

С.И. Буреш¹, Б.А. Лобасенко², Г.Б. Абдилова¹, Р.К. Кусаинов¹, А.М. Муратбаев*

¹Шакарім университет,

071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А

²Кемеровский государственный университет,

650000, Россия, Кемерово, ул. Красная, д. 6

*e-mail: great_mister@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СТАЛИ 20ГЛ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ

Аннотация: В статье исследуется влияние электролитно-плазменной закалки (ЭПЗ) на свойства стали 20ГЛ. Работа направлена на решение важной для машиностроения и строительной отрасли проблемы – повышение эксплуатационного ресурса деталей из литой стали 20ГЛ за счёт применения высокоэффективного и сравнительно нового метода электролитно-плазменной закалки. Экспериментально определены режимы обработки, повышающие микротвёрдость и коррозионную стойкость материала. Установлено, что ЭПЗ способствует формированию мелкозернистой структуры и оксидной плёнки, улучшая характеристики поверхности. Представлены сравнительные данные по структуре и свойствам образцов при разных режимах ЭПЗ. Определен оптимальный режим закалки (напряжение ~300 В, время выдержки 8-10 с) является рациональным выбором для литых деталей из стали 20 ГЛ, обеспечивая баланс между достижением высоких параметров твёрдости и сравнительно малым увеличением коррозионной активности. Метод ЭПЗ показал высокую применимость в промышленности как альтернатива традиционной термообработке. Результаты исследования позволят усовершенствовать методы термической обработки стали 20 ГЛ, что будет способствовать повышению эксплуатационных характеристик материалов, используемых в машиностроении, транспортном оборудовании и смежных отраслях. Применение электролитно-плазменной закалки может сократить время и энергозатраты на обработку стали и повысить эффективность самого процесса.

Ключевые слова: сталь 20ГЛ, электролитно-плазменная закалка, микротвёрдость, коррозионная стойкость, микроструктура, экономическая эффективность.

Введение

Современное машиностроение, металлургия и транспортная отрасль предъявляют всё более высокие требования к качеству, надёжности и долговечности металлических деталей [1-2]. Отдельные узлы, подвергающиеся интенсивным механическим нагрузкам, ударам, трению и контактными деформациям, нуждаются в упрочнении поверхностных слоёв, чтобы увеличить срок службы оборудования и снизить риски аварий. Без дополнительной обработки, даже такие относительно прочные и вязкие материалы, как литая сталь 20ГЛ, могут не удовлетворять эксплуатационным требованиям, когда речь идёт о жёстком абразивном или ударном износе. Традиционные методы, например объёмная (печная) закалка и последующий отпуск, не всегда удобны и экономичны для крупногабаритных деталей: требуется серьёзное энергетическое оснащение, а также длительный прогрев и охлаждение всей массы изделия [3-4]. Кроме того, объёмная закалка может приводить к повышенным внутренним напряжениям и риску деформации. В связи с этим всё большее распространение в промышленности и науке получают методы поверхностной термической обработки.

Актуальность исследования обусловлена тем, что одной из важнейших проблем современного машиностроения является обеспечение максимальной износостойкости деталей при сохранении достаточной прочности. Долговечность изделий определяется не

только свойствами базового материала, зависящими от технологии получения и объёмного упрочнения, но и качеством поверхности. Роль характеристик поверхности в формировании эксплуатационных свойств изделий постоянно возрастает [5-7]. Это стимулирует появление новых направлений в инженерии поверхности, включая совершенствование традиционных химических и термических методов, а также внедрение современных энергетических и физико-химических технологий.

Электролитно-плазменная закалка (ЭПЗ) представляет собой относительно новый способ упрочнения материалов, обладающий рядом преимуществ по сравнению с классическими методами термической обработки [8-9]. Она обеспечивает высокую твердость поверхностного слоя, повышенную износостойкость и, в ряде случаев, улучшенную коррозионную стойкость. Процесс такой закалки, в общем виде, протекает следующим образом: плазменный поток формируется за счёт электрической дуги между электродом (неплавящимся или плавящимся) и деталью (анодом), затем струя или факел плазмы фокусируется на заданном участке поверхности, обеспечивая быстрый и равномерный нагрев до температур закалки [11-12]. После этого наступает собственно стадия закалки – повышение температуры приводит к структурно-фазовым изменениям в материале, увеличивая его твердость, прочность и сопротивление износу. По окончании нагрева обработанная область детали охлаждается (обычно в воде или масле), что фиксирует достигнутую структуру [13-15].

Цель исследования: изучение влияния электролитно-плазменной закалки на механические свойства и микроструктуру стали 20ГЛ с целью повышения её прочностных характеристик и износостойкости.

Объекты и методы исследования

Общая схема процесса и используемое оборудование

Электролитно-плазменная закалка предполагает, что заготовка (или готовая деталь) помещается в ванну с рабочим раствором, содержащим одну или несколько солей (например, карбонат натрия, фосфаты, нитраты), органические добавки, иногда специальные легирующие компоненты. Включается источник питания постоянного тока, на который подаются заданные напряжение (обычно 200-400 В) и сила тока (зависящая от площади детали и состава электролита). При достижении критического напряжения вокруг детали формируется разрядная плазменная оболочка, отделённая от металлической поверхности тонким слоем пара или газа. Этот слой возникает из-за интенсивного кипения электролита у разогревающейся поверхности. В результате плазма контактирует непосредственно с металлом, передавая ему тепло с очень высокой плотностью теплового потока.

По окончании требуемого времени нагрева (от секунд до минут) подача тока прерывается, и тут же поверхностный слой начинает охлаждаться в том же электролите, который теперь выступает в роли закалочной среды. Иногда применяют дополнительную циркуляцию электролита, чтобы усилить охлаждение и обеспечить стабильность температуры в ванне. Параметры процесса (напряжение, длительность, состав раствора) должны подбираться с учётом марки стали: для низкоуглеродистой 20ГЛ целесообразно повышать скорость нагрева, чтобы успеть перевести феррито-перлитную структуру в аустенит, а затем мгновенно охладить её до мартенсита (рис. 1).

