

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.5>**ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ И ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЦИНКОВОГО ПОКРЫТИЯ НА СТАЛИ**

Научная статья

Бондарева О.С.^{1,*}, Добычина О.С.²¹ORCID : 0000-0002-4273-2483;²ORCID : 0000-0001-6330-5758;^{1,2} Самарский национальный исследовательский университет им. ак. С.П.Королева, Самара, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (osbond[at]yandex.ru)

Аннотация

В работе были изучены особенности формирования цинкового покрытия на изделиях из стали СтЗсп после лазерной и плазменной резки. Обнаружено, что обработка поверхности оказывает влияние на толщину и фазовый состав цинкового покрытия. На поверхностях после механического снятия фаски и после прокатки толщина покрытия достигает 126 мкм и имеет строение, характерное для стали СтЗсп: на 80% представляет собой крупные кристаллы ζ-фазы, остальное δ-фаза. На поверхности после плазменной резки образуется тонкое покрытие около 43 мкм, в котором хорошо различимы три фазовых слоя – столбчатая δ-фаза, ζ-фаза и η-фаза. Установлено, что снятие окалины не приводит к устранению этого эффекта, в то время как механическое снятие поверхностного слоя устраняет это явление. Показано, что в приповерхностной зоне реза происходит плавное изменение мартенситной структуры в ферритно-перлитную. Глубина закаленного слоя после плазменной резки составляет 117 мкм, максимальная микротвердость 260HV, а после лазерной резки глубина закаленного слоя 55 мкм, микротвердость 160 HV. Таким образом, недостаточная толщина цинкового покрытия на поверхностях после плазменной и лазерной резки обусловлена не поверхностными дефектами и присутствием окалины, а структурными изменениями в зоне термического влияния. Диффузионный процесс образования цинкового покрытия тормозится образованием на поверхности структуры мартенсита, представляющим собой пересыщенный твердый раствор углерода в α-железе. В случаях, когда снижение толщины покрытия недопустимо, необходимо механически снимать поверхностный закаленный слой.

Ключевые слова: горячее цинкование, цинковое покрытие, плазменная резка, лазерная резка, зона термического влияния, поверхностная закалка, мартенсит, микротвердость.

EFFECT OF PLASMA AND LASER CUTTING ON THE FORMATION OF ZINC COATING ON STEEL

Research article

Bondareva O.S.^{1,*}, Dobichina O.S.²¹ORCID : 0000-0002-4273-2483;²ORCID : 0000-0001-6330-5758;^{1,2} Samara University, Samara, Russian Federation

* Corresponding author (osbond[at]yandex.ru)

Abstract

The specifics of zinc coating formation on products made of steel St3sp after laser and plasma cutting were studied. It was found that the surface treatment influences the thickness and phase composition of the zinc coating. On the surfaces after mechanical beveling and after rolling, the coating thickness reaches 126 μm and has a structure characteristic of St3sp steel: 80% is large ζ-phase crystals, the rest is δ-phase. On the surface after plasma cutting a thin coating of about 43 μm is formed in which three-phase layers - columnar δ-phase, ζ-phase and η-phase - are clearly visible. It was found that descaling does not eliminate this effect, while mechanical removal of the surface layer eliminates this occurrence. It is shown that in the near-surface zone of the cut, there is a smooth change of martensitic structure into ferrite-perlite structure. The depth of the hardened layer after plasma cutting is 117 μm, maximum microhardness 260 HV, and after laser cutting the depth of the hardened layer is 55 μm, microhardness 160 HV. Thus, the insufficient thickness of the zinc coating on the surfaces after plasma and laser cutting is caused not by surface defects and the presence of scale, but by structural changes in the heat affected zone. The diffusion process of zinc coating formation is inhibited by formation of martensite structure on the surface, which is a supersaturated solid solution of carbon in α-iron. In cases when the reduction of coating thickness is impermissible, it is necessary to mechanically remove the surface hardened layer.

Keywords: hot dip galvanizing, zinc coating, plasma cutting, laser cutting, heat affected zone, shell hardening, martensite, microhardness.

