

Влияние предварительной плазменной обработки поверхности стали 09Г2С на формирование покрытия в результате горячего цинкования

© 2024

Бондарева Ольга Сергеевна*¹, кандидат технических наук,

доцент кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения

Добычина Ольга Сергеевна, аспирант кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения

Куканков Леонид Сергеевич, студент

Короткова Юлия Николаевна, студент

Третьяков Виталий Александрович, студент

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара (Россия)

*E-mail: osbondareva@ssau.ru,
osbond@yandex.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4273-2483>

Поступила в редакцию 27.06.2023

Принята к публикации 22.11.2023

Аннотация: В последние годы расширяется ассортимент кремнийсодержащих сталей, подвергаемых горячему цинкованию. Легирование стали 0,5–1 % кремния приводит к образованию цинкового покрытия большой толщины с матовой или разнотонной поверхностью. Это связано с изменением фазовых реакций между железом и цинком в системе Fe–Zn–Si. Актуальной задачей является разработка способов нейтрализации негативного влияния кремния на формирование цинкового покрытия. Цель работы – изучение влияния предварительной плазменной резки и плазменной поверхностной закалки стали 09Г2С (S355J2) на толщину и структуру цинкового покрытия, образующегося на обработанных поверхностях. Установлено, что после плазменной резки структура приповерхностного слоя стали представляет собой мартенсит, а после плазменной поверхностной закалки – мартенсит и феррит. Анализ изменения микротвердости от поверхности стали к середине показал, что глубина закаленного слоя составляет 400 мкм. На поверхности стали без предварительной обработки формируется цинковое покрытие, состоящее из δ-фазы и ζ-фазы. На поверхности стали после плазменной обработки формируется цинковое покрытие, характерное для малокремнистых сталей и состоящее из δ-фазы, ζ-фазы и η-фазы. Установлено, что толщина цинкового покрытия на поверхности после плазменной резки в два раза меньше, чем на необработанной поверхности, причем сокращение толщины покрытия происходит за счет уменьшения толщины ζ-фазы. Выдвинута гипотеза, что образование на поверхности стали мартенсита приводит к исчезновению упорядоченной фазы FeSi и изменяет фазовое равновесие в системе Fe–Zn–Si. Следовательно, предварительная плазменная обработка поверхности стали позволяет управлять структурой и толщиной образующегося цинкового покрытия и поэтому рекомендуется для внедрения в процесс горячего цинкования кремнийсодержащих сталей.

Ключевые слова: горячее цинкование; цинковое покрытие; кремнийсодержащие стали; Fe–Zn–Si; плазменная обработка; поверхностная закалка.

Для цитирования: Бондарева О.С., Добычина О.С., Куканков Л.С., Короткова Ю.Н., Третьяков В.А. Влияние предварительной плазменной обработки поверхности стали 09Г2С на формирование покрытия в результате горячего цинкования // Frontier Materials & Technologies. 2024. № 2. С. 23–31. DOI: 10.18323/2782-4039-2024-2-68-2.

ВВЕДЕНИЕ

В последние два десятилетия наблюдается расширение номенклатуры сталей, подвергаемых горячему цинкованию. Это связано с потребностью строительной и автомобильной отраслей в современных улучшенных высокопрочных сталях (Advanced High-Strength Steel, AHSS), включающих в себя стали, закаливаемые под прессом (Press Hardening Steel, PHS), аустенитные пластичные стали (Transformation Induced Plasticity, TRIP), двухфазные стали (Dual Phase Steels, DP steel), сложнофазовые стали (Complex Phase Steels, CP steel), мартенситные стали (Martensitic Steels, MS Steel), холоднодеформируемые стали и др. Уникальный комплекс свойств этих сталей – высокая конструкционная прочность, малый вес и возможность самоадаптации к экстремальным внешним воздействиям обеспечивается термомеханической обработкой и системой легирования.

Кремний является одним из основных легирующих элементов, стабилизирующих аустенит [1; 2]. Кремний также является дешевым упрочнителем конструкционных сталей, широко применяемых для сварных строительных конструкций, среди которых сталь 09Г2С (S355J2) [3]. Однако высокое содержание кремния (более 0,4 %) способствует формированию на стали цинкового покрытия большой толщины – 200–500 мкм [4]. Такая толщина цинкового покрытия приводит к перерасходу цинкового сырья, а в некоторых случаях и к отслоению покрытия, что недопустимо. Установлено, что это связано с влиянием кремния на процессы взаимной диффузии железа и цинка при формировании покрытия [5–7].

Известно, что цинковые покрытия, получаемые при погружении стали в расплав, имеют в структуре слои интерметаллических фаз системы Fe–Zn: δ, ζ и η. Эти фазы хорошо изучены, они отличаются по структуре, химическому составу и кристаллической решетке.

Слой δ -фазы прилегает к стальной подложке, его толщина равномерна, а структура относительно компактна. Следующий слой ζ -фазы имеет разветвленную дендритную структуру, кристаллиты вытянуты в направлении отвода тепла от основы к поверхности покрытия. При извлечении изделия из ванны на поверхности образуется практически чистый цинк – η -фаза [8]. При цинковании сталей с содержанием кремния более 0,4 % η -фаза отсутствует, а морфология ζ -фазы изменяется: она становится крупнокристаллической и составляет около 90 % всей толщины покрытия. При этом ζ -фаза выходит на поверхность покрытия, придавая ему матовость [9].

Один из вариантов контроля роста толщины цинкового покрытия – управление температурой цинкования, так как она оказывает определяющее влияние на толщину, строение и фазовый состав покрытия [10]. Известна технология высокотемпературного цинкования (530–590 °С), позволяющая получать покрытия, состоящие преимущественно из δ -фазы – наиболее плотной фазы, обеспечивающей минимальную толщину покрытия, в том числе на кремнистых сталях [11]. Однако данная технология требует использования керамических ванн, поскольку сокращает срок службы стальных ванн, а также повышает затраты на электроэнергию.

Другим способом нейтрализации негативного влияния кремния на процесс цинкования является его удаление с поверхности стали особой предварительной химической обработкой перед горячим цинкованием. Она заключается в травлении стали в комплексных растворах, содержащих плавиковую и соляную кислоты или фториды аммония и натрия в различных концентрациях [12]. Недостатком данной технологии является сложность утилизации травильных растворов.

