

Б.К. Рахадиллов, Р.К. Кусаинов, Ж.Э. Бакыт, А.Б. Шынарбек, К.Д. Орманбеков, С.И. Буреш, Н.Е. Мусатаева, Н.Е. Кадырболат
УДК: 31.15.33

ЭЛЕКТРОЛИТТИК-ПЛАЗМАЛЫК БЕТТИК ӨЧҮРҮҮДӨ СТРУКТУРАЛЫК БОЛОТТОРДУ КАТУУЛАТУУНУН ФИЗИКАЛЫК МЕХАНИЗМДЕРИН ИЗИЛДӨӨ

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ УПРОЧНЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКЕ

STUDY OF PHYSICAL MECHANISMS OF STRENGTHENING OF STRUCTURAL STEELS DURING ELECTROLYTIC- PLASMA SURFACE HARDENING

*Б.К. Рахадиллов, Р.К. Кусаинов, Ж.Э. Бакыт, А.Б. Шынарбек,
К.Д. Орманбеков, С.И. Буреш, Н.Е. Мусатаева, Н.Е. Кадырболат*

*B.K. Rakhadilov, R.K. Kusainov, Zh.Э. Bakyt, A.B. Shynarbek,
K.D. Ormanbekov, S.I. Buresh, N.E. Musataeva, N.E. Kadyrbolat*

Бул макалада 20ГЛ конструкциялык болотун электролиттик-плазмалык катуулатуу (ЭПК) процесси талдоого алынган, ал машина куруу жана өнөр жайдын башка тармактарында кеңири колдонулат. Изилдөөнүн актуалдуулугу жогорку жүктөмдөр жана агрессивдүү чөйрөлөр шартында колдонулуучу материалдардын эксплуатациялык өзгөчөлүктөрүн жогорулатуу зарылдыгы менен негизделген. Жүргүзүлгөн эксперименттер көрсөткөндөй, электролиттик-плазмалык иштетүү катуулуктун олуттуу өсүшүнө алып келди, ал 600HV деңгээлине жетти. Беттик катмарды модификациялоо натыйжасында материалдын негизги механикалык касиеттерин жакшыртуу мүмкүн болду, бул ЭПК ыкмасынын натыйжалуулугун ырастайт, деталдардын жана конструкциялардын кызмат мөөнөтүн узартууга жардам берет. Мындан тышкары, изилдөөлөр 20ГЛ болотунун коррозияга туруктуулугу жогорулаганын көрсөттү, бул анын агрессивдүү химиялык чөйрөлөрдө иштеши үчүн абдан маанилүү. Алынган маалыматтар ошондой эле эскирүүгө туруктуулугу жогорулаганын далилдеп, ЭПК ыкмасын механикалык жүктөмдөргө жана сүрүлүүгө дуушар болгон конструкциялык элементтерди иштетүү үчүн келечектүү кылат. Демек, электролиттик-плазмалык катуулатуу – бул конструкциялык болоттордун эксплуатациялык өзгөчөлүктөрүн жакшыртуунун натыйжалуу жана технологиялык жактан жеткиликтүү ыкмасы. Бул технологияны автоөнөр жайда, курулушта, энерге-

тикада жана башика тармактарда ишке ашыруу жана өнүктүрүү буюмдардын узак мөөнөттүү иштешин жана ишенимдүүлүгүн жогорулатууга, алардын оңдоп-түзөө жана тейлөө чыгымдарын азайтууга мүмкүндүк берет. ЭПК ыкмасынын келечектүүлүгү аны мындан аркы илимий изилдөөлөр жана өнөр жайлык колдонуу үчүн актуалдуу багыт кылат.

В статье представлен анализ процесса электролитно-плазменного упрочнения (ЭПУ) конструкционной стали 20ГЛ, широко применяемой в машиностроении и других отраслях промышленности. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эксплуатационных характеристик материалов, используемых в условиях высоких нагрузок и агрессивных сред. Проведенные эксперименты показали, что электролитно-плазменная обработка способствует значительному увеличению твердости, которая достигла 600HV. В результате модификации поверхностного слоя удалось улучшить основные механические свойства материала, что подтверждает эффективность метода ЭПУ для увеличения срока службы деталей и конструкций. Кроме того, исследования показали улучшение коррозионной стойкости стали 20ГЛ, что особенно важно для ее эксплуатации в агрессивных химических средах. Полученные данные также свидетельствуют о повышенной износостойкости, что делает метод ЭПУ перспективным для обработки конструктивных элементов, подвергающихся интенсивному трению и механическим нагрузкам. Таким образом, электролитно-плазменное упрочнение является эффективным и технологически доступным способом улучшения эксплуатационных характеристик конструкционных сталей. Развитие и внедрение данной технологии в автомобилестроении, строительстве, энергетике и других отраслях позволит повысить долговечность и надежность изделий, снижая затраты на их ремонт и обслуживание. Перспективность метода ЭПУ делает его актуальным направлением для дальнейших научных исследований и промышленного применения.