Введение

В современном производстве для раскроя листовых металлических материалов широко используются источники высококонцентрированных потоков энергии: лазерные и плазменные [1], [2]. Лазерное излучение используют для резки листов толщиной до 8-10 мм. Для резки листов большей толщины необходимо применять источники плазменного излучения [3]. Механизм плазменной и лазерной резки состоит в том, что высокоэнергетическая струя

взаимодействует с металлом и расплавляет его по линии воздействия. Прилегающие к линии реза микрообъемы металла также разогреваются, но до более низких температур. Градиент температуры изменяется на некотором расстоянии от кромки реза от температуры плавления до комнатной. Эта область называется зоной термического влияния (ЗТВ). Поверхность реза полностью переходит в жидкое состояние, а после прекращения нагрева затвердевает с очень большой скоростью охлаждения из-за быстрого отвода теплоты внутрь холодного объема. Фактически на поверхности реза происходит закалка с плавлением поверхности — это термическая обработка, при которой главным процессом является быстрое затвердевание поверхностного слоя с образованием метастабильной структуры. В результате в кромках металла на стадии затвердевания происходят такие фазовые и структурные изменения, которые вообще невозможны при нагреве без расплавления [4]. Большие скорости нагрева и охлаждения, присущие плазменной резке, могут приводить к образованию высокопрочных и прочных фаз, охрупчивающих сталь [5], [7], [10], [11]. Подобные качественные изменения металла в зоне термического влияния (ЗТВ) обуславливают последующие технологические и эксплуатационные свойства в этой зоне. Возникающее упрочнение поверхностных слоев при поверхностной плазменной и лазерной закалке успешно используется для деталей, работающих в условиях износа и трения [12], [13], [15], [17]. Однако существуют случаи, когда поверхностные структурные изменения приводят к дефектам и проявлению нежелательных явлений [5]. Например, обнаружено, что при горячем цинковании изделий, имеющих поверхности после плазменной и лазерной резки, наблюдается недостаточная толщина покрытия на изучаемых поверхностях. В связи с этим, целью работы было установление причин изменения формирования цинкового покрытия на поверхности металла после лазерной и плазменной резки.

Методы и принципы исследования

Для исследования были отобраны образцы из стали СтЗсп после плазменной и лазерной резки. Поверхность реза образцов после плазменной резки зачищали с помощью угловой шлифовальной машины до металлического блеска (снятие окалины) и до снятия поверхностного слоя. После чего образцы травили в 10% соляной кислоте 1 час. Цинкование производили на ОАО «Завод Промаш» при температуре 4480С, время выдержки 2 мин.

Микроструктуру стали и покрытия исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega SB. Элементный анализ структурных составляющих проводили с помощью с энергодисперсионного рентгеновского анализатора INCAx-act. Микротвердость стали измеряли под нагрузкой 20 г на микротвердомере HV-1000.

Основные результаты и обсуждение

Исследования показали, что состояние стальной поверхности оказывает непосредственное влияние на толщину цинкового покрытия. На рисунке 1 показано поперечное сечение образца, имеющего поверхности после плазменной резки, после механического снятия фаски и после прокатки листа.

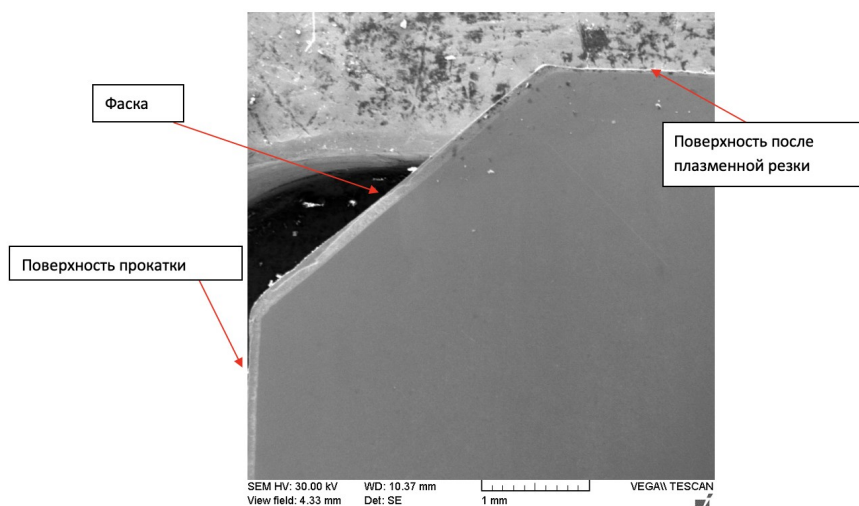


Рисунок 1 - Общий вид поперечного сечения цинкового покрытия на образце
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.5.1>

Анализ толщины цинкового покрытия на различных поверхностях изделия показал, что на поверхности после плазменной резки образуется тонкое покрытие около 43мкм, на поверхности после снятия фаски толщина покрытия максимальна и достигает 126 мкм (табл.1).

