

Л.Г. Сулюбаева¹, Д.Р. Байжан², Б.А. Алибекова³

¹PhD, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова
(Казахстан, г. Усть-Каменогорск), e-mail: lsulyubaveva@gmail.com

²докторант, Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова
(Казахстан, г. Усть-Каменогорск), e-mail: daryn.baizhan1@gmail.com

³студент, Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова
(Казахстан, г. Усть-Каменогорск), e-mail: bailymalibekova304@gmail.com*

ҚҰРЫЛЫМДЫҚ БОЛАТ 40ХН БЕТІНІҢ МИКРОҚАТТЫЛЫҒЫН АРТТЫРУ ҮШІН
ТЕРМОЦИКЛДІ ЭЛЕКТРОЛИТ-ПЛАЗМАНЫ ӨНДЕУ ӘДІСІ
A METHOD OF THERMOCYCLIC ELECTROLYTIC PLASMA TREATMENT FOR IMPROVING
THE SURFACE MICROHARDNESS OF STRUCTURAL STEEL 40XHN
СПОСОБ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ
УЛУЧШЕНИЯ МИКРОТВЁРДОСТИ ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ 40ХН

Аннотация. В статье представлены результаты исследования разработки технологических режимов способа термоциклической электролитно-плазменной обработки для улучшения микротвёрдости конструкционной стали 40ХН. Метод основан на сочетании электролитно-плазменного циклического воздействия, что позволяет эффективно улучшить эксплуатационные характеристики материала. Термоциклическое электролитно-плазменное обработка представляет собой комплексное воздействие на поверхность материала, включающее термические циклы, электролитную обработку и плазменное воздействие. В процессе обработки происходит изменение структуры поверхности стали, формирование плотной оксидной и карбидной плёнки, которая значительно увеличивает твёрдость и износостойкость. Процесс включает в себя чередование циклов нагрева и охлаждения в условиях плазменной обработки, что способствует значительному увеличению прочности стали. Экспериментальные исследования показали, что после применения термоциклической электролитно-плазменной обработки микротвёрдость поверхности стали 40ХН увеличивается в ~4,5 раза. Результаты работы подтверждают эффективность предложенного метода для улучшения механических свойств конструкционных материалов, используемых в различных отраслях промышленности, в том числе машиностроение и открывает новые возможности для повышения надёжности и срока службы компонентов энергетической промышленности. Способ термоциклической электролитно-плазменной обработки является эффективным и перспективным для улучшения свойств конструкционных материалов.

Ключевые слова: электролитно-плазменная обработка, конструкционная сталь, термоциклическая электролитно-плазменная обработка, микротвёрдость, электроразрядные явления, микроструктура.

Abstract. The article presents the results of a study on the development of technological regimes for the thermocyclic electrochemical-plasma treatment method to improve the microhardness of 40XH structural steel. The method is based on a combination of electrochemical-plasma cyclic effects, which effectively enhance the operational characteristics of the material. Thermocyclic electrochemical-plasma treatment involves a comprehensive effect on the material surface, including thermal cycles, electrochemical treatment, and plasma impact. During the process, the surface structure of the steel changes, forming a dense oxide and carbide film, which significantly increases hardness and wear resistance. The process includes alternating heating and cooling cycles under plasma treatment conditions, contributing to a significant increase in the steel's strength. Experimental studies showed that after applying thermocyclic electrochemical-plasma treatment, the microhardness of the 40XH steel surface increases by approximately 4.5 times. The results confirm the effectiveness of the proposed method for improving the mechanical properties of structural materials used in various industries, including machine engineering, and open new opportunities to enhance the reliability and service life of components in the energy industry. The thermocyclic electrochemical-plasma treatment method is effective and promising for improving the properties of structural materials.

Keywords: electrolytic plasma treatment, structural steel, thermocyclic electrolytic plasma treatment, microhardness, electrical discharge phenomena, microstructure.

Аңдатпа. Мақалада 40ХН конструкциялық болатының микроқаттылығын жақсарту үшін термостикалық электролитті-плазмалық өңдеу әдісінің технологиялық режимдерін әзірлеу нәтижелері ұсынылған. Әдіс электролитті-плазмалық циклдық әсердің үйлесіміне негізделген, бұл материалдың эксплуатациялық сипаттамаларын тиімді жақсартуға мүмкіндік береді. Термостикалық электролитті-плазмалық өңдеу материал бетіне кешенді әсер ету болып табылады, ол термиялық циклдарды, электролитті

