

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ
И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ**

УДК 533.924

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ ИМПУЛЬСНЫМИ
ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ НА ТОЛЩИНУ, МИКРОТВЕРДОСТЬ,
ЭЛЕМЕНТНЫЙ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВЫ МОДИФИЦИРОВАННЫХ
ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ**

© 2023 г. А. К. Кутуков^а, *, И. М. Позняк^а, С. Е. Панин^а,
Н. А. Данилина^а, М. А. Миллер^а, В. В. Гапонова^а, А. А. Сергеечев^а

^аАО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, 108840 Россия

*E-mail: kutukov@triniti.ru

Поступила в редакцию 20.07.2022 г.

После доработки 26.07.2022 г.

Принята к публикации 28.07.2022 г.

Недостаточная изученность процессов, происходящих при обработке материалов импульсными плазменными потоками, не позволяет оценить основные параметры модифицированного слоя. Ввиду этого, для каждого материала производят экспериментальный подбор режима для получения оптимальной толщины и микротвердости слоя закалки. В данной научной работе исследовались элементный и фазовый составы, микротвердость и толщина слоя закалки конструкционных сталей 45, 20Х и 40ХН2МА, облученных при различных длительностях и количестве импульсов.

Ключевые слова: конструкционные стали, обработка импульсными потоками плазмы, толщина модифицированного слоя, микротвердость, элементный и фазовый состав

DOI: 10.56304/S207956292205027X

ВВЕДЕНИЕ

Обработка материалов импульсными плазменными потоками (ИПП) – перспективный метод модифицирования поверхностного слоя и улучшения эксплуатационных характеристик материалов [1]. Суть метода заключается в быстром нагреве поверхности до (или выше) температуры фазовых переходов с последующим резким охлаждением. Одной из главных особенностей данного метода является возможность облучения достаточно большой площади поверхности за короткий промежуток времени. Однако процессы, происходящие в материале во время облучения ИПП, мало изучены, а оптимальные условия модифицирования, при которых достигается максимальные толщина слоя и микротвердость, уникальны для каждого материала, поэтому необходимые условия облучения определяются экспериментально [2].

Целью данной работы было определение влияния длительности и количества импульсов на толщину модифицированного слоя конструкционных сталей, а также на его элементный, фазовый составы и микротвердость.

**УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА
И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Исследование влияния обработки ИПП на характеристики модифицированного слоя проводилось для следующих марок конструкционных сталей: 45, 20Х, 40ХН2МА, элементный состав которых представлен в табл. 1.

Для осуществления обработки импульсными потоками плазмы использовались следующие установки: квазистационарный плазменный ускоритель (КСПУ) и импульсный плазменный ускоритель МКТ.

Таблица 1. Марки и элементные составы исследуемых сталей [3]

№	Марка стали	C	Si	Mn	Ni	Cu	Cr	S	P	Mo
1	Ст45	0.45	0.27	0.65	<0.25	<0.25	<0.25	<0.04	<0.035	—
2	20Х	0.20	0.27	0.65	<0.3	<0.3	0.85	<0.035	<0.035	—
3	40ХН2МА	0.38	0.27	0.37	3	<0.3	1	<0.025	<0.025	0.25

