

UDC 621.9.047

Krasnova M.N., Batin A.D. Analysis of methods, mechanical characteristics, structure and phase composition of iron-based alloys during surface hardening

Анализ методов, механических характеристик, структуры и фазового состава сплавов на основе железа при поверхностном упрочнении

Krasnova M.N.

PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology,
Voronezh State Technical University

Batin A.D.

Master's Student
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
"Voronezh State Technical University"
Краснова М.Н.

К. т. н, доцент кафедры технологии машиностроения
Воронежского государственного технического университета
Батин А.Д.
Магистрант

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный технический университет"

Abstract. *The study focuses on modern surface treatment methods for steels aimed at improving their mechanical properties and corrosion resistance. It explores various strengthening techniques, such as quenching, nitriding, plasma treatment, carburization, and pulse electron beam processing, highlighting the latest advancements in this field. The study examines the advantages and disadvantages of each method, as well as their impact on surface hardness and roughness. It presents research findings that demonstrate a significant increase in corrosion resistance and mechanical properties after pulse electron beam treatment. The paper also discusses the possibilities of using high-energy beams to modify the structure and improve the properties of various steels, including stainless and tool steels. The work highlights the potential of electron beam processing as a modern and effective method for enhancing the performance of steels.*

Keywords: *steels, surface treatment, microhardness, corrosion resistance, pulsed electron beam processing, hardening, mechanical properties, stainless steels, tool steels, additive technologies.*

Аннотация. *Исследование посвящено современным методам обработки поверхности сталей, направленным на улучшение их механических свойств и коррозионной стойкости. Рассматриваются методы упрочнения, такие как закалка, нитрация, плазменная обработка, карбидизация и импульсная электронно-пучковая обработка, с акцентом на последние достижения в этой области. Особое внимание уделяется преимуществам и недостаткам каждого метода, а также их влиянию на твердость и шероховатость поверхности. Рассматриваются результаты исследований, которые показывают значительное увеличение коррозионной стойкости и механических свойств материала после обработки импульсными электронными пучками. Также рассматриваются возможности применения высокоэнергетических пучков для модификации структуры и улучшения характеристик различных сталей, включая нержавеющие и инструментальные стали. Работа подчеркивает потенциал электронно-пучковой обработки как современного и эффективного метода для повышения эксплуатационных характеристик сталей в различных отраслях, таких как механическая, автомобильная и биомедицинская.*

Ключевые слова: *стали, обработка поверхности, микротвердость, коррозионная стойкость, импульсная электронно-пучковая обработка, упрочнение, механические свойства, нержавеющие стали, инструментальные стали, аддитивные технологии.*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Сплавы на основе стали занимают ведущие позиции среди наиболее распространенных материалов, используемых в автомобилестроении, биомедицине, машиностроении и в подшипниковых системах. Для обеспечения надежной и долговечной работы этих конструкций, материалы, из которых они изготовлены, должны демонстрировать отличные механические свойства и химическую стойкость, даже в условиях агрессивной среды. Поэтому современное научное сообщество активно ищет новые и передовые технологии обработки поверхности сталей для их более широкого применения в сложных промышленных условиях. В последние десятилетия наблюдается рост интереса к исследованиям в области модификации поверхности сталей.

Например, исследования, проведенные Y. Fu [1], сосредоточены на поверхностном упрочнении стали 30CrMnSiA с помощью непрерывного электронного пучка. В его работе отмечается, что микротвердость обработанной поверхности увеличивается с 209 до 520 HV при этом уровень шероховатости не подвергается изменениям. Эти результаты подчеркивают высокую эффективность данного метода. Однако для более глубокого понимания его преимуществ необходимо рассмотреть и другие способы упрочнения поверхности сталей, а также провести их сравнительный анализ.

Методы упрочнения поверхности:

Закалка

Это процесс включает нагрев стали до высоких температур с последующим её быстрым охлаждением. Закалка увеличивает твердость и прочность, однако, может привести к возникновению внутренних напряжений.

Микротвердость: Обычно достигает 600-800 HV для некоторых сталей.

Шероховатость поверхности: Может увеличиваться в результате термической обработки.

Нитрация

Процесс, в котором на поверхность стали вводят азот для формирования нитридной пленки. Это приводит к увеличению твердости и улучшению износостойкости.

Микротвердость: Может достигать 1000 HV в зависимости от режима обработки.

Шероховатость поверхности: Как правило, остаётся на уровне, схожем с изначальным, но зависит от технологии.

Плазменная обработка

Использует плазменные источники для нанесения защитных покрытий на поверхность стали. Плазменная обработка позволяет создать покрытия высокой прочности и устойчивости к коррозии.

Микротвердость: Индексы твердости варьируются, но могут достигать до 1200 HV.

Шероховатость поверхности: Зависит от типа покрытия и условий нанесения, может быть улучшена или ухудшена.

Карбидизация

Процесс диффузии углерода в сталь, что приводит к образованию карбидов на поверхности. Этот метод значительно увеличивает износостойкость.

Микротвердость: Достигает 900-1100 HV в обработанных слоях.

Шероховатость поверхности: Опять же, зависит от условий обработки.

Импульсная электронно-пучковая обработка

Метод, при котором высокоэнергетический электронный пучок воздействует на поверхность материала, вызывая её быстрый нагрев и затем мгновенное охлаждение.

Микротвердость: Повышается с 208 HV до 520 HV, как показано в исследовании Y. Fu и соавт.

Шероховатость поверхности: Не изменяется, что является значительным преимуществом по сравнению с другими методами.

Сравнительный анализ характеристик методов упрочнения представлен в табл. 1.

Таблица 1.

