

Лазерная обработка поверхности металлических сплавов для диффузионной сварки

Ю. А. Вашуков, С. Ф. Демичев, В. Д. Еленев, Т. В. Малинский, С. И. Миколуцкий,
Ю. В. Хомич, В. А. Ямщиков

При обработке поверхности CuCrZr-бронзы сканирующим пучком наносекундных лазерных импульсов с длиной волны излучения 355 нм выявлено образование структур в виде сфер диаметром около 500 нм, расположенных на ножках высотой до 1 мкм. Обнаружено влияние плотности энергии лазерного излучения и скорости сканирования лазерным пучком на формирование данных субмикронных структур. Показана возможность улучшения качества соединения металлических сплавов при диффузионной сварке за счет лазерной обработки поверхностей заготовок.

Ключевые слова: наноструктурирование поверхности, диффузионная сварка, наносекундные лазеры, временное сопротивление, микроструктуры.

Ссылка: Вашуков Ю. А., Демичев С. Ф., Еленев В. Д., Малинский Т. В., Миколуцкий С. И., Хомич Ю. В., Ямщиков В. А. // Прикладная физика. 2019. № 1. С. 82.

Reference: Yu. A. Vashukov, S. F. Demichev, V. D. Elenev, T. V. Malinskiy, S. I. Mikolutskiy, Yu. V. Khomich, and V. A. Yamshchikov, Prikl. Fiz., No. 1, 82 (2019).

Введение

Последние десятилетия характеризуются повышенным вниманием к наноструктурам как перспективному объекту для применения в различных областях науки и техники. Использование наноструктур позволяет улучшить свойства обрабатываемого материала. Например, возможно увеличение прочности совместно с пластичностью в металлах и сплавах [1] или контролируемое изменение электрических свойств поверхности проводников и диэлектриков [2]. В атмосферной плазменной технологии, основанной на барьерном

разряде [3], поверхностные микро- и наноструктуры позволяют снижать порог зажигания разряда, улучшать однородность разряда, повышая эффективность отдельных узлов устройств формирования электрогидродинамических потоков и атмосферных ионных двигателей [4, 5].

Наноструктурирование поверхности заготовок при диффузионной сварке разнородных материалов, широко применяемой в атомной промышленности, авиационной и космической технике, приводит к улучшению механических свойств сварного шва [6, 7] и качества соединения в целом.

Целью данной работы являлось исследование возможности использования лазерной обработки для повышения механических параметров (временное сопротивление и относительное удлинение) твердотельных сварных соединений металлических сплавов из циркониевой бронзы и нержавеющей стали.

Постановка работы

В результате быстропотекающих тепловых процессов, фазовых переходов, массопереноса под действием фемтосекундного или наносекундного лазерного излучения могут образовываться структуры различных типов: наноджеты, наноотверстия, нано- и мезочастицы, микроконусы. Обычно для создания таких структур используется излучение фемтосекундных лазеров и микрообъективы с

Вашуков Юрий Александрович¹, доцент, к.т.н.

Демичев Сергей Федорович¹, доцент, к.т.н.

Еленев Валерий Дмитриевич¹, директор института авиационной техники, д.т.н.

Малинский Тарас Владимирович², зав. лаб., к.т.н.

Миколуцкий Сергей Иванович², с.н.с., к.ф.-м.н.

Хомич Юрий Владиславович², м.н.с.

Ямщиков Владимир Александрович², директор московского филиала, д.т.н., чл.-корр. РАН.

¹ Самарский Университет.

Россия, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34.

Тел. 8(846) 267-43-39. E-mail: elenev@ssau.ru

² Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.

Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 18.

Тел. 8(499) 135-11-95. E-mail: mikolserg@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28 января 2019 г.

высокой (более 0,8) числовой апертурой [8, 9]. В данной работе для получения поверхностных микро- и наноструктур предлагается использовать метод прямого лазерного наноструктурирования [10–12]. Он широко используется для обработки металлических поверхностей [13], создания структур для медико-биологических исследований [14], увеличения эффективности топливных ячеек [15]. К достоинствам метода относится возможность получения различных наноструктур с помощью достаточно простой и производительной установки на основе наносекундных лазеров [16].