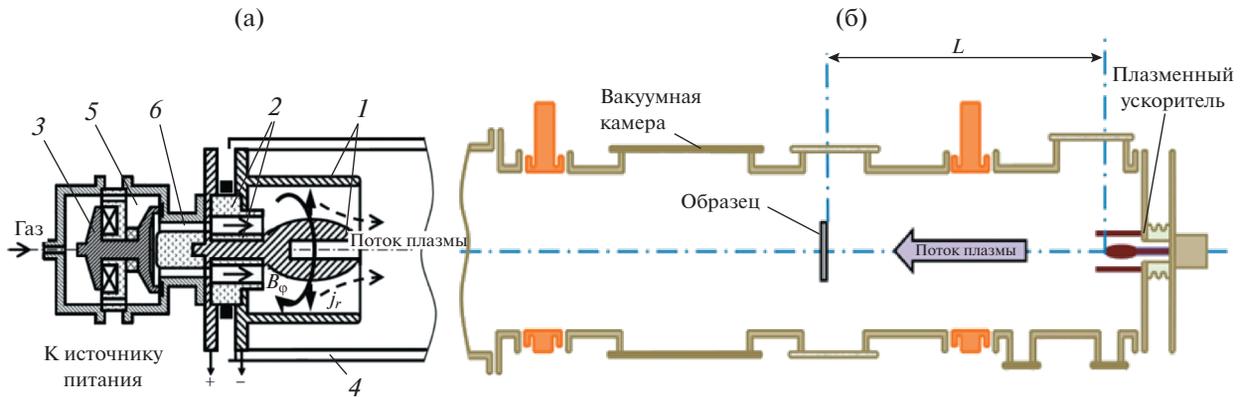


Рис. 1. Установка КСПУ [4] (а) и схема облучения образцов (б) [1]: 1 – электроды, 2 – изоляторы, 3 – электродинамический клапан, 4 – вакуумная камера, 5 – подклапанный объем для рабочего газа, 6 – дросселирующий канал.

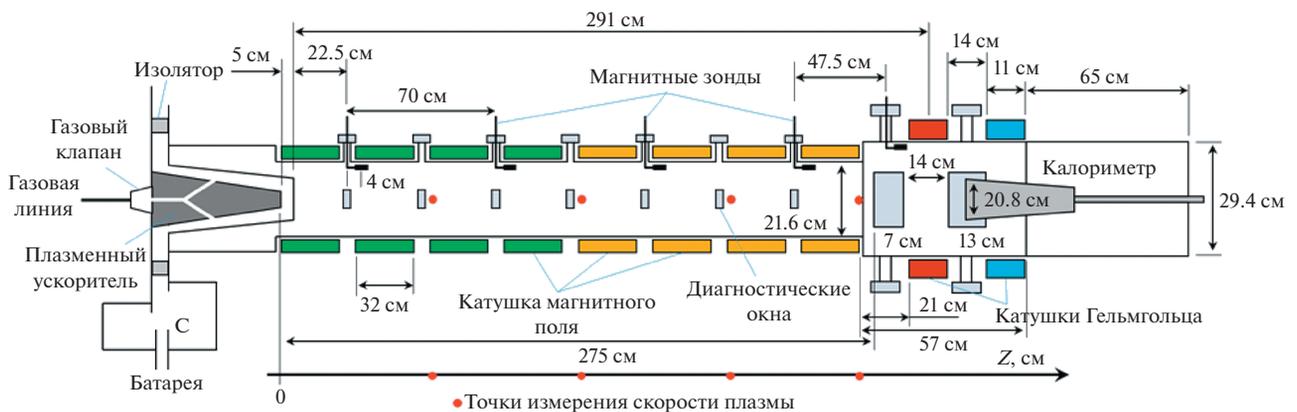


Рис. 2. Схема установки МКТ [6].

Установка КСПУ представляет собой одноступенчатый квазистационарный плазменный ускоритель с собственным магнитным полем [6], генерирующий аксиальный поток плазмы вдоль оси системы. КСПУ [4] и схема облучения образцов представлены на рис. 1. Основными частями ускорителя являются два коаксиальных электрода (1), разделенных изолятором (2), и электродинамический клапан (3), обеспечивающий подачу рабочего газа в межэлектродный промежуток. Электродная система ускорителя помещена в вакуумную камеру (4). Перед каждым пуском вакуумная камера откачивается до давления $5 \cdot 10^{-4}$ мм. рт. ст., подклапанный объем (5) заполняется рабочим газом до давления несколько атмосфер. При срабатывании электродинамического клапана газ через дросселирующий канал (6) начинает поступать в межэлектродный промежуток. Спустя определенное время (время задержки) на электроды ускорителя подается напряжение, в результате чего происходят пробой и ионизация газа в межэлектродном зазоре ускорителя. Энергопитание ускорителя осуществляется от конденса-

торной батареи с общей емкостью 96 мФ и максимальным напряжением зарядки 5 кВ, разделенной на 6 одинаковых секций, которые коммутируются на нагрузку независимым образом.

Схема экспериментов (рис. 1б) выглядела следующим образом: поток плазмы, сформированный плазменным ускорителем, падает на поверхность образца, расположенного на расстоянии L от электродов ускорителя. При взаимодействии плазменного потока с поверхностью облучаемого образца происходит его нагрев с передачей энергии вглубь материала.