This article presents an analysis of the electrolytic-plasma hardening (EPH) process for 20GL structural steel, which is widely used in mechanical engineering and other industrial sectors. The relevance of the study is determined by the need to enhance the operational characteristics of materials that are used under high loads and aggressive environments. The experiments conducted demonstrated that electrolytic-plasma treatment significantly increases hardness, reaching 600HV. As a result of surface layer modification, it was possible to improve the key mechanical properties of the material, confirming the effectiveness of the EPH method for extending the service life of parts and structures. Additionally, the study revealed improved corrosion resistance of 20GL steel, which is particularly important for its operation in aggressive chemical environments. The obtained data also indicate enhanced wear resistance, making the EPH method a promising solution for treating structural components that experience intensive friction and mechanical loads. Thus, elec-

Б.К. Рахадитов, Р.К. Кусаинов, Ж.Э. Бакыт, А.Б. Шынарбек, К.Д. Орманбеков, С.И. Буреи, Н.Е. Мусатаева, Н.Е. Кадырболат
trolytic-plasma hardening is an effective and technologically accessible method for improving the operational characteristics of structural steels. The development and implementation of this technology in automotive, construction, energy, and other industries will allow for increased durability and reliability of products, while reducing maintenance and repair costs. The promising nature of the EPH method makes it a relevant direction for further scientific research and industrial application.

Түйүн сөздөр: *электролиттик-плазмалык бекемдөө, 20ГЛ болот, катуулук, эскирүүгө туруктуулук, болоттун коррозияга туруктуулугу.*

Ключевые слова: *электролитно-плазменное упрочнение, сталь 20ГЛ, твердость, износостойкость, коррозионная стойкость стали.*

Keywords: *electrolytic plasma hardening, 20GL steel, hardness, wear resistance, corrosion resistance of steel.*

Введение: Одним из ключевых факторов, влияющих на востребованность проектируемой детали, является ее качество. Работоспособность и надежность обеспечиваются соблюдением таких основных требований, как прочность, жесткость и устойчивость к различным воздействиям (износ, вибрация, температура и т.д.). Выполнение требований прочности при статическом, циклическом и ударном нагружениях должно исключить возможность разрушения, а также возникновения недопустимых остаточных деформаций. Должна быть обеспечена износостойкость детали, которая существенно влияет на долговечность работы механизма. Требование по износостойкости можно удовлетворить не только путем конструкционных решений и применением новых высокопрочных материалов, но и за счет улучшения поверхностного слоя деталей машин. Существует ряд методов поверхностного упрочнения, которые классифицируются по принципу действия: механические, термические, химико-термические методы, методы с применением концентрированных источников энергии, диффузионное насыщение и другие.

Сталь 20ГЛ, применяемая для изготовления литых несущих деталей грузовых железнодорожных вагонов, сталкивается с рядом проблем, связанных с усталостной прочностью и хрупкостью. Эти детали работают при высоких нагрузках и в различных климатических условиях, что требует от материала высокой стойкости к уста-

лости и сопротивления хрупкому разрушению на протяжении всего срока службы. Повышенные требования к эксплуатационной надежности новых конструкций тележек требуют разработки новых подходов к обеспечению долговечности и устойчивости к усталостным трещинам литых сталей. Важнейшим фактором, определяющим живучесть конструкции, является способность материала сопротивляться распространению усталостных трещин, что особенно важно в зонах повышенной ответственности, где существуют структурные дефекты и концентрации напряжений. Механические испытания стали 20ГЛ в условиях циклического нагружения показали, что трещины развиваются с увеличением пластической зоны в их вершине. В диапазоне скоростей роста трещины $6 \cdot 10^{-8}$ - $1,5 \cdot 10^{-6}$ м/цикл сталь проявляет склонность к постепенному разрушению под воздействием усталостных нагрузок. Это подтверждает необходимость проведения дополнительных исследований и совершенствования технологий для повышения усталостной прочности и живучести литых несущих деталей, особенно с учетом высоких эксплуатационных нагрузок в современных вагонах.