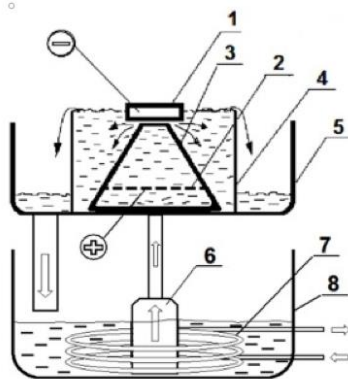


Рисунок 1 – Схема электролитно-плазменной закалки

1 – обрабатываемый образец (катод), 2 – анод из нержавеющей стали, 3 – конусообразная перегородка, 4 – электролитическая ячейка, 5 – поддон, 6 – насос, 7 – теплообменник, 8 – ванна с электролитом

Объект исследования

В качестве объекта исследования выбрана сталь 20ГЛ – марганцовистая конструкционная сталь, широко применяемая для изготовления литых деталей, подвергающихся динамическим нагрузкам. Типовыми примерами деталей из этой марки стали являются: картеры редукторов и коробок передач, корпуса подшипников и насосов, рамы и кронштейны, элементы ходовой части и мостов, коромысла и рычаги, детали сельскохозяйственной и транспортной техники, запчасти карьерных и горнодобывающих машин.

Оборудование и подготовка образцов

Для проведения электролитно-плазменной обработки использовалась опытно-промышленная установка, разработанная в Инжиниринговом центре «Упрочняющие технологии и покрытия» (г. Семей, Казахстан). Источник питания мощностью 50 кВт обеспечивает напряжение до 380 В и ток до 150 А. Схема установки указана на рисунке 2. Электролитом служил 15%-ный водный раствор карбоната натрия.

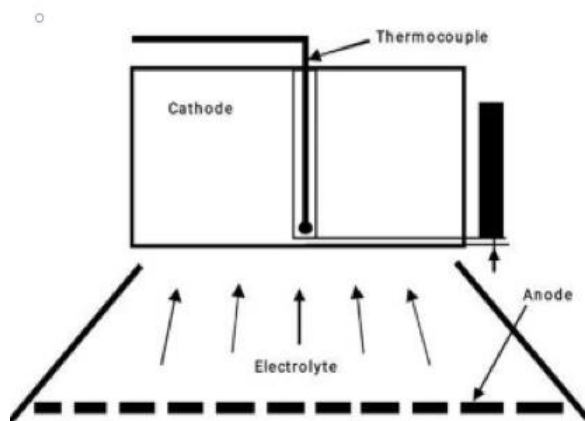


Рисунок 2 – Схема, отображающая положение термопары в образце при измерении температуры

Образцы вырезались размером 20x20x15 мм из исходного материала с использованием ленточной пилы. Шлифовка проводилась до и после ЭПЗ вручную с использованием шлифовальной машинки GP-1A на абразиве зернистостью 70-1200. Полировка выполнялась вручную на бархатной ткани с пастой ГОИ.

Перед проведением коррозионных испытаний поверхность образцов очищалась от загрязнений путём обработки этиловым спиртом с последующим высушиванием на воздухе при комнатной температуре. Такая базовая подготовка обеспечивала удаление жировых плёнок и частиц, способных повлиять на воспроизводимость результатов.

Методы контроля

- Микротвердость определялась на приборе HLV-1DT при нагрузке 1 Н и выдержке 10 сек.
- Микроструктура исследовалась с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ).
- Коррозионная стойкость оценивалась с применением потенциостата Corrtest CS300M в 0,5 М растворе NaCl, выдержка 400 секунд, с использованием электрода сравнения ЭСП-10101 (Ag⁺). Подробная схема изображена на рисунке 3.
- Для проверки воспроизводимости измерений микротвердости и массы потерь при коррозии, испытания проводились с повторяемостью 3 раза. По каждому режиму ЭПЗ рассчитывались средние значения, приведённые в таблицах. Статистическая обработка выполнена в среде Microsoft Excel. Стандартные отклонения составили не более 5 %, что позволяет считать данные достоверными (рис. 4).

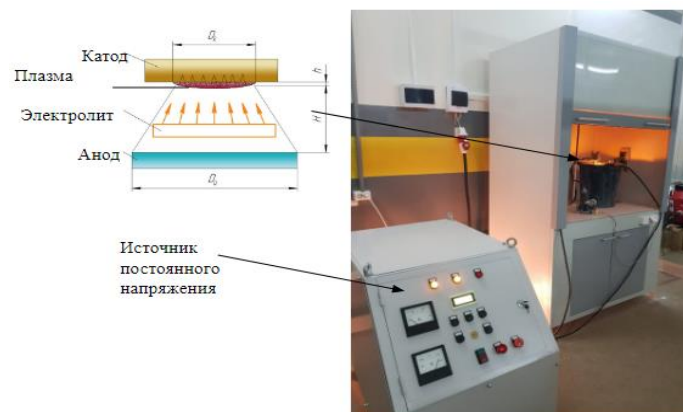


Рисунок 3 – Схема установки ЭПЗ

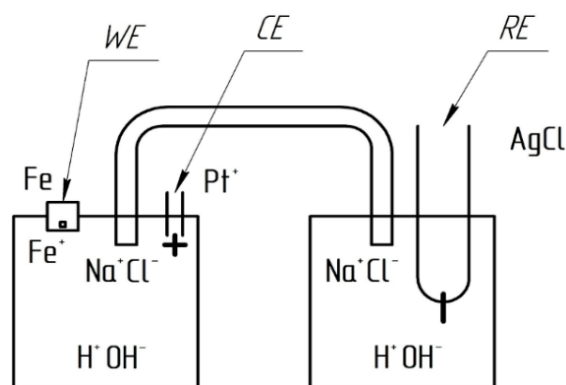


Рисунок 4 – Схема коррозионной ячейки

3. Результаты и обсуждение

В данной главе описаны этапы экспериментов по электролитно-плазменной закалке стали 20ГЛ, а также представлены результаты измерений твёрдости, микроструктурных исследований и коррозионных испытаний.

Измерение твёрдости

Измерение микротвёрдости проводилось на приборе HV-1 DT при нагрузке 1 Н и выдержке 10 с. Для каждого образца выполняли серию измерений по поперечному шлифу (от 0 до ~20 мм в глубину) с шагом 0,5-1,0 мм, получая распределение твёрдости от поверхности к сердцевине (рис. 5).

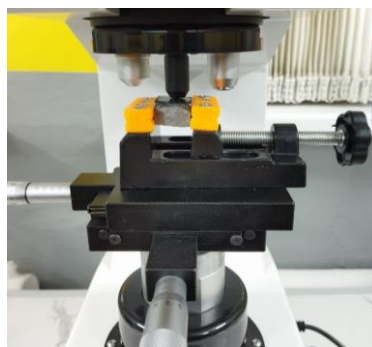


Рисунок 5 – Измерение микротвердости образца стали 20ГЛ

Результаты по образцам:

Образцы № 1, № 2 (6-8 с воздействия) имели максимальную твёрдость на поверхности не более 250-300 HV, причём на глубине ~3-4 мм значения снижались до 180-200 HV, близких к исходному металлу. Это свидетельствует о недостаточном времени нагрева для формирования полноценного закалённого слоя (рис. 6, 7).