Установка МКТ состоит из мощного электродинамического плазменного ускорителя, плазموпровода и мишенной камеры с набором диагностических средств (рис. 2). Электродная система плазменного ускорителя выполнена в виде двух усеченных коаксиальных конусов из нержавеющей стали. У основания электроды разделены кольцевым изолятором из органического стекла [7].

Напуск рабочего газа в межэлектродный зазор ускорителя осуществляется с помощью быстродей-

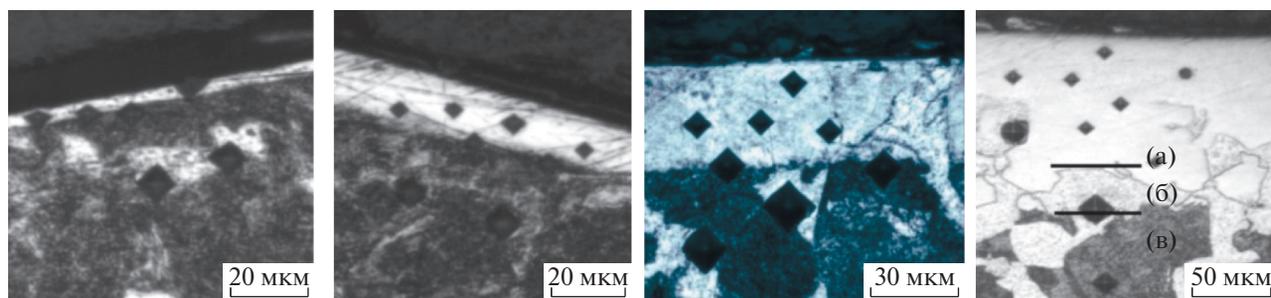


Рис. 3. Фотографии срезов Ст45 с длительностью импульсов 0.15 мкс, 0.2, 0.6 и 1 мс соответственно: (а) зона закалки, (б) зона термического влияния, (в) зона исходной структуры.

ствующего электродинамического клапана, расположенного у основания катода. Питание ускорителя происходит от конденсаторной батареи емкостью $C_0 = 648$ мкФ. В ходе экспериментов рабочее напряжение U может варьироваться в диапазоне 10–22 кВ, что соответствует изменению запасенной в батарее энергии – от 31 до 155 кДж. Для коммутации батареи на электроды ускорителя используются 6 дисковых вакуумных разрядников. Магнитное поле внутри плазмопровода создается с помощью двух соленоидов, состоящих из четырех многовитковых катушек каждый, включенных в цепь питания последовательно. На рис. 2 соленоиды показаны зеленым и оранжевым цветом. Запитка соленоидов происходит от независимых конденсаторных батарей, что позволяет варьировать профиль поля по длине плазмопровода. Взаимодействие плазмы с исследуемыми образцами происходит в мишенной камере, длиной 50 см и диаметром 30 см. С помощью колец Гельмгольца внутри камеры создается продольное магнитное поле, величина которого может достигать 2 Тл.

Облучение образцов проводилось при следующих параметрах плазменного воздействия: длительность импульса – 0.15 мкс на МКТ; 0.2–1.0 мс с шагом 0.2 мс на КСПУ; количество плазменных воздействий – 1, 3, 5, 10. В качестве плазмообразующих газов выбраны гелий и азот. Исследование толщины модифицированного слоя осуществлялось по фотографиям среза образцов, полученных с помощью оптического микроскопа. Методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии на сканирующем электронном микроскопе изучен элементный состав поверхности после облучения. Рентгенофазовый анализ произведен на дифрактометре (Со-излучение).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

После обработки образцов плазмой были получены фотографии их срезов. На рис. 3 приведены изображения микроструктуры Ст45 после облучения с различной длительностью: для 0.25 мкс и 0.2 мс характерно отсутствие визуально различимого

слоя термического влияния (ТРВ), при увеличении до 0.6 и 1 мс данный слой четко различим.