өңдеуді және плазмалық әсерді қамтиды. Өңдеу процесінде болаттың бет құрылымы өзгеріп, тығыз оксидті және карбидті қабықша пайда болады, бұл оның қаттылығы мен тозуға төзімділігін айтарлықтай арттырады. Процесс қыздыру және салқындату цикларының плазмалық өңдеу жағдайларында кезектесуімен жүзеге асырылады, бұл болаттың беріктігін айтарлықтай арттыруға ықпал етеді. Эксперименттік зерттеулер термостикалық электролитті-плазмалық өңдеуден кейін 40ХН болатының бетінің микрقاتтылығы шамамен 4,5 есеге артатынын көрсетті. Жұмыстың нәтижелері конструкциялық материалдардың механикалық қасиеттерін жақсарту үшін ұсынылған әдістің тиімділігін растайды, бұл әдіс түрлі салаларда, оның ішінде машина жасау және энергетика салаларында қолданылатын материалдардың сенімділігі мен қызмет мерзімін арттыру үшін жаңа мүмкіндіктер ашады. Термостикалық электролитті-плазмалық өңдеу әдісі конструкциялық материалдардың қасиеттерін жақсарту үшін тиімді және перспективалы әдіс болып табылады.

Негізгі сөздер: электролит-плазманы өңдеу, құрылымдық болат, термоциклді электролит-плазманы өңдеу, микрقاتтылық, электроразрядтық құбылыстар, микроқұрылым.

Введение

Чтобы увеличить твердость деталей машин и механизмов обычно применяют специальные высоколегированные стали и другие дорогие материалы, из-за чего увеличивается стоимость всей машины. Чтобы снизить стоимость деталей машин, можно использовать и менее дорогие слаболегированные стали, прошедшие объемную упрочняющую термообработку.

Конструкционная сталь 40ХН представляет собой материал, широко используемый в различных отраслях промышленности, таких как машиностроение, энергетика, авиация и автомобилестроение, благодаря своим хорошим механическим свойствам, прочности и износостойкости. Однако в условиях эксплуатации, особенно при повышенных нагрузках, температурных колебаниях и агрессивных внешних воздействиях, её поверхность подвержена значительному износу, что ограничивает срок службы компонентов, изготовленных из этой стали. Одним из эффективных способов повышения эксплуатационных характеристик стали является улучшение её микроструктуры и твёрдости поверхности [1-2].

Одной из перспективных технологий для этих целей является термическая обработка с применением способа термоциклической электролитно-плазменной обработки (ТЭПО), которая представляет собой комбинацию термических, электрических и плазменных воздействий на материал в электролитической среде в которой активные элементы способствуют модификации за счет коммутации электрического тока через среду на поверхность материала. Такой подход позволяет не только значительно повысить твёрдость поверхностных слоёв материала. Процесс ТЭПО включает чередование циклов нагрева и охлаждения, что способствует глубоким изменениям в структуре материала, улучшая его механические свойства [3-4].

Современные исследования в области электроразрядной и электроплазменной обработки проводят как отечественные, так и зарубежные исследователи, развивая эту область в теоретическом и практическом направлениях. Исследования зарубежных ученых существенно обогатили знания в области электроразрядной и электроплазменной обработки. Работы таких специалистов, как Edgerton Н [5], А. Jones [6], Y. Fukuzawa [7], К. Kagaya [8], Т. Sato [9], внесли важный вклад в теорию и практику этих технологий, что позволяет создавать высококачественные и экономически эффективные методы обработки материалов, расширяя их применение в различных отраслях промышленности в том числе и в машиностроении.

В работе Vitthal R. Jumbad¹, и др [10] приведены результаты исследования электролитной-плазменной обработки, которая применяется для улучшения поверхностных свойств сталей с низким, средним и высоким содержанием углерода. Согласно результатам авторов, в диапазоне от часа до 5 минут обработки можно достичь необходимые желаемые свойства, что очень мало по сравнению с традиционной термообработкой поверхности, а

также указано, что закалку, осаждение, нанесение покрытия, очистку, полировку можно осуществить в одной и той же установке с небольшим усовершенствованием имеющей установки. В работе установлено, что процессе катодной электролитической плазмы шероховатость поверхности увеличивается, а в процессе анодной электролитической плазмы шероховатость поверхности уменьшается. ЭПО также применяется для повышения коррозионной стойкости, согласно результатам которых у конструкционных сталей коррозионная стойкость увеличилась в несколько раз больше, чем у нержавеющей стали.