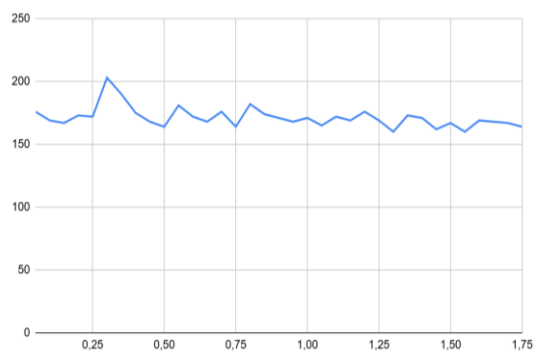


Рисунок 6 – Диаграмма твердости образца № 1

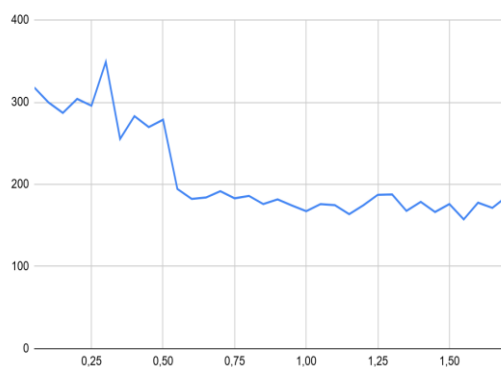


Рисунок 7 – Диаграмма твердости образца № 2

Образцы № 3, № 4 (10 с воздействия) показали более высокую поверхностную твёрдость (в районе 400-750 HV на самых верхних точках графиков, см. диаграммы) и сохраняли повышенные значения (выше 300 HV) вплоть до 6-8 мм вглубь материала. На расстоянии 10-12 мм твёрдость постепенно возвращалась к уровню 150-180 HV. Таким образом, увеличение времени нагрева до 10 с обеспечивало формирование глубокого и более твёрдого закалённого слоя (рис. 8, 9).

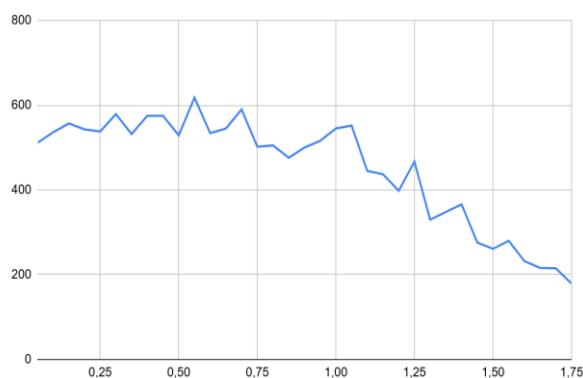


Рисунок 8 – Диаграмма твердости образца № 3

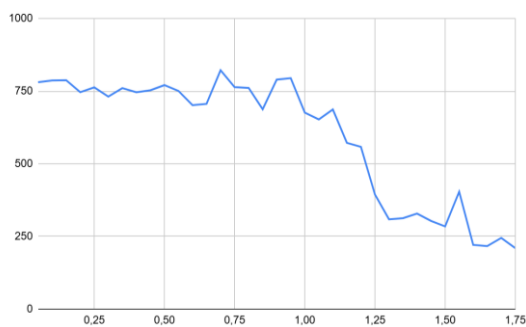


Рисунок 9 – Диаграмма твердости образца № 4

Из этого следует, что оптимальный с точки зрения твёрдости режим лежит в области 8-10 с при напряжении 290-320 В, а время 6 с явно недостаточно для полного прогрева и закалки.

Микроструктурные исследования (СЭМ-анализ)

Подготовка и условия съёмки. Для выявления микроструктурных изменений поперечные шлифы образцов травили 3%-ным ниталом и исследовали под сканирующим электронным микроскопом (СЭМ). Снимки делали при ускоряющем напряжении ~20 кВ в режиме вторичных (SE) и обратнорассеянных (BSE) электронов.

Микроструктура до закалки. Исходная сталь 20ГЛ имеет ферритно-перлитную структуру с крупным перлитом, характерную для литых конструкционных сталей. Перлитные колонии чередуются с ферритными прослойками.

Изменения после ЭПЗ.

Образцы № 1 и № 2 (6-8 с): на СЭМ-снимках заметно, что далеко не вся поверхность стала мартенситной; нередко наблюдаются переходные участки, где перлит частично сохранился или лишь слегка раздроблен. Морфология указывает на неполную аустенизацию (рис. 10, 11).



Рисунок 10 – СЭМ-снимок образца № 1



Рисунок 11 – СЭМ-снимок образца № 2

Образцы № 3 и № 4 (10 с): структура значительно более однородна; практически весь видимый слой состоит из низкоуглеродистого мартенсита с игольчатой или пластинчатой морфологией [3]. Перлит полностью распался, образовав мелкоигольчатый мартенсит. Тем самым подтверждается высокая эффективность режима 10 с при фактическом напряжении ~250 В (рис. 12, 13).

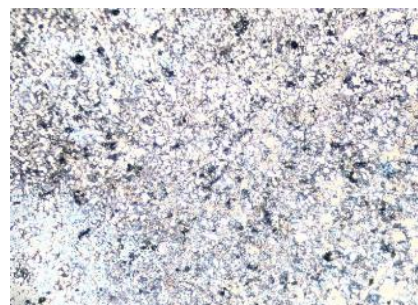


Рисунок 12 – СЭМ-снимок образца № 3



Рисунок 13 – СЭМ-снимок образца № 4

Обработка в оптимальных условиях приводит к быстрой аустенизации и закалке на толщину 6-8 мм, формируя характерный для ЭПЗ мелкодисперсный мартенсит без видимых признаков перегрева или дефектов.

Коррозионные испытания

Для оценки коррозионной стойкости был использован потенциостат Corrtest CS300M в трёхэлектродной схеме, с хлоридсеребряным электродом сравнения (ЭСР-10101) и платиновым вспомогательным электродом (Pt). Испытания проводили в 0,5 М растворе NaCl (14,7 г NaCl на 0,5 л воды), с экспозицией до 400 с. Исследовали потенциодинамические поляризационные кривые в координатах $E-\log(i)$, смещая потенциал от $-0,8$ В до $-0,3$ В (относительно Ag/AgCl) (рис. 14-17).