Ранее были разработаны и внедрены системы легирования цинкового расплава никелем, алюминием, висмутом, оловом для управления структурой, толщиной и свойствами покрытий на кремнийсодержащих сталях [13]. Для сталей с содержанием кремния до 0,3 % успешным оказалось применение расплава цинка с микродобавками (0,05 %) никеля [14]. Однако при содержании кремния более 0,3 % добиться значительного снижения толщины покрытия не удалось.

Перед горячим цинкованием возможно нанесение предварительных металлических покрытий, например железа, никеля, меди и/или их сплавов, образующих диффузионный барьер и предотвращающих образование дефектов покрытия [15; 16].

Авторами настоящей работы было обнаружено, что на поверхностях стальных деталей после плазменной и лазерной резки толщина покрытия значительно меньше, чем на остальных поверхностях. Предварительные исследования показали, что 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. В результате воздействия факела при плазменной резке металл оплавляется и быстро охлаждается за счет отвода тепла вглубь металла, поэтому приповерхностная структура характеризуется наличием мартенситной составляющей [17]. С помощью плазменного поверхностного упрочнения можно получить поверхностный мартенситный слой не только в зоне реза, но и на лю-

бой обрабатываемой поверхности [18]. Сущность метода поверхностной плазменной закалки заключается в быстром разогреве поверхности плазменной струей и последующем быстром охлаждении путем отвода тепла в основной объем металла, который остается холодным. Для разработки новых способов контроля толщины цинкового покрытия остается немаловажным подробное изучение влияния структурных изменений при плазменной обработке стали на формирование этого покрытия.

Цель исследования – изучение влияния предварительной плазменной резки и плазменной поверхностной закалки стали 09Г2С (S355J2) на толщину и структуру цинкового покрытия.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования были отобраны образцы из промышленного горячекатаного листа стали 09Г2С (S355J2) по ГОСТ 5520-79 размером 100×100×25 мм. Химический состав образцов определен на оптико-эмиссионном анализаторе Foundry-Master XPR и приведен в таблице 1.

Образцы вырезали на установке плазменной резки HyPerformance 400 XD. Поверхностная закалка образцов проводилась на установке ручной плазменной закалки УДГЗ-200. Принцип ее действия заключается в том, что плазменный поток очень быстро нагревает поверхность изделия, и за счет теплоотвода с поверхности вглубь происходит закалка поверхностного слоя толщиной 1–2 мм. Закалка происходит на воздухе без принудительного охлаждения водой или маслом. Расстояние от плазматрона до поверхности изделия составляло 20 мм, сила тока закалки 200 А, производительность 110 см/мин.

Шлифы для изучения микроструктуры изготавливались на шлифовально-полировальном станке Remet LS 2. После закалки твердость образцов измерялась на стационарном твердоме NOVOTEST ТС-БРВ по шкале Роквелла, измерения снимались с обработанной стороны и с торцов. Изучение микроструктуры образцов проводилось с помощью цифрового тринокулярного инвертированного микроскопа Carl Zeiss Axio Vert 40 MAT. Затем образцы подвергались горячему цинкованию, которое включало в себя следующие стадии: обезжиривание в 20 % NaOH, травление в 10 % HCl, флюсование в ZnCl₂–NH₄Cl, сушка и погружение в цинковый расплав температурой 450±3 °С, время выдержки в расплаве 2 мин.

Исследования микроструктуры и измерение толщины фазовых слоев покрытия проводились на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA SB. Измерения микротвердости подповерхностного слоя образцов проводились на микротвердоме ПМТ-3 с нагрузкой 20 г. Важно отметить, что ключевым фактором при формировании структуры и свойств зоны термического влияния является скорость охлаждения. В нашем исследовании охлаждение происходило на воздухе, что повлияло на характер изменения микроструктуры. Воздух был выбран в качестве охладителя в связи с тем, что глубина прогрева при поверхностной закалке невелика, поэтому тепло отводится в толщу образца.

Таблица 1. Химический состав стали 09Г2С, %
Table 1. Chemical composition of 09G2S steel, %

Fe	C	Si	Mn	Ni	Cr	V	Cu
Основа	0,137	0,608	1,670	0,015	0,038	0,012	0,009

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате анализа поперечного сечения образца после плазменной закалки и образца после плазменной резки были получены изображения микроструктуры, которые приведены на рис. 1 и 2.

В микроструктуре образца после поверхностной закалки (рис. 1 а) видна явная граница между поверхностной структурой и серединой – это глубина термического влияния, она составляет около 950 мкм. Приповерхностный слой неоднородный и имеет структуру неполной закалки – мартенсит и феррит (рис. 1 б). Глубина закаленного слоя – около 300 мкм. Переходный слой представлен феррито-перлитной структурой (рис. 1 с).

На микроструктуре образца после плазменной резки (рис. 2 а) наблюдается явная граница между поверхно-

стной структурой и серединой, глубина термического влияния – около 600 мкм. Приповерхностный слой представляет собой игольчатый мартенсит (рис. 2 б). Толщина закаленного слоя – около 200 мкм.

Более точно определить глубину закаленной зоны можно, проанализировав изменение твердости от края поверхности вглубь образца. Анализ графиков (рис. 3) показывает, что твердость уменьшается от края к середине. После плазменной закалки твердость неравномерная (мартенсит + феррит). Максимальная величина твердости у края поверхности 153 HV (зерно мартенсита), минимальная величина твердости 123 HV (феррит). Заметное снижение твердости наступает после глубины в 400 мкм. Максимальная величина твердости стали после плазменной резки у края поверхности составила 173 HV.