Экспериментальная установка и методика эксперимента

В работе использована экспериментальная установка, схема и подробное описание которой представлено в [16]. Ее основным элементом является импульсно-периодический твердотельный NdYAG-лазер HR2731 (Opotec Inc.), работающий на третьей гармонике с длиной волны излучения 355 нм. Длительность импульса составляет 10 нс, а энергия в импульсе может достигать 8 мДж. Лазерный пучок проходит формирующую оптическую систему, состоящую из конденсора, диафрагмы и проекционной линзы.

Отличием данной схемы от представленной в [16] является наличие газонаполняемой камеры с входным окном, через которое излучение попадает на образец. Камера располагается на трехкоординатном столике, состоящем из двух подвижек 8MT180 и одной подвижки 8MT175. Управление данными подвижками осуществляется посредством контроллера 8SMC1-USBhF (Standa Ltd). Применение газонаполняемой камеры позволяет проводить обработку образцов в вакууме или в выбранной газовой среде (воздух, аргон). Откачка газов осуществляется форвакуумным насосом, а напуск аргона происходит из газового баллона через специальные входные отверстия.

Для проведения экспериментов использовались образцы круглой формы из CuCrZr-бронзы диаметром 18 мм и толщиной 5 мм. Их обработка проводилась лазерным пучком диаметром около 200 мкм, сканирующим поверхность в прямом и обратном направлениях, при скорости перемещения пучка по горизонтали от 0,5 мм/с до 1 мм/с. Так как частота следования импульсов излучения составляла 100 Гц, то смещение лазерного пятна за время между импульсами составляло величину от 10 мкм до 20 мкм. Смещение пучка между «строчками» по вертикали было приблизительно таким же. Благодаря малой скорости сканирования на каждый участок обрабатываемой поверхности при-

ходило более 100 импульсов. Плотность энергии в импульсе варьировалась от 0,2 Дж/см² до 1,7 Дж/см². Большое число импульсов позволило обеспечить постоянную плотность поглощенной энергии практически по всей площади поверхности и исключить появления периодических структур, определяемых траекторией перемещения лазерного пучка.

Обработанные поверхности исследовались с помощью профилометра NewView 7300 (ZYGO Europe Corp.), сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Phenom Pro и атомно-силового микроскопа (АСМ) Alpha 300 (WITec).

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Перед облучением образцы из CuCrZr-бронзы подвергались механической обработке, вследствие чего на необлученной поверхности наблюдаются следы в виде борозд с шириной до нескольких десятков микрометров и высотой около 10 мкм. На склонах и вершинах борозд можно различить микроострия и структуры в виде выступов с размерами 1–5 мкм. Дополнительной полировки поверхности не проводилось, так как метод прямого лазерного наноструктурирования при достаточной энергии в импульсах позволял удалять незначительные хаотичные дефекты рельефа и обрабатывать поверхность при перепадах высот рельефа порядка 10 мкм.

При облучении образцов лазерными импульсами с малой плотностью энергии до 0,4 Дж/см² (как в воздушной среде, так и в среде аргона) в основном происходило удаление верхнего оксидного слоя с поверхности бронзового сплава. Крупномасштабная структура почти не изменялась, но наблюдалось сглаживание микроострий и выступов на поверхности борозд.

При плотности энергии в импульсе 1,2 Дж/см² и скорости сканирования лазерным пучком 1 мм/с становится заметным оплавление поверхности, а также наблюдается формирование структур круглой формы с диаметром менее одного микрометра, которые на профилометре наблюдались в виде темных точек. Стоит отметить, что появление такого рода структур было заметно уже при плотностях энергии лазерного импульса от 0,6 до 0,85 Дж/см², но в гораздо меньших количествах. Для более детального исследования размеров обнаруженных субмикронных структур был использован атомно-силовой микроскоп. На АСМ-изображении профиля поверхности бронзы видны структуры конической формы, высота которых варьируется от 300 до 1000 нм (см. рис. 1).