В работе Sergey N. Grigoriev, и др. [11] также дали результаты о влиянии электрофизических параметров плазменной электролитической обработки на изменение структурно-фазового состава и морфологии поверхности инструментальной стали CrWMn, сопровождающееся повышением ее износостойкости. Авторами установлено, что более твердая мартенситная основа испытывает только упругую деформацию, поэтому увеличение доли остаточного аустенита при азотировании приводит к снижению весового износа в 14 раз и приводит к снижению шероховатости поверхности на 42–68%, тем самым облегчая скольжение пары трения — снижается коэффициент трения и износ веса. Изучая работы S S Korableva и др. [12] можно увидеть результаты о возможности катодно-плазменного электролитического борирования среднеуглеродистой стали в водном растворе хлорида аммония и борной кислоты с последующей анодной плазменно-электролитической полировкой с изменением рабочего напряжения. Исследованы морфология и шероховатость поверхности, микротвердость модифицированного слоя. Установлено, что катодное борирование при температуре 850 °С в течение 5–30 мин приводит к упрочнению поверхностного слоя до 1050 HV с увеличением шероховатости в 1,5–2,5 раза и износостойкости в 3,5 раза.

Таким образом согласно, анализу установлен, что технологии основанные на процессах электроразрядных явлениях применимы как альтернатива традиционной термообработке с целью улучшения эксплуатационных характеристик обширного класса сталей, однако определение технологических режимов катодной электролитно-плазменной обработки с термоциклированием не изучалось подробно. Поэтому, целью настоящей работы является разработка и исследование метода термоциклической электролитно-плазменной обработки для улучшения микротвёрдости конструкционной стали 40ХН. В ходе исследования будут рассмотрены основные технологические параметры процесса, а также его влияние на физико-механические свойства стали, что может значительно повысить её долговечность в условиях эксплуатации.

Материалы и методы исследование

Сталь 40ХН, как среднеуглеродистая легированная сталь, используется для изготовления высоконагруженных деталей машин и механизмов. К числу таких деталей относятся валы, шестерни, оси, ступицы и кривошпы, которые работают в условиях переменных нагрузок, вибраций и ударных воздействий.

Выбор материала для исследования обусловлен тем, что эти стали широко используются в машиностроении, энергетике и других отраслях промышленности, где критически важными являются такие свойства, как прочность, износостойкость, термостойкость и способность сохранять механические характеристики при воздействии высоких температур и нагрузок.

Маркировка 40ХН означает среднее количества углерода (С) менее одного процента, более 0,4% хрома (Cr) и 1,0% никеля (Ni). Точный химический состав по ГОСТ 4543-71.

Таблица 1. Химический состав сталь 40XH

C	Si	Mn	Ni	Cr	S	P	Cu
0.36 - 0.44	0.17 - 0.37	0.5 - 0.8	1 - 1.4	0.45 - 0.75	до 0.035	до 0.035	до 0.3

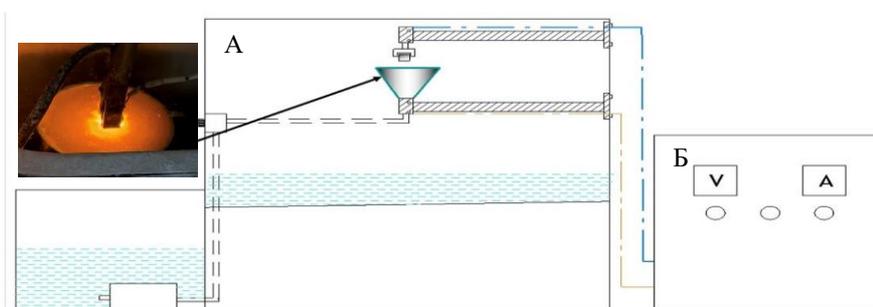
Электролитно-плазменное термоциклическое упрочнение образцов стали 40XH проводили на модернизированной установке в НИЦ «Инженерия поверхности и трибология» (Рис.1). Схематический установка ТЭПО состоит из электролитической ячейки и источника питания. Модернизированная часть источника питания установки включает в себя несколько ключевых модулей, важными элементами которых являются блок синхронизации, микропроцессорный блок, блок питания, блок силовых выводов и блок управления. Блок синхронизации отвечает за фазировку и обеспечение корректного взаимодействия между питающей сетью и тиристорами. Микропроцессорный блок позволяет настраивать параметры термоциклирования, задавать режимы работы и осуществлять автоматическое управление всей системой. Блок питания преобразует входное напряжение в необходимые уровни для обеспечения работы всех других модулей. Блок силовых выводов обеспечивает подачу токов высокой мощности для обработки стальных образцов, а блок управления синхронизирует действия тиристорov, осуществляя их включение и выключение в нужные моменты.

Образцы готовили на плоско-шлифовальном станке Metarol-2000P с последующей полировкой с использованием алмазных паст.

