

## СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ДИФФУЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ХРОМА, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВАЛКОВ ИЗ СЕРОГО ЧУГУНА ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ

Гадалов В.Н.<sup>1</sup>, Щеренкова И.С.<sup>2</sup>, Ворначева И.В.<sup>1</sup>, Журавлев Г.М.<sup>3</sup>, Абакумов А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

<sup>2</sup> Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия

<sup>3</sup> Тульский государственный университет, Тула, Россия

**Аннотация.** Предоставленные литературные сведения по влиянию повышенных скоростей нагрева и охлаждения на эксплуатационные свойства серых чугунов с электролитическими покрытиями ограничены и неоднозначны в их интерпретации, в связи с этим вопрос об установлении закономерностей структурообразования, изучения факторов состава и влияния этих факторов на изменение свойств материала, служащего объектом исследования, является востребованным как в научном, так и практическом плане.

Объектами служили композиционные электрохимические покрытия (КЭП) на основе хрома и зона взаимодействия (ПИС) с основой – подложкой. КЭП наносились в самолегирующемся электролите сульфатного типа ( $\text{CrO}_3$  – 250 г/л,  $\text{SrSO}_4$  – 6 г/л) при температуре 60°C, плотности тока 50 А/Дм<sup>2</sup> для обеспечения формирования твердого износостойкого осадка хрома. В зависимости от времени электролиза 60–180 мин были сформированы КЭП различной толщины, от 15 до 130 мкм.

Для получения плазменно-диффузионных покрытий в качестве подложки использовался серый чугун марки СЧ-20 и двухслойный валковый чугун с рабочим слоем из ЛПХд-70. На отливку электролитическим способом при температуре 60°C и плотности тока 50 А/Дм<sup>2</sup> наносился хром толщиной 100 и 300 мкм, который подвергался плазменной обработке по следующему режиму: плотность тока 7–8 МА/м<sup>2</sup>, расход плазмообразующего аргона 5–6 л/мин, удельная мощность плазмотрона 240–250 МВт/м<sup>2</sup>, диаметр сопла плазмотрона 8 мм, линейная скорость передвижения плазмотрона составляла 70 м/с. Упрочненные слои образовывались без принудительного охлаждения, только за счет теплоотвода в металле. Данный режим был выбран для обеспечения расплавления поверхности чугуна.

Повышение физикомеханических электролитического хрома возможно за счет его термической обработки (ТО). ТО может осуществляться различными способами, в частности плазменной обработкой, в условиях повышенных скоростей нагрева и охлаждения. При этом повышается адгезионная прочность покрытий и поверхностный измененный слой (ПИС) приобретает высокую износостойкость вследствие образования твердых мелкодисперсных карбидов хрома.

**Ключевые слова:** диффузионное покрытие, износостойкость, плазменная обработка, двухслойные валки, твердый раствор.

### Введение

Литературные сведения по влиянию повышенных скоростей нагрева и охлаждения на эксплуатационные свойства серых чугунов с электролитическими покрытиями ограничены и неоднозначны в их интерпретации, поэтому определение закономерностей структурообразования, исследование компонентов состава и действия их на изменение свойств материала актуально как в научном, так и практическом плане.

Объектами служили композиционные электрохимические покрытия (КЭП) на основе хрома и зона взаимодействия (ПИС) с основой – подложкой. КЭП наносились в самолегирующемся электролите типа ( $\text{CrO}_3$  – 250 г/л,  $\text{SrSO}_4$  – 6 г/л) при температуре 60°C, плотности тока 50 А/Дм<sup>2</sup> для обеспечения формирования твердого износостойкого осадка хрома. Были получены КЭП с различными толщинами 15–130 мкм, зависящими от времени электролиза 60–180 мин.

Для получения плазменно-диффузионных покрытий в качестве подложки использовали серый чугун марки СЧ-20 и двухслойный валковый чугун с рабочим слоем из ЛПХд-70. На от-

© Гадалов В.Н., Щеренкова И.С., Ворначева И.В., Журавлев Г.М., Абакумов А.В., 2016

ливку электролитическим способом при температуре 60°C и плотности тока 50 А/Дм<sup>2</sup> наносили хром толщиной 100 и 300 мкм, который подвергали плазменной обработке при следующих режимах: плотность тока 7–8 МА/м<sup>2</sup>, расход аргона, образующего плазму 5–6 л/мин, при удельной мощности плазмотрона 240–250 МВт/м<sup>2</sup>, диаметре сопла 8 мм, линейной скорости передвижения плазмотрона 70 м/с. Упрочненные слои образовывались только за счет теплоотвода в металле без принудительного охлаждения. Такие параметры обеспечивают расплавление поверхности чугуна.