Поверхностное термическое упрочнение стальных деталей является одним из наиболее эффективных и действенных способов увеличения ресурса работы нагруженных элементов машин и механизмов, а также снижения их материалоемкости. При этом упрочняют только наиболее нагруженную рабочую поверхность детали, оставляя нетронутой сердцевину. Данные технологии обеспечивают более высокие эксплуатационные свойства и качество упрочнения. Сегодня в промышленности для термической обработки ответственных и сильно нагруженных деталей широко применяются методы высокочастотной, газопламенной, плазменной, электроннолучевой и лазерной обработки.

Сталь 20ГЛ широко применяется для изготовления боковых рам тележек грузовых тележек, которые часто подвергаются механическим поломкам в силу неправильной обработкой перед эксплуатацией. Например, в исследовании, проведенном Чейляхом А. П. и Караваевой Н. Е., представлены результаты термической закалки стали 20ГЛ после процесса цементации, что привела к формирова-

Б.К. Рахадиллов, Р.К. Кусаинов, Ж.Э. Бакыт, А.Б. Шынарбек, К.Д. Орманбеков, С.И. Буреи, Н.Е. Мусатаева, Н.Е. Кадырболат

нию желаемой микроструктуры и улучшению механических свойств стали. В ходе исследования образцы подвергались цементации при температуре 930 °С, затем закалке в диапазоне от 780 до 1150 °С и низкому отпуску при 200 °С. Результаты показали, что наибольшая твердость верхнего слоя достигалась при закалке при 780 °С, тогда как при 1150 °С твердость была минимальной из-за увеличения содержания остаточного аустенита и уменьшения мартенсита. Наиболее высокая ударно-абразивная износостойкость наблюдалась после закалки при 780–880 °С. Авторы отмечают, что при нагреве до 1150 °С износостойкость снижалась, что связано с растворением карбидов и ростом зерна. После проведенной цементации и термообработки износостойкость стали 20ГЛ увеличилась более чем в 6 раз [1].

Также в работе Приуполина Д. В., Будруева А. В. приводятся результаты испытаний стали 20ГЛ после объемной поверхностной закалки (ОПЗ), которая оказалась предпочтительнее по сравнению с закалкой в воде и отпуску по ряду параметров. Было установлено, что после нормализации сталь имеет ферритно-перлитную структуру, а после закалки структура стали преобразовалась в мартенситоподобную с уменьшением размера зерен. Объемно-поверхностная закалка привела к формированию трооститоподобной структуры с более мелкими зернами в поверхностной зоне: от 0,4 до 3,8 мкм, при этом зерна увеличивались по мере приближения к центру образца. Изменение структуры напрямую повлияло на механические свойства. После ОПЗ сталь продемонстрировала более высокие значения твердости и предела текучести по сравнению с нормализацией, сохраняя при этом повышенное относительное удлинение, что свидетельствует о ее лучшей пластичности. Таким образом, объемно-поверхностная закалка стали 20ГЛ обеспечивает оптимальное сочетание твердости и пластичности, что делает данный метод предпочтительным для изготовления конструкций, подверженных динамическим нагрузкам, таких, как боковые рамы поездов [2].

В другой работе авторов А. П. Чейляха, Н. Е. Караваева дается описание сталей 20ГЛ после термической циклической закалки, что также привело к улучшению эксплуатационных характеристик. По-

сле двух циклов ВТЦО наблюдается аустенитно-мартенситная структура с микротвердостью поверхности около 4400 МПа. При увеличении числа циклов до 14 микротвердость на поверхности возрастает до 5500 МПа, а на глубине 1–1,5 мм — до 6500 МПа. Такая структура значительно повышает износостойкость стали: при сухом трении относительная износостойкость достигает 3, а при абразивном изнашивании — 2,5. Полученные улучшения авторы статьи объясняют измельчением микроструктуры, обогащением аустенита углеродом и самоупрочнением стали за счет превращения остаточного аустенита в мартенсит [3].

В настоящее время железные дороги нуждаются в решении проблемы эксплуатационного разрушения боковых рам тележек грузовых вагонов. Решение этой проблемы необходимо для обеспечения безопасности на сети железных дорог. За последние годы наблюдается статистика сходов на железной дороге, которые произошли в том числе из-за некачественных комплектующих. Наиболее тяжелая проблема на сегодняшний день остается низкое качество литых деталей тележек грузовых вагонов, выпускаемых вагоностроительными заводами. Все разрушенные боковые рамы тележек находились в эксплуатации не более двух-трех лет с момента изготовления при гарантированном заводами-изготовителями нормативном сроке службы 32 года. Поэтому отрасль железных дорог нуждается в усовершенствовании методов производства и эксплуатации используемой продукции.