Сравнительный анализ характеристик методов упрочнения

Метод упрочнения	Микротвердость (HV)	Шероховатость поверхности	Преимущества	Недостатки
Закалка	600–800	Может увеличиваться	Относительная простота обработки	Внутренние напряжения
Нитрация	~1000	Сохранение уровня	Высокая твердость и износостойкость	Длительность процесса
Плазменная обработка	До 1200	Зависит от технологии	Высокая прочность покрытия	Высокая стоимость оборудования
Карбидизация	900–1100	Зависит от условий	Устойчивость к износу	Изменение свойств основного материала
Импульсная электронно-пучковая обработка	500–900	Улучшение уровня	Минимальное изменение геометрии, глубокое упрочнение, отсутствие термических деформаций, применимость к различным материалам, быстрота процесса, экологичность	Стоимость оборудования

Импульсная электронно-пучковая обработка выделяется среди других методов обработки стали благодаря своей способности значительно увеличивать микротвердость при минимальных изменениях шероховатости поверхности. В то время как традиционные методы, такие как закалка, нитрация и карбидизация, успешно повышают твердость и износостойкость, они часто приводят к увеличению шероховатости, что может негативно сказаться на эксплуатационных характеристиках изделий.

Метод импульсной электронно-пучковой обработки обеспечивает эффект быстрого нагрева и последующего охлаждения, что позволяет минимизировать возникновение внутренних напряжений и сохранять высокое качество гладкости поверхности. Это делает данный метод особенно привлекательным для применения в условиях высокой нагрузки, где критически важны как твердость, так и чистота поверхности.

Таким образом, можно заключить, что импульсная электронно-пучковая обработка является наиболее оптимальным и эффективным методом для улучшения свойств стали, позволяя достичь высокого уровня твердости без ущерба для качества поверхности.

Работа ученых под руководством J. Kim [2] показала, что нанотвердость стали КР1 увеличилась на 315%, в то время как для стали КР4 этот показатель возрос на 145%. Это улучшение связано с ростом плотности линейных дефектов (дислокаций) в слое, обработанном импульсным электронным пучком (рис. 1).

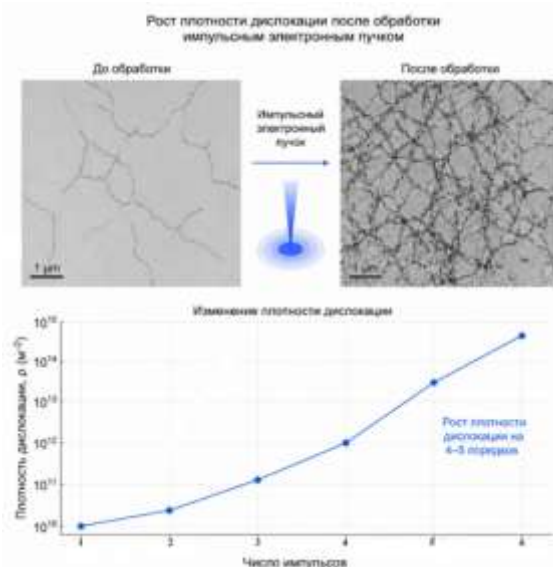


Рисунок 1 – Рост плотности дислокаций после обработки импульсным электронным пучком.

Известно, что коррозионная стойкость нержавеющей сталей в водных растворах относительно высока из-за оксидной пленки образуемой хромом, которая естественным образом образуется на поверхности материала. Однако хорошо известно, что нержавеющие стали подвержены точечной коррозии в хлоридсодержащих водных средах.

Этот недостаток объясняется наличием включений, таких фаз как Al-Mn и Mn-S (полностью аустенитная однофазная структура, свободная от ферритных δ - или σ -фаз) [3].

Аустенитная структура:

Стандартные нержавеющие стали, такие как 304 и 316, имеют аустенитную структуру с кубической гранецентрированной решеткой (FCC). Эта однородная структура обеспечивает высокую коррозионную стойкость, однако, ферритные или другие фазы могут образовываться под воздействием определенных условий, таких как температура или легирование.

Ферритная структура:

Хотя в данном контексте речь идет о полностью аустенитной стали, феррит может присутствовать в результате термической обработки или легирования. Например, сталь 430 — ферритная нержавеющая сталь, которая менее коррозионностойка в хлоридсодержащих средах.

Карбиды:

Наличие карбидов (например, карбиды хрома) в аустенитной структуре может приводить к образованию "локальных анодов", что способствует точечной коррозии. В стали 316L эти карбиды могут формироваться при высоких температурах сварки, что снижает коррозионную стойкость.

Супердуплексные стали:

Структура супердуплексных нержавеющей сталей (например, 2507) сочетает аустенитную и ферритную фазы. Это придает им отличные механические свойства и коррозионную стойкость, при этом они менее подвержены точечной коррозии, чем обычные аустенитные стали.

Интерметаллические фазы:

Включения, такие как Al-Mn или Mn-S, могут способствовать образованию интерметаллических фаз, которые из-за различий в электрохимической активности становятся активными центрами для точечной коррозии.

Эти структуры и фазы играют важную роль в коррозионной стойкости нержавеющей сталей, особенно в агрессивных средах, таких как морская вода или

хлоридсодержащие растворы. Понимание их образования и поведения помогает разработать более устойчивые к коррозии материалы.

Для улучшения механических свойств и химической стабильности поверхности сталей используются методы обработки с применением высокоэнергетических пучков [4]. Установлено, что облучение импульсными электронными пучками значительно повышает как механические, так и химические характеристики поверхности материалов [5]. Например, ученые под руководством Y. Fu предложили метод повышения коррозионной стойкости стали AISI 1045, который заключается в обработке поверхности псевдоискровым электронным пучком. Этот метод представляет собой разновидность циклической обработки импульсным электронным пучком и характеризуется быстрыми и повторяемыми операциями, что обеспечивает мгновенный выброс энергии и плазменное гашение. В результате такой обработки поверхности материала удается достичь уникальных механических и структурных свойств. Исследования показали, что после обработки псевдоискровым электронным пучком в поверхностных слоях стали AISI 1045 формируется аморфная структура. Визуализация структуры материала представлена на рис.2.