Исследование микроструктуры комплексных электрохимических покрытий и плазменных покрытий производили на оптическом микроскопе МИМ-8, автоматическом анализаторе структуры ЕРИQUANT при увеличении 100–1000 раз и на просвечивающем электронном микроскопе ЭМ-200 при ускоряющем напряжении 150 кВ и рабочем увеличении от 2000 до 26000. Фазовый и химический состав порошков и плазменно-диффузионных покрытий изучали на дифрактометре «ДРОН-4» и растровом электронном микроскопе LEO EVO-50XVP. Изучение структуры и измерение микротвердости покрытий и контактирующих с ними зон материала основы производили на поверхности и поперечных шлифах.

Измерение микротвердости покрытий проводили по стандартной методике на микротвердомере «ПМТ-3» с нагрузкой 0,98Н (100 г) на поперечных шлифах с интервалом 100 мкм между отпечатками.

Испытания на износостойкость осуществляли на установках «Шлиф – 2» и «СМЦ – 2». На модернизированной установке «Шлиф – 2» определяли устойчивость покрытий к абразивному износу. Контртелом являлся круг из электрокорунда 14 А на вулканитовой основе. Истирание образца происходило по боковой поверхности круга. Образцы испытывали под нагрузкой 7 Н со скоростью перемещения образца 5,5 м/с при трении без смазки.

На машине трения «СМЦ – 2» проводили испытания на износостойкость при трении качении без смазки с проскальзыванием 10% по схеме «диск по диску». Образцы подвергали нагрузке 1 Н/мм с частотой вращения 300 об/мин в течение 35 мин. Закаленный цилиндр диаметром 50 мм из среднеуглеродистой стали 40Х с твердостью 52–54 HRC<sub>3</sub> использовали как контртело. Определение износостойкости проводилось по

величине потери массы за пройденное расстояние. Измерение массы осуществлялось на аналитических весах АДВ-200М с точностью 0,1 мг.

### Материалы и методы исследований

В настоящей работе представлены исследования по влиянию термической обработки на структурообразование и физико-механические свойства диффузионных хромовых покрытий. Комплексные хромовые электрохимические покрытия значительно увеличивают длительность эксплуатации инструментов, используемых в условиях повышенных нагрузок, но их применение ограничено температурами выше 400°C, поскольку резко снижается твердость электролитического хрома. По этой причине дальнейшие исследования посвящены поиску решений по увеличению срока эксплуатации деталей, работающих при повышенных температурах и нагрузках. Температурная обработка хромовых электролитических осадков – это разновидность диффузионного хромирования. В промышленных условиях для диффузионного хромирования применяют длительный высокотемпературный отжиг, но его использование ограничено из-за возможных коробления и поводки крупногабаритных изделий, а также маленькой толщины получаемого диффузионного слоя. Применение обработки плазмой электролитического осадка хрома позволяет создавать покрытия, имеющие высокую концентрацию хрома и большие толщины при отсутствии коробления.

Изучение возможности упрочнения серого чугуна обработкой плазмой предварительно нанесенного хромового осадка и изучение воздействия толщины электролитического хромового осадка на свойства формируемых покрытий производили на образцах из материала серый чугун марки СЧ-20 на ферритно-перлитной основе с пластинчатой формой графита. Сведения о химическом составе этой марки серого чугуна представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Сведения о химическом составе чугуна марки СЧ-20

Вид материала	Сведения о химическом составе, %					σ <sub>в</sub> , МПа, не менее
	C	Si	Mn	P	S	
Чугун СЧ-20	3,4	1,9	0,8	0,2	0,15	200

Структуру покрытий и зон материала основы, контактирующих с ними, исследовали на поперечных шлифах. Фотография структуры исходного образца представлена на рис. 1.