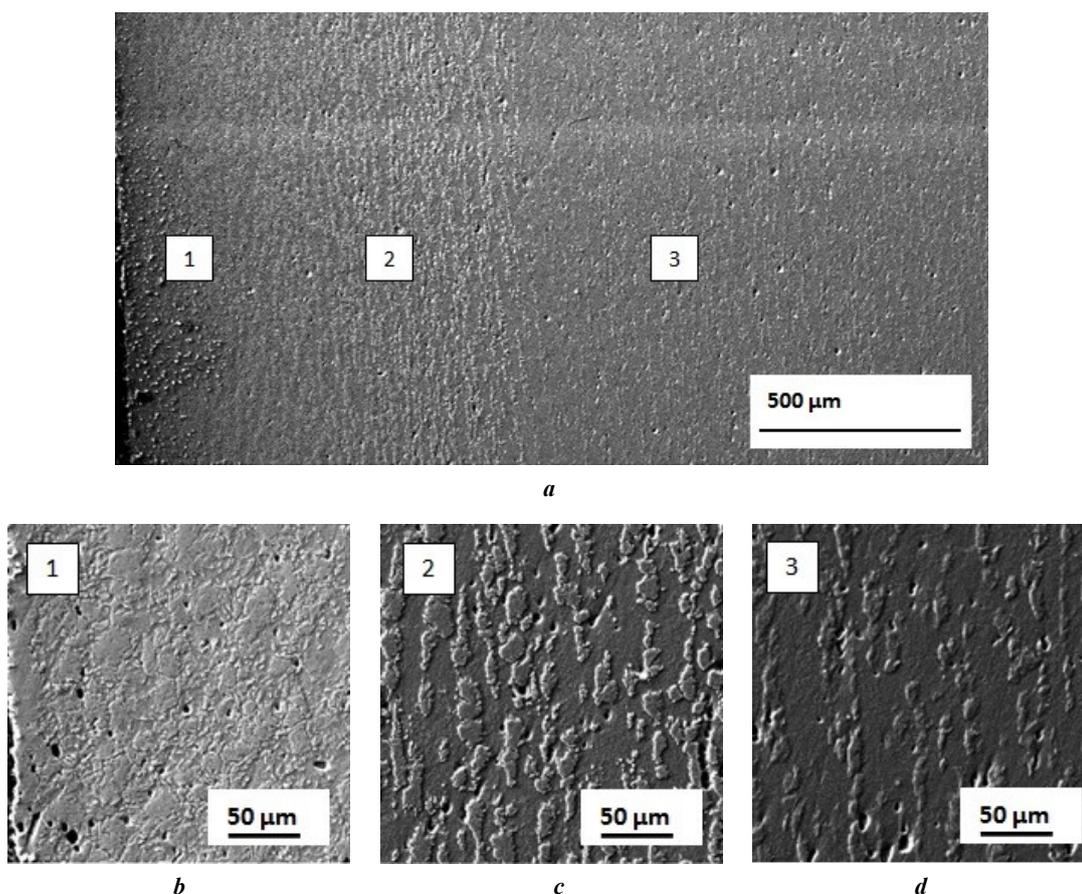
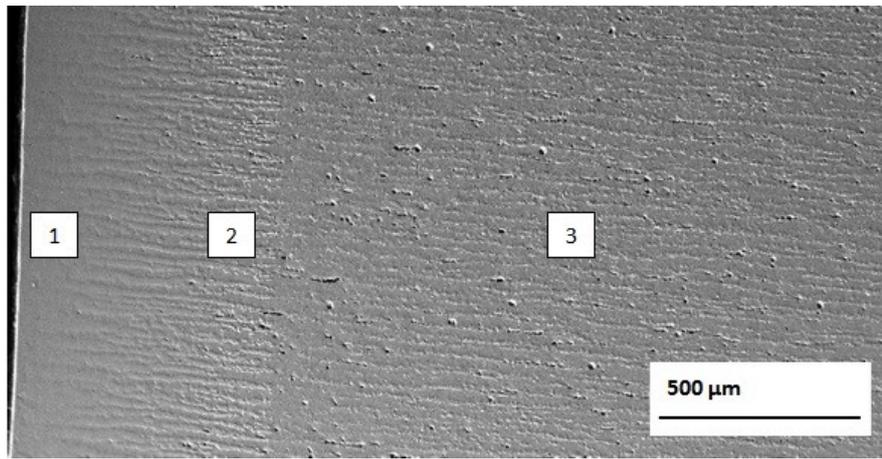
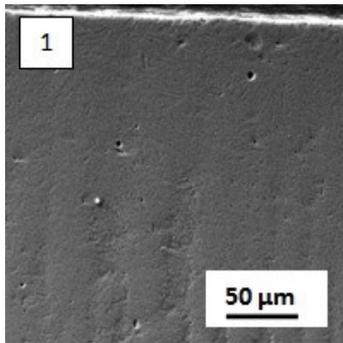


Рис. 1. Микроструктура образца после плазменной закалки:
a – общий вид, $\times 100$; *b* – поверхностный слой, $\times 1000$; *c* – переходный слой, $\times 1000$; *d* – середина, $\times 1000$

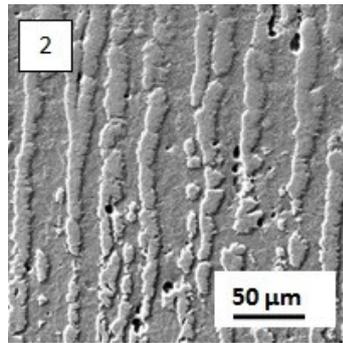
Fig. 1. Microstructure of the sample after plasma hardening:
a – general view, $\times 100$; *b* – surface layer, $\times 1000$; *c* – transition layer, $\times 1000$; *d* – middle, $\times 1000$



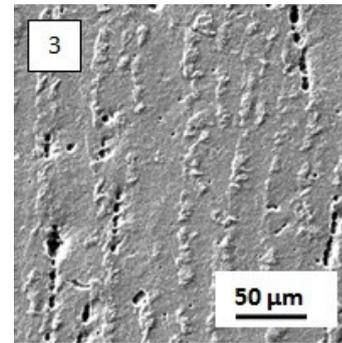
a



b



c



d

Рис. 2. Микроструктура образца после плазменной резки:
a – общий вид, $\times 100$; *b* – поверхностный слой, $\times 1000$; *c* – переходный слой, $\times 1000$; *d* – середина, $\times 1000$
Fig. 2. Microstructure of the sample after plasma cutting:
a – general view, $\times 100$; *b* – surface layer, $\times 1000$; *c* – transition layer, $\times 1000$; *d* – middle, $\times 1000$