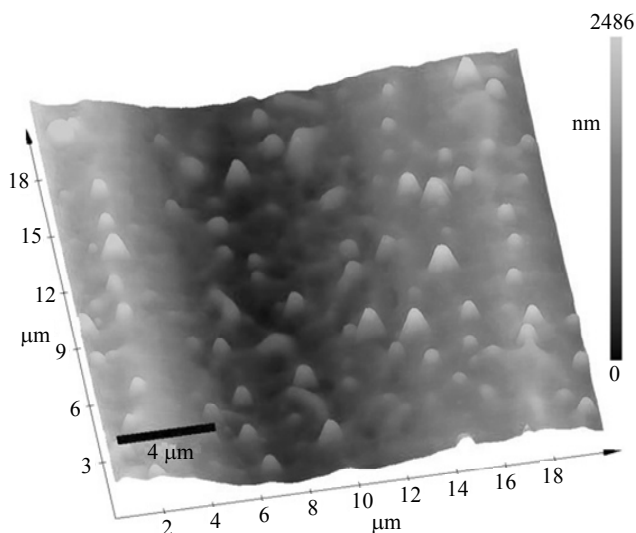


Рис. 1. АСМ-изображение поверхности бронзы после облучения твердотельным лазером при скорости сканирования 1,0 мм/с и плотности энергии в импульсе 1,2 Дж/см² в вакууме.

Так как зондовый принцип измерения поверхности имеет свои недостатки, для уточнения формы образующихся структур было проведено

исследование с помощью сканирующего электронного микроскопа, результаты которого представлены на рис. 2. На изображении поверхности бронзы (рис. 2, а) видно, что новые структуры представляют собой сферы диаметром около 500 нм, расположенные на ножках, высота которых может достигать 1 мкм. Причем данные структуры располагаются на червеобразных бороздах и каналах с поперечными размерами от 1 до 3 мкм и протяженностью около 10 мкм.

При уменьшении скорости сканирования лазерного пучка в два раза до 0,5 мм/с (то есть при увеличении количества импульсов на единицу облучаемой поверхности) при той же плотности энергии в 1,2 Дж/см² происходит дальнейшее развитие поверхности и увеличение количества шарообразных структур на подножках на единицу поверхности приблизительно в два раза (рис. 2, б). При превышении плотности энергии более 1,2 Дж/см² наблюдается сильное оплавление поверхности, количество шарообразных структур на подножках значительно уменьшается, что, вероятно, связано с интенсивным абляционным удалением материала.