Микроструктура образцов были выявлены химическим способом травления с применением 4%-ного раствора азотной кислоты (HNO_3) в этиловом спирте. Микроструктуру исходных и обработанных сталей изучали методами оптической микроскопии на микроскопе Olympus VX53P в отраженном свете при светлом поле при увеличениях $\times 4000$, $\times 10000$. Съемка проводилась в режимах вторичных и обратно рассеянных электронов.

Для определения твердости по глубине образцов использовали микроизмеритель твердости МЕТОЛАБ 502, оснащенный четырехгранной алмазной пирамиды Виккерса с квадратным основанием и углом $\alpha = 136^\circ$ между противоположными гранями при вершине при строгом соблюдении требований ГОСТ 9450-76, предъявляемых к методу Виккерса. Алмазный индентор под нагрузкой $F = 1 \text{ Н}$ вдавливался перпендикулярно и выдерживался под нагрузкой 10 с. Измерялись диагонали отпечатка d_1 , d_2 .

Общий вид и схема установки электролитно-плазменной обработки показан на рисунке 2. Установка конструктивно состоит из источника питания, камеры электролитно-плазменной обработки материалов.



А – Электролитическая ячейка для ТЭПО, Б – Источник питания

Рисунок 1. Схематическое изображение установки для термоциклической электролитно-плазменной обработки

В ходе экспериментальных работ проводились измерения температуры на поверхности образца. Для этого использовались термопары, изготовленные методом естественного термического спаивания. Термопары размещались в двух слоях образца на глубине 1,0 и 2,0 мм от нагреваемой поверхности, что позволило фиксировать температурные изменения на разных уровнях материала. Размещение термопарных спаев схематично представлено на рисунке 2. При расчёте температуры на поверхности образца было принято, что весь тепловой поток распространяется от поверхности вглубь материала. Это допущение позволяет считать тепловой процесс однонаправленным и учитывать влияние только тех факторов, которые связаны с передачей энергии вглубь образца, без учёта возможных потерь на излучение или конвекцию. Такой подход упрощает анализ и позволяет более точно определить температуру на поверхности.

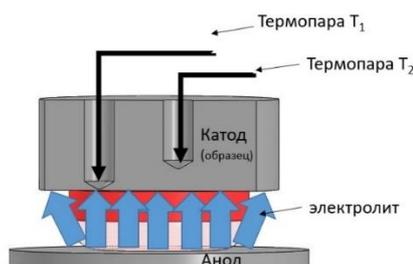


Рисунок 2. Схема размещения термопары в поверхностном слое образца при измерении температуры в процессе электролитно-плазменного нагрева.

Сущность процесса электролитно-плазменное термоциклической упрочнения состоит в следующем. При малых напряжениях (150 В) в электрохимической ячейке, содержащей водный раствор электролита, наблюдается классический электрохимический процесс. При повышении напряжения (300 В) начинается интенсивное электродное газовыделение приводящее к формированию при электродном газожидкостном слое. По мере повышения напряжения плотность упаковки газовых пузырьков в при электродном газожидкостном слое возрастает, и суммарная площадь поперечного сечения электролитных мостиков между ними уменьшается. В результате джоулева тепловыделения температура электролита в этих мостиках достигает температуры кипения. При переходе от пузырькового режима кипения к плёночному вокруг погружённого в электролит изделия возникает тонкая (50–100 мкм) парогазовая оболочка (ПГО), состоящая из паров воды, активированных OH^- , H^+ и ионов Na^+ и CO_3^{2-} , входящих в состав электролита. Напряженность электрического поля в ПГО достигает 10^4 – 10^5 В/см. При температуре около 100°C такая напряженность способна вызвать ионизацию паров, а также эмиссию ионов и электронов, необходимую для поддержания стационарного электрического разряда. И в результате образуется электролитная плазма. Раствор карбоната натрия (Na_2CO_3) использовался в качестве источника нагрева и охлаждения.

Результаты и обсуждение

Проведённые исследования показали, что при подаче электрического потенциала 300 В в цепь нагревателя происходит быстрый нагрев поверхности образца. Скорость нагрева поверхности достигает 500°C в секунду. При периодическом переключении между высоким электрическим потенциалом (300 В) и низким (150 В) наблюдается циклическое изменение скорости нагрева. Такой режим позволяет контролировать интенсивность теплового воздействия, что способствует увеличению продолжительности нагрева и формированию более толстого нагретого слоя на поверхности материала. На первом ряде графиков представлены три режима нагрева (Рисунок 3). Режим №1 характеризуется чередованием

подачи напряжения 300 В на 4 секунды и 200 В на 2 секунды, что создаёт цикличность в нагреве. Режим №2 отличается более частым чередованием высокого и низкого напряжений, а общее время обработки увеличено, что приводит к более длительному воздействию на материал. Режим №3 имеет ещё более интенсивное чередование напряжений и увеличенное общее время работы до 40 секунд. Такие режимы позволяют контролировать процесс нагрева, обеспечивая разные температурные профили и интенсивность теплового воздействия на образцы.