Для всех марок сталей наблюдается следующая зависимость: с увеличением длительности воздействия плазмы на образец происходит утолщение модифицированного слоя (рис. 4а). Кроме того, установлено, что аналогичная зависимость (рис. 4б) существует между толщиной слоя закалки и количеством импульсов: на рис. 5 представлены фотографии срезов стали 20Х, на которых наблюдается увеличение толщины слоя закалки при облучении в различных режимах.

Таким образом, увеличение количества и длительности плазменных импульсов, позволяет получить большую толщину слоя закалки. Данный эффект обусловлен увеличением количества энергии, сообщаемого плазмой материалу, что, в свою очередь, приводит к изменению структуры стали.

На облученных образцах измерена микротвердость, которая оказалась выше, чем у исходных образцов. Измерения проводили в различных точках: на поверхности и на торце, на различных толщинах модифицированного слоя. На рис. 6а представлена зависимость исследуемой характеристики от количества импульсов.

Как видно из диаграммы, микротвердость на поверхности всегда выше, чем на торце, что, в первую очередь, связано с более мелкозернистой структурой поверхностного слоя, которая образуется в результате большего переохлаждения. По этой же причине наблюдается повышение микротвердости при увеличении количества импульсов: закалка происходит при более высокой температуре, что способствует ускоренному зарождению зародышеобразования.

В поверхностном слое образцов, подвергшихся облучению N_2 , обнаружено присутствие данного элемента в диапазоне от 2% (при нагреве выше температуры плавления) до 7.3% (при нагреве до плавления), из чего можно сделать предположение, что азот в материале присутствует в виде карбонитридов железа. Результаты энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии приведены на

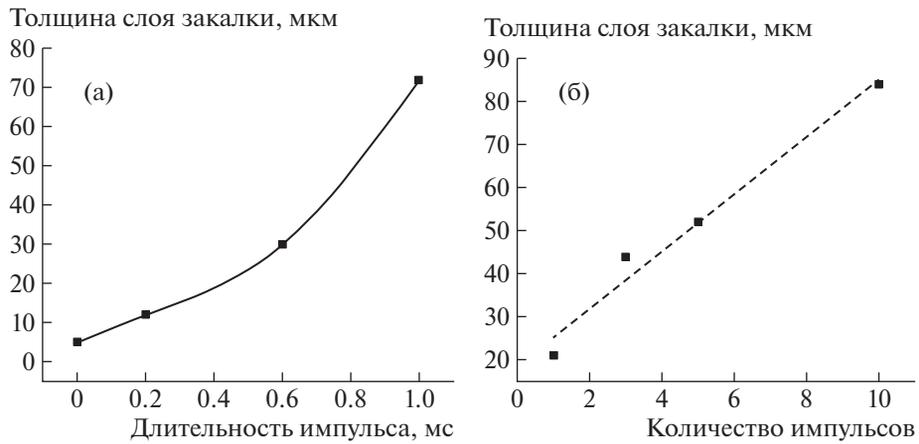


Рис. 4. Зависимость толщины слоя закалки от длительности (а) и от количества (б) импульсов для Ст45 и 20Х соответственно.

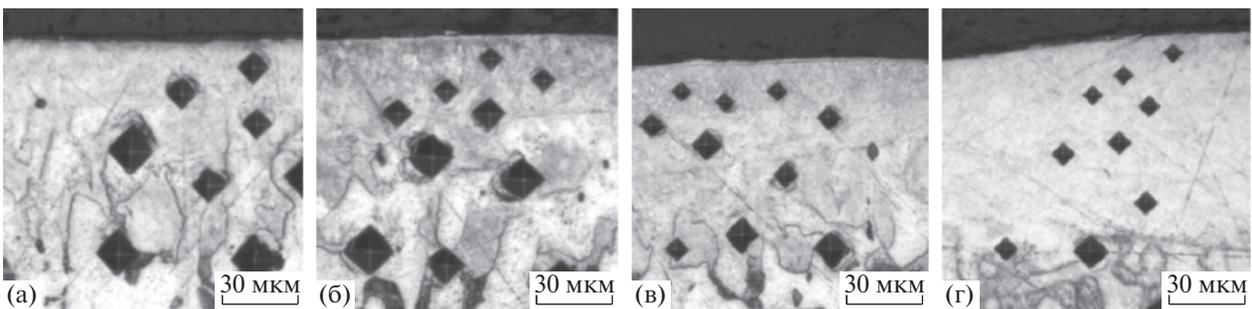


Рис. 5. Фотографии срезов стали 20Х, обработанных плазмой при различном количестве импульсов: (а) 1 импульс, (б) 3 импульса, (в) 5 импульсов, (г) 10 импульсов.