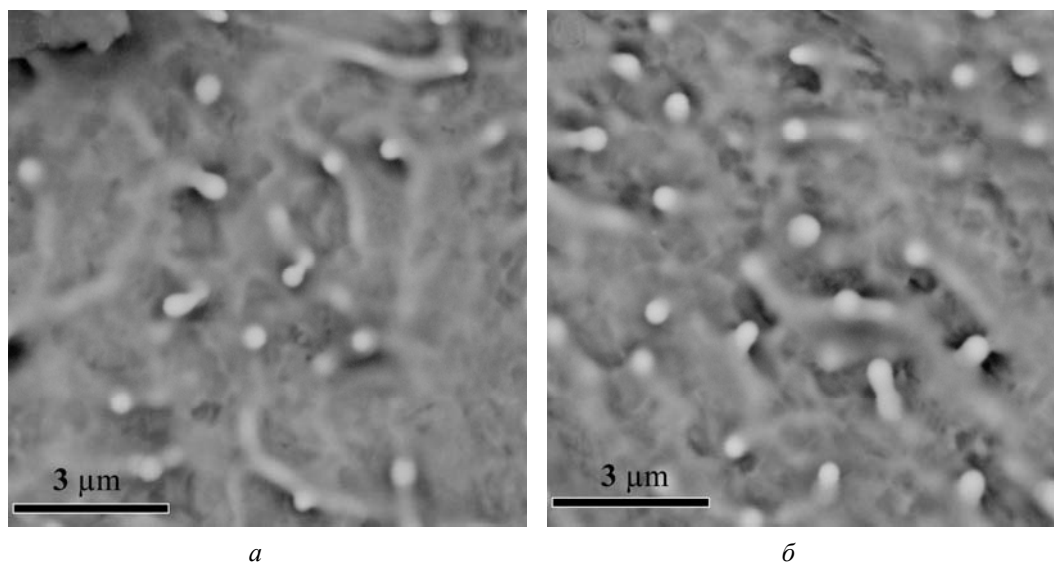


Рис. 2. Полученные на сканирующем электронном микроскопе изображения поверхности бронзы после облучения твердотельным лазером в вакууме при плотности энергии в импульсе в 1,2 Дж/см² при различных скоростях сканирования лазерного пучка: (а) 1,0 мм/с; (б) 0,5 мм/с.

Хотя лазерно-индуцированные периодические структуры впервые получены около 50 лет назад, до сих пор нет полного понимания процессов зарождения и образования лазерно-индуцированных наноструктур. Одно из общепринятых объяснений относится к пространственной модуляции нагрева поверхности, которая является результатом интерференции падающей лазерной волны с полем, возникшим при рассеянии излучения на флуктуационных модуляциях рельефа по-

верхности [17]. Механизмы формирования «нерезонансных» структур при лазерном воздействии предложены в работах [10, 18, 19]. Причем, рассмотрены процессы, обусловленные как массопереносом в процессе лазерно-индуцированного испарения [18], так и переходом материала из жидкой фазы в твердую в условиях высокой скорости охлаждения [10, 19].

В условиях настоящих экспериментов развитие структур в виде субмикронных сферических

капель на ножках при характерном расстоянии микронного порядка между структурами вдоль поверхности 1,5–2 мкм может быть объяснено совместным действием плавления и испарения в некотором диапазоне плотностей энергии выше порога плавления. Модуляция рельефа поверхности, например, в виде капиллярных волн с характерными для металлов и сплавов микронными периодами [17, 20] приводит к соответствующей модуляции температуры и испарительного давления вдоль поверхности в виде некоторой двумерной квазипериодической решетки. Расплав при таком неоднородном испарении выдавливается вдоль поверхности в места минимумов испарительного давления, где и происходит выброс жидких струй расплава преимущественно в направлении поперек поверхности. При этом силы поверхностного натяжения приводят к развитию сферических капель на концах этих струй на заключительной стадии их развития, когда заканчивается действие импульсного испарительного давления и начинается затвердевание расплава.

Диффузионная сварка

Образцы из бронзы с развитой вышеописанным способом поверхностью (обработка при плотности энергии 1,2 Дж/см², скорости сканирования 1 мм/с в среде аргона) далее соединялись с образцами из стали 12Х18Н10Т (обработка при плотности энергии 1,1 Дж/см², скорости сканирования 1 мм/с в вакууме) с помощью газостатической диффузионной сварки. Поверхностные структуры, получаемые на стали 12Х18Н10Т при облучении наносекундными импульсами NdYAG-лазера, показаны на рис. 3.

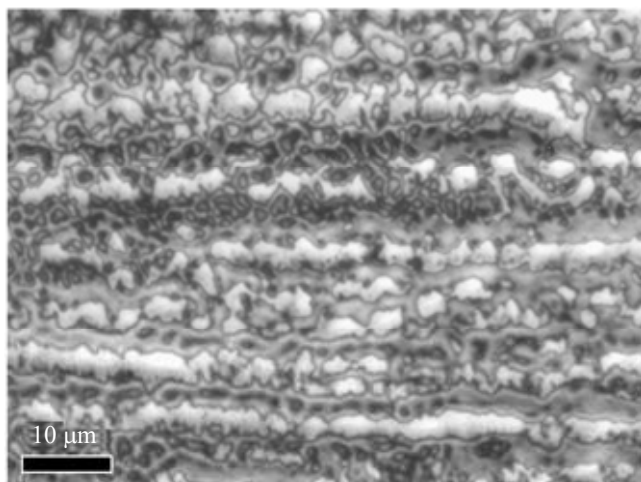


Рис. 3. Полученные на профилометре изображение поверхности стали 12Х18Н10Т после облучения твердотельным лазером в вакуумной камере при плотности энергии в импульсе в 1,1 Дж/см² при скорости сканирования лазерного пучка 1,0 мм/с.