При этом из всех существующих способов упрочнения по своим технико-экономическим показателям находит широкое и эффективное применение плазменное поверхностное упрочнение. Одним из разновидностей плазменного поверхностного упрочнения является электролитно-плазменное упрочнение (ЭПУ).

ЭПУ – это современный метод обработки металлов, при котором поверхность детали нагревается до высоких температур с помощью электрической дуги, горящей в электролите. Одновременно с нагревом происходит электролиз, что приводит к изменению химического состава поверхностного слоя металла.

Б.К. Рахадиллов, Р.К. Кусаинов, Ж.Э. Бакыт, А.Б. Шынарбек, К.Д. Орманбеков, С.И. Буреи, Н.Е. Мусатаева, Н.Е. Кадырболат

Такой комплексный подход позволяет существенно улучшить характеристики стали: повысить ее твердость, устойчивость к износу и коррозии. При этом технология ЭПУ отличается простотой и экологичностью, что делает ее привлекательной для широкого спектра применений [4, 5].

Методы исследования: Экспериментальные исследования и испытания проводились на базе Инжинирингового центра «Упрочняющие технологий и покрытия», Университета имени Шакарим города Семей, Казахстан. Объектом исследования была сталь 20ГЛ, образцы которой были изготовлены из проката путем нарезки размерами 20*20*15 мм с последующей шлифовкой и полировкой. ЭПУ проводилась на установке электролитно-плазменной обработки для четырех образцов. Параметры ЭПУ приведены в таблице 1. В качестве электролита использовался водный раствор карбоната натрия с концентрацией 20% для всех образцов.

Таблица 1 – Параметры ЭПУ

Образец	Фактическое напряжение, В	Сила тока, А	Время нагрева, с
№ 1	240	40	6
№ 2	240	40	8
№ 3	250	60	8
№ 4	250	60	10

Как видно из таблицы 1, для образцов № 1, № 2 прикладываемое напряжение составило – 240 В и для двух остальных образцов – 250 В. Время нагрева составляло от 6, 8 и 10 с для разных образцов.

Металлографический анализ был выполнен на микроскопе HL-102AW с цифровой камерой разрешением 3.0 МП и специализированным программным обеспечением от фирмы Altami. Для металлографического микроанализа образцов после их полировки пастой на основе диоксида хрома использовали 3%-й спиртовой раствор азотной кислоты в качестве травителя. Измерения микротвердости проводились на приборе по Виккерсу HV-1 DT при нагрузке на индентор 1 Н и времени выдержки 10 секунд в соответствии с ГОСТ 9450-76.

Для исследования микроструктуры и фазового состава стали 20 ГЛ после обработки методом ЭПУ использовалась сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) на приборе *TESCAN VEGA Compact*. Данный прибор позволяет детально изучить морфологические изменения поверхности материала, включая выявление характерных структурных элементов, фазовых включений и распределение легирующих элементов.

Результаты и обсуждения: Микроструктура стали 20ГЛ в исходном состоянии содержит перлитные и ферритные включения, которые видны из рисунка 1. На ней ферриты это светлые участки, а перлиты – темные участки, которые проявляются после травления в спиртовом растворе азотной кислоты.

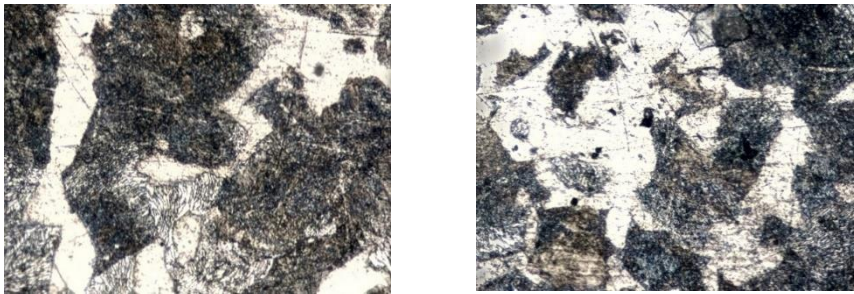


Рисунок 1 – Микроструктура стали 20ГЛ до закалки

В результате закалки, происходящей при быстром охлаждении из высокотемпературного состояния, аустенит преобразуется в мартенсит — метастабильную фазу с характерной мелкозернистой структурой. Мартенситные выделения формируются в виде тонких, вытянутых кристаллов, что способствует улучшению прочностных характеристик, стали. Эти выделения обладают высокой твердостью благодаря жесткой кристаллической решетке, что делает сталь более устойчивой к износу.