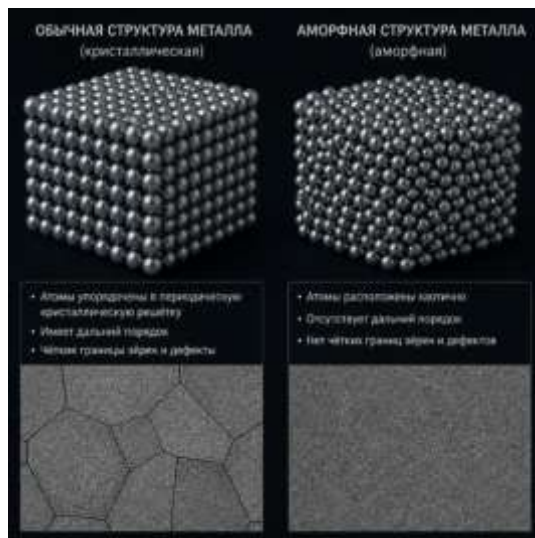


Рисунок 2 – визуализация структуры материала.

Обработанный слой имеет толщину в несколько микрон и обладает неоднородной структурой материала, в результате обработки происходит значительное уменьшение размеров зерен материала. Средний размер зерен в зоне воздействия меньше, чем в зоне плавления. Это объясняется комбинацией влияния температурно-индуцированных динамических полей, вызываемых резким изменением температуры, что приводит к локальным изменениям состояния материала, и наиболее выраженного температурного

градиента, который возникает в местах, где скорость изменения температуры максимально высока. В результате в зоне плавления происходит частичное расплавление материала, за которым следует быстрое затвердевание материала, что способствует образованию новых меньших по размеру зерен по сравнению с зернами в зоне термического воздействия.

Для исследования коррозионного поведения образцов до и после электронно-лучевой обработки применялась электрохимическая импедансная спектроскопия (ЭИС) и анализ потенциальной поляризации. Схема электрохимической импедансной спектроскопии представлена на рис. 3.

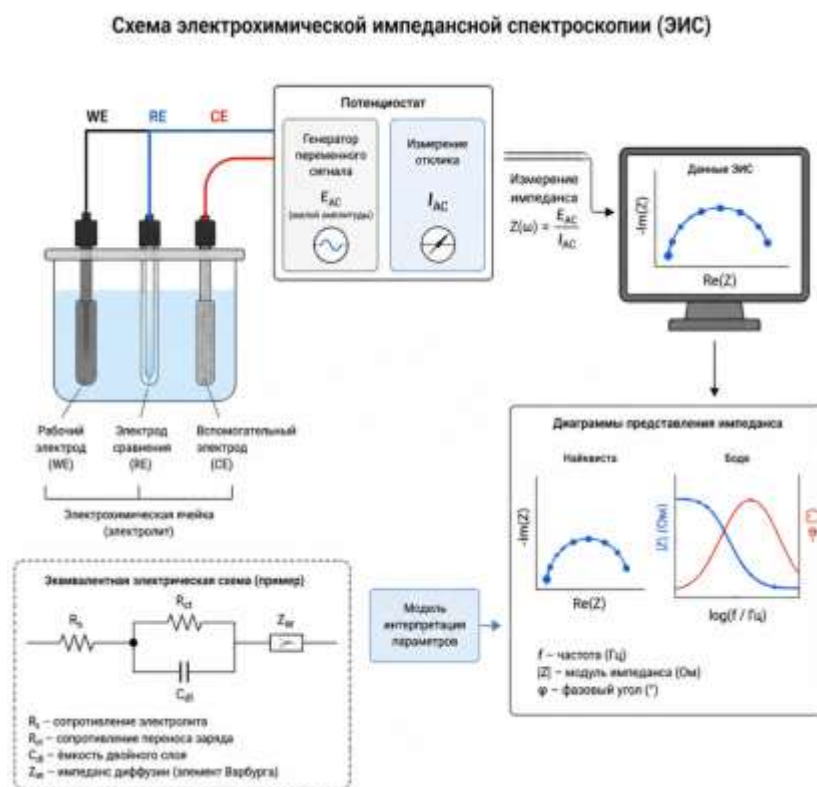


Рисунок 3 – Схема электрохимической импедансной спектроскопии.

Авторы установили, что увеличение коррозионной стойкости связано с комбинацией эффектов, таких как образования аустенита, удаления примесей в процессе электронно-лучевой обработки поверхности и формирование аморфной фазы, которая действует как однородная пассивная пленка. В работе [6] дуплексная нержавеющая сталь 2205 обработана сильноточным импульсным электронным пучком. Обнаружено, что такой вид обработки приводит к образованию кратеров на поверхности стальных материалов, где после 5 импульсов появляются трещины. Данное явление обусловлено растягивающими напряжениями возникающими в

модифицированном слое вследствие высокоскоростного охлаждения. Дальнейшие исследования показали, что повышение количества импульсов до 15 устраняло эту проблему. Микроструктурный анализ выполненный при помощи дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD) и рентгеновской дифрактометрии показал, что содержание фазы α -Fe увеличивается в слое после обработки, что может быть связано с гомогенизацией поверхности. Схема микроструктурного анализа при помощи дифракции обратно рассеянных электронов представлена на рис. 4.