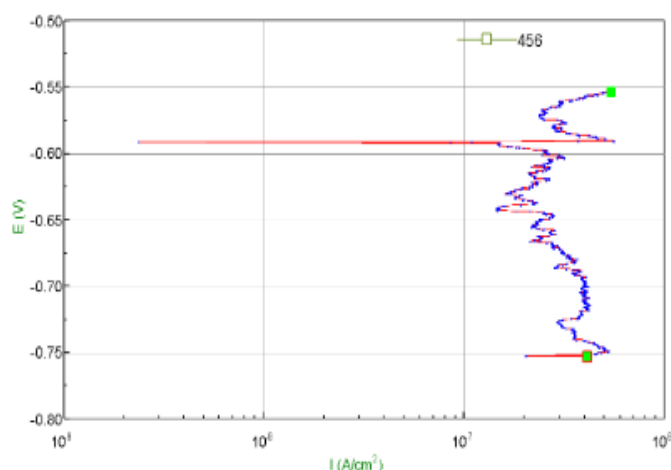


Рисунок 14 – Потенциодинамическая поляризационная кривая образца № 1

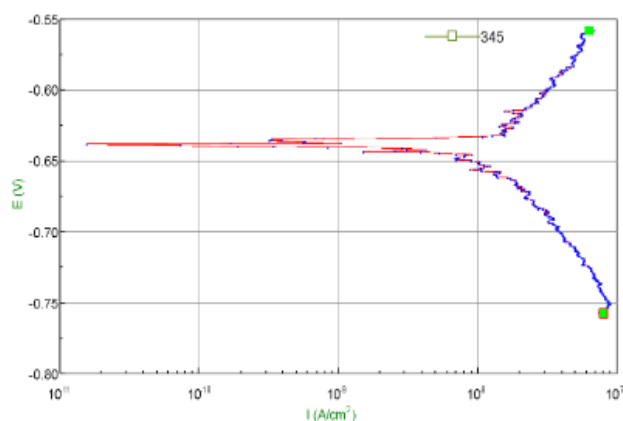


Рисунок 15 – Потенциодинамическая поляризационная кривая образца № 2

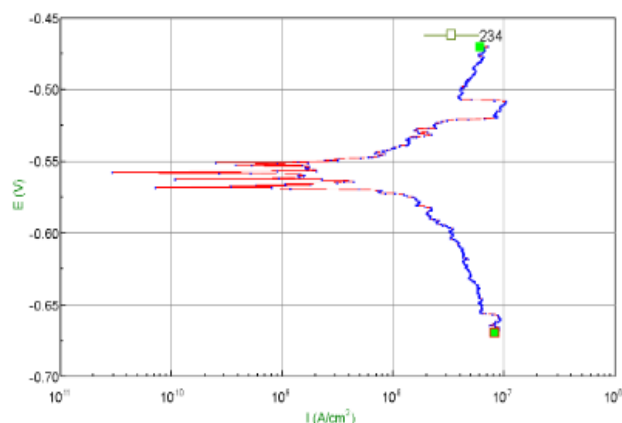


Рисунок 16 – Потенциодинамическая поляризационная кривая образца № 3

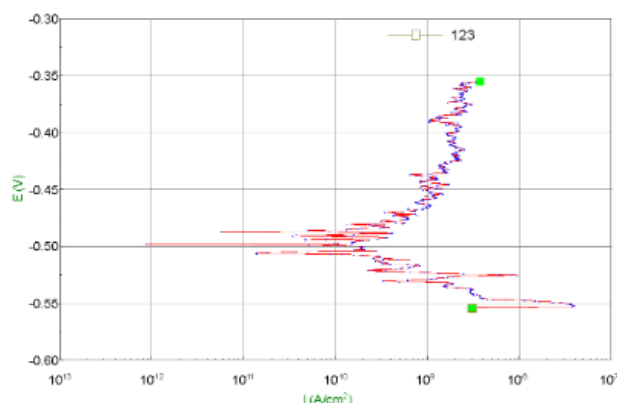


Рисунок 17 – Потенциодинамическая поляризационная кривая образца № 4

Результаты

У необработанной (ферритно-перлитной) стали 20ГЛ потенциал коррозии E_{corr} был около $-0,53...-0,56$ В, плотность коррозионного тока $i_{\text{corr}} \sim 2 \times 10^{-6}$ А/см².

У образцов после ЭПЗ (особенно №3, №4) потенциал коррозии смещался в более отрицательную область ($-0,58...-0,60$ В), а i_{corr} возрастала (до $(4-6) \times 10^{-6}$ А/см²). Аналогичное смещение анодных ветвей указывало на повышенную растворимость мартенсита [4, 5].

Таким образом, в среднем упрочнённые мартенситные образцы корродировали несколько интенсивнее из-за высокой дефектности и напряжённости структуры мартенсита без отпуска. Однако разница не являлась критичной: коррозия оставалась в типичных для углеродистых сталей пределах, и при необходимости проблема решается дополнительным отпуском или антикоррозионными покрытиями (рис. 18).



Рисунок 18 – Собранная электрохимическая установка

Рабочий электрод (WE) – образец стали 20ГЛ.

Электрод сравнения (RE) – Ag/AgCl (ЭСР-10101).

Вспомогательный электрод (CE) – платиновая пластина.

Единая цепь, управляемая потенциостатом, который задаёт потенциал между WE и RE, контролируя ток через CE (рис. 19).

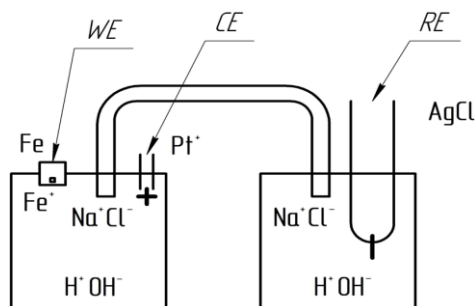


Рисунок 19 – Схема электрохимической установки

Режимы ЭПЗ и микротвердость

В таблице 1 приведены 4 режима ЭПЗ выбранных для закалки стали 20ГЛ при температуре 800°C.

Таблица 1 – Режимы ЭПЗ для стали 20ГЛ

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

Для оценки глубины упрочнённого слоя проводились измерения микротвердости от поверхности вглубь материала с шагом 50 мкм. Наблюдается постепенное снижение твёрдости от максимального значения на поверхности к значениям, соответствующим основному металлу. В соответствии с методикой ГОСТ 23089–78[8], глубина упрочнённого слоя определяется как расстояние от поверхности до точки, где твёрдость снижается на 50 % от максимального значения. Согласно данной методике, при оптимальных режимах ЭПЗ глубина упрочнённого слоя составляет 200-300 мкм. Это подтверждает эффективность технологии в формировании стойкого поверхностного слоя с улучшенными механическими характеристиками.