диаграмме (рис. 6б) для режимов с температурой ниже и выше температуры плавления.

Из диаграммы видно, что режим облучения напрямую влияет на содержание азота в поверхност-

ном слое: при достижении температур, превышающих температуру плавления, диффузия элемента затрудняется. Кроме того, на внедрение азота влияет химический состав стали, в особенности – угле-

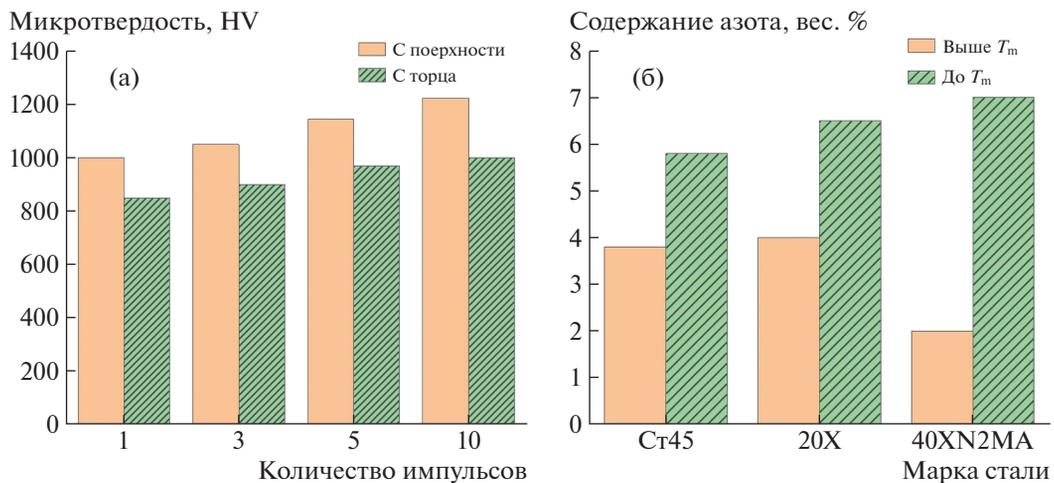


Рис. 6. Диаграммы микротвердости на поверхности и торце образцов стали 20Х в зависимости от количества импульсов (а) и изменения содержания азота от режима обработки (б).

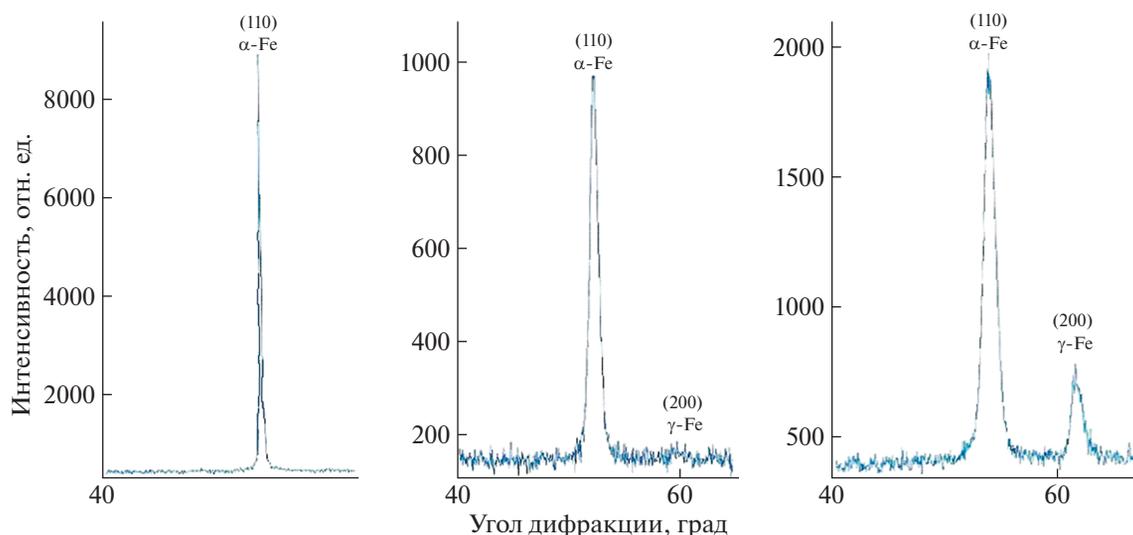


Рис. 7. Участок дифрактограммы Ст 45 до обработки и после облучения плазменным импульсом длительностью 0.2 и 1 мс соответственно.