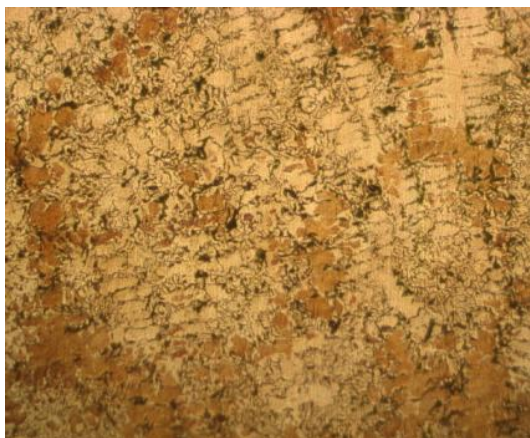


Рис. 1. Структура чугуна исходного образца (травление в 3% растворе  $\text{HNO}_3$ )

Для изучения воздействия плазменной струи на первоначальную структуру чугуна приготовленный участок подвергали плазменной обработке с оплавлением. Для предотвращения растрескивания применяли предварительный подогрев до  $350^\circ\text{C}$ . Проведенные после этого металлографические исследования показали, что протяженность зоны, которая подвергалась воздействию температуры, достигает около 1000 мкм. Толщина зоны, которая подверглась расплавлению, составляет 800 мкм, под ней располагается зона закалки из твердой фазы толщиной приблизительно 200 мкм. Переплавленная зона – это смесь мартенсита, ледебурита и остаточного аустенита. В зоне оплавления полностью растворены включения графита. В зоне

оплавления структура состоит из дендритов, которые ориентированы в направлении теплоотвода, зона закалки из твердой фазы – это крупные зерна имеющие мартенситную структуру, микроструктура металлической основы в обработанном чугуна особых изменений не претерпела. Микротвердость исходного образца варьируется в пределах 1,6–2,0 ГПа, микротвердость модифицированного плазмой чугуна возросла и в среднем составила 3,5–4,0 ГПа (рис. 2).

Механические свойства поверхностного слоя серого чугуна при плазменной обработке улучшались с помощью создания хромовых диффузионных покрытий. На исходные образцы наносили слой твердого электролитического хрома с различными толщинами: 100 и 300 мкм, а затем образцы подвергались модифицированию струей плазмы с оплавлением поверхности по режиму приведенному ранее при предварительном подогреве. Так было изучено воздействие толщины осадка хрома на механические свойства и структуру серого чугуна при обработке плазмой, а также глубину поверхностного слоя. Эксперименты показали, что получены покрытия толщиной 3,5–4,5 мм. С увеличением толщины покрытия возрастает микротвердость и толщина диффузионного слоя. Для образцов, модифицированных хромом, при толщине слоя осадка 100 мкм, наибольшая микротвердость была 4,0–5,0 ГПа, толщина слоя покрытия – 3,5 мм; а в выборке с толщиной электролитического хромового осадка 300 мкм толщина – 4,5 мм, наибольшая микротвердость – 5,5–6,5 ГПа.