На представленных СЭМ-снимках на рисунке 2, полученных с поперечного среза образцов стали 20ГЛ после ЭПУ, можно наблюдать изменения в микроструктуре материала, связанные с воздействием температур. Сталь 20ГЛ содержит марганец, который оказывает влияние на процессы закалки, и его присутствие сказывается на

Б.К. Рахадиллов, Р.К. Кусаинов, Ж.Э. Бакыт, А.Б. Шынарбек, К.Д. Орманбеков, С.И. Буреи, Н.Е. Мусатаева, Н.Е. Кадырболат

формировании микроструктуры. Однако важно отметить, что марганец, наряду с положительным влиянием на прокаливаемость, может также приводить к неравномерности распределения твердости в материале, что видно на данных изображениях. Также на изображениях видно, что приповерхностные слои стали имеют более высокую плотность и мелкозернистую структуру, что связано с повышенной твердостью в этих областях. С увеличением глубины наблюдается снижение плотности и изменение структуры зерен, что коррелирует с неравномерным распределением твердости. Это указывает на то, что присутствие марганца в составе стали способствует как улучшению прокаливаемости, так и образованию участков с различными свойствами.

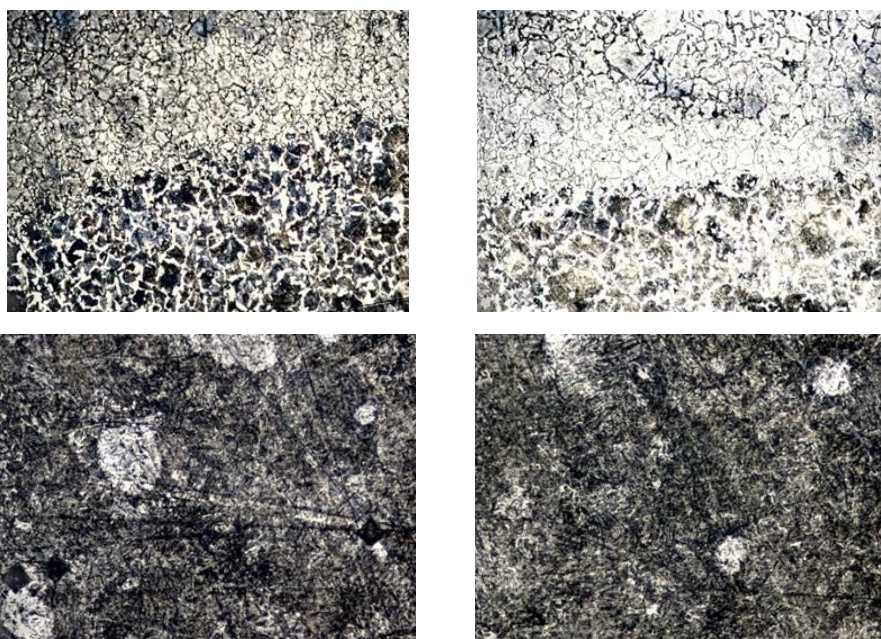


Рисунок 2 – Микроструктура поперечного среза закаленной стали 20ГЛ

На снимках отчетливо видна зона поверхностного упрочнения, где произошли значительные структурные изменения вследствие ЭПУ. Границы зерен хорошо выражены, однако именно в этих зо-

нах можно наблюдать резкие изменения микроструктуры, что указывает на неравномерное распределение тепла по объему.

Таким образом, СЭМ-снимки и данные микротвердости подтверждают влияние марганца на структуру стали 20ГЛ после ЭПУ. Несмотря на то, что марганец способствует повышению прокаливаемости и уменьшению склонности к росту зерен.

Образование мартенсита в стали 20 ГЛ после закалки приводит к значительному увеличению твердости, что позволяет использовать ее в ответственных конструкциях с высокими требованиями к износостойкости. Мартенситные структуры также способствуют повышению прочности на растяжение и усталостной прочности, что является критически важным для деталей, подвергающихся циклическим нагрузкам. Однако, несмотря на эти преимущества, следует учитывать, что повышенное содержание мартенсита может привести к снижению пластичности и ударной вязкости. Эти факторы необходимо учитывать при проектировании и выборе условий эксплуатации стали, чтобы обеспечить оптимальное сочетание механических свойств для конкретных применений.