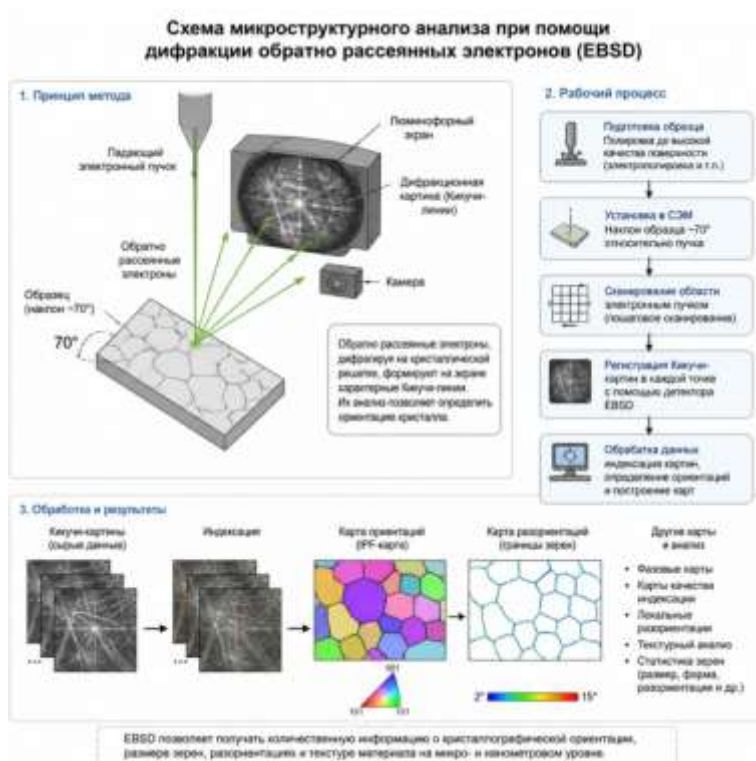


Рисунок 4 – Схема микроструктурного анализа при помощи дифракции обратно рассеянных электронов.

Кроме того, установлено увеличение микротвердости поверхности до значений 381 HV. Глубина упрочненного слоя увеличивалась с увеличением числа импульсов, достигая около 400 мкм. Коррозионные испытания в 3,4 мас.% водном растворе NaCl показали, что потенциал коррозии увеличился от -0,97 МВ для необработанного образца до -0,27 МВ для образца, обработанного высокоинтенсивными электронными пучками. График зависимости параметров от количества импульсов представлен на рис. 5.

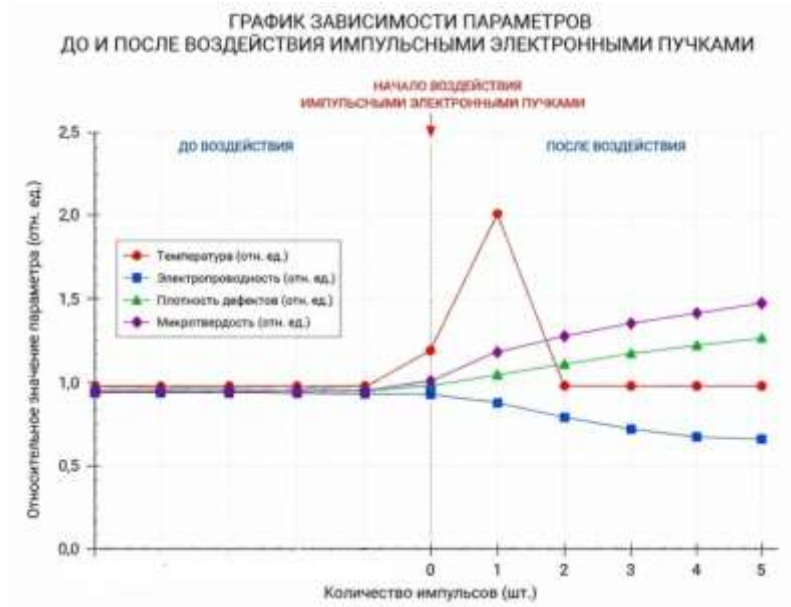


Рисунок 5 – График зависимости параметров от количества импульсов.

Еще одним примером увеличения коррозионной стойкости нержавеющей стали посредством обработки сильноточным электронным пучком может стать работа [7]. В ней показаны результаты коррозионных испытаний, и количественные значения износостойкости стали FV520B до и после обработки сильноточным импульсным электронным пучком. Параметры электронно-пучковой обработки были следующие: ускоряющее напряжение 26 кВ, длительность импульса 2,4 мкс и плотность энергии пучка 5 Дж/см². Металлографический анализ обработанных образцов показал, что с увеличением количества импульсов обработки микроструктура поверхности становится более однородной со средним размером зерна менее 3 мкм, схема представлена на рис. 6.

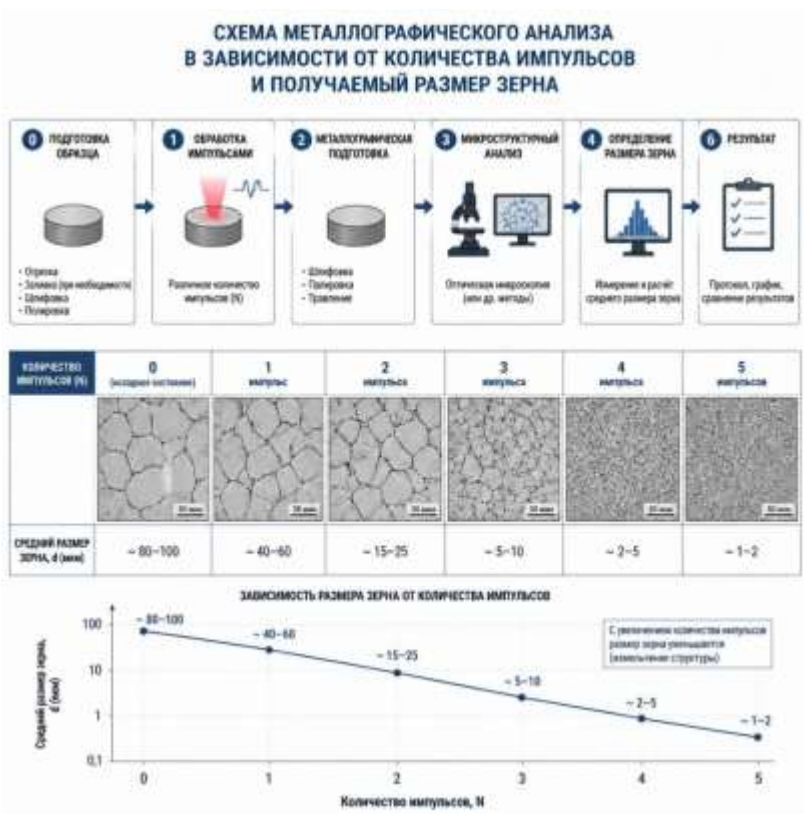


Рисунок 6 – Схема металлографического анализа в зависимости от количества импульсов.