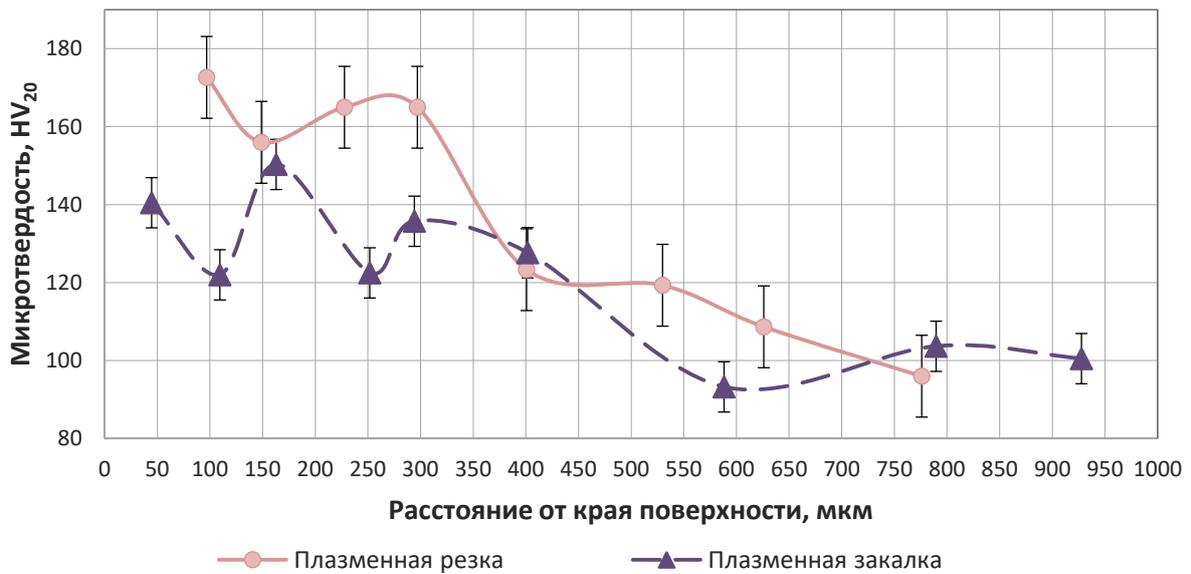


Рис. 3. Изменение микротвердости от края обработанной поверхности к середине
Fig. 3. Change in microhardness from the edge of the treated surface to the middle

На расстоянии 300–400 мкм от края поверхности твердость резко уменьшается и соответствует твердости феррита, т. е. это и есть глубина закаленной зоны.

Цинковое покрытие на образцах без обработки имеет матовые и разнотонные пятна (рис. 4 а), в то время как на образце после плазменной обработки покрытие имело глянцевый блеск (рис. 4 б).

Исследования микроструктуры цинкового покрытия, полученного на поверхностях без обработки и после плазменной резки и закалки (рис. 5), показали, что фазовое строение покрытий отличается. На поверхности без обработки образуется цинковое покрытие, имеющее характерное для покрытия на высококремнистой стали строение: 80–90 % ζ -фазы и тонкий слой δ -фазы, η -фаза отсутствует, что приводит к матовой и разнотонной поверхности покрытия (рис. 5 а). После плазменной обработки в микроструктуре цинкового покрытия наблюдаются все три основные фазы: плотная, столбчатая δ -фаза, дендритная ζ -фаза и η -фаза – покровный цинк, обеспечивающий глянцевую поверхность покрытия (рис. 5 б, 5 с). Такое покрытие характерно для малокремнистых сталей. Толщина ζ -фазы в покрытии на поверхности после плазменной резки составляет 30 % от общей толщины покрытия, а на поверхности после плазменной закалки – 50 % от общей толщины покрытия.

Анализ влияния предварительной плазменной обработки на твердость поверхности образца и толщину формирующегося цинкового покрытия (рис. 6) показал, что необработанный образец с феррито-перлитной структурой поверхности имеет наименьшую твердость и наибольшую толщину покрытия, в среднем около 122 мкм. После плазменной закалки твердость феррито-мартенситной структуры поверхности увеличилась, а толщина покрытия уменьшилась на 29 % и составила около 87 мкм. После плазменной резки твердость мартенситной структуры поверхности максимальна, толщина покрытия уменьшилась на 55 % относительно необработанного образца и составила около 55 мкм.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В соответствии с равновесной фазовой диаграммой Fe–Si при небольших концентрациях кремния в железе имеются области α -фазы, которая представляет собой неупорядоченный твердый раствор замещения железа кремнием в объемно-центрированной кубической (ОЦК) решетке, и двух упорядоченных фаз $\alpha 1$ (Fe₃Si) и $\alpha 2$ (FeSi) [19].

При взаимодействии кремнийсодержащей стали с расплавленным цинком фазовые реакции описываются тройной системой Fe–Zn–Si. Исследователи [20] показали, что кремний, находящийся в стали в количестве 0,5–1 %, образует фазу FeSi и смещает равновесие в трехфазную область: ζ -FeZn₁₃–FeSi – жидкий Zn. Наличие жидкой фазы ускоряет рост интерметаллидного слоя ζ -FeZn₁₃.

В результате проведенных исследований установлено, что толщина и структура цинкового покрытия, формирующегося на высококремнистой стали 09Г2С, зависит от приповерхностной структуры стали. Если структура равновесная, феррито-перлитная, как на образцах без термической обработки, то цинковое покрытие образуется толстое, с хорошо развитой ζ -фазой, что характерно для высококремнистой стали.

Если приповерхностная структура стали представляет собой мартенсит или мартенсит + феррит, то толщина ζ -фазы уменьшается в два раза, в структуре покрытия появляется поверхностная η -фаза, что характерно для малокремнистой стали. При этом приповерхностная структура полной закалки (мартенсит) тормозит рост ζ -фазы покрытия сильнее, чем структура неполной закалки (мартенсит + феррит).

Можно предположить, что образование мартенсита приводит к исчезновению упорядоченной фазы FeSi. Кристаллическая решетка мартенсита сильно искажена по сравнению с решеткой феррита и вместо кубической приобретает тетрагональную форму. В отсутствие фазы FeSi образование цинкового покрытия происходит согласно двойной системе Fe–Zn, а в покрытии наблюдаются фазы, характерные для малокремнистых сталей.