Рисунок 3 показывает СЭМ-изображения микроструктуры стали 20ГЛ при увеличении 2000х. На данных изображениях можно наблюдать четко выраженные изменения в структуре материала, которые возникли в результате ЭПУ. Изображения демонстрируют характерные микроструктурные особенности поверхности стали на различных участках, что позволяет сделать выводы о фазовых и структурных превращениях.

На верхних снимках видно разделение на зоны с различной микроструктурой. Левая часть изображений показывает более равномерную, мелкозернистую структуру, которая характерна для поверхностных слоев после упрочнения. Правая часть содержит более крупные зерна, что свидетельствует о зоне, где процесс закалки был менее эффективен, находящейся дальше от приповерхностной зоны. На границе можно увидеть четкие различия в размере зерен, что указывает на переход между поверхностной и внутренней зонами закалки.

Б.К. Рахадиллов, Р.К. Кусаинов, Ж.Э. Бакыт, А.Б. Шынарбек, К.Д. Орманбеков, С.И. Буреи, Н.Е. Мусатаева, Н.Е. Кадырболат

Нижние снимки также демонстрируют неоднородную структуру стали. Можно наблюдать трещины и разрывы в структуре, которые могут быть следствием термических напряжений, возникших в процессе ЭПУ. Данные дефекты могут являться результатом неравномерного распределения твердости и изменений в фазовом составе стали. На изображениях видны зоны с более высокой плотностью и мелкозернистой структурой, что свидетельствует о высокой твердости этих участков. Справа видны крупнозернистые области с признаками сегрегации, что может быть результатом различий в охлаждении материала и изменении фазовых состояний.

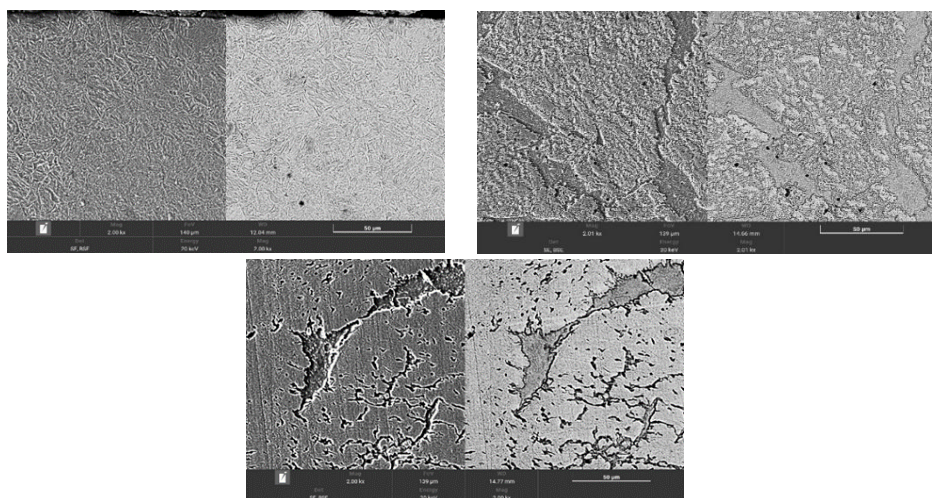


Рисунок 3 – СЭМ-изображения стали 20 ГЛ при увеличении 2000х

На рисунке 4, демонстрирующем изменение микротвердости стали 20ГЛ по глубине после ЭПУ, отчетливо видно, что твердость материала изменяется неравномерно в поперечном сечении. Это указывает на неоднородность закалки, что, вероятно, связано с влиянием марганца, присутствующего в составе стали, на распределение теплового потока и фазовые превращения в процессе упрочнения.

Марганец, входящий в состав стали 20ГЛ, улучшает прокаливаемость, но его действие не обеспечивает равномерное распределение твердости по всей глубине материала. Это приводит к флуктуа-

циям твердости в различных зонах, особенно в диапазоне 0,5–2,5 мм от поверхности, где наблюдаются резкие изменения. Данные колебания также могут быть результатом неравномерного распределения фаз, таких как мартенсит и феррит, которые образуются при охлаждении после обработки ЭПУ.