Таблица 1 - Толщина покрытия на различных поверхностях

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.5.2>

Вид поверхности	Толщина покрытия, мкм
-----------------	-----------------------

После плазменной резки	43,4
После снятия фаски	125,9
Исходная поверхность прокатки	129,3

Строение цинкового покрытия на различных поверхностях образца отличается. На поверхности после плазменной резки в покрытии хорошо различимы три фазовых слоя – столбчатая δ -фаза, ζ -фаза и η -фаза (рис.2а). На поверхности после прокатки наблюдается покрытие, характерное для стали СтЗсп (рис.2б) [18]. Оно на 80% представляет собой крупные кристаллы ζ -фазы, остальное δ -фаза.

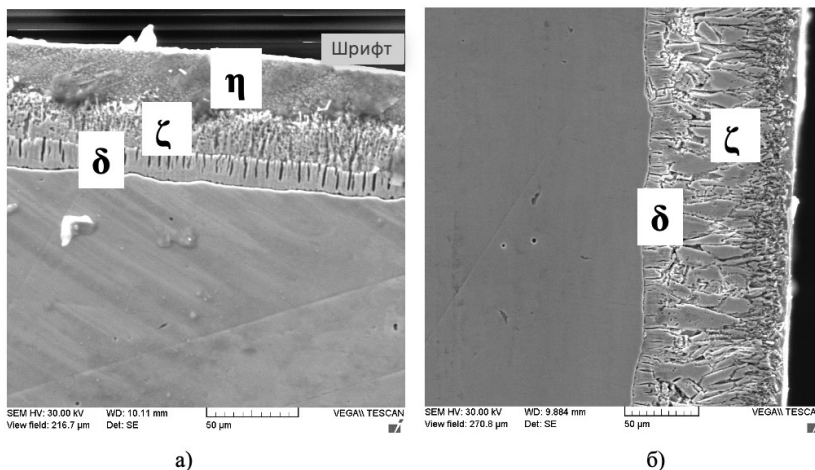


Рисунок 2 - Цинковое покрытия на различных поверхностях образца:
 а – поверхность после плазменной резки; б – поверхность проката
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.5.3>

Предположительно причиной сниженной толщины покрытия могут быть структурные изменения в стали или образование плотной толстой окалины в результате высокотемпературного воздействия. Для выяснения этого были проведены исследования поверхности и микроструктуры подповерхностных слоев металла.

Исследования поверхности металла после плазменной и лазерной резки показали, что на поверхности присутствует характерный рельеф, вызванный течением металла под воздействием высокоэнергетического пучка. Поверхность стали покрыта окалиной (рис. 3а,б).

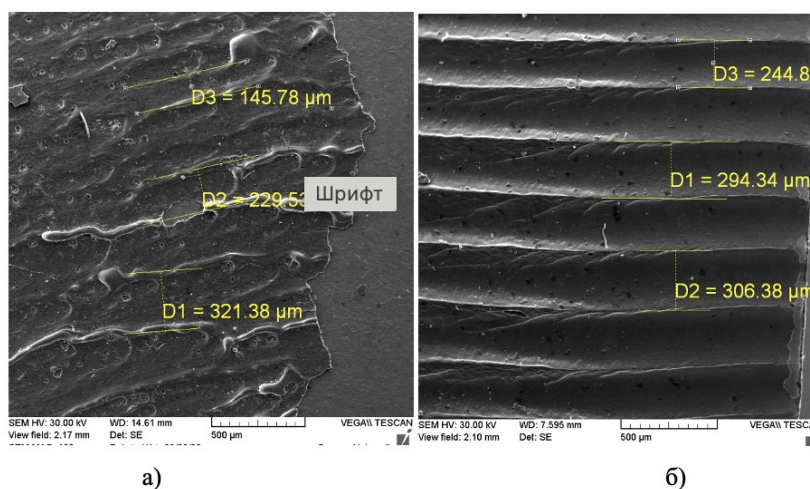


Рисунок 3 - Окалина на поверхности образца:
 а - после плазменной резки; б - после лазерной резки
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.5.4>