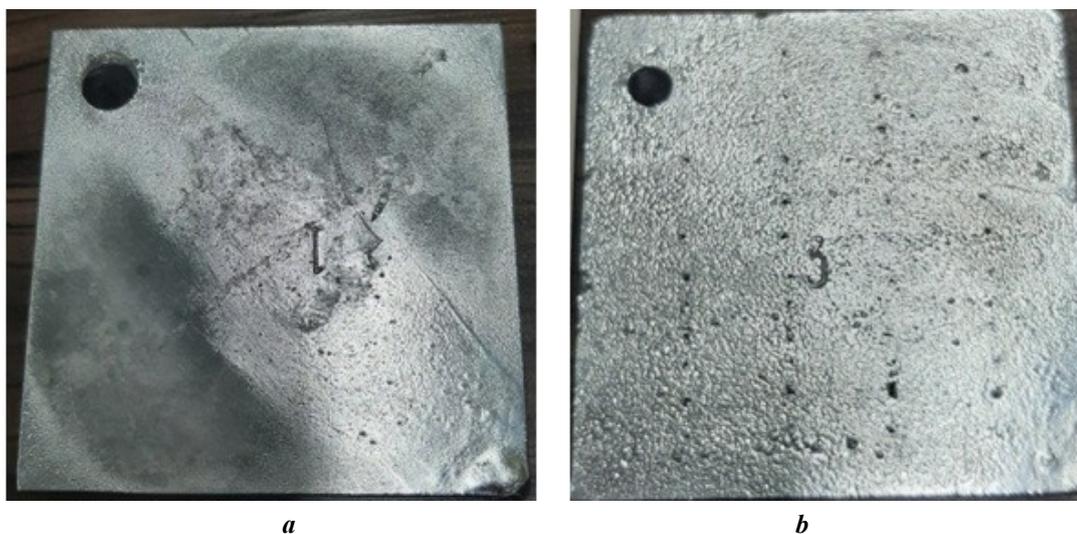


Рис. 4. Поверхность покрытия после горячего цинкования: а – без обработки; б – после плазменной закалки
Fig. 4. Coating surface after hot galvanizing: a – without treatment; b – after plasma hardening

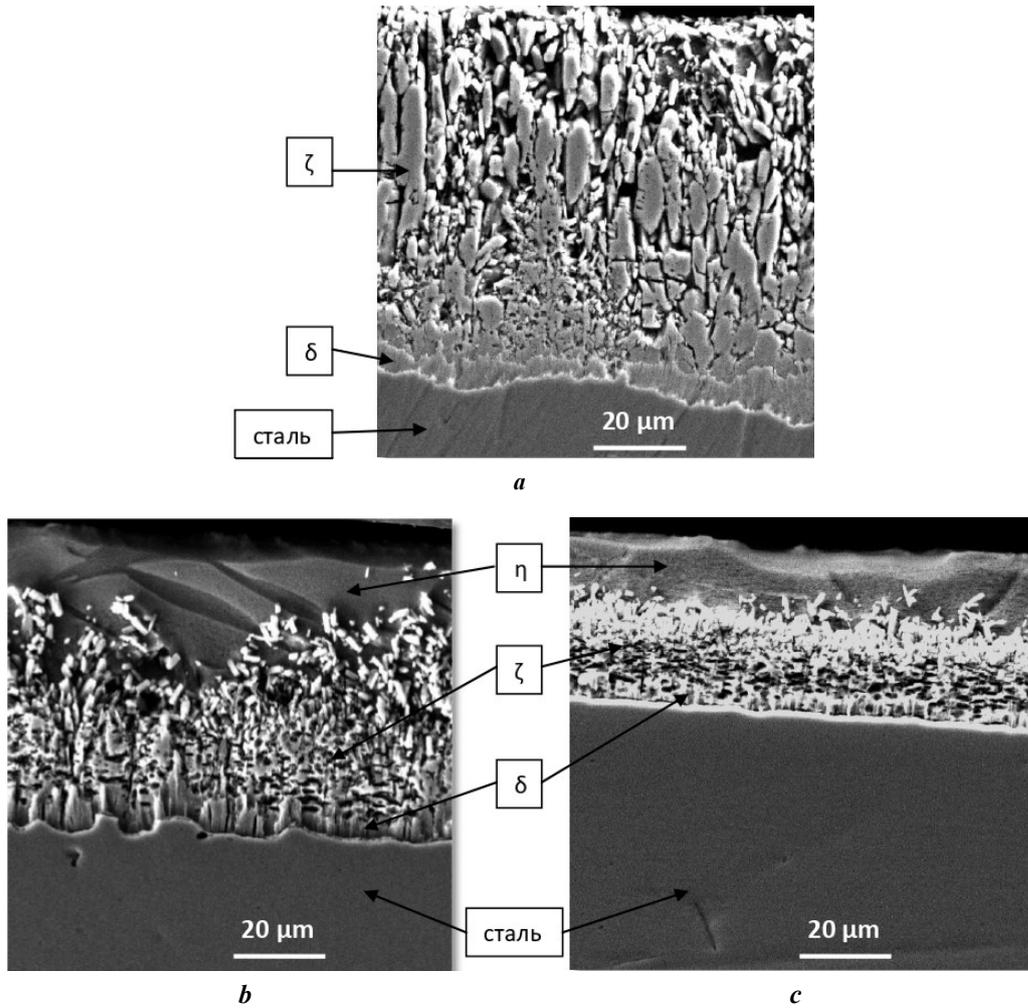


Рис. 5. Микроструктура цинкового покрытия образца, $\times 2000$:
a – без обработки; *b* – после плазменной закалки; *c* – после плазменной резки
Fig. 5. Microstructure of the sample zinc coating, $\times 2000$:
a – without treatment; *b* – after plasma hardening; *c* – after plasma cutting