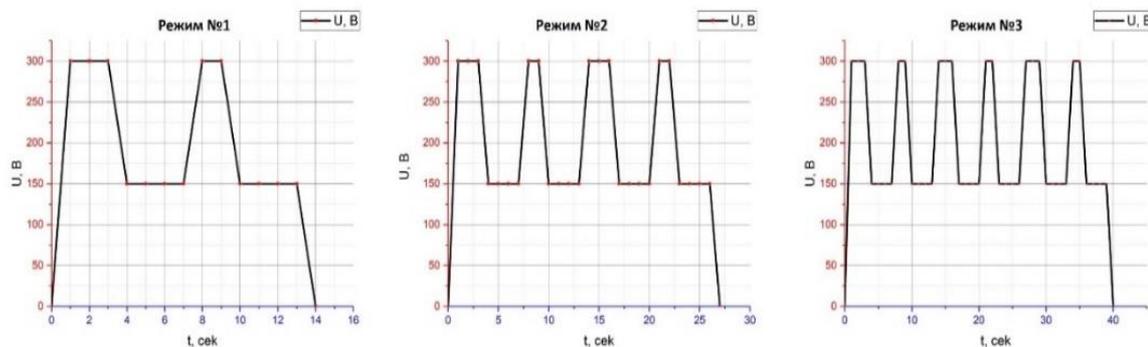


Рисунок 3. Диаграмма периодичности подключения электрического потенциала при термоциклическом нагреве.

Для нагрева использовался водный раствор карбоната натрия (Na_2CO_3) с концентрацией 10% и 15% (масс. %). В таблице 2 приведены параметры электролитно-плазменного нагрева различных марок стали (40ХН) в растворах карбоната натрия (Na_2CO_3) с концентрациями 10% и 15%. Целью исследований было определить влияние концентрации электролита, напряжения, силы тока и длительности нагрева на изменение температуры поверхности стали, электрической проводимости раствора (УЭП) и других характеристик процесса.

В таблице 2 представленные данные характеризуют параметры электролитно-плазменного нагрева стали 40ХН в растворах карбоната натрия (Na_2CO_3) с концентрацией 10% и 15%. Для раствора с концентрацией 10% Na_2CO_3 начальная температура электролита составляла до 33°C. В первом цикле нагрева при напряжении 300 В, токе 40 А и продолжительности 5 секунд температура поверхности стали достигала 390°C при плотности тока 13,3 А/см². В последующих циклах, при аналогичных параметрах, температура стали возрастала до 875°C (во втором цикле) и 1000°C (в третьем цикле). Нагрев сопровождался циклическим чередованием напряжений: 300 В на 4–5 секунд и 150 В на 5 секунд, что обеспечивало равномерное распределение тепловой энергии и постепенное повышение температуры. При увеличении концентрации Na_2CO_3 до 15% наблюдалось повышение плотности тока до 26,6 А/см², что обеспечивало более интенсивное тепловое воздействие. Начальная температура электролита составляла до 35°C, а температура стали достигала 750°C уже во втором цикле. В третьем цикле температура стали увеличивалась до 900°C, а температура электролита к этому моменту возрастала до 39°C. Нагрев при этом также происходил циклично: напряжение 300 В подавалось на 1–2 секунды, после чего снижалось до 150 В на 3 секунды. Подобный режим позволял контролировать интенсивность теплового воздействия и предотвращать перегрев материала. Примечательно, что в каждом цикле при увеличении температуры электролита плотность тока оставалась стабильной, что свидетельствует о высокой эффективности передачи тепловой энергии от катода к поверхности стали. Максимальная температура поверхности, достигнутая в режиме с 15%-ным раствором Na_2CO_3 , составила 900°C, что обеспечивает глубокое и равномерное прогревание материала.