После применения ЭПУ происходит значительное увеличение микротвердости, особенно в приповерхностных слоях материала. Этот эффект обусловлен измельчением зерен, образованием карбидных фаз и упрочнением вследствие высоких температур, которые характерны для метода ЭПУ. Поверхностные слои стали подвергаются интенсивным термическим воздействиям, что приводит к изменениям в микроструктуре и значительно повышает ее износостойкость и сопротивляемость механическим нагрузкам.

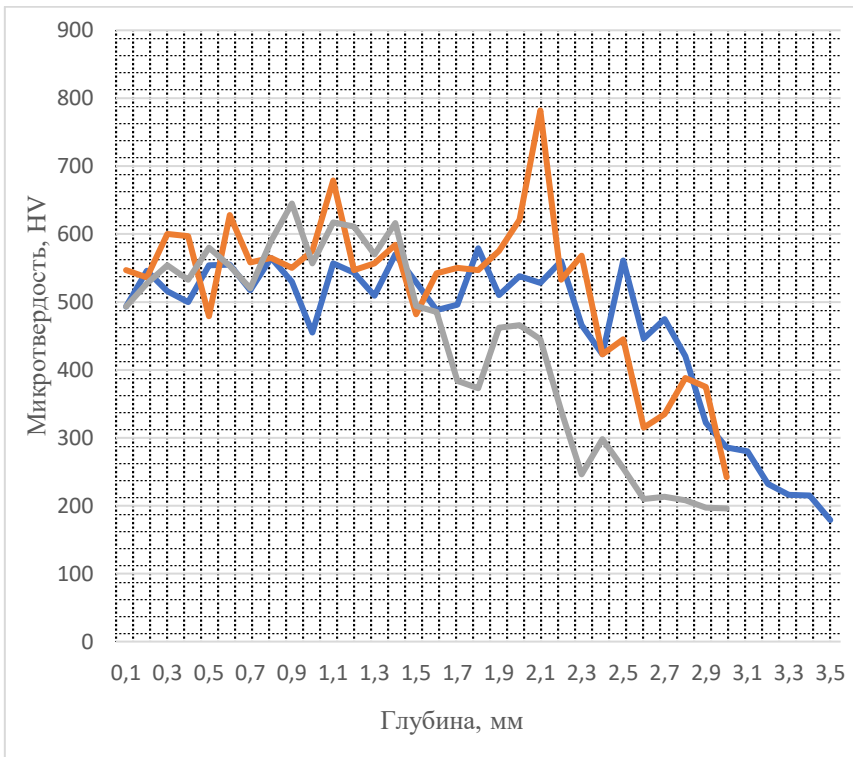


Рисунок 4 – Распределение микротвердости стали 20ГЛ после ЭПУ в поперечном срезе

Б.К. Рахадиллов, Р.К. Кусаинов, Ж.Э. Бакыт, А.Б. Шынарбек, К.Д. Орманбеков, С.И. Буреи, Н.Е. Мусатаева, Н.Е. Кадырболат

Сравнивая начальное и конечное состояние стали 20ГЛ, можно отметить, что после ЭПУ микротвердость увеличивается в 2,5–3 раза. Это свидетельствует о высокой эффективности данного метода упрочнения, благодаря которому сталь 20ГЛ становится значительно более пригодной для эксплуатации в условиях высоких механических нагрузок и интенсивного трения. Такой результат существенно расширяет ее возможности для использования в тяжело-нагруженных узлах и деталях оборудования, повышая их долговечность и надежность.

Выводы: Проведенное исследование показало высокую эффективность ЭПУ стали 20ГЛ с использованием карбоната натрия в качестве электролита. Обработка значительно улучшила микроструктуру и микротвердость. В результате закалки был сформирован упрочненный поверхностный слой, который обеспечил повышение микротвердости до 600 HV, что представляет собой увеличение в 2,5–3 раза по сравнению с исходными показателями.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что ЭПУ является перспективным и эффективным методом упрочнения стали 20ГЛ, позволяющим существенно повысить ее долговечность в условиях эксплуатации с высокими механическими и абразивными нагрузками. Учитывая вышесказанное, данный метод может быть рекомендован для применения в различных областях, включая производство деталей машин и механизмов, работающих в условиях высоких нагрузок и агрессивных сред. Эти результаты открывают возможности для дальнейшего применения и оптимизации технологии в промышленности, что позволит значительно повысить ресурс и надежность изделий, изготовленных из стали 20ГЛ.