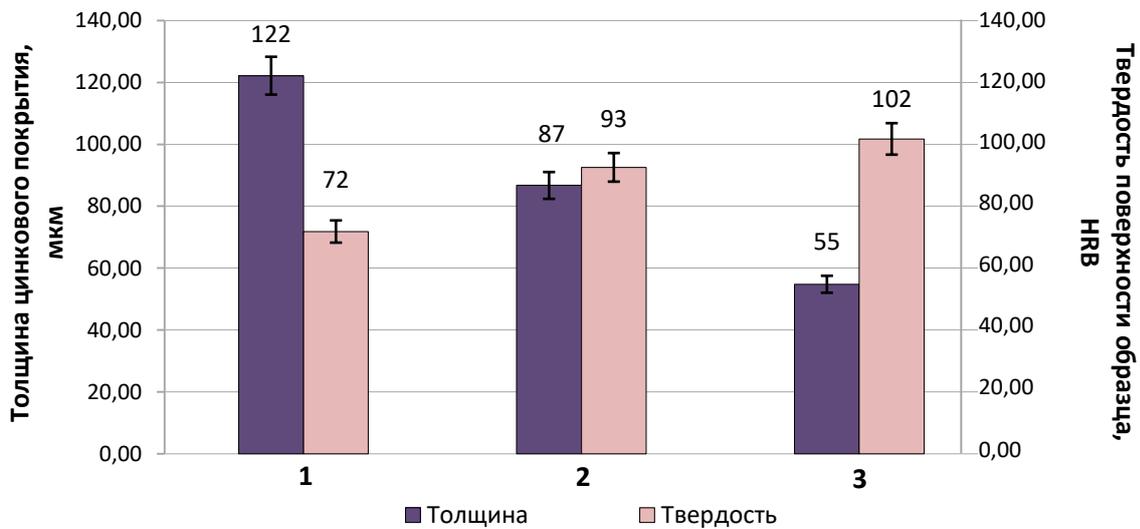


Рис. 6. Диаграмма влияния обработки на толщину покрытия и твердость основы:
 1 – без обработки; 2 – плазменная закалка; 3 – плазменная резка
Fig. 6. Diagram of the influence of treatment on the coating thickness and base hardness:
 1 – without treatment; 2 – plasma hardening; 3 – plasma cutting

Можно считать, что приповерхностная мартенситная структура является диффузионным барьером для кремния, находящегося в стали и влияющего на образование и морфологию ζ -фазы цинкового покрытия.

Таким образом, предварительная плазменная обработка поверхности позволяет управлять структурой и толщиной цинкового покрытия, образующегося на этой поверхности. В дальнейших исследованиях планируется установить время погружения стали в расплав, при котором сохраняется действие мартенситного слоя как диффузионного барьера.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Определена структура отдельных участков зоны термического влияния и изучена их микроструктура. На поверхности после плазменной резки обнаружена структура полной закалки (мартенсит), на поверхности после плазменной закалки – структура неполной закалки (феррит и мартенсит).

Максимальная твердость поверхности образца после плазменной резки составляет 172 HV (увеличилась на 42 %), а после плазменной поверхностной закалки – 153 HV (увеличилась на 29 %). Глубина закаленной зоны составила 400 мкм.

На поверхности после плазменной обработки образуется покрытие с η -фазой чистого цинка, что придает покрытию глянцевый блеск. Толщина цинкового покрытия на поверхности после плазменной закалки на 29 % меньше, а на поверхности после плазменной резки на 55 % меньше, чем на необработанной поверхности. Сокращение толщины покрытия происходит за счет уменьшения толщины ζ -фазы.

Выдвинута гипотеза, что образование на поверхности стали мартенсита приводит к исчезновению упорядоченной фазы FeSi и изменяет фазовое равновесие в системе Fe–Zn–Si. Цинковое покрытие образуется согласно двойной системе Fe–Zn. Таким образом, закаленный слой служит диффузионным барьером при образовании железозинковых слоев покрытия.

Предварительная плазменная обработка поверхности стали 09Г2С приводит к снижению расхода цинка на формирование защитного покрытия и образованию глянцевой поверхности, поэтому данный способ рекомендуется для внедрения в процесс горячего цинкования данной марки стали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gorlenko D.A., Konstantinov D.V., Polyakova M.A., Dabalá M. TRIP steels: the features of chemical composition and structure, prospects of application (overview) // CIS Iron and Steel Review. 2022. Vol. 23. P. 67–75. DOI: [10.17580/cisirs.2022.01.13](https://doi.org/10.17580/cisirs.2022.01.13).
- Min Sun, Packer J.A. Hot-dip galvanizing of cold-formed steel hollow sections: a state-of-the-art review // Frontiers of Structural and Civil Engineering. 2019. Vol. 13. P. 49–65. DOI: [10.1007/s11709-017-0448-0](https://doi.org/10.1007/s11709-017-0448-0).
- Arabaci U., Özdemir U. Effect of Filler Wire Composition on Hot-Dip Galvanizing Performance of S355JR Structural Steel Joints // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2023. Vol. 76. P. 1583–1591. DOI: [10.1007/s12666-023-02878-5](https://doi.org/10.1007/s12666-023-02878-5).
- Бондарева О.С., Мельников А.А. Влияние содержания кремния в конструкционных сталях на строение и скорость роста цинкового покрытия // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19. № 1-3. С. 506–510. EDN: [YPKJJ](https://www.edn.ru/ypkj).
- Inoue J., Miwa S., Koseki T. Effect of Si content in steel on formation of Fe–Zn intermetallic compound layer at pure Zn melt/steel interface // Tetsu-To-Hagane/Journal of the Iron and Steel Institute of Japan. 2014. Vol. 100. № 3. P. 390–396. DOI: [10.2355/tetsutohagane.100.390](https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.100.390).
- Han Seung-Chang, Sanchez D.F., Grolimund D., Uhm Sang-Ho, Choi Du-Youl, Jeong Hong-Chul, Jun Tea-Sung. Role of silicon on formation and growth of intermetallic phases during rapid Fe–Zn alloying reaction // Materials Today Advances. 2023. Vol. 18. Article number 100368. DOI: [10.1016/j.mtadv.2023.100368](https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2023.100368).
- Minenkov A., Mörtlbauer T., Arndt M., Hesser G., Angeli G., Groiss H. Towards a dependable TEM characterization of hot-dip galvanized steels with low and high Si content // Materials & Design. 2023. Vol. 227. Article number 111684. DOI: [10.1016/j.matdes.2023.111684](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111684).
- Marder A.R., Goodwin F.E. The Metallurgy of Zinc Coated Steels. Amsterdam: Elsevier Inc., 2023. 590 p. DOI: [10.1016/C2020-0-04502-0](https://doi.org/10.1016/C2020-0-04502-0).
- Marder A.R., Goodwin F.E. Chapter 15 – General galvanizing // The Metallurgy of Zinc Coated Steels. Amsterdam: Elsevier Inc., 2023. P. 543–566. DOI: [10.1016/B978-0-323-99984-7.00020-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99984-7.00020-8).
- Бондарева О.С., Мельников А.А. Влияние температуры цинкового расплава на толщину и структуру покрытия при высокотемпературном горячем цинковании сталей с высоким содержанием кремния // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2015. № 1. С. 66–70. DOI: [10.17073/1997-308X-2015-1-66-70](https://doi.org/10.17073/1997-308X-2015-1-66-70).
- Verma A.R.B., Van Ooij W.J. High-temperature batch hot-dip galvanizing. Part 1. General description of coatings formed at 560 °C // Surface and Coatings Technology. 1997. Vol. 89. № 1-2. P. 132–142. DOI: [10.1016/S0257-8972\(96\)02941-6](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(96)02941-6).
- Schmitz T. Silicon-containing steel sheet chemical pretreatment prior to hot coating used in automobile structural part production involves degreasing and submersing in pickling bath containing fluorine ions to remove silicon from steel surface: patent FR № 9900126, 2002. 15 p.
- Kania H., Mendala J., Kozuba J., Saternus M. Development of Bath Chemical Composition for Batch Hot-Dip Galvanizing-A Review // Materials (Basel). 2020. Vol. 13. № 18. Article number 4168. DOI: [10.3390/ma13184168](https://doi.org/10.3390/ma13184168).
- He Z.-R., He Y., Zhang Y.-H., Liu J.-T., Xie K. Comparative on microstructure and properties of Zn and Zn–0.05Ni alloy coatings by hot-dip galvanizing // Cailial Rechuli Xuebao/Transactions of Materials and Heat Treatment. 2013. Vol. 34. № 2. P. 152–156.
- Chakraborty A., Ghosh R., Sudan M., Mondal A. Improvement in hot dip galvanized coating microstructure and properties by pre-metallic deposition on steel surface: A comprehensive review // Surface and Coatings Technology. 2022. Vol. 449. Article number 128972. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2022.128972](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128972).
- Che Chunshan, Lu Jintang, Kong Gang, Xu Qiaoyu. Role of silicon in steels on galvanized coatings // Acta