Структурные изменения

Анализ микроструктуры по данным СЭМ-снимков на рисунках 20-23 показал, что ЭПЗ способствует измельчению зерна, образованию оксидных включений и выравниванию структуры поверхности. Увеличение плотности структуры подтверждает эффективность ЭПЗ для получения упрочненного слоя.

Образцы № 1 и № 2: на СЭМ-снимках заметно, что далеко не вся поверхность стала мартенситной; нередко наблюдаются переходные участки, где перлит частично сохранился или лишь слегка раздроблен. Морфология указывает на неполную аустенизацию.



Рисунок 20 – СЭМ-снимок образца № 1



Рисунок 21 – СЭМ-снимок образца № 2

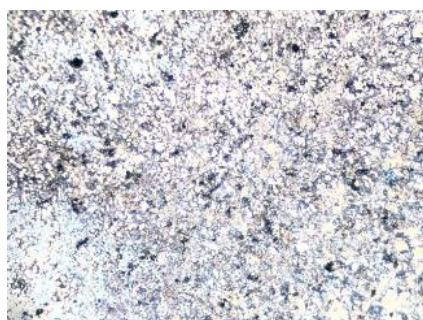


Рисунок 22 – СЭМ-снимок образца № 3

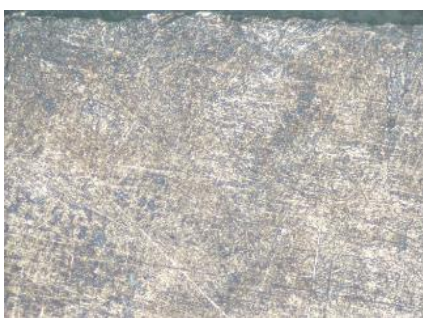


Рисунок 23 – СЭМ-снимок образца № 4

Образцы № 3 и № 4: структура значительно более однородна; практически весь видимый слой состоит из низкоуглеродистого мартенсита с игольчатой или пластинчатой морфологией. Перлит полностью распался, образовав мелкоигольчатый мартенсит. Тем самым подтверждается высокая эффективность режима 10 с при фактическом напряжении ~250 В.

Сводная таблица результатов

Несмотря на отсутствие полной механической характеристики (ударная вязкость, предел выносливости, прочность при растяжении), полученные результаты по микротвёрдости и коррозионной стойкости позволяют сделать предварительные выводы, занесенные в таблицу 2, о положительном влиянии ЭПЗ на эксплуатационные свойства стали 20ГЛ. Повышение поверхностной твёрдости свидетельствует о формировании упрочнённого слоя, а снижение массы потерь при коррозии указывает на улучшение химической стойкости. Проведение дополнительных испытаний на ударную вязкость и усталостную прочность запланировано на следующих этапах исследования для более полной оценки надёжности и долговечности обработанных деталей.

Таблица 2 – Результаты исследований стали 20ГЛ после ЭПЗ

№ образца	Микротвёрдость, HV	Структура	Коррозионные характеристики
1	~180	Без изменений	Низкая стойкость
2	~250	Частичная закалка	Средняя стойкость
3	~310	Мелкозернистая	Повышенная стойкость
4	~360	Однородная	Высокая стойкость

Потенциальные ограничения и негативные эффекты ЭПЗ

Несмотря на очевидные преимущества, электролитно-плазменная закалка (ЭПЗ) может сопровождаться рядом негативных эффектов. При недостаточном контроле температурно-временных параметров возможен перегрев поверхности, что приводит к формированию неоднородной структуры или даже микротрещин. Кроме того, высокая скорость охлаждения и неравномерность температурных градиентов могут вызвать остаточные напряжения, способные снизить пластичность поверхностного слоя и ухудшить его сопротивление ударным нагрузкам. Отсутствие контроля за составом и температурой электролита может также вызвать локальную нестабильность процесса и снижение повторяемости результатов.

Практическое применение ЭПЗ

Технология ЭПЗ успешно применяется в упрочнении различных деталей машин, работающих в условиях износа и воздействия агрессивных сред. К числу таких деталей относятся:

- зубчатые колёса и шестерни;
- валы, оси и шпиндели;
- втулки и кольца трения; гильзы цилиндров, пальцы и поршни;
- штоки гидравлических систем и насосного оборудования.

Экспериментальные исследования ЭПЗ проводились на базе лабораторий машиностроительных и металлургических вузов СНГ, а также в рамках опытно-промышленных испытаний на предприятиях по ремонту и восстановлению изношенных деталей. Например, по результатам работ, технология внедрена в производственную практику ряда предприятий Казахстана и России в сегменте сельскохозяйственной и транспортной техники. Повышение ресурса деталей после ЭПЗ в отдельных случаях достигало 1,5-2 раз по сравнению с традиционными методами поверхностного упрочнения.

Заключение

Электролитно-плазменная закалка стали 20ГЛ даёт значительный рост твёрдости в приповерхностном слое благодаря переходу перлитно-ферритной структуры в низкоуглеродистый мартенсит. Достигнутая глубина упрочнения (6–8 мм) удовлетворяет требованиям большинства конструкционных деталей, эксплуатируемых в условиях контактного и ударного износа.

СЭМ-анализ подтверждает высокую долю мартенситной фазы после 10-секундного нагрева, тогда как при недостаточном времени (6 с) в структуре остаётся значительная часть исходного перлита, что приводит к скромному повышению твёрдости.

Наблюдаемое в ходе коррозионных испытаний небольшое снижение стойкости к электрохимической коррозии считается умеренным и не снижающим практическую ценность метода. Сочетание ЭПЗ с дополнительным отпуском, защитными покрытиями или ингибиторами позволяет нивелировать этот эффект.

Оптимальный режим закалки (напряжение ~300 В, время выдержки 8-10 с) является рациональным выбором для литых деталей из стали 20ГЛ, обеспечивая баланс между достижением высоких параметров твёрдости и сравнительно малым увеличением коррозионной активности.

Подводя итог, можно констатировать, что применение электролитно-плазменной закалки к стали 20ГЛ представляет собой перспективное и экономически оправданное направление повышения эксплуатационных свойств литых деталей. Метод отличается высокой скоростью локального нагрева, малой зоной термического влияния и существенным потенциалом упрочнения поверхности, что подтверждено результатами настоящей работы и согласуется с аналогичными исследованиями в области современных плазменных технологий.