Литература

1. Сатбаева З. А. Структурообразование в легированных сталях при электролитно-плазменном поверхностном упрочнении. – Диссертация на соискание степени доктора философии (Ph.D)). Усть-Каменогорск, 2022 г.
2. Кусаинов Р.К., Кадырболат Н.Е., Курмангалиев Р.Х., Орманбеков К.Д., Шынарбек А.Б. Применение электролитно-плазменного

- упрочнения для улучшения свойств деталей машины из стали 45. Вестник Университета Шакарима. – Серия технические науки. 2024; (3(15)). – С. 62–70.
3. Д. В. Приуполин, А. В. Будруев. Исследование влияния градиентной структуры в стали 20ГЛ на ее механические свойства. – С. 67–71. Д. Выксунский филиал НИТУ «МИСиС», г. Выкс; Сборник материалов VIII региональной межвузовской научно-практической конференции «Творчество молодых — родному региону».
 4. Чейлях, А. П., Караваева, Н. Е. Влияние режимов закалки на структуру и свойства цементованной стали 20ГЛ. III Международная научно-техническая конференция «Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве». 2011.
 5. Чейлях А. П., Караваева Н. Е. Влияние высокотемпературной термоциклической обработки на структуру и свойства цементованной стали 20ГЛ. Міжвузівський збірник "Наукові нотатки". – Луцьк, 2015. – Випуск № 50.
 6. Турсунов Н. К., Уразбаев Т. Т., Турсунов Т. М. Методика расчета комплексного раскисления стали марки 20ГЛ с алюминием и кальцием // *Universum: технические науки*. – 2022. – №. 2-2 (95). – С. 20–25.
 7. Куликов И., Ващенко С., Каменев А. Электролитно-плазменная обработка материалов. – Litres, 2022. – С. 191–219.
 8. Воленко А. П., Бойченко О. В., Чиркунова Н. В. Электролитно-плазменная обработка металлических материалов // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. – 2012. – №. 4. – С. 14–147.
 9. Погребняк А. Д. и др. Электролитно-плазменная обработка и нанесение покрытий на металлы и сплавы // *Успехи физики металлов*. – 2005.
 10. Турсунов Н. К., Семин А. Е., Санокулов Э. А. Исследование процессов дефосфорации и десульфурации при выплавке стали 20ГЛ в индукционной тигельной печи с дальнейшей обработкой в ковше с использованием редкоземельных металлов // *Черные металлы*. – 2017. – №. 1. – С. 33–40.
 11. Воленко А. П., Бойченко О. В., Чиркунова Н. В. Электролитно-плазменная обработка металлических материалов // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. – 2012. – №. 4. – С. 144–147.

Б.К. Рахадиллов, Р.К. Кусаинов, Ж.Э. Бакыт, А.Б. Шынарбек, К.Д. Орманбеков, С.И. Буреи, Н.Е. Мусатаева, Н.Е. Кадырболат

12. Погребняк А. Д., Каверина А. Ш., Кылышканов М. К. Электролитно-плазменная технология для нанесения покрытий и обработки металлов и сплавов // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2014. – Т. 50. – №. 1. – С. 72–88.
13. Тюрин Ю. Н. Особенности электролитно-плазменной закалки. – 1999.
14. Рахадиллов Б. К. и др. Структурное превращение в стали 20ГЛ после электролитно-плазменной поверхностной закалки // Вестник НЯЦ РК. – 2018. – №. 3. – С. 99–102.
15. Кенесбеков А. Б. и др. Влияние электролитно-плазменной закалки на трибологические свойства стали 40ХН // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. – 2018. – №. 4. – С. 144–151.
16. Токтарбаева Г. М. и др. Влияние электролитно-плазменного упрочнения поверхности на структуру и свойства стали 40ХН // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. Учредители: Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева. – 2020. – №. 1. – С. 199–204.
17. Комбаев К. К., Кылышканов М. К., Лопухов Ю. И. Влияние электролитно-плазменной обработки стали 18ХНЗМА-Ш на поверхностную микроструктуру и твердость // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2009. – Т. 2. – №. 4. – С. 394–399.
18. Рахадиллов Б. К. и др. Модификация поверхности стали 30ХГСА с применением электролитно-плазменного термоциклического упрочнения // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, Сварка. – 2022. – С. 610–616.
19. Погребняк А. Д. и др. Закалка и легирование стали в результате электролитно-плазменной обработки. – 2003. – С. 76–78.
20. Рахадиллов Б. К. и др. Изменение механических характеристик колесной стали после электролитно-плазменной поверхностной закалки // Актуальные проблемы прочности. – 2020. – С. 330–332.