Наблюдается сильное оплавление поверхности. Борозды от механической обработки в процессе оплавления начинают разбиваться на круглые холмообразные островки с поперечными размерами от 5 до 10 мкм и высотой приблизительно 500 нм.

Для сравнения механических свойств при одинаковых условиях сварки были получены соединения заготовок без лазерной обработки и заготовок, обработанных методом прямого лазерного микро- и наноструктурирования. После их сварки в условиях горячего изостатического прессования проводились измерения временного сопротивления сварного шва. Из сваренной заготовки изготавливали образцы тип I по ГОСТ6996-66 и испытывали их на статическое растяжение при комнатной температуре. Испытания показали, что временное сопротивление сварного соединения увеличивается на 15 %, а именно, с 245 МПа в отсутствие обработки до 281 МПа при лазерной обработке поверхностей.

Наиболее вероятная причина улучшения свойств сварного соединения – лазерно-индуцированная модификация поверхности в результате воздействия наносекундных импульсов УФ-излучения. Сочетание малой длительности импульса и короткой длины волны, поглощающейся в микрометровом слое, позволяет создавать большие температурные градиенты, способствующие образованию новых микро и наноструктур.

Имеется немало экспериментальных и теоретических работ, показывающих, что коэффициент диффузии по границам зерен может на порядки превышать значения в объеме зерен [6, 7, 21, 22]. Поэтому создание поверхностных наноструктур может улучшить качество соединения как за счет большей плотности сетки границ зерен, обеспечивающих более активную диффузию в материале, так и в результате облегченной пластической деформации ультрамелкозернистого материала.

Заключение

При обработке поверхности CuCrZr-бронзы сканирующим пучком наносекундных лазерных импульсов с длиной волны излучения 355 нм было выявлено образование субмикронных структур в виде сфер диаметром около 500 нм, находящихся на вершинах конических ножек высотой до 1 мкм. Сканирование поверхности проводилось пучком наносекундного лазера диаметром около 200 мкм со степенью перекрытия более 95 %. Формирование такого рода структур наблюдалось при плотностях энергии лазерного импульса от 0,6 до 1,2 Дж/см², причем количество шарообразных

структур на единице площади растёт с увеличением плотности энергии лазерного импульса. Также было обнаружено, что количество таких структур на единице площади растёт при уменьшении скорости сканирования лазерным пучком по поверхности.

При обработке заготовок из циркониевой бронзы и нержавеющей стали 12X18H10T импульсами УФ-излучения NdYAG-лазера и их диффузионной сварке было выявлено увеличение временного сопротивления сварного соединения на 15 %. Оно может быть обусловлено большей плотностью сетки границ зерен, обеспечивающих более активную диффузию в материале, а также облегченной пластической деформацией ультрамелкозернистого материала.

Проведенные исследования открывают возможность улучшения качества соединения металлических сплавов при диффузионной сварке за счет лазерной обработки поверхностей заготовок, что имеет немаловажное значение для атомной промышленности и авиационно-космической техники.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 17-08-01409 А.