Анализ данных по средней толщине цинкового покрытия показал, что на поверхности после плазменной резки образуется покрытие меньшей толщины, чем на других поверхностях. При средних значениях толщины покрытия на

поверхности после плазменной резки 64,5 мкм, в некоторых местах покрытие достигает минимальных значений, не допустимых ГОСТ 9.307-89 около 40 мкм. Механическое снятие окалины не приводит к устранению этого эффекта и увеличению толщины покрытия. В то время как снятие поверхностного слоя устраняет этот эффект, толщина покрытия увеличивается до 98,5 мкм (табл.2).

Таблица 2 - Толщина цинкового покрытия в зависимости от обработки поверхности

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.5.5>

Обработка поверхности	Толщина покрытия, мкм
Плазменная резка	64,5
Механическое снятие окалины	64,7
Механическое снятие поверхностного слоя	98,5

Исследования микроструктуры стали в зоне плазменной резки показали, что ферритно-перлитная структура стальной основы (рис. 4б) переходит в закаленную игольчатую структуру в приповерхностной зоне (рис.4в). Глубина закаленного слоя около 12 мкм, ширина зоны термического влияния около 380 мкм (рис. 4а)

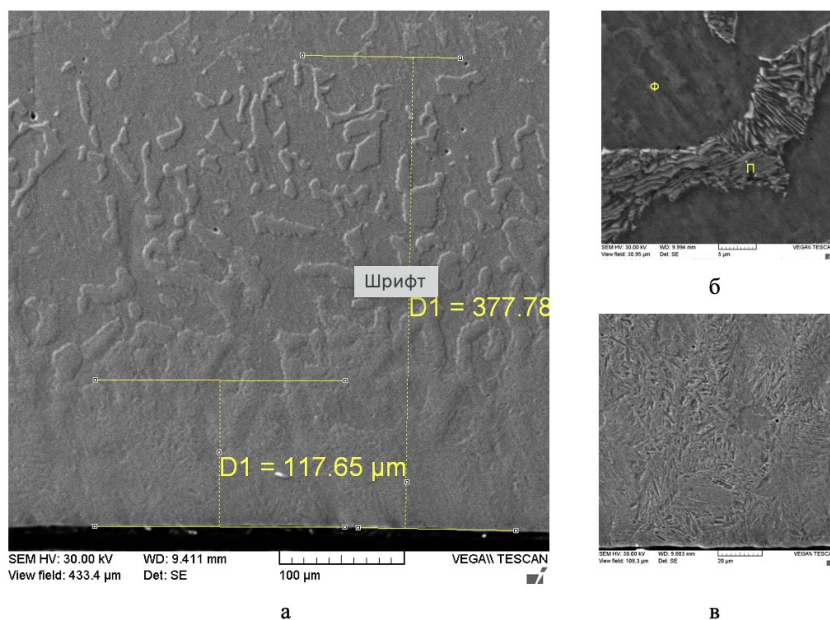


Рисунок 4 - Микроструктура зоны термического влияния после плазменной резки:
а – общий вид, x500; б – основа, x7000; в – приповерхностная зона, x2000

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.5.6>

После лазерной резки в структуре стали также наблюдается переход от феррито-перлитной структуры (рис.5б) к закаленной игольчатой (рис.5в). Однако глубина ЗТВ меньше, чем после плазменной резки – 140 мкм, а глубина закаленной зоны – 55 мкм (рис.5а).