Переплавленный слой, подвергшийся воздействию импульсного электронного пучка, имел глубину примерно 3 мкм. Результаты коррозионных испытаний показывают, что после 20 импульсов обработки сильноточным электронным пучком потенциал коррозии повысился до 0,037 В с 0,214 В исходного образца, износостойкость увеличилась в три раза. Высокоуглеродистые стали Т10, являющиеся разновидностью инструментальных сталей, широко применяются в производстве пресформ. Однако такие негативные характеристики как плохая прокаливаемость и большая закалочная деформация, ограничивают возможность применения материала для изготовления деталей сложной формы, предназначенных для работы при высоких нагрузках. Поэтому активно исследуются методы поверхностной обработки, одним из которых стала обработка поверхности электронным пучком. В статье [8] исследуются изменения микроструктуры поверхности, микротвердости, глубины переплавленного слоя и зоны термического влияния, морфологии поверхности, шероховатости поверхности и износостойкости стали Т10 после обработки импульсным электронным пучком с различным значением тока пучка. Графическая зависимость влияния тока на свойства поверхности представлена на рис. 7.

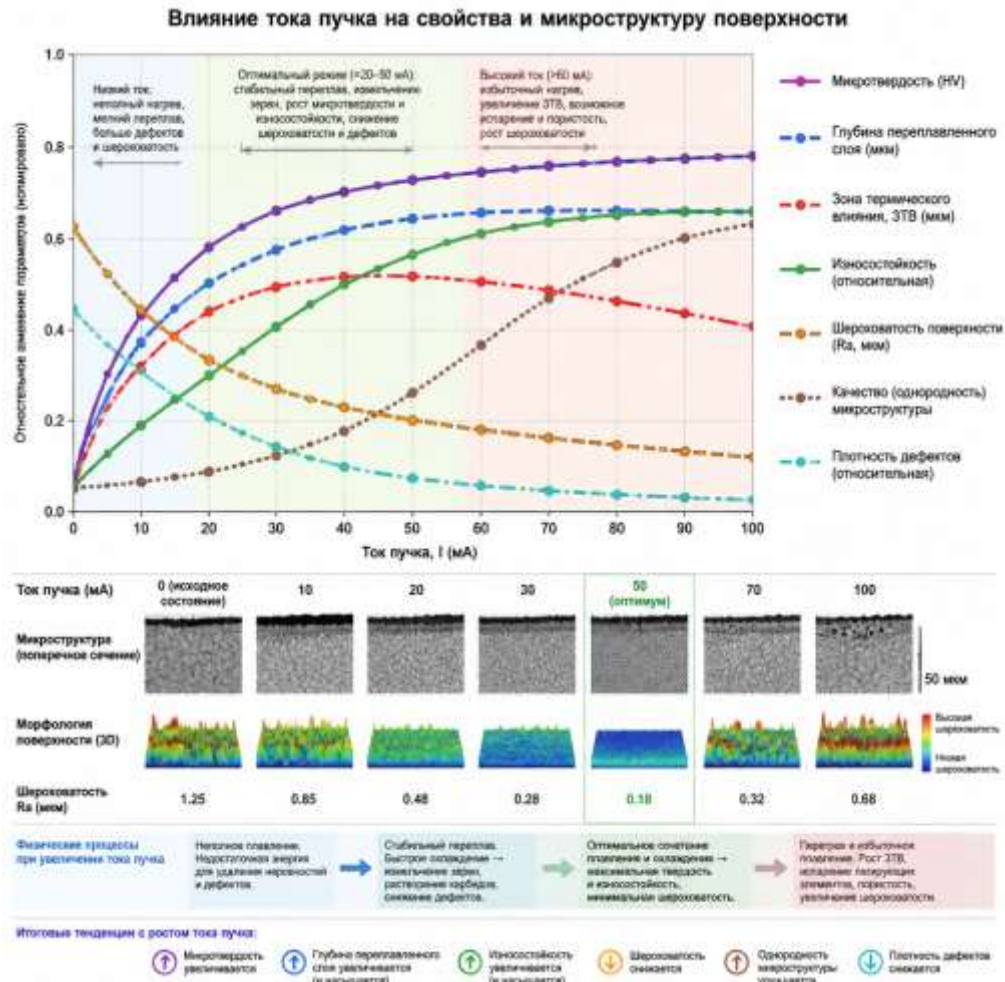


Рисунок 7 – Графическая зависимость влияния тока на свойства поверхности.

Представим зависимости: микротвердости, глубины переплавленного слоя, зоны термического влияния, шероховатости, износостойкости от изменения тока пучка.

Микротвердость:

Микротвердость HV может быть представлена как функция от тока:

$$HV = f(I)$$

где I — ток пучка.

Обычно увеличение тока приводит к увеличению микротвердости из-за более структурно-упорядоченного состояния материала.

Глубина переплавленного слоя:

Глубина переплавленного слоя d может зависеть от тока по следующей зависимости:

$$d = k \cdot I^n$$

где k и n — коэффициенты, зависящие от материала и режима обработки.

