным методом модификации, стали, позволяющим значительно улучшить её эксплуатационные характеристики.

Список литературы

1. Kumar A. Plasma Electrolytic Nitriding of Steels / A. Kumar, D. Singh // Journal of Surface Engineering. – 2018. – № 34(5). – P. 321-330.
2. Electrolytic Plasma Nitriding: Theory and Practice / A. Ivanov et al / Moscow: Mashinostroenie. – 2010.
3. Brown D. Historical Perspectives on Plasma Nitriding Processes / D. Brown, R. Clark // Materials Performance and Characterization. – 2017. – № 6(4). – P. 245-253.
4. Application of Plasma Nitriding to Medium Carbon Steels / V. Kuznetsov et al // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2016. – № 47. – P. 192-202.
5. Lee C. Microstructure and Properties of Plasma Nitrided Steels / C. Lee, H. Park // Journal of Materials Science and Technology. – 2020. – № 56. – P. 45-53.
6. Microstructural Evolution in Plasma Nitrided Medium Carbon Steel / Y. Zhang et al // Surface and Coatings Technology. – 2021. – № 409. – P. 126891.
7. Thompson R. Formation of Iron Nitrides in Plasma Nitriding / R. Thompson, M. Green // Acta Materialia. – 2018. – № 142. – P. 137-145.
8. Anode plasma electrolytic nitrohardening of medium carbon steel / S.A. Kusmanov et al // Surf. Coat. Technol. – 2015.

9. Improvement of corrosion and wear resistance of 45 steel with anode plasma electrolyte nitriding / A.A. Smirnov et al // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. – 2017.
10. Sliding wear behavior of electrolytic plasma nitrided cast iron and steel / X. Nie et al // Surf. Coat. Technol. – 2005.
11. Feasibility study of aqueous electrolyte plasma nitriding / A. Roy et al // Surface engineering. – 2007.
12. Carburizing of low-melting-point metals by pulsed nanocrystalline plasma electrolytic carburizing / M. Aliofkhazraei et al // Surf. Coat. Technol. – 2008.
13. Plasma electrolytic surface carburized and hardening of pure iron / M. Tarakci et al // Surf. Coat. Technol. – 2005.
14. Taheri P. A phenomenological model of nanocrystalline coating production using plasma electrolytic saturation (PES) technique / P. Taheri, C. Dehghanian // Transaction B: Mechanical Engineering. – 2009.
15. Aliev M.Kh. Pulsed nanocrystalline plasma electrolytic boriding as a novel method for corrosion protection of CP-Ti / M.Kh. Aliev, A. Sabour // Bull. Mater. Sci. – 2007.
16. "Surface modification of SCM420 steel by plasma electrolytic treatment / J.H. Kong et al // Surf. Coat. Technol. – 2013.
17. Anodic heating in aqueous solutions of electrolytes and its use for treating metal surfaces / P.N. Belkin et al // Surf. Eng. Appl. Electrochem. – 1997.
18. Rakhadilov B. The influence of electrolytic-plasma nitriding on the structure and tribological properties of high-speed steels / B. Rakhadilov, S. urbanbekov, A. Miniyazov // Tribologia. – 2015.
19. Skakov M. Influence of electrolyte plasma treatment on structure, phase composition and microhardness of steel P6M5 / M. Skakov, B. Rakhadilov, M. Sheffler // Key Eng. Mater. – 2013.
20. The effect of ammonia water on the microstructure and performance of plasma electrolytic saturation nitriding layer of 38CrMoAl steel / X.-Z. Hua et al // Phys. Procedia. – 2013.
21. A novel method of surface modification for steel by plasma electrolysis carbonitriding / D.J. Shen et al // Material Science and Engineering A. – 2007.
22. Anodic plasma electrolytic saturation of steels by carbon and nitrogen / B.R. Lazarenko et al // Scientific.net. – 2017.
23. Electrolyte-plasma surface hardening of hollow steel applicator needles for point injection of liquid mineral fertilizers / B. Rakhadilov et al // AIMS Materials Science. – 2024. – № 11(2).
24. Change of structure and mechanical properties of R6M5 steel surface layer at electrolytic-plasma nitriding / M. Skakov et al // Adv Mat Res. – 2014. – № 1040. – P. 753-758.
25. Study on surface hardening and wear resistance of AISI 52100 steel by ultrasonic nanocrystal surface modification and electrolytic plasma surface modification technologies / N. Magazov et al // Materials. – 2023. – № 16. – P. 6824.

Информация о финансировании

Исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP14972599).