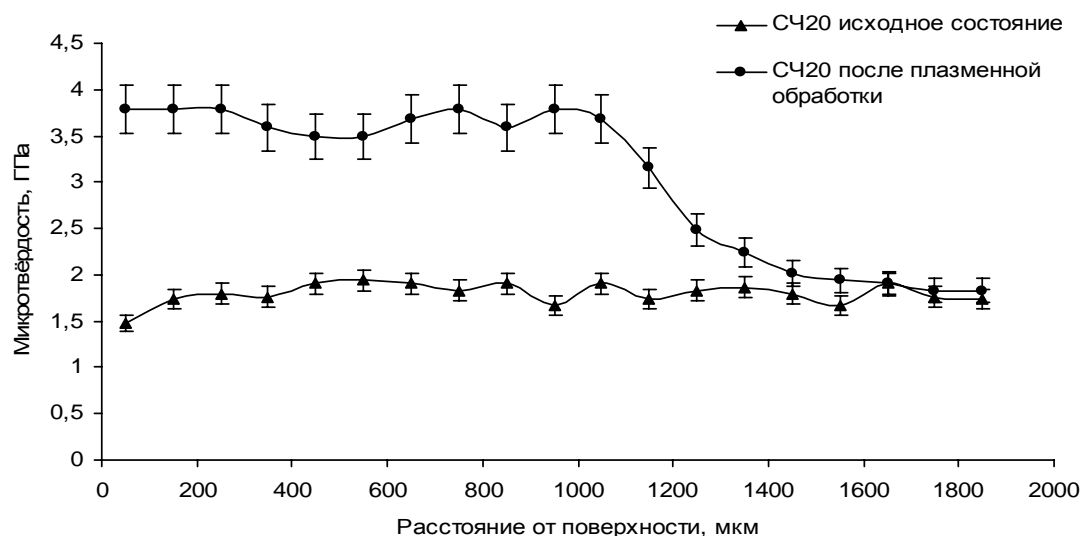


Рис. 2. Различие микротвердости чугуна по глубине слоя, модифицированного плазмой

Изучение микроструктур (рис. 3) показало, что при модифицировании плазменной струей слоя электролитического хрома толщиной 100 мкм в покрытие определяется четко выраженная структура. дендриты, направленные в сторону теплоотвода, находятся в зоне оплавления, межосное пространство является легированным ледебуритом. Переходная зона представляет собой мартенситную структуру. Покрытие, полученное обработкой 300 мкм слоя хрома, является дисперсным с большей степени, дендритная структура выражена менее. Дендриты занимают большую поверхность, а доля легированного ледебурита (межосного пространства) уменьшается. Зона закалки из твердого состояния является мелкодисперсным мартенситом, металлическая основа в обработанном чугуна осталась практически неизменной.

Установлено, что толщина зоны, не подвергшейся расплавлению, но структура которой изменилась в результате воздействия плазмы, в присутствии хрома – 3,5–4,5 мм, это соотносится с толщиной наплавки металлов. Процентное содержание диффундирующего элемента на поверхности раздела «хром – чугун» в значительной степени влияет на протекание и итог процесса диффузии. При повышении толщины наносимого покрытия увеличивается микротвердость и толщина диффузионного слоя. В выборке из 10 хромированных образцов при толщине осадка 100 мкм наибольшая микротвердость – 4,5–5,0 ГПа, толщина покрытия – 3,5 мм; а в выборке из 10 образцов с толщиной электролитического хромового осадка 300 мкм микротвердость составляет 6,0–7,0 ГПа, толщина – 4,5 мм (рис. 4).

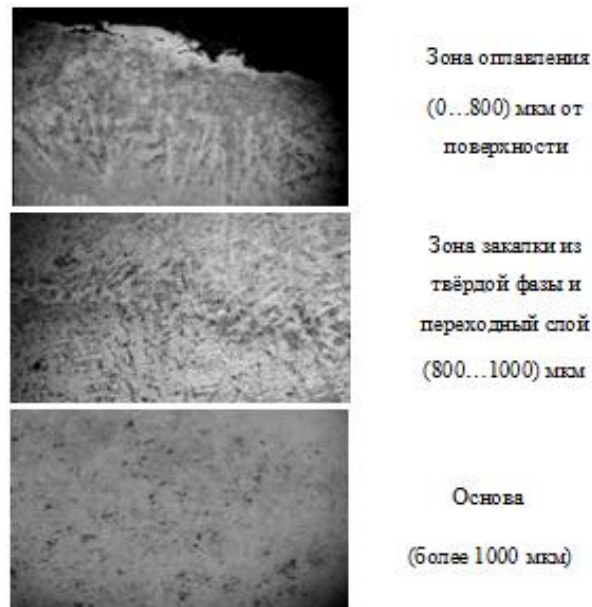


Рис. 3. Структура чугуна, обработанного плазмой, от поверхности до исходной структуры (травления в 3 % растворе HNO<sub>3</sub>), ×100

Исследование микроструктур (рис. 5) выявило, что при плазменной обработке электролитического хрома толщиной 100 мкм покрытие обладает четко выраженной структурой.

Дендриты, направленные в сторону теплоотвода, находятся в зоне оплавления, межосное пространство является структурой легированного ледебурита (см. рис. 5). Переходная зона представляет собой мартенситную структуру. Покрытие, полученной обработкой 300 мкм слоя хрома, является более дисперсным, структура дендритов выражена менее четко (рис. 6), количество межосного пространства (легированного ледебурита) сокращается, а дендриты занимают наибольшую площадь. Зона закалки из твердого состояния является мелкодисперсным ледебуритом.