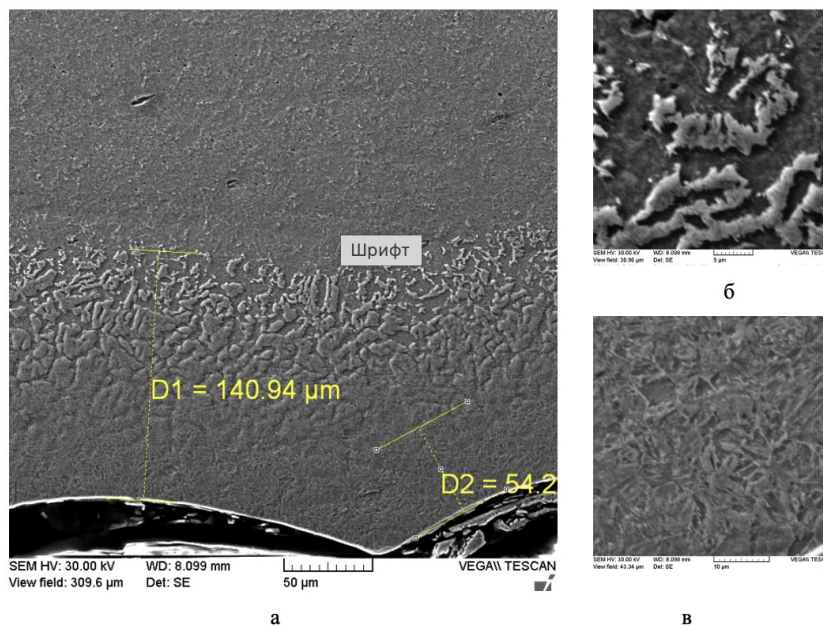


Рисунок 5 - Микроструктура зоны термического влияния после лазерной резки:
 а – общий вид, x700; б – основа, x7000; в – приповерхностная зона, x5000
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.5.7>

Установленные особенности микроструктуры металла, приобретаемые в результате плазменной и лазерной резки, вызваны сильным разогревом зоны реза и приповерхностных слоев с последующим быстрым охлаждением. Это приводит к поверхностной закалке стали в зоне реза. Глубина закаленного слоя зависит от глубины прогрева, т.е. от интенсивности энергетического пучка, поэтому после плазменной резки она больше.

Для анализа механических свойств приповерхностного слоя измеряли микротвердость. Полученные результаты представлены на графике (рис.6).

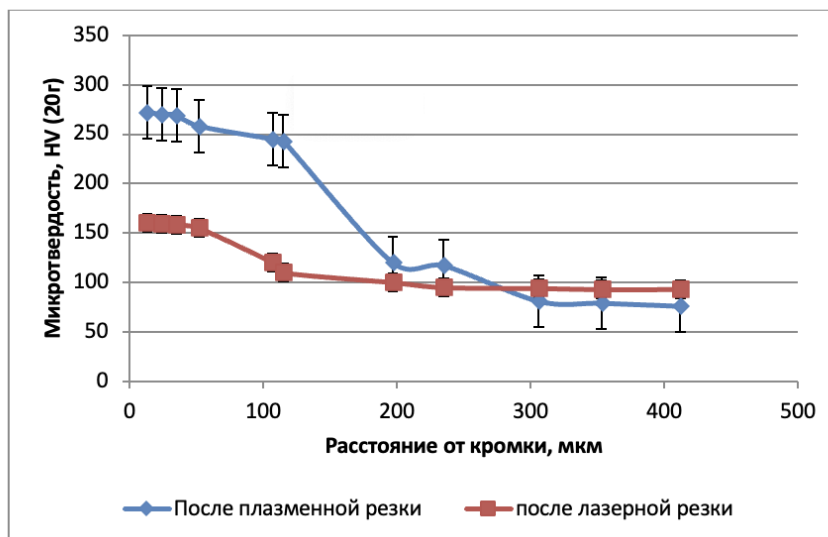


Рисунок 6 - Изменение микротвердости приповерхностного слоя после плазменной и лазерной резки
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.5.8>

Исследования показали, что после плазменной резки микротвердость закаленной зоны составляет около 260HV (255HV), что соответствует твердости мартенсита низкоуглеродистой стали с содержанием углерода 0,2% [4]. Микротвердость закаленной зоны после лазерной резки составляет около 160HV (152HV). Это вызвано различной интенсивностью и глубиной зоны разогрева ЗТВ и соответственно разной скоростью охлаждения приповерхностного слоя. Большая твердость указывает на более значительные структурные искажения.

Мартенсит представляет собой пересыщенный твердый раствор углерода в железе, с сильными искажениями кристаллической решетки, с отсутствием границ зерен и вакансий. Таким образом, структура мартенсита может тормозить взаимную диффузию железа и цинка при образовании покрытия.