- Metallurgica Sinica (English Letters). 2009. Vol. 22. № 2. P. 138–145. DOI: [10.1016/s1006-7191\(08\)60081-2](https://doi.org/10.1016/s1006-7191(08)60081-2).
17. Токтар А.Б., Әділбеков К.Е., Серіков С.Е., Комбаев К.К. Влияние режимов плазменной резки на свойства кромки стали марки 09Г2С // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. 2019. № 4. С. 160–170. EDN: [VCTRBV](https://www.edn.net/VCTRBV).
 18. Самотугин С.С., Гагарин В.А., Мазур В.А., Нестеров О.Ю. Металлографические исследования упрочненных слоев после поверхностной обработки высококонцентрированной плазменной струей // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2017. № 34. С. 98–105. EDN: [YLVILS](https://www.edn.net/YLVILS).
 19. Ершов Н.В., Черненко Ю.П., Лукшина В.А., Федоров В.И. Структура сплавов α -FeSi с 8 и 10 ат. % кремния // Физика твердого тела. 2012. Т. 54. № 9. С. 1813–1819. EDN: [RCSSDL](https://www.edn.net/RCSSDL).
 20. Takata N., Hayano K., Suzki A., Kobashi M. Enhanced Interfacial Reaction of Fe–Si Alloy Sheets Hot-Dipped in Zn Melt at 460°C // ISIJ International. 2018. Vol. 58. № 9. P. 1608–1615. DOI: [10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-036](https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-036).
 8. Marder A.R., Goodwin F.E. *The Metallurgy of Zinc Coated Steels*. Amsterdam, Elsevier Inc. Publ., 2023. 590 p. DOI: [10.1016/C2020-0-04502-0](https://doi.org/10.1016/C2020-0-04502-0).
 9. Marder A.R., Goodwin F.E. Chapter 15 – General galvanizing. *The Metallurgy of Zinc Coated Steels*. Amsterdam, Elsevier Inc. Publ., 2023, pp. 543–566. DOI: [10.1016/B978-0-323-99984-7.00020-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99984-7.00020-8).
 10. Bondareva O.S., Melnikov A.A. Influence of the temperature of a zinc melt on the coating thickness and structure during high-temperature zincplating steels with a high silicon content. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*, 2015, no. 1, pp. 66–70. DOI: [10.17073/1997-308X-2015-1-66-70](https://doi.org/10.17073/1997-308X-2015-1-66-70).
 11. Verma A.R.B., Van Ooij W.J. High-temperature batch hot-dip galvanizing. Part 1. General description of coatings formed at 560 °C. *Surface and Coatings Technology*, 1997, vol. 89, no. 1-2, pp. 132–142. DOI: [10.1016/S0257-8972\(96\)02941-6](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(96)02941-6).
 12. Schmitz T. *Silicon-containing steel sheet chemical pre-treatment prior to hot coating used in automobile structural part production involves degreasing and submersing in pickling bath containing fluorine ions to remove silicon from steel surface*, patent FR no. 9900126, 2002, 15 p.
 13. Kania H., Mendala J., Kozuba J., Saternus M. Development of Bath Chemical Composition for Batch Hot-Dip Galvanizing-A Review. *Materials (Basel)*, 2020, vol. 13, no. 18, article number 4168. DOI: [10.3390/ma13184168](https://doi.org/10.3390/ma13184168).
 14. He Z.-R., He Y., Zhang Y.-H., Liu J.-T., Xie K. Comparative on microstructure and properties of Zn and Zn–0.05Ni alloy coatings by hot-dip galvanizing. *Cailial Rechuli Xuebao/Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2013, vol. 34, no. 2, pp. 152–156.
 15. Chakraborty A., Ghosh R., Sudan M., Mondal A. Improvement in hot dip galvanized coating microstructure and properties by pre-metallic deposition on steel surface: A comprehensive review. *Surface and Coatings Technology*, 2022, vol. 449, article number 128972. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2022.128972](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128972).
 16. Che Chunshan, Lu Jintang, Kong Gang, Xu Qiaoyu. Role of silicon in steels on galvanized coatings. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2009, vol. 22, no. 2, pp. 138–145. DOI: [10.1016/s1006-7191\(08\)60081-2](https://doi.org/10.1016/s1006-7191(08)60081-2).
 17. Токтар А.Б., Әділбеков К.Е., Серіков С.Е., Комбаев К.К. The influence of plasma cutting modes on the edge properties of 09G2S steel. *Bulletin of D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University*, 2019, no. 4, pp. 160–170. EDN: [VCTRBV](https://www.edn.net/VCTRBV).
 18. Самотугин С.С., Гагарин В.А., Мазур В.А., Нестеров О.Ю. Metallographic examination of hardened layers after surface treatments by highly concentrated plasma jet. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2017, no. 34, pp. 98–105. EDN: [YLVILS](https://www.edn.net/YLVILS).
 19. Ершов Н.В., Лукшина В.А., Черненко Ю.П., Федоров В.И. Structure of α -FeSi alloys with 8 and 10 at % silicon. *Physics of the Solid State*, 2012, vol. 54, no. 9, pp. 1935–1942. DOI: [10.1134/S1063783412090107](https://doi.org/10.1134/S1063783412090107).
 20. Takata N., Hayano K., Suzki A., Kobashi M. Enhanced Interfacial Reaction of Fe–Si Alloy Sheets Hot-Dipped in Zn Melt at 460°C. *ISIJ International*, 2018, vol. 58, no. 9, pp. 1608–1615. DOI: [10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-036](https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-036).