Зона термического влияния:

Зона термического влияния (ZTH) изменяется в зависимости от теплопередачи и распределения температуры, что также зависит от мощности пучка:

$$ZTH = C \cdot I_m$$

где C и m — материалозависимые коэффициенты.

Шероховатость поверхности:

Шероховатость Ra может быть представлена как функция от тока, где увеличение тока часто приводит к уменьшению шероховатости из-за лучшего плавления:

$$Ra = g(I)$$

Износостойкость:

Износостойкость может быть связана с микротвердостью и морфологией, представлена формулой:

$$W_{ear} = h(HV, Ra)$$

где увеличение микротвердости и уменьшение шероховатости, как правило, приводят к большей износостойкости.

Обработка металлов электронным пучком оказывает существенное влияние на микроструктуру стали, способствуя образованию игольчатого и реечного мартенсита в модифицированном слое. Увеличение тока пучка приводит к росту микротвердости поверхности и глубины модифицированного слоя. Например микротвердость поверхности образца составляет 839 HV, а глубина модифицированного слоя - 330 мкм при токе пучка 8 мА. Однако стоит отметить, что износостойкость поверхности стали Т10, снижается с увлечением тока пучка, и при значении тока 6 мА возникает минимальное трение и износ. Также с увеличением тока шероховатость поверхности уменьшается. Шероховатость поверхности составляет 0,47 мкм при токе 6 мА, это позволяет говорить, что электронно-лучевая обработка позволяет реализовать определенную степень полировки поверхности обрабатываемого изделия. В исследовании [9] была изучена структура и механические свойства инструментальной стали AISI S7 после двустадийной обработки, которая заключалась в обработке

поверхности электронным пучком и последующей криогенной заморозке что приводило к снижению остаточных растягивающих напряжений. Установлено, что после электронно-пучковой обработки в модифицированном слое формируется повышенное содержание остаточного аустенита, а последующая криогенная заморозка приводит к значительному уменьшению остаточного растягивающего напряжения модифицированного слоя, вероятно, из-за превращения остаточного аустенита в менее плотный мартенсит. Криогенная обработка превратила остаточный аустенит в мартенсит, и соответствующее расширение объема уменьшило пиковое остаточное напряжение растяжения на 28%, что делает данный метод перспективным для применения к инструментальным сталям. Сталь 40CrMn – представляющая собой конструкционную сталь со средним содержанием углерода, данный вид стали используется в промышленном производстве. В связи с этим ведутся исследования новых методов модификации поверхности стали для придания уникальных механических характеристик и продления срока службы различных изделий [10]. В исследовании [11] была проведена модификация поверхности стали 40CrMn методом непрерывного сканирующего электронного пучка. Металлографический анализ показал, что в модифицированном слое проходило мартенситное превращение, микроструктура представляла собой игольчатый и реечный мартенсит. На глубине 300 мкм микротвердость достигала максимума и составляла 741,3 HV. При токе пучка 4 мА глубина модифицированного слоя составляла 405,8 мкм, а при увеличении тока пучка глубина модифицированного слоя увеличивалась нелинейно. Установлено, что микротвердость поверхности увеличивается с увеличением тока пучка электронов. При токе пучка 6 мА микротвердость поверхности составила 693,8 HV. При скорости движения 110 мм/мин микротвердость поверхности составила 656,2 HV, что позволило авторам сделать вывод о том, что при увеличении скорости сканирования непрерывным электронным пучком микротвердость поверхности уменьшается. Обратный эффект наблюдается с шероховатостью поверхности стали, которая снижалась с увеличением скорости движения пучка электронов, при скорости 300 мм/мин, шероховатость поверхности уменьшилась с 1,7 до 0,8 мкм. Также были значительно улучшены параметры износостойкости поверхности стали 40CrMn после обработки электронным пучком [12].

По технологии непрерывного сканирования электронным пучком также была обработана поверхность литейной стали 5CrMnMo. Модификация поверхности стали 5CrMoMn непрерывным электронным пучком была проведена при следующих параметрах: скорость движения 60 мм/мин, ускоряющее напряжение 70 кВ, частота 310 Гц и ток пучка 6-8 мА. Металлографический анализ показал, что структура стали, после

обработки электронным пучком, состоит из расплавленного слоя, зоны термического влияния и матрицы подложки. Свойства поверхности, включая шероховатость поверхности, микротвердость поверхности и износостойкость, анализировали до и после обработки. Процесс быстрого охлаждения вызвал мартенситное фазовое превращение в модифицированном слое стали 5CrMnMo, и как следствие повышение характеристик твердости и износостойкости поверхностных слоев [13].

На сегодняшний день аддитивное производство демонстрирует быстрый темп роста. Эта технология, строящая изделия послойно, вызывает растущий интерес благодаря способности создавать компоненты сложной геометрии, которые трудно получить традиционными методами. Она предлагает такие значительные преимущества, как гибкость производства и экономия ценных материалов, однако, несмотря на уникальные свойства получаемых материалов, остаются и проблемы, включая микропоры и микротрещины в изделиях. Обработку готовых изделий после аддитивного производства импульсными электронными пучками рассматривают как жизнеспособный способ устранения дефектов.

В работе [14] исследуется постобработка импульсным электронным пучком мартенситной стали, полученной методами аддитивного изготовления. Результаты показали, что воздействие электронного пучка расплавляет поверхность изделия, заполняет трещины и пустоты, что ведет к образованию однородной поверхности. Преобладающей фазой в материале оказался объёмноцентрированный кубический α -мартенсит с небольшой долей гранецентрированной кубической γ -ферритной фазы аустенитной фазы. Также отмечено, что облучение пучком уменьшает шероховатость поверхности, что улучшает коррозионную стойкость материала.