Заключение

Обнаружено, что предварительная обработка поверхности стали после плазменной и лазерной резки влияет на толщину цинкового покрытия, получаемого горячим цинкованием. На обработанных поверхностях толщина покрытия значительно меньше, чем на остальных поверхностях, что не допускается требованиями ГОСТ 9.307-89.

Установлено, что снятие окалины не приводит к устранению этого эффекта в то время как механическое снятие поверхностного слоя устраняет этот эффект.

Показано, что в приповерхностной зоне реза происходит плавное изменение мартенситной структуры в ферритно-перлитную. Глубина закаленного слоя после плазменной резки составляет 117 мкм, максимальная микротвердость 260HV, а после лазерной резки глубина закаленного слоя 55 мкм, микротвердость 160 HV.

Таким образом, недостаточная толщина цинкового покрытия на поверхностях после плазменной и лазерной резки обусловлена не поверхностными дефектами и присутствием окалины, а структурными изменениями в ЗТВ. Диффузионный процесс образования цинкового покрытия тормозится образованием на поверхности структуры мартенсита, представляющим собой пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе.

В случаях, когда снижение толщины покрытия недопустимо, необходимо механически снимать поверхностный закаленный слой.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Сидикова Т.Д., Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.5.9>

Review

Sidikova T.D., Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.5.9>

Список литературы / References

1. Балановский А.Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов / А.Е. Балановский – Иркутск: ИрГТУ, 2006. – 180 с.
2. Соснин Н.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров / Н.А. Соснин, С.А. Ермаков, П.А. Тополянский. – СПб: Изд-во Политехнического университета, 2013. – 406 с.
3. Канаев А.Т. Структурообразование в плазменно-упрочненных металлических материалах / А.Т. Канаев, А.В. Богомоллов – Астана: Политон, 2015. – 185 с.
4. Овчинников В.В. Технология термической обработки / В.В. Овчинников – М.: ФОРУМ ; ИНФРА-М, 2016. – 320 с.
5. Kanayev A. Gradient layer structure formation during plasma treatment of wheel steel. / A. Kanayev // International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development. – 2020. – Vol. 10. - № 3. – p. 457-467. – DOI: 10.24247/ijmperdjun202042
6. Kossanova I.M. Improving the surface structure of massive parts by the plasma method. / I.M. Kossanova, A.T. Kanayev, A.U. Akhmedyanov et al. // Herald of Science of S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University. – 2020. – № 4 (107). – p. 167-176.
7. Balanovskii A.E. Plasma surface carburizing with graphite paste. / A.E. Balanovskii // Letters on materials . – 2017. – № 7 (2). – p. 175-179. – DOI: 10.22226/2410-3535-2017-2-175-179
8. Ayday A. The Effects of Overlapping in Electrolytic Plasma Hardening on Wear Behavior of Carbon Steel. / A. Ayday, D. Kirsever, A. Demirkiran // Transactions of the Indian Institute of Metals. – 2021. – № 1. – DOI: 10.1007/s12666-021-02368-6
9. Бондарева О.С. Влияние содержания кремния в конструкционных сталях на строение и скорость роста цинкового покрытия. / О.С. Бондарева, А.А. Мельников // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2017. – № 19 (1-3). – с. 506-510.
10. Сумец А.В. Закономерности структурообразования зоны термического влияния при термической резке металлов. / А.В. Сумец, В.Д. Кассов // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2017. – № 77. – с. 166-170.
11. Михайлицын С.В. Исследование плазменно-дуговой резки низколегированной стали 09Г2С / С.В. Михайлицын, М.А. Шекшеев, О.М. Аюбашев // Вестник МГТУ им. Г.Н. Носова. – 2017. – Т.15. – № 2. – С. 48-52. – DOI: 10.18503/1995-2732-2017-15-2-48-53
12. Самотугин С.С. Металлографические исследования упрочненных слоев после поверхностной обработки высококонцентрированной плазменной струей. / С.С. Самотугин, В.А. Гагарин, В.А. Мазур и др. // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2017. – № 34. – с. 98-105.
13. Анахов С.В. Микроструктурный анализ сварных соединений, полученных с применением плазменных технологий резки. / С.В. Анахов, Н.Б. Пугачева, Ю.А. Пыкин и др. // Физика и химия обработки материалов. – 2016. – № 2. – с. 16-22.