Таблица 2. Параметры термоциклической электролитно-плазменной обработки стали 40ХН при разных режимах

Режим	1-Режим											
	1-цикл				2-цикл				3-цикл			
U, В	300	150	300	150	300	150	300	150	300	150	300	150
t,сек	5	5	4	5	5	5	4	5	5	5	4	5
I, А	40	15	40	15	40	15	40	15	40	15	40	15
T°C образца	390				875				1000			
J, А/см2	13,3	5	13,3	5	13,3	5	13,3	5	13,3	5	13,3	5
Электролит	10% Na ₂ CO ₃ +90% дистиллированная вода											
Режим	2-Режим											
	1-цикл				2-цикл				3-цикл			
U, В	300	150	300	150	300	150	300	150	300	150	300	150
t,сек	2	3	1	3	5	4	5	2	3	1	3	2
I, А	80	22	80	22	8	30	8	80	22	80	22	80
T°C образца	406				750				900			
J, А/см2	26,6	7,3	26,6	7,3	2,6	10	2,6	26,6	7,3	26,6	7,3	26,6
Электролит	15% Na ₂ CO ₃ +85% дистиллированная вода											

Таким образом, результаты исследований показывают, что концентрация электролита и выбранный режим нагрева оказывают значительное влияние на термическую обработку сталей. Высокая концентрация электролита (15%) в сочетании с оптимальными режимами нагрева (например, режимы №1 и №2) способствует увеличению микротвёрдости за счёт большей плотности энергии и интенсивного нагрева.

На рисунке 4 продемонстрировано поперечное сечение микроструктуры стали 40ХН после ТЭПО в электролите содержащим 10% соды (Рис.4а) и 15% соды (Рис.4б) электролите при 2х циклах,. Поперечное сечение сталей после ТЭПО состоит из нескольких зон. Зона закаленного слоя состоит из α' -Fe+ Fe₃C, а зона термического влияния содержит фазы α' -Fe+ γ -Fe, последующая зона матрицы стали 40ХН имеет ферритно-перлитную структуру. Установлено что зависимости от термоциклирование эти зоны имеют разную толщину.

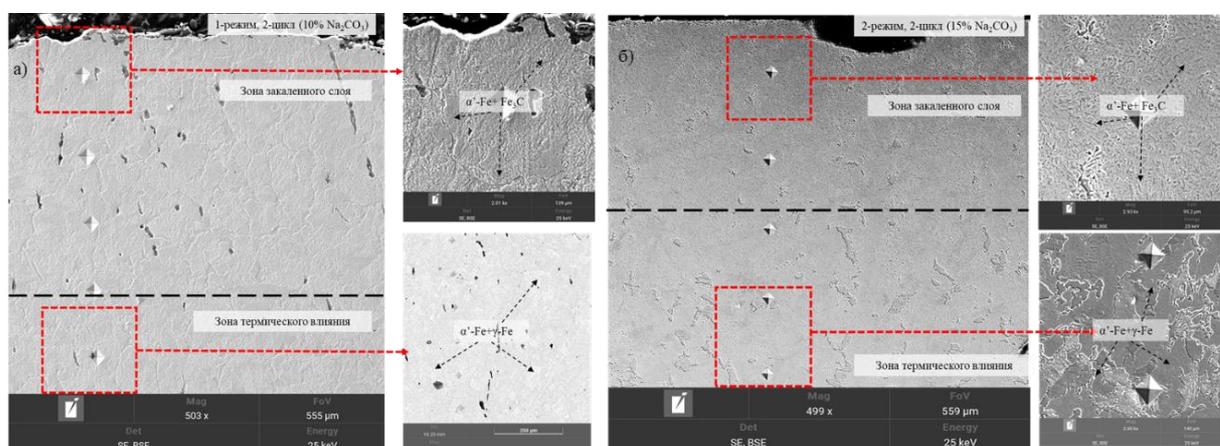


Рисунок 4. Микроструктура поперечного сечения сталей 40ХН после ТЭПО при разных режимах.

На рисунке 5 показаны результаты исследований, которые проводились для изучения влияния электролитно-плазменного нагрева на микротвердость стали 40ХН. На графике представлена зависимость микротвердости обработанных образцов от концентрации электролита и выбранного режима нагрева. В исходном состоянии микротвердость стали 40ХН имеет значение 290МПа, а в режиме №1 при концентрации электролита 10% наблюдается значительное увеличение микротвердости по сравнению с концентрацией 15%. Это связано с высокой плотностью энергии при кратковременном воздействии.