З.А. Сатбаева¹, А. Мәуліт^{1,2*}, А. Аманов³, А.С. Рүстемов¹

¹«Plasma Science» ЖШС,

Шығыс Қазақстан облысы, Өскемен қаласы, Гоголь көшесі, 7Г

²Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті,

071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі, 20 А

³Tampere University of Applied Sciences

Kuntokatu 3, FI-33520 Tampere, Finland

*e-mail: maulit.almas@gmail.com

ЭЛЕКТРОЛИТ ҚҰРАМЫНЫҢ КАТОДТЫ ЭЛЕКТРОЛИТ-ПЛАЗМАЛЫҚ АЗОТТАУДАН КЕЙІН 45 БОЛАТТЫҢ МИКРОҚҰРЫЛЫМЫ МЕН МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ӘСЕРІ

Бұл жұмыста катодты азоттаудың әртүрлі су электролиттерінде өңделген 45 болаттың құрылымы мен қасиеттеріне әсері жан-жақты зерттелді. Рентгендік зерттеулер мен электронды микроскопияны қамтитын талдау азоттау оксид, нитрид және мартенсит қабаттарын қамтитын көп қабатты беткі құрылымның пайда болуына ықпал ететінін көрсетті. Пайдаланылған электролиттің құрамына байланысты өзгертілген қабаттардың фазалық құрамы мен қалыңдығының өзгеруі Болаттың механикалық қасиеттеріне айтарлықтай әсер етеді, бұл

өңдеуден кейінгі материалдардың қаттылығы мен тозуға төзімділігінің айырмашылығымен расталады. Атап айтқанда, құрамында натрий карбонаты (Na_2CO_3) және мочеви́на ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) бар электролитті қолданған кезде 986 HV максималды микроқаттылыққа қол жеткізілді, бұл тығыз нитридті қабаттың пайда болуына байланысты. Сонымен қатар, қосу нитрат электролитке нитраттар, микроқаттылықтың 882 HV дейін төмендеуіне қарамастан, коррозияға төзімділікті жақсартатын қосымша нитридтер мен оксидтерді қамтитын күрделі және тұрақты фазалық құрылымның пайда болуына ықпал етті. Жұмыс нәтижелері Болаттың қаттылығы, тозуға төзімділігі және коррозияға төзімділігі сияқты жақсартылған өнімділігіне қол жеткізу үшін электролит құрамын оңтайландырудың маңыздылығын көрсетеді. Зерттеу 45 Болаттың механикалық және беттік қасиеттерін жақсартудың тиімді әдісі ретінде катодты азоттау әлеуетін көрсетеді, бұл оны жоғары жүктемелер мен агрессивті ортада қолдануға жаңа мүмкіндіктер ашады.

Түйін сөздер: электролиттік-плазмалық азоттау (ЭПА), нитрид қабаты, су электролиттері, тозуға төзімділік, диффузиялық қанықтылық, беттік модификация.

Z.A. Satbayeva¹, A. Maulit^{1, 2*}, A. Amanov³. A.Rustemov¹

¹«Plasma Science» LLP,

East Kazakhstan region, Ust-Kamenogorsk, Gogol str., 7G

²Semey Shakarim University,

071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinka str., 20 A

³Tampere University of Applied Sciences

Kuntokatu 3, FI-33520 Tampere, Finland

*e-mail: maulit.almas@gmail.com

THE EFFECT OF THE ELECTROLYTE COMPOSITION ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL 45 AFTER CATHODIC ELECTROLYTE-PLASMA NITRIDING

This research offers an in-depth exploration of the impact of cathodic nitriding on the structural and mechanical characteristics of 45 steel treated in different aqueous electrolytes. Through a combination of X-ray diffraction and electron microscopy analyses, it was determined that the nitriding process facilitates the development of a multilayered surface structure, which includes oxide, nitride, and martensitic layers. The composition of the electrolyte plays a crucial role in determining the phase composition and thickness of the modified layers, directly influencing the steel's mechanical properties, as reflected by variations in hardness and wear resistance post-treatment. Notably, an electrolyte containing sodium carbonate (Na_2CO_3) and urea ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) achieved a maximum microhardness of 986 HV due to the formation of a dense nitride layer. On the other hand, introducing ammonium nitrate to the electrolyte, while slightly decreasing the microhardness to 882 HV, resulted in the formation of a more intricate and stable phase structure, including additional nitrides and oxides, which contributed to enhanced corrosion resistance. These findings underscore the critical importance of optimizing electrolyte composition to improve the performance characteristics of steel, such as hardness, wear resistance, and corrosion resistance. This study underscores the effectiveness of cathodic nitriding as a method for significantly enhancing the mechanical and surface properties of 45 steel, thereby expanding its potential for use in high-load and aggressive environments.

Key words: Electrolytic Plasma Nitriding (EPN), Nitride Layer, Aqueous Electrolytes, Wear Resistance, Diffusion Saturation, Surface Modification.