В работе [15] изучались условия образования, структура и свойства слоёв на основе боридов железа на углеродистой стали 45 под воздействием электронного пучка в вакууме. Установлено, что после химикотермической обработки поверхностный слой состоит из FeB и борированного цементита. Применение защитного аморфного оксида способствовало достижению равновесного боридного слоя. В слоях наблюдались эвтектические структуры с микротвердостью в диапазоне 650–700 HV. Такой подход позволяет получить защитные покрытия, повышающие твёрдость и износостойкость деталей.

В работе [16] представлены результаты поверхностного упрочнения образцов из штамповой стали 5ХНМ методом комплексного насыщения бором и медью с последующей модификацией слоя электронно-пучковой обработкой на плазменном катоде. Целью исследования было повышение ряда физико-механических свойств боридных слоёв, в частности пластичности. Выполнен сравнительный анализ строения

диффузионного слоя после боромеднения и последующей модификации этим слоем электронно-пучковой обработкой. Проведён анализ морфологии диффузионного слоя, исследованы микротвердость, элементный и фазовый состав. Также оценена пластичность полученных диффузионных слоёв до и после обработки.

В настоящее время обработка различных материалов низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками широко применяется для упрочнения их поверхностных слоёв [17]. Воздействие электронных пучков позволяет повысить эксплуатационные характеристики материалов, в частности микротвердость и износостойкость, а также модифицировать рельеф поверхности. Установлено, что быстрый нагрев и последующее rapid охлаждение материала при электронной обработке приводит к реструктуризации кристаллической зернистой структуры и снижению размера зерна [18]. Авторами [19] предложен способ поверхностного упрочнения головок стальных рельсов действующего рельсового пути (рис. 8), включающий нагрев по меньшей мере одной боковой или верхней поверхности головки рельсового пути электронными пучками, перемещающимися относительно рельса, и последующее охлаждение этой поверхности, отличающийся использованием низкоэнергетических электронов (100–300 кэВ), выводимых в воздушной атмосфере.

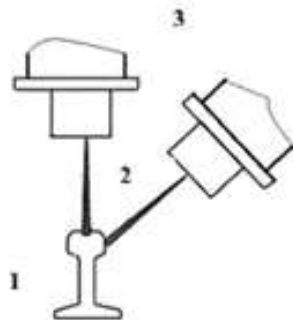


Рисунок 8. – Схема поверхности воздействия при упрочнении головок стальных рельсов: 1 – упрочняемая головка рельса ; 2 – импульсный электронный пучок ; 3 – выводной узел .

Этот способ позволяет быстро и эффективно осуществлять упрочнение головок одного или двух рельсов на относительно небольшую глубину (0,4-0,8 мм), при этом снижается вероятность отслаивания упрочненного слоя. Причем упрочнение рельсов с помощью предлагаемого метода можно проводить регулярно по мере износа упрочненного слоя.

В частности, предлагаемым способом поверхностного упрочнения электронными пучками рельсов, изготовленных из стали марки Р65, было достигнуто увеличение

твердости упрочненного слоя в 3 раза. Исходная твердость – 2300 МПа, твердость упрочненного слоя – 9000 МПа, толщина упрочненного слоя – 850 мкм. В процессе упрочнения происходит: высокоскоростной нагрев поверхности до температур выше точки аустенитизации (900-1500°C); распространение температурного фронта вглубь материала и протекание фазовых превращений α -фазы железа в γ - фазу, т.е. преобразование объемно-центрированных кристаллов в гранецентрированные; растворение углеродных и иных легирующих включений в гранецентрированных кристаллах γ -фазы железа, образование новых фаз; высокоскоростное остывание за счет теплопроводности внутрь головки рельса; формирование в упрочненном слое мартенситной структуры с высокой твердостью. Кроме того, данный способ позволяет существенно снизить весогабаритные характеристики оборудования для генерации и вывода электронного пучка. В частности, переход от электронного ускорителя с энергией электронов 1-4 МэВ к ускорителю с энергией 100-300 кэВ снижает характерные размеры оборудования в несколько раз и массу более чем в 15 раз. Данные количественные изменения носят уже качественный характер – появляется возможность установления подобного оборудования на любых рельсовых транспортных средствах и осуществления эффективного упрочнения рельсов непосредственно в составе действующих путей.

Вывод:

Исследование современных методов обработки поверхности сталей выявляет их ключевую роль в обеспечении повышенных механических свойств и коррозионной стойкости материалов, что делает эти технологии крайне актуальными для широкого применения в различных отраслях, таких как автомобилестроение, медицина и машиностроение. Импульсная электронно-пучковая обработка представляется наиболее перспективной благодаря своей способности значительно увеличивать микротвердость стали при минимальных изменениях шероховатости поверхности, что положительно сказывается на эксплуатационных характеристиках изделий. Несмотря на ряд традиционных методов упрочнения, таких как закалка и нитрация, они часто сопровождаются нежелательными увеличениями шероховатости и внутренними напряжениями.

Проведенные исследования показывают, что применение высокоэнергетических электронных пучков приводит к улучшению не только механических свойств, но и коррозионной стойкости, что особенно важно в условиях агрессивных окружающих сред.

В контексте быстрого развития аддитивных технологий, обработка изделий, полученных с помощью этих методов, импульсными электронными пучками

представляет собой жизнеспособное решение для устранения дефектов и повышения качества конечных продуктов. Такой подход позволяет достигать однородной структуры материала и высокой коррозионной стойкости, что открывает новые горизонты для создания высококачественных и долговечных сталей, способных эффективно работать в условиях жесткой эксплуатации.