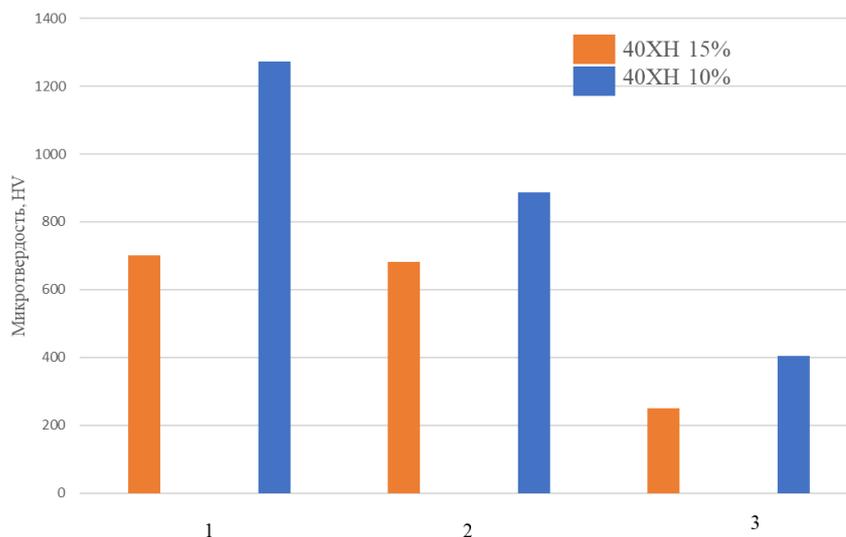


Рисунок 5. Зависимость микротвердости стали 40ХН от режимов электролитно-плазменного нагрева

Заключение

На основе полученных результатов были определены микроструктура и микротвердость конструкционной стали 40ХН при термоциклической электролитно-плазменной обработке. Согласно результатам, было установлено, что при ТЭПО конструкционной стали 40ХН в электролитах содержащих 10 и 15% Na_2CO_3 + 90 и 85% дистиллированной воды, формируется модифицированный закаленный слой с толщиной более 600 мкм, структурно состоящая из основных фаз мартенсита и цементита, формирование которых подтверждается повышением микротвердости в ~ 4,5 раза. На основе полученных результатов был разработан оптимальный технологический режим способа поверхностной термической обработки конструкционной стали 40ХН методом термоциклической электролитно-плазменной обработки.

Это исследование было выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR24992879.).

Список использованной литературы

1. Сулюбаева Л.Г., Рахадиллов Б.К., Бердимуратов Н.Е., Сатбаева З.А. (2023). Исследование современного состояния и технологических возможностей способа электролитно-плазменной химико-термической обработки сталей. *Вестник НЯЦ РК*, 3, 182-191. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-3-182-191>
2. Satbayeva Z., Rakhadilov B.K., Turar Z., Berdimuratov N., Baizhan D., Maulit A. (2024). Surface Modification of Chromium–Nickel Steel by Electrolytic Plasma Nitriding Method. *Crystals*, 14(9), 759. <https://doi.org/10.3390/cryst14090759>
3. Satbayeva Z., Maulit A., Ispulov N., Baizhan D., Rakhadilov B., Kusainov R. (2024). Electrolytic Plasma Nitriding of Medium-Carbon Steel 45 for Performance Enhancement. *Crystals*. 14(10), P.895. <https://doi.org/10.3390/cryst14100895>

- Baizhan D., Rakhadilov B., Zhurerova L., Tyurin Y., Sagdoldina Zh., Adilkanova M., Kozhanova R. (2022). Investigation of Changes in the Structural-Phase State and the Efficiency of Hardening of 30CrMnSiA Steel by the Method of Electrolytic Plasma Thermocyclic Surface Treatment. *Coatings*, 12, 1696. <https://doi.org/10.3390/coatings12111696>
- Robert H. Edgerton. (1982). Available energy and environmental economics. *Lexington Books*, 2, 447.
- Jones A. (1996). Principles and Prevention of Corrosion. *Prentice Hall NJ USA*, 2, 96.
- Fukuzawa Y., Kojima Y., Sekiguchi E., Mohori N. (1993). Surface Modification of Stainless Steel by Electrical Discharge Machining. *ISIJ International*, 33, 996–1002.
- Kagaya K., Oishi Y., Yada K. (1990). Micro electro-discharge machining using water as a working fluid 2: Narrow slit fabrication. *Precision Engineering*, 12(4), 213-217.
- Sato T., Mizutani T., Yonemochi K., Kawata K. (1986). The development of an electrodischarge machine for micro-hole boring. *Precision Engineering*, 8(3), 163-168.
- Vitthal R. Jumbad., Arvind Chel., Updesh Verma., Geetanjali Kaushik. (2020). Application of Electrolytic Plasma Process in Surface Improvement of Metals: A Review. *Letters in Applied NanoBioScience*, 9(3), 1249-1262. <https://doi.org/10.33263/LIANBS93.12491262>
- Grigoriev S.N., Mukhacheva T.L., Tambovskiy I.V., Kusmanova I.A., Golubeva T.M., Podrabinnik P.A., Khmyrov R.S., Suminov I.V., Kusmanov S.A. (2024). Increasing the Wear Resistance of CrWMn Tool Steel Surfaces by Plasma Electrolytic Nitriding and Polishing. *Applied Sciences*, 14(22), 10488. <https://doi.org/10.3390/app142210488>
- Korableva S.S., Palenov I.R., Naumov I.M., Smirnov A.A., Kusmanova I.A., Gorokhov I.S., Belov R.D., Sokova E.V., Bestchetnikova K.I. (2021). Cathodic boriding and anodic polishing of medium-carbon steel by plasma electrolysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 2144(1), 012027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2144/1/012027>