ЛИТЕРАТУРА

1. Matsui I., Uesugi T., Takigawa Y., Higashi K. // Acta Mater. 2013. Vol. 61. P. 3360.
2. Lu L., Shen Y., Chen X., Qian L., Lu K. // Science. 2004. Vol. 304. P. 422.
3. Chernyshev S. L., Gamirullin M. D., Kuryachii A. P., Litvinov V. M., Manuilovich S. V., Rusyanov D. A., Khomich V. Y., Moshkunov S. I., Rebrov I. E., Yamshchikov V. A. // Aerosp. Sci. Technol. 2016. Vol. 59. P. 155.
4. Peterson M. S., Fisher T. S., Garimella S. V., Schlitz D. J. in ASM E. 2003. P. IMECE2003-41775.
5. Khomich V. Yu., Malashin M. V., Moshkunov S. I., Shershunova E. A., Yamschikov V. A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. Vol. 42. No. 10. P. 3314.
6. Лутфуллин П. Я., Мухаметрахимов М. Х., Валитов В. А., Мухтаров Ш. Х., Классман П. А. // Перспективные материалы. 2011. № 12. С. 295.
7. Хазгалиев Р. Г., Мухаметрахимов М. Х. // Перспективные материалы. 2011. № 12. С. 529.
8. Kuchmizhak A. A., Ionin A. A., Kudryashov S. I., Makarov S. V., Rudenko A. A., Kulchin Yu. N., Vitrik O. B., Efimov T. V. // Opt. Lett. 2015. Vol. 40. P. 1687.
9. Kuchmizhak A., Pavlov D., Vitrik O., Kulchin, Y. N. // Applied Surface Science. 2015. Vol. 357. Part B. P. 2378.
10. Zavestovskaya I. N. // Quantum Electronics. 2010. Vol. 40. No. 11. P. 942.
11. Лапшин К. Э., Обидин А. З., Токарев В. Н., Хомич В. Ю., Шмаков В. А., Ямицков В. А. // Российские нанотехнологии. 2007. Т. 2. № 11-12. С. 50.
12. Токарев В. Н., Хомич В. Ю., Шмаков В. А., Ямицков В. А. // Доклады Академии наук. 2008. Т. 419. № 6. С. 754.
13. Vorobyev A. Y., Guo C. // Appl. Phys. 2008. Lett. Vol. 92. P. 041914-3.
14. Pfleging W., Adamietz R., Brückner H.J., Bruns M., Welle A. // Proceedings of SPIE. 2007. Vol. 6459. P. 645907.
15. Khomich V. Yu., Urlichich Yu. M., Shmakov V. A., Tokarev V. N., Galstyan A. M., Mikolutskiy S. I., Malinskiy T. V., Ganin D. V. // Inorg. Mater.: Appl. Res. 2013. Vol. 4. No. 3. P. 201.
16. Железнов Ю. А., Малинский Т. В., Миколуцкий С. И., Токарев В. Н., Хасая Р. Р., Хомич Ю. В., Ямицков В. А. // Прикладная физика. 2014. № 3. С. 83.
17. Ахманов С. А., Емельянов В. И., Коротеев Н. И., Семиногов В. Н. // УФН. 1985. Т. 147. С. 675.
18. Токарев В. Н., Хомич В. Ю., Шмаков В. А., Ямицков В. А. // ФХОМ. 2008. № 4. С. 15.
19. Хомич В. Ю., Шмаков В. А. // УФН. 2015. Т. 185. № 5. С. 489.
20. Ёлкин В. Н., Малинский Т. В., Миколуцкий С. И., Хасая Р. Р., Хомич Ю. В., Ямицков В. А. // ФХОМ. 2016. № 6. С. 5.
21. Мухаметрахимов М. Х. // Письма о материалах. 2013. Т. 3. С. 276.
22. Мухаметрахимов М. Х. // Письма о материалах. 2014. Т. 4. С. 195.

Laser processing of metal alloys for diffusion welding

*Yu. A. Vashukov¹, S. F. Demichev¹, V. D. Elenov¹, T. V. Malinskiy², S. I. Mikolutskiy²,
Yu. V. Khomich², and V. A. Yamshchikov²*

¹ Samara University
34 Moskovskoe sh., Samara, 443086, Russia
E-mail: elenev@ssau.ru

² Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences
18 Dvortzovaya nab., St.-Petersburg, 191186, Russia
E-mail: mikolserg@mail.ru

Received January 28, 2019

A CuCrZr-bronze surface was treated with a scanning beam of the nanosecond laser pulses with an irradiation wavelength of 355 nm. On the irradiated surface, there were observed structures in the form of spheres with a diameter of about 500 nm located on legs up to 1 μm in height. The influence of the energy density of laser radiation and the scanning speed of laser beam on the formation of these submicron structures has been found. The possibility of improving the quality for metal alloys coupling at diffusion welding due to laser surface treatment of the workpieces has been investigated.

Keywords: surface nanostructuring, diffusion welding, nanosecond lasers, breaking strength, microstructures.