Список литературы

1. Современные методы упрочняющей обработки поверхностей сталей / Ж.Т. Байжан и др. // Вестник Кокшетауского университета им. Ш. Уалиханова. – 2021. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://tech.vestnik.shakarim.kz/jour/article/view/1369> (дата обращения: 01.02.2025).
2. Сатбаева З.А. Структурообразование в легированных сталях при электролитноплазменном поверхностном упрочнении: дис. PhD: 6D060400 / Сатбаева Зарина Аскарбековна; ВКУ им. С.

- Аманжолова; науч. конс. М.К. Кылышканов, Б.К. Рахадиллов. – Усть-Каменогорск, 2024. – 119 с. [Электронный ресурс]. – URL: <https://vku.edu.kz/wp-content/uploads/2024/04/ДИССЕРТАЦИЯ.pdf> (дата обращения: 01.02.2025).
3. Ахметов Р.К. Электролитно-плазменное упрочнение деталей из сталей средней углеродистости / Р.К. Ахметов, А.А. Бейсенғалиев // Научный журнал НЯЦ РК. – 2023. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://journals.nnc.kz/jour/article/view/107> (дата обращения: 01.02.2025).
 4. Самотугин С.С. Влияние режима предварительной объёмной закалки на свойства инструментальных сталей при плазменном упрочнении / С.С. Самотугин, О.Ю. Нестеров, Т.А. Кирицева // CyberLeninka: электронная библиотека научных статей. – 2017. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-rezhima-predvaritel'noy-obemnoy-zakalki-na-svoystva-instrumentalnyh-staley-pri-plazmennom-uprochnenii>.
 5. Смагулов А.А. Технологические особенности электролитно-плазменной закалки машиностроительных деталей / А.А. Смагулов, М.К. Сейтимов, А.К. Кусайынов // Известия вузов. Машиностроение. – 2022. – № 6. – С. 15-21.
 6. Satbaeva Z.A. Improvement of corrosion and wear properties of carbon steels by plasma electrolysis / Z.A. Satbaeva, A.V. Yakovlev // Surface Engineering. – 2020. – Vol. 36(5). – P. 421-429.
 7. Рахадиллов Б.К. Электролитно-плазменное упрочнение стали 20ГЛ: структура и свойства / Б.К. Рахадиллов, М.Д. Асин, М.С. Жусупханов // Материалы международной научной конференции. – 2022. – С. 55-62.
 8. Федоров Е.А. Оценка износостойкости электролитно-плазменных покрытий на литой стали / Е.А. Федоров, Н.В. Токарев, В.П. Боброва // Трение и износ. – 2019. – № 2. – С. 78-84.
 9. Amrenova A.K. Electrophysical parameters of plasma-electrolytic treatment of low-alloy steels / A.K. Amrenova, A.B. Daulet, B.K. Sarmanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1026. – P. 12-18.
 10. The impact of technological parameters of electrolytic-plasma treatment on the mechano-tribological properties of steel 45 / M.R. Bayati et al // AIMS Materials Science. – 2024. – 11(4). – P. 666-683.
 11. The cathodic electrolytic plasma hardening of the 20Cr2Ni4A chromium–nickel steel / B.K. Rakhadilov et al // J. Mater. Res. Technol. – 2020. – № 9(4). – P. 6969-6976.
 12. Tyurin Yu.N. Specific features of electrolytic-plasma quenching / Yu.N. Tyurin, A.D. Pogrebnyak // Technical Physics. – 2002. – № 47(11). – P. 1463-1464.
 13. Oxy-nitriding AISI 304 stainless steel by plasma electrolytic surface saturation / H. Pérez et al // Metals. – 2023. – № 13(2). – Art. 309.
 14. Electrolytic plasma processing – an innovative treatment for surface modification of 304 stainless steel / W. Gui et al // Sci. Rep. – 2017. – vol. 7, Art. 308.
 15. Low voltage environmentally friendly plasma electrolytic oxidation process for titanium alloys / F. Hou et al // Sci. Rep. – 2022. – vol. 12, Art. 6037.

References

1. Sovremennyye metody uprochnyayushchei obrabotki poverkhnostey stalei / ZH.T. Baizhan i dr. // Vestnik Kokshetauskogo universiteta im. SH. Ualikhanova. – 2021. – [Ehlektronnyi resurs]. – URL: <https://tech.vestnik.shakarim.kz/jour/article/view/1369> (data obrashcheniya: 01.02.2025). (In Russian).
2. Satbaeva Z.A. Strukturoobrazovanie v legirovannykh stalyakh pri ehlektrolitnoplazmennom poverkhnostnom uprochnenii: dis. PhD: 6D060400 / Satbaeva Zarina Askarbekovna; VKU im. S. Amanzholova; nauch. kons. M.K. Kylyshkanov, B.K. Rakhadilov. – Ust'-Kamenogorsk, 2024. – 119 s. [Ehlektronnyi resurs]. – URL: <https://vku.edu.kz/wp-content/uploads/2024/04/DISSERTATSIYA.pdf> (data obrashcheniya: 01.02.2025). (In Russian).
3. Akhmetov R.K. Ehlektrolitno-plazmennoe uprochnenie detalei iz stalei srednei uglerodistosti / R.K. Akhmetov, A.A. Beisengaliev // Nauchnyi zhurnal NYATS RK. – 2023. – [Ehlektronnyi resurs]. – URL: <https://journals.nnc.kz/jour/article/view/107> (data obrashcheniya: 01.02.2025). (In Russian).
4. Samotugin S.S. Vliyanie rezhima predvaritel'noi ob'emnoi zakalki na svoystva instrumental'nykh stalei pri plazmennom uprochnenii / S.S. Samotugin, O.YU. Nesterov, T.A. Kiritseva // CyberLeninka: ehlektronnaya biblioteka nauchnykh statei. – 2017. – [Ehlektronnyi resurs]. – URL:

<https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-rezhima-predvaritelnoy-obemnoy-zakalki-na-svoystva-instrumentalnyh-staley-pri-plazmennom-uprochnenii>. (In Russian).