References

- Sulyubaeva, L. G., Rakhadilov, B. K., Berdimuratov, N. E., & Satbayeva, Z. A. (2023). Issledovanie sovremennogo sostoyaniya i tekhnologicheskikh vozmozhnostey sposoba elektrolitno-plazmennoy khimiko-termicheskoy obrabotki staley. *Vestnik NYaTs RK*, 3, 182–191. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-3-182-191>
- Satbayeva Z., Rakhadilov B.K., Turar Z., Berdimuratov N., Baizhan D., Maulit A. (2024). Surface Modification of Chromium–Nickel Steel by Electrolytic Plasma Nitriding Method. *Crystals*, 14(9), 759. <https://doi.org/10.3390/cryst14090759>
- Satbayeva Z., Maulit A., Ispulov N., Baizhan D., Rakhadilov B., Kusainov R. (2024). Electrolytic Plasma Nitriding of Medium-Carbon Steel 45 for Performance Enhancement. *Crystals*. 14(10), P.895. <https://doi.org/10.3390/cryst14100895>
- Baizhan D., Rakhadilov B., Zhurerova L., Tyurin Y., Sagdoldina Zh., Adilkanova M., Kozhanova R. (2022). Investigation of Changes in the Structural-Phase State and the Efficiency of Hardening of 30CrMnSiA Steel by the Method of Electrolytic Plasma Thermocyclic Surface Treatment. *Coatings*, 12, 1696. <https://doi.org/10.3390/coatings12111696>
- Robert H. Edgerton. (1982). Available energy and environmental economics. *Lexington Books*, 2, 447.
- Jones A. (1996). Principles and Prevention of Corrosion. *Prentice Hall NJ USA*, 2, 96.
- Fukuzawa Y., Kojima Y., Sekiguchi E., Mohori N. (1993). Surface Modification of Stainless Steel by Electrical Discharge Machining. *ISIJ International*, 33, 996–1002.
- Kagaya K., Oishi Y., Yada K. (1990). Micro electro-discharge machining using water as a working fluid 2: Narrow slit fabrication. *Precision Engineering*, 12(4), 213-217.
- Sato T., Mizutani T., Yonemochi K., Kawata K. (1986). The development of an electrodischarge machine for micro-hole boring. *Precision Engineering*, 8(3), 163-168.
- Vitthal R. Jumbad., Arvind Chel., Updesh Verma., Geetanjali Kaushik. (2020). Application of Electrolytic Plasma Process in Surface Improvement of Metals: A Review. *Letters in Applied NanoBioScience*, 9(3), 1249-1262. <https://doi.org/10.33263/LIANBS93.12491262>
- Grigoriev S.N., Mukhacheva T.L., Tambovskiy I.V., Kusmanova I.A., Golubeva T.M., Podrabinnik P.A., Khmyrov R.S., Suminov I.V., Kusmanov S.A. (2024). Increasing the Wear Resistance of CrWMn Tool Steel Surfaces by Plasma Electrolytic Nitriding and Polishing. *Applied Sciences*, 14(22), 10488. <https://doi.org/10.3390/app142210488>
- Korableva S.S., Palenov I.R., Naumov I.M., Smirnov A.A., Kusmanova I.A., Gorokhov I.S., Belov R.D., Sokova E.V., Bestchetnikova K.I. (2021). Cathodic boriding and anodic polishing of medium-carbon steel by plasma electrolysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 2144(1), 012027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2144/1/012027>

Авторлар туралы мәліметтер

Сүлюбаева Л.Г. – PhD, қауымдастырылған профессор, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті (Қазақстан, Өскемен қ.), e-mail: lsulyubayeva@gmail.com

Байжан Д.Р. – докторант, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті (Қазақстан, Өскемен қ.), e-mail: daryn.baizhan1@gmail.com

Әлібекова Б.Ә. – студент, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті (Қазақстан, Өскемен қ.), e-mail: bailymalibekova304@gmail.com

Information about authors

Sulyubaeva L.G. - PhD, associate professor, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University (Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk), e-mail: lsulyubayeva@gmail.com

Baizhan D.R. - doctoral student, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University (Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk), e-mail: daryn.baizhan1@gmail.com

Alibekova B.A. – student, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University (Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk), e-mail: bailymalibekova304@gmail.com