REFERENCES

1. Gorlenko D.A., Konstantinov D.V., Polyakova M.A., Dabalá M. TRIP steels: the features of chemical composition and structure, prospects of application (overview). *CIS Iron and Steel Review*, 2022, vol. 23, pp. 67–75. DOI: [10.17580/cisistr.2022.01.13](https://doi.org/10.17580/cisistr.2022.01.13).
2. Min Sun, Packer J.A. Hot-dip galvanizing of cold-formed steel hollow sections: a state-of-the-art review. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2019, vol. 13, pp. 49–65. DOI: [10.1007/s11709-017-0448-0](https://doi.org/10.1007/s11709-017-0448-0).
3. Arabaci U., Özdemir U. Effect of Filler Wire Composition on Hot-Dip Galvanizing Performance of S355JR Structural Steel Joints. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2023, vol. 76, pp. 1583–1591. DOI: [10.1007/s12666-023-02878-5](https://doi.org/10.1007/s12666-023-02878-5).
4. Bondareva O.S., Melnikov A.A. Effect of the silicon content in structural steels on the structure and growth rate of the zinc coating. *Izvestiya of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2017, vol. 19, no. 1-3, pp. 506–510. EDN: [YPKJJJ](https://www.edn.net/YPKJJJ).
5. Inoue J., Miwa S., Koseki T. Effect of Si content in steel on formation of Fe-Zn intermetallic compound layer at pure Zn melt/steel interface. *Tetsu-To-Hagane/Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*, 2014, vol. 100, no. 3, pp. 390–396. DOI: [10.2355/tetsutohagane.100.390](https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.100.390).
6. Han Seung-Chang, Sanchez D.F., Grolimund D., Uhm Sang-Ho, Choi Du-Youl, Jeong Hong-Chul, Jun Tea-Sung. Role of silicon on formation and growth of intermetallic phases during rapid Fe–Zn alloying reaction. *Materials Today Advances*, 2023, vol. 18, article number 100368. DOI: [10.1016/j.mtadv.2023.100368](https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2023.100368).
7. Minenkov A., Mörtlbauer T., Arndt M., Hesser G., Angeli G., Groiss H., Towards a dependable TEM characterization of hot-dip galvanized steels with low and high Si content. *Materials & Design*, 2023, vol. 227, article number 111684. DOI: [10.1016/j.matdes.2023.111684](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111684).

The influence of preliminary plasma treatment of the 09G2S steel surface on the formation of a coating as a result of hot galvanizing

© 2024

Olga S. Bondareva*¹, PhD (Engineering),

assistant professor of Chair of Metal Technology and Aviation Materials Science

Olga S. Dobychina, postgraduate student of Chair of Metal Technology and Aviation Materials Science

Leonid S. Kukankov, student

Yuliya N. Korotkova, student

Vitaly A. Tretyakov, student

Academician S.P. Korolev Samara National Research University, Samara (Russia)

*E-mail: osbondareva@ssau.ru,
osbond@yandex.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4273-2483>

Received 27.06.2023

Accepted 22.11.2023

Abstract: In recent years, the range of silicon-containing steels subjected to hot galvanizing has been expanding. Alloying of steel with 0.5–1 % of silicon leads to the formation of a zinc coating of great thickness with a matte or multi-colored surface. This is associated with the changes in phase reactions between iron and zinc in the Fe–Zn–Si system. The development of ways to neutralize the negative influence of silicon on the formation of zinc coating is an urgent task. The purpose of the work is to study the influence of preliminary plasma cutting and plasma surface hardening of 09G2S (S355J2) steel on the thickness and structure of zinc coating formed on treated surfaces. It was found that after plasma cutting, the structure of the surface layer of steel is martensite, and after plasma surface hardening, it is martensite and ferrite. Analysis of the change in microhardness from the steel surface to the middle showed that the hardened layer depth is 400 μm. A zinc coating consisting of a δ-phase and a ζ-phase is formed on the surface of the steel without pretreatment. On the surface of the steel after plasma treatment, a zinc coating is formed characteristic of low-silicon steels and consisting of the δ-phase, ζ-phase, and η-phase. It was found that the thickness of the zinc coating on the surface after plasma cutting is two times less than on the untreated surface, and the reduction in the coating thickness occurs due to a decrease in the ζ-phase thickness. A hypothesis was suggested that the martensite formation on the steel surface leads to the disappearance of the ordered FeSi phase and changes the phase equilibrium in the Fe–Zn–Si system. Consequently, preliminary plasma treatment of the steel surface allows controlling the structure and thickness of the resulting zinc coating and is therefore recommended for introduction into the hot galvanizing process of silicon-containing steels.

Keywords: hot galvanizing; zinc coating; silicon-containing steels; Fe–Zn–Si; plasma treatment; surface hardening.

For citation: Bondareva O.S., Dobychina O.S., Kukankov L.S., Korotkova Yu.N., Tretyakov V.A. The influence of preliminary plasma treatment of the 09G2S steel surface on the formation of a coating as a result of hot galvanizing. *Frontier Materials & Technologies*, 2024, no. 2, pp. 23–31. DOI: 10.18323/2782-4039-2024-2-68-2.