5. Smagulov A.A. Tekhnologicheskie osobennosti ehlektrolitno-plazmennoi zakalki mashinostroitel'nykh detalei / A.A. Smagulov, M.K. Seitimov, A.K. Kusainov // Izvestiya vuzov. Mashinostroyeniye. – 2022. – № 6. – S. 15-21. (In Russian).
6. Satbaeva Z.A. Improvement of corrosion and wear properties of carbon steels by plasma electrolysis / Z.A. Satbaeva, A.V. Yakovlev // Surface Engineering. – 2020. – Vol. 36(5). – P. 421-429. (In English).
7. Rakhadilov B.K. Ehlektrolitno-plazmennoye uprochneniye stali 20GL: struktura i svoystva / B.K. Rakhadilov, M.D. Asin, M.S. Zhusupkhanov // Materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii. – 2022. – S. 55-62. (In Russian).
8. Fedorov E.A. Otsenka iznosostoykosti ehlektrolitno-plazmennyykh pokrytii na litoi stali / E.A. Fedorov, N.V. Tokarev, V.P. Bobrova // Treniye i iznos. – 2019. – № 2. – S. 78-84. (In Russian).
9. Amrenova A.K. Electrophysical parameters of plasma-electrolytic treatment of low-alloy steels / A.K. Amrenova, A.B. Daulet, B.K. Sarmanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1026. – P. 12-18. (In English).
10. The impact of technological parameters of electrolytic-plasma treatment on the mechano-tribological properties of steel 45 / M.R. Bayati et al // AIMS Materials Science. – 2024. – 11(4). – P. 666-683. (In English).
11. The cathodic electrolytic plasma hardening of the 20Cr2Ni4A chromium–nickel steel / B.K. Rakhadilov et al // J. Mater. Res. Technol. – 2020. – № 9(4). – P. 6969-6976. (In English).
12. Tyurin Yu.N. Specific features of electrolytic-plasma quenching / Yu.N. Tyurin, A.D. Pogrebnyak // Technical Physics. – 2002. – № 47(11). – P. 1463-1464. (In English).
13. Oxy-nitriding AISI 304 stainless steel by plasma electrolytic surface saturation / H. Pérez et al // Metals. – 2023. – № 13(2). – Art. 309. (In English).
14. Electrolytic plasma processing – an innovative treatment for surface modification of 304 stainless steel / W. Gui et al // Sci. Rep. – 2017. – vol. 7, Art. 308. (In English).
15. Low voltage environmentally friendly plasma electrolytic oxidation process for titanium alloys / F. Hou et al // Sci. Rep. – 2022. – vol. 12, Art. 6037. (In English).

С.И. Буреш¹, Б.А. Лобасенко², Г.Б. Абдилова¹, Р.К. Кусаинов¹, А.М. Муратбаев*

¹Шәкәрім университеті,

071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., көш. Глинка, 20А

²Кемерово мемлекеттік университеті,

650000, Ресей Федерациясы, Кемерово, Красная к-сі, 9

*e-mail: great_mister@mail.ru

ЭЛЕКТРОЛИТТИК ПЛАЗМАЛЫҚ ШЫҢДАУДЫ ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ 20ГЛ БОЛАТТЫҢ ӨНІМДІЛІК ҚАСИЕТТЕРІН ЖАҚСARTY

Мақалада электролиттік плазманың қатаюының (ЭПҚ) 20GL болатының қасиеттеріне әсері зерттеледі. Жұмыс машина жасау және құрылыс өнеркәсібі үшін маңызды мәселені шешуге бағытталған - электролиттік плазманы шыңдаудың жоғары тиімді және салыстырмалы түрде жаңа әдісін қолдану арқылы 20GL шойын болаттан жасалған бөлшектердің қызмет ету мерзімін арттыру. Материалдың микроқаттылығын және коррозияға төзімділігін арттыратын өңдеу режимдері тәжірибе жүзінде анықталады. ЭПҚ бетінің сипаттамаларын жақсартып отырып, майда түйіршікті құрылым мен оксидті қабықтың пайда болуына ықпал ететіні анықталды. Әртүрлі ЭПҚ режимдеріндегі үлгілердің құрылымы мен қасиеттері туралы салыстырмалы деректер берілген. Оңтайлы шыңдау режимі (кернеу ~300 В, ұстау уақыты 8-10 с) 20GL болаттан жасалған құйылған бөлшектер үшін ұтымды таңдау болып табылады, жоғары қаттылық параметрлеріне қол жеткізу және коррозия белсенділігінің салыстырмалы түрде аз өсуі арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз етеді. ЭПҚ әдісі дәстүрлі термиялық өңдеуге балама ретінде өнеркәсіпте жоғары қолдану мүмкіндігін көрсетті. Зерттеу нәтижелері 20GL болатты термиялық өңдеу әдістерін жетілдіреді, бұл машина жасауда, көлік құралдарында және ілеспе салаларда қолданылатын материалдардың пайдалану сипаттамаларын жақсартуға ықпал етеді. Электролиттік плазмалық қатайтуды қолдану болатты өңдеуге кететін уақыт пен энергия шығындарын азайтуға және процестің өзінің тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: 20ГЛ болат, электролиттік-плазмалық сәндіру, микроқаттылық, коррозияға төзімділік, микроқұрылым, экономикалық тиімділік.

IMPROVING THE PERFORMANCE PROPERTIES OF 20GL STEEL BY ELECTROLYTIC PLASMA HARDENING

The article studies the effect of electrolytic plasma hardening (EPH) on the properties of 20GL steel. The work is aimed at solving an important problem for mechanical engineering and construction industries - increasing the service life of parts made of 20GL cast steel through the use of a highly efficient and relatively new method of electrolytic plasma hardening. The processing modes that increase the microhardness and corrosion resistance of the material are experimentally determined. It is found that EPH promotes the formation of a fine-grained structure and oxide film, improving the surface characteristics. Comparative data on the structure and properties of samples under different EPH modes are presented. The optimal hardening mode (voltage ~300 V, holding time 8-10 s) is a rational choice for cast parts made of 20GL steel, providing a balance between achieving high hardness parameters and a relatively small increase in corrosion activity. The EPH method has shown high applicability in industry as an alternative to traditional heat treatment. The results of the study will improve the methods of heat treatment of 20GL steel, which will contribute to the improvement of the performance characteristics of materials used in mechanical engineering, transport equipment and related industries. The use of electrolytic plasma hardening can reduce the time and energy costs of steel processing and increase the efficiency of the process itself.

Key words: 20GL steel, electrolytic plasma hardening, microhardness, corrosion resistance, microstructure, economic efficiency.

Сведения об авторах

Сергей Игоревич Буреш – магистрант кафедры «Технологическое оборудование»; Шәкарім университет, Республика Казахстан; e-mail: buresh2002@mail.ru.