References

1. Surface hardening of 30CrMnSiA steel using continuous electron beam / Y. Fu, J. Hu, X. Shen [et al.]. – DOI 10.1016/j.nimb.2017.08.014 // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2017. – Vol. 410. – P. 207–214. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2017.08.014> .
2. Kim, J. Corrosion inhibition and surface hardening of KP1 and KP4 mold steels using pulsed electron beam treatment / J. Kim, S. S. Park, H. W. Park. – 10.1016/j.corsci.2014.08.018 // Corrosion Science. – 2014. – Vol. 89. – P. 179–188. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.08.018> .
3. Chao, Q. On the enhanced corrosion resistance of a selective laser melted austenitic stainless steel / Q. Chao, V. Cruz, S. Thomas [et al.]. – DOI 10.1016/j.scriptamat.2017.07.037 // Scripta Materialia. – 2017. – Vol. 141. – P. 94–98. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.07.037> .
4. Исследование свойств системы цирконий (плёнка)/сталь 12X18H10T (подложка), подвергнутой импульсному электронно-пучковому воздействию / А. Д. Тересов, В. В. Шугуров, Ю. Ф. Иванов [и др.] // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, № 9-3. – С. 145–149. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25225128> .
5. Структура и трибологические свойства поверхностного слоя, наплавленного на мартенситную сталь и модифицированного электроннопучковой обработкой / В. Е. Громов, В. Е. Кормышев, С. В. Коновалов [и др.] // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2017. – Т. 14, № 1. – С. 28–33. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28790847> .
6. Surface microstructure and property modifications in a duplex stainless steel induced by high current pulsed electron beam treatments / K. Zhang, J. Ma, J. Zou, Y. Liu. – DOI 10.1016/j.jallcom.2017.01.003 // Journal of Alloys and Compounds. – 2017. – Vol. 707. – P. 178–183. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.01.003> .
7. Improving corrosion and wear resistance of FV520B steel by high current pulsed electron beam surface treatment / S. Hao, L. Zhao, Y. Zhang, H. Wang. – DOI 10.1016/j.nimb.2015.04.046 // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section

B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2015. – Vol. 356–357. – P. 12–16. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.04.046> .

8. Effect of the continuous electron beam process treatment in the surface modification of T10 steel / R. Wang, H. Cui, J. Huang, H. Jiang. – DOI 10.1016/j.nimb.2018.09.004 // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2020. – Vol. 436. – P. 29–34. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2018.09.004>

9. College, D. A. Alleviating surface tensile stress in e-beam treated tool steels by cryogenic treatment / D. A. College, Y. Zhu. – DOI 10.1016/j.msea.2018.03.036 // Materials Science and Engineering: A. – 2018. – Vol. 722. – P. 167–172. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.03.036> .

11. Ormanova, M. Electron beam surface treatment of tool steels / M. Ormanova, P. Petrov, D. Kovacheva. – DOI 10.1016/j.vacuum.2016.10.022 // Vacuum. – 2017. – Vol. 135. – P. 7–12. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2016.10.022> .

12. Surface microstructures and improved mechanical property of 40CrMn steel induced by continuous scanning electron beam process / R. Wang, J. Yu, D. Wei, C. Meng. – DOI 10.1016/j.nimb.2019.08.020 // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2019. – Vol. 436. – P. 130–136. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.08.020> .

13. Surface modification of 5CrMnMo steel with continuous scanning electron beam process / D. Wei, X. Wang, R. Wang, H. Cui – DOI 10.1016/j.vacuum.2017.12.032 // Vacuum. – 2018. – Vol. 149. – P. 118–123. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.12.032> .

14. Enhancement of the surface properties of selective laser melted maraging steel by large pulsed electron-beam irradiation / T. S .N. Sankara Narayanan, J. Kim, H. E. Jeong, H. W. Park. – DOI 10.1016/j.addma.2020.101125 // Additive Manufacturing. – 2020. – Vol. 33. – P. 101125. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101125> .

15. Дашеев, Д. Э. Математическое моделирование и особенности электронно-лучевого борирования низкоуглеродистых сталей в вакууме / Д. Э. Дашеев, А. П. Семенов, Н. Н. Смирнягина // Химическая физика и мезоскопия. – 2012. – Т. 14, № 3. – С. 417–421.

16. Электронно-пучковая модификация боридных диффузионных слоев на поверхности штамповой стали 5ХНМ / С. А. Лысых, У. Л. Мишигдоржийн, Ю. П. Хараев [и др.]. – DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.028 // Ползуновский вестник. – 2023. – № 2. – С. 217–224. – URL: <https://ojs.altstu.ru/index.php/PolzVest/article/view/529> .

17. Patent № 053407, DE, МПК В33У 10/00, В33У 30/00, В33У 40/00, H01J 37/30, H01J 37/304. Method for smoothing a component surface region : № PCT/EP2019/074525 : register 13.09.2019 : publication 19.03.2020 / B. Graffel, F. Winckler, S. Fritzsche [et al.] ; Fraunhofer

Gesellschaft zur Forderung der Angewandten Forschung eV. – 6 p. // Google.com: patents. – URL: <https://patents.google.com/patent/US20210197307A1/en> .

18. Patent № US10577684, МПК C22F 1/16, C22F 1/18, B23K 15/00, B33Y 10/00, C22C 14/00. Method for producing ultrafine-grained crystalline materials via electronbeam : № 15810895 : register 13.11.2017 : publication 03.03.2020 / R. D. Reeves, T. M. Lasko, J. J. Hill ; Mainstream Engineering Corp. – 13 p. // Google.com: patents. – URL: <https://patents.google.com/patent/US10577684B1/en> .

19. Патент № 2704051 Российская Федерация, МПК C21D 9/04. Способ и установка для поверхностного упрочнения головок стальных рельсов действующих путей : № 2018137161 : заявл. 23.10.2018 : опубл. 23.10.2019 / В. В. Кошлаков, Р. Н. Ризаханов ; заявитель Исследовательский центр имени М.В. Келдыша. – 14 с. // Yandex.ru: патенты. – URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2704051C1_20191023 .