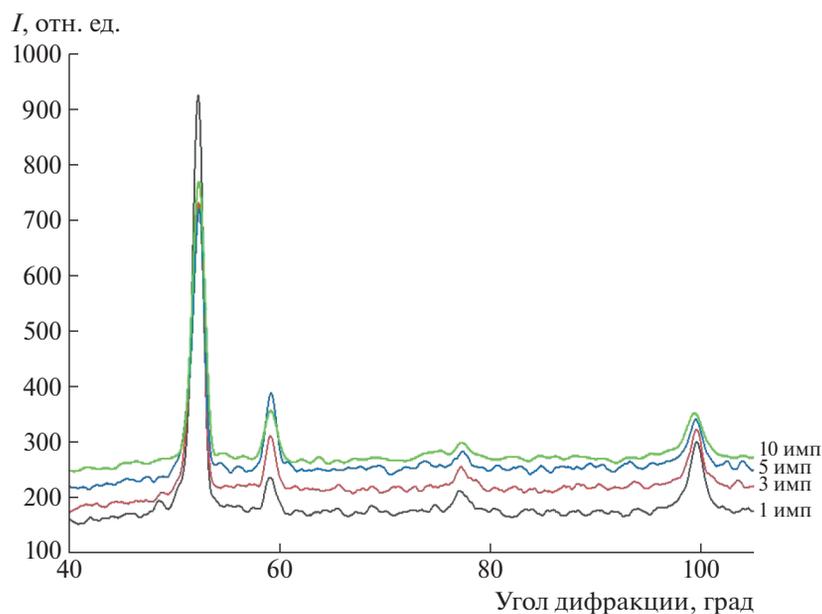


Рис. 8. Участок дифрактограмм стали 20X после облучения различным количеством импульсов.

род, способный замедлять данный процесс. Элементный анализ показал отсутствие изменений состава при облучении гелием во всех режимах.

Изменению подвергается не только элементный состав, но и фазовый. На рис. 7 представлены дифрактограммы образца Ст45 до и после облучения. Отмечено, что при увеличении продолжительности импульса наблюдается появление преимущественной ориентировки зерна, что выражено в виде пиков гамма-железа. Интенсивность соответствующих пиков растет с увеличением длительности импульса, что связано с большим переохлаждением

аустенита в процессе теплоотвода, в результате чего происходит ориентированный рост зерен.

Изменения в фазовом составе низколегированной стали 20X при изменении количества импульсов незначительны (рис. 8): небольшое уменьшение интенсивности пиков ввиду увеличения дисперсности слоя. В образцах низколегированной углеродистой стали 40ХН2МА при увеличении длительности импульсов наблюдается снижение интенсивности пиков (рис. 9) высокотемпературной гамма-фазы и увеличение низкотемпературной альфа-фазы: возрастает тепловое воздействие и