14. Антипов Н.А. Определение дефектного приповерхностного слоя при воздушно-плазменной разрезке заготовок из углеродистой низколегированной стали. / Н.А. Антипов, В.С. Медко // Электрофизические и электрохимические методы обработки. – 2014. – № 2 (80). – с. 25-27.
15. Анахов С.В. Разработка оборудования и технологии прецизионной воздушно-плазменной резки толстолистовой стали / С.В. Анахов, Б.Н. Гузанов, А.В. Матушкин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2022. – Т. 65. – № 1. – С. 38-47. – DOI: 10.17073/0368-0797-2022-1-38-47
16. Канаев А.Т. Формирование градиентно-слоистых структур в колесной стали при плазменной закалке. / А.Т. Канаев, А.В. Богомоллов // Восточно-Европейский научный журнал. – 2016. – № 9 (3). – с. 5-11.
17. Stotsko Z. The Optimal Thickness of the Surface Plasma Hardening Layer of Functional-Gradient Parts with Symmetrical Stress Concentrators / Z. Stotsko, M. Kuzin, O. Kuzin // Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV : DSMIE: Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange; – Lviv: Cham : Springer, 2021. – p. 75-83.
18. Анахов С.В. Особенности структурообразования в зоне термического влияния при узкоструйной воздушно-плазменной резке металлов / С.В. Анахов, Б.Н. Гузанов, Н.Б. Пугачева // Сварка в России-2020: современное состояние и перспективы. – Якутск: Дани-Алмас, 2020. – с. 25-42.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Balanovskij A.E. Plazmennoe poverxnostnoe uprochnenie metallov [Plasma surface hardening of metals] / A.E. Balanovskij – Irkutsk: IrGTU, 2006. – 180 p. [in Russian]
2. Sosnin N.A. Plazmennie tekhnologii. Rukovodstvo dlya inzhenerov [Plasma technologies. Guide for engineers] / N.A. Sosnin, S.A. Yermakov, P.A. Topolyanskii. – SPb: Publishing House of the Polytechnic University, 2013. – 406 p. [in Russian]
3. Kanaev A.T. Strukuroobrazovanie v plazmenno-uprochnenny'x metallicheskix materialax [Structure formation in plasma-hardened metallic materials] / A.T. Kanaev, A.V. Bogomolov – Astana: Politon, 2015. – 185 p. [in Russian]
4. Ovchinnikov V.V. Tekhnologiya termicheskoy obrabotki [Heat Treatment Technology] / V.V. Ovchinnikov – M.: FORUM ; INFRA-M, 2016. – 320 p. [in Russian]
5. Kanayev A. Gradient layer structure formation during plasma treatment of wheel steel. / A. Kanayev // International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development. – 2020. – Vol. 10. - № 3. – p. 457-467. – DOI: 10.24247/ijmperdjun202042
6. Kossanova I.M. Improving the surface structure of massive parts by the plasma method. / I.M. Kossanova, A.T. Kanayev, A.U. Akhmedyanov et al. // Herald of Science of S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University. – 2020. – № 4 (107). – p. 167-176.
7. Balanovskii A.E. Plasma surface carburizing with graphite paste. / A.E. Balanovskii // Letters on materials . – 2017. – № 7 (2). – p. 175-179. – DOI: 10.22226/2410-3535-2017-2-175-179
8. Ayday A. The Effects of Overlapping in Electrolytic Plasma Hardening on Wear Behavior of Carbon Steel. / A. Ayday, D. Kirsever, A. Demirkiran // Transactions of the Indian Institute of Metals. – 2021. – № 1. – DOI: 10.1007/s12666-021-02368-6
9. Bondareva O.S. Vliyanie sodержaniya kremniya v konstrukcionny'x stalyax na stroenie i skorost' rosta cinkovogo pokry'tiya [Effect of Silicon Content in Structural Steels on the Structure and Growth Rate of Zinc Coating]. / O.S. Bondareva, A.A. Mel'nikov // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. – 2017. – № 19 (1-3). – p. 506-510. [in Russian]