Сведения об авторах

Зарина Аскарбековна Сатбаева – PhD; Руководитель Материаловедческого центра коллективного пользования ТОО «Plasma Science»; e-mail: satbaeva.z@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7161-2686>.

Алмасбек Маулит* – докторант НАО «Университета имени Шакарима города Семей»; Руководитель технопарка «Shygys Bastau», ВКУ им. С. Аманжолова; e-mail: maulit.almas@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0519-3222>.

Ауезхан Аманов – PhD; Ассоциированный профессор Университет Тампере; e-mail: auezhan.amanov@tuni.fi. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8695-7430>.

Ануар Саятбекұлы Рүстемов – студент специальности «Техническая физика»; НАО «ВКТУ им. Д.Серикбаева»; инженер ТОО «Plasma Science»; e-mail: anuarrustemovv05@gmail.com

Авторлар туралы мәліметтер

Зарина Аскарбековна Сатбаева – PhD; «Plasma Science» ЖШС ұжымдық қолданыстағы материалтану орталығының басшысы; e-mail: satbaeva.z@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7161-2686>.

Алмасбек Мәуліт* – «Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті» КЕАҚ докторанты; С. Аманжолов ат. ШҚУ «Shygys Bastau» технопаркінің басшысы; e-mail: maulit.almas@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0519-3222>.

Ауезхан Аманов – PhD; қауымдастырылған профессор Тампере университеті; e-mail: auezhan.amanov@tuni.fi. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8695-7430>.

Ануар Саятбекұлы Рүстемов – «Техникалық физика» мамандығының студенті; Д. Серікбаев ат. «ШҚТУ» КЕАҚ; «Plasma Science» ЖШС инженері; e-mail: anuarrustemovv05@gmail.com

Information about the authors

Zarina Askarbekovna Satbayeva – PhD; Head of the Materials Science Center for Collective Use of PlasmaScience LLC; e-mail: satbaeva.z@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7161-2686>.

Maulit Almasbek* – PhD student of the National Joint-Stock Company «Shakarim University of Semey»; Head of the Shygys Bastau Technopark, S. Amanzholov Higher School of Economics; e-mail: maulit.almas@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0519-3222>.

Auezhan Amanov – PhD; Associate Professor, University of Tampere; e-mail: auezhan.amanov@tuni.fi. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8695-7430>.

Anuar Sayatbekovich Rustemov – student of the specialty «Technical Physics»; NAO «VKTU named after D. Serikbaev»; Engineer of TOO «PlasmaScience»; e-mail: anuarrustemovv05@gmail.com

Поступила в редакцию 23.08.2024

Поступила после доработки 25.09.2024

Принята к публикации 26.09.2024

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-3\(15\)-51](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-3(15)-51)



IRSTI: 31.15.33

B. Rakhadilov¹, R. Kussainov^{2,*}, Zh. Bakyt², Ye. Naimankumaruly², R. Kurmangaliev²

¹Plasma Science LLP,

Ust-Kamenogorsk 070000, Kazakhstan

²Engineering Center «Strengthening Technologies and Coatings»,

Shakarim University of Semey,

071412, Kazakhstan, Semey

*e-mail: rinat.k.kus@mail.ru

APPLICATION OF ELECTROLYTE BASED ON SODIUM CARBONATE FOR ELECTROLYTE-PLASMA SURFACE HARDENING OF STEEL 45

Abstract: This article evaluates the electrolyte-plasma hardening (EPH) of steel 45 using an electrolyte based on sodium carbonate (Na_2CO_3). Theoretical foundations of the electrolysis process of a sodium carbonate aqueous solution were studied during the course of the work. The mechanical and tribological properties of 45 steel samples after EPH were studied. It was found that with an electrolyte composition of 20% Na_2CO_3 and 80% distilled water, a hardened zone with a thickness of up to 5 mm is formed after EPH. The increase in microhardness reached up to 690 HV, which corresponds to a 3–3.5 times increase compared to the initial state. The results of tribological tests showed that the friction coefficient of steel 45 decreased after EPH, indicating a significant improvement in tribological characteristics compared to the initial value before hardening. Electrochemical tests on the corrosion resistance of steel 45 were also carried out. After EPH, the corrosion rate significantly decreased for steel 45 samples, indicating its highest corrosion resistance.

Key words: Electrolyte-plasma hardening, steel 45, structure, wear resistance, microhardness.

Introduction

Electrolyte-plasma hardening (EPH) is a promising thermal treatment method that involves applying a plasma discharge to the surface of steel in an electrolyte environment at high temperatures. During EPH, an electrolysis process also occurs, which is an ion exchange reaction between the anode and the cathode. Various surface modifications can be achieved depending on parameters such as electrode size, applied voltage, and electrolyte chemical composition. Due to its simplicity and environmental friendliness, EPH represents a promising technology for surface modification of materials. Several studies have focused on the impact of EPH technology on steel