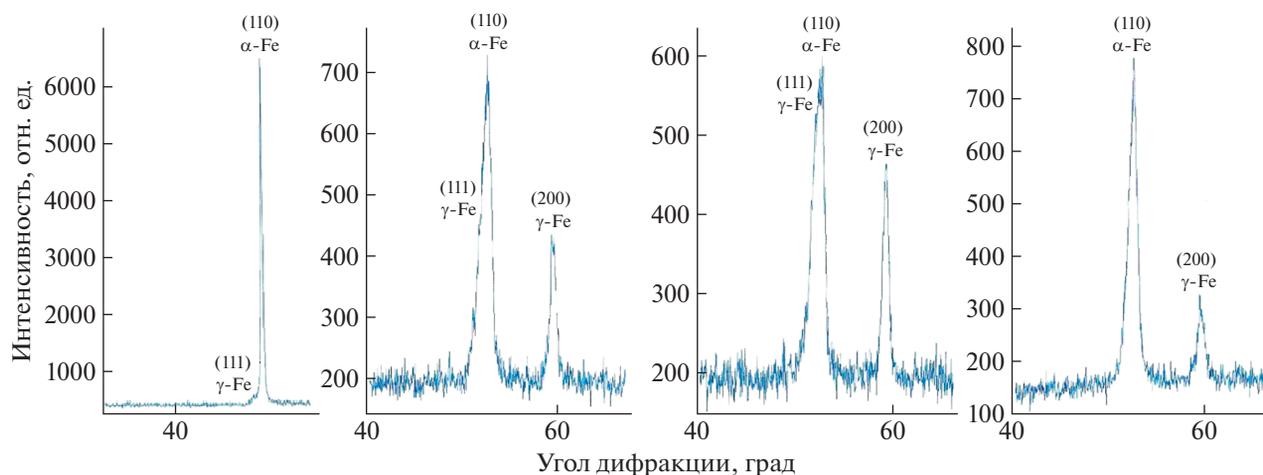


Рис. 9. Участок дифрактограмм стали 40XN2MA при длительности воздействия 0,2, 0,6 и 1 мс соответственно.

мартенситное превращение протекает более полно по отношению к низкоуглеродистым сталям.

ВЫВОДЫ

В ходе работы были получены следующие результаты:

– с увеличением длительности (от 0,15 мкс до 1 мс) импульса и их количества (1, 3, 5, 10) толщина слоя закалки исследуемых сталей повышается;

– в результате увеличения количества импульсов при обработке исследуемых сталей образуется мелкозернистая структура, обладающая повышенной твердостью;

– на элементный состав сталей влияет сорт плазмообразующего газа: при использовании азота, поверхностный слой будет содержать данный химический элемент. Его концентрация зависит от режима облучения: максимальное значение достигается при закалке от температур ниже плавления. Гелий не оказывает влияния на элементный состав образцов;

– для марок нелегированных сталей характерно наличие текстуры, о чем можно судить по на-

личию пиков гамма-железа. Изменения фазового состава у низколегированных сталей зависят от содержания в них легирующих компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Грибков В.А. и др. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов: Учеб. пособие для студентов. 2001. Москва: Круглый год.
2. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Сварка, нанесение покрытий, упрочнение. 2008. Москва: Машиностроение.
3. Сорокин В.Г. и др. Марочник сталей и сплавов. 1989. Москва: Машиностроение.
4. Коваленко Д.В. и др. // ВАНТ. Сер.: Термоядерный синтез. 2014. Т. 37 (4). С. 39–48.
5. Позняк И.М. и др. // ВАНТ. Сер.: Термоядерный синтез. 2012. № 4. С. 23–33.
6. Морозов А.И. Введение в плазмодинамику. 2006. Москва: Физматлит.
7. Климов Н.С. Макроскопическая эрозия материалов при их облучении интенсивными потоками плазмы. дис. к.ф.-м.н. 01.04.08. 2011. Троицк.

Effect of Pulsed Plasma Flow Treatment Parameters on the Thickness, Microhardness, and Elemental and Phase Compositions of Modified Surface Layers of Structural Steel

A. K. Kutukov¹, *, I. M. Poznyak¹, S. E. Panin¹, N. A. Danilina¹,
M. A. Miller¹, V. V. Gaponova¹, and A. A. Sergeev¹

¹JSC "SSC RF Trinity", Troitsk, 108840 Russia

*e-mail: kutukov@triniti.ru

Received July 20, 2022; revised July 26, 2022; accepted July 28, 2022

Abstract—The processing of materials by pulsed plasma flows is insufficiently studied, that does not allow estimating the main parameters of the modified layer. In view of this, the processing mode is selected experi-

mentally for each individual material to obtain the optimal hardening layer thickness and microhardness. In this scientific work, structural steels 45, 20Kh and 40KhN2MA were irradiated at different durations and number of pulses, subsequently, the elemental and phase composition, microhardness and thickness of the hardening layer were studied.

Keywords: structural steels, pulsed plasma flows treatment, modified layer thickness, microhardness, elemental and phase composition