10. Sumecz A.V. Zakonomernosti strukuroobrazovaniya zony' termicheskogo vliyaniya pri termicheskoy rezke metallov [Patterns of structure formation of the heat-affected zone during thermal cutting of metals]. / A.V. Sumecz, V.D. Kassov // Vestnik Xar'kovskogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta [Bulletin of Kharkov National Automobile and Road University]. – 2017. – № 77. – p. 166-170. [in Russian]
11. Mikhailitsin S.V. Issledovanie plazmenno-dugovoi rezki nizkolegированной stali 09G2S [Study of plasma-arc cutting of low-alloy steel 09Mn2Si] / S.V. Mikhailitsin, M.A. Sheksheev, O.M. Ayubashev // Vestnik MGTU im. G.N. Nosova [Bulletin of MSTU im. G.N. Nosova]. – 2017. – Vol.15. – № 2. – P. 48-52. – DOI: 10.18503/1995-2732-2017-15-2-48-53 [in Russian]
12. Samotugin S.S. Metallograficheskie issledovaniya uprochnenny'x sloev posle poverxnostnoj obrabotki vy'sokokoncentrirovannoj plazmennoj struej [Metallographic studies of hardened layers after surface treatment with a highly concentrated plasma jet]. / S.S. Samotugin, V.A. Gagarin, V.A. Mazur et al. // Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. Seriya: Texnicheskie nauki [Bulletin of the Azov State Technical University. Series: Engineering sciences]. – 2017. – № 34. – p. 98-105. [in Russian]
13. Anaxov S.V. Mikrostrukturny'j analiz svarny'x soedinenij, poluchenny'x s primeneniem plazmenny'x tekhnologij rezki [Microstructural Analysis of Welded Joints Obtained Using Plasma Cutting Technologies]. / S.V. Anaxov, N.B. Pugacheva, Yu.A. Py'kin et al. // Fizika i ximiya obrabotki materialov [Physics and chemistry of material processing]. – 2016. – № 2. – p. 16-22. [in Russian]
14. Antipov N.A. Opredelenie defektnogo pripoverxnostnogo sloya pri vozdušno-plazmennoj razrezke zagotovok iz uglerodistoj nizkolegированной stali [Determination of a defective near-surface layer during air-plasma cutting of blanks from carbon low-alloy steel]. / N.A. Antipov, V.S. Medko // E'lektrofizicheskie i e'lektroximicheskie metody' obrabotki [Electrophysical and electrochemical processing methods]. – 2014. – № 2 (80). – p. 25-27. [in Russian]
15. Anakhov S.V. Razrabotka oborudovaniya i tekhnologii pretsizionnoi vozdušno-plazmennoi rezki tolstoлистовой stali [Development of equipment and technology for precision air-plasma cutting of steel plates] / S.V. Anakhov, B.N. Guzanov, A.V. Matushkin // Izvestiya visshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy]. – 2022. – Vol. 65. – № 1. – P. 38-47. – DOI: 10.17073/0368-0797-2022-1-38-47 [in Russian]

16. Kanaev A.T. Formirovanie gradientno-sloisty'x struktur v kolesnoj stali pri plazmennoj zakalke [Formation of Gradient Layered Structures in Wheel Steel during Plasma Hardening]. / A.T. Kanaev, A.V. Bogomolov // Vostochno-Evropejskij nauchny'j zhurnal [East European Scientific Journal]. – 2016. – № 9 (3). – p. 5-11. [in Russian]
17. Stotsko Z. The Optimal Thickness of the Surface Plasma Hardening Layer of Functional-Gradient Parts with Symmetrical Stress Concentrators / Z. Stotsko, M. Kuzin, O. Kuzin // Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV : DSMIE: Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange; – Lviv: Cham : Springer, 2021. – p. 75-83.
18. Anakhov S.V. Osobennosti strukturoobrazovaniya v zone termicheskogo vliyaniya pri uzkostruinoi vozdušno-plazmennoi rezke metallov [Features of structure formation in the heat-affected zone during narrow-jet air-plasma cutting of metals] / S.V. Anakhov, B.N. Guzanov, N.B. Pugacheva // Welding In Russia-2020: Current Status And Prospects. – Yakutsk: Dani-Almas, 2020. – p. 25-42. [in Russian]