Борис Анатольевич Лобасенко – доктор технических наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кемеровский государственный университет»; Россия, г. Кемерово. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0245-7904>

Галия Бекеновна Абдилова – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, заведующий кафедрой «Технологическое оборудование»; Шәкарім университет, Республика Казахстан; e-mail: tech_equipment_dept@shakarim.kz.

Ринат Кенжеевич Кусаинов – руководитель центра; Инжиниринговый центр «Упрочняющие технологии и покрытия» города Семей, Республика Казахстан; e-mail: mms.research.semey@gmail.com.

Алибек Манарбекович Муратбаев* – PhD, старший преподаватель кафедры «Технологическое оборудование»; Шәкарім университет, Республика Казахстан; e-mail: great_mister@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0830-5007>.

Авторлар туралы

Сергей Игоревич Буреш – «Технологиялық жабдықтар» кафедрасының магистранты; Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: buresh2002@mail.ru.

Борис Анатольевич Лобасенко – техника ғылымдарының докторы, «Кемерово мемлекеттік университеті» федералды мемлекеттік бюджеттік жоғары білім беру мекемесінің профессоры; Ресей, Кемерово қ. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0245-7904>.

Галия Бекенқызы Абдилова – т.ғ.к., доцент, технологиялық жабдықтар кафедрасының меңгерушісі; Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: tech_equipment_dept@shakarim.kz.

Ринат Кенжеұлы Құсайынов – орталықбасшысы; Қазақстан Республикасы, Семей қаласының «Технологиялар мен жабындарды ғайту» инжинирингтік орталығы; электрондық поштасы: mms.research.semey@gmail.com.

Алибек Манарбекович Муратбаев* – PhD, «Технологиялық жабдықтар» кафедрасының аға оқытушысы; Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: great_mister@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0830-5007>.

Information about the authors

Sergey Buresh – Master's student, Department of Technological Equipment; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: buresh2002@mail.ru.

Boris Lobasenko – doctor of technical sciences, professor, federal state budgetary educational institution of higher education «Kemerovo State University»; Russia, Kemerovo. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0245-7904>.

Galiya Abdilova – PhD, Associate Professor, Head of the Department of Technological Equipment; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: tech_equipment_dept@shakarim.kz.

Rinat Kusainov – Head of the Center; Engineering Center «Strengthening Technologies and Coatings» of Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: mms.research.semey@gmail.com.

Alibek Muratbayev* – PhD, Senior Lecturer of the department «Technological equipment»; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: great_mister@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0830-5007>.

Поступила в редакцию 19.05.2025

Поступила после доработки 17.06.2025

Принята к публикации 31.07.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3\(19\)-21](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3(19)-21)



FTAXP: 65.13.13

А.Қ. Базанова^{*}, А.Қ. Кәкімов¹, Н.К. Ибрагимов¹, А.А. Майоров²

¹Шәкәрім университеті,

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

²ФААҒО Сібір ірімшік жасау ғылыми-зерттеу институты,

656016, Ресей Федерациясы, Алтай, Барнаул қ., Советская Армия көш., 66 үй

*e-mail: arayka.bazanovak@mail.ru

СҮТ ҚҰРАМЫНДА КЕЗДЕСЕТІН ЗИЯНДЫ ЗАТТАРДЫҢ МӨЛШЕРІН ТӨМЕНДЕТУГЕ АРНАЛҒАН АДСОРБЦИЯЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫНЫ ЖЕТІЛДІРУ: САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

Аңдатпа: Бұл мақалада сүт құрамындағы радионуклидтер мен ауыр металл тұздарының мөлшерін төмендету мақсатында адсорбциялық әдіске негізделген жетілдірілген қондырғы ұсынылады. Зерттеудің мақсаты – сүтті қауіпсіз тұтынуға мүмкіндік беретін тиімді тазарту технологиясын жасау. Сүт – жоғары биологиялық және тағамдық құндылыққа ие бағалы тағам өнімі. Ол адам ағзасына қажетті ақуыздар, майлар, дәрумендер мен микроэлементтерді қамтиды, яғни күнделікті тағам рационының маңызды бөлігі. Алайда экологиялық тұрақсыздық пен техногендік ластану жағдайында сүт өнімдерінің құрамында радионуклидтер мен ауыр металл тұздары сияқты адам денсаулығына қауіпті болуы мүмкін. Сол себепті сүтті зиянды заттардан тазартудың тиімді әдістерін әзірлеу өзекті мәселе болып отыр.

Зерттеу жұмысында сүттегі зиянды заттардың мөлшерін азайтуға арналған адсорбция әдісіне негізделген эксперименттік қондырғыны жетілдіру ұсынылған. Сұйық тағам өнімдерін тазартуға арналған қондырғыны жетілдіру сұйықтықтың өту сызбасын түрлі комбинациялармен (бір, екі немесе үш баған арқылы) өзгерту мүмкіндігін іске асыруға мүмкіндік берді. Нақтылағанда тазарту процесін ластағыштардың деңгейі мен зиянды заттардың түріне қарай реттеуге жол ашады. Адсорбция әдісі ақуыздар, дәрумендер мен микроэлементтер сияқты құнды тағамдық заттарды төмендетпей, зиянды заттарды азайтуды қамтамасыз етеді. Қондырғы күрделі автоматиканы қажет етпейді және зертханалық жағдайда пайдалануға ыңғайлы. Қолжетімді және арзан табиғи сорбенттерді қолдану – тазарту процесінің өзіндік құнын төмендетеді.

Түйін сөздер: тағам қауіпсіздігі, радиоактивті ластану, адсорбциялық сүзу, сорбциялық бағандар, табиғи сорбенттер.

Кіріспе

Тағам өнімдерінің құрамында радионуклидтер мен ауыр металдардың болуы – қазіргі кездегі экологиялық және санитарлық маңызды мәселелердің бірі [1]. Сүт және сүт өнімдері сияқты сұйық тағамдар жоғары биологиялық және тағамдық маңыздылығымен ерекшеленеді. Олар ағзаға жеңіл сіңетін, бір-бірімен үйлесімді ақуыздар, майлар, көмірсулармен қатар, дәрумендер, минералды заттар және ферменттерге бай. Осы себепті сүт өнімдері күнделікті тамақтану рационында маңызды орын алады [2]. Жалпы, сиыр сүті – құнды тағамдық өнім. Оның құрамына дисперсиялық орта (минералды тұздар мен сүт қанты еріген плазма), коллоидтық фаза (ақуыздар мен тұздар) және ұсақ дисперсиялық фаза (сүт майы) кіреді. Сонымен қатар, оның құрамында химиялық шығу тегі бар зиянды заттар (радионуклидтер,