REFERENCES

1. I. Matsui, T. Uesugi, Y. Takigawa, and K. Higashi, *Acta Mater.* **61**, 3360 (2013).
2. L. Lu, Y. Shen, X. Chen, L. Qian, and K. Lu, *Science* **304**, 422 (2004)
3. S. L. Chernyshev, M. D. Gamirullin, A. P. Kuryachii, V. M. Litvinov, S. V. Manuilovich, D. A. Rusyanov, V. Yu. Khomich, S. I. Moshkunov, I. E. Rebrov, and V. A. Yamshchikov, *Aerosp. Sci. Technol.* **59**, 155 (2016).
4. M. S. Peterson, T. S. Fisher, S. V. Garimella, and D. J. Schlitz, in *ASM E. P. IMECE 2003*, p. 41775 (2003).
5. V. Yu. Khomich, M. V. Malashin, S. I. Moshkunov, E. A. Shershunova, and V. A. Yamshchikov, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **42**, 3314 (2014).
6. R. Y. Lutfulin, M. H. Muhametrahimov, V. A. Valitov, Sh. H. Muhtarov, and P. A. Klassman, *Perspektivnye Materialy*, No. 12, 295 (2011)
7. R. G. Hazgaliev and M. H. Muhametrahimov, *Perspektivnye Materialy*, No. 12, 529 (2011).
8. A. A. Kuchmizhak, A. A. Ionin, S. I. Kudryashov, S. V. Makarov, A. A. Rudenko, Yu. N. Kulchin, O. B. Vitrik, and T. V. Efimov, *Opt. Lett.* **40**, 1687 (2015).
9. A. Kuchmizhak, D. Pavlov, O. Vitrik, and Y. N. Kulchin, *Applied Surface Science* **357 Part B**, 2378 (2015).
10. I. N. Zavestovskaya, *Quantum Electronics* **40**, 942 (2010).
11. K. E. Lapshin, A. Z. Obidin, V. N. Tokarev, V. Yu. Khomich, V. A. Shmakov, and V. A. Yamshchikov, *Rossiyskie nanotekhnologii*, **2** (11-12), 50 (2007).
12. V. N. Tokarev, V. Yu. Khomich, V. A. Shmakov, and V. A. Yamshchikov, *Doklady Physics* **53** (4), 206 (2008).
13. A. Y. Vorobyev and C. Guo, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 041914 (2008).
14. W. Pflöging, R. Adamietz, H. J. Brückner, M. Bruns, and A. Welle, *Proceedings of SPIE* **6459**, 645907 (2007).
15. V. Yu. Khomich, Yu. M. Urlichich, V. A. Shmakov, V. N. Tokarev, A. M. Galstyan, S. I. Mikolutskiy, T. V. Malinskiy, and D. V. Ganin, *Inorg. Mater.: Appl. Res* **4** (3), 201 (2013).
16. Yu. A. Zheleznov, T. V. Malinskiy, S. I. Mikolutskiy, V. N. Tokarev, R. R. Khasaya, Yu. V. Khomich, and V. A. Yamshchikov, *Prikl. Fiz.*, No. 3, 83 (2014).
17. S. A. Ahmanov, V. I. Emel'yanov, N. I. Koroteev, and V. N. Seminogov, *Sov. Phys. Usp.* **28**, 1084 (1985).
18. V. N. Tokarev, V. Yu. Khomich, V. A. Shmakov, and V. A. Yamshchikov, *Fizika i khimia obrabotki materialov*, No. 4, 15 (2008).
19. V. Yu. Khomich and V. A. Shmakov, *Phys. Usp.* **58**, 455 (2015).
20. V. N. Elkin, T. V. Malinskiy, S. I. Mikolutskiy, R. R. Khasaya, Yu. V. Khomich, and V. A. Yamshchikov, *Fizika i khimia obrabotki materialov*, No. 6, 5 (2016)
21. M. H. Muhametrahimov, *Pis'ma o Materialakh* **3**, 276 (2013).
22. M. H. Muhametrahimov, *Pis'ma o Materialakh* **3**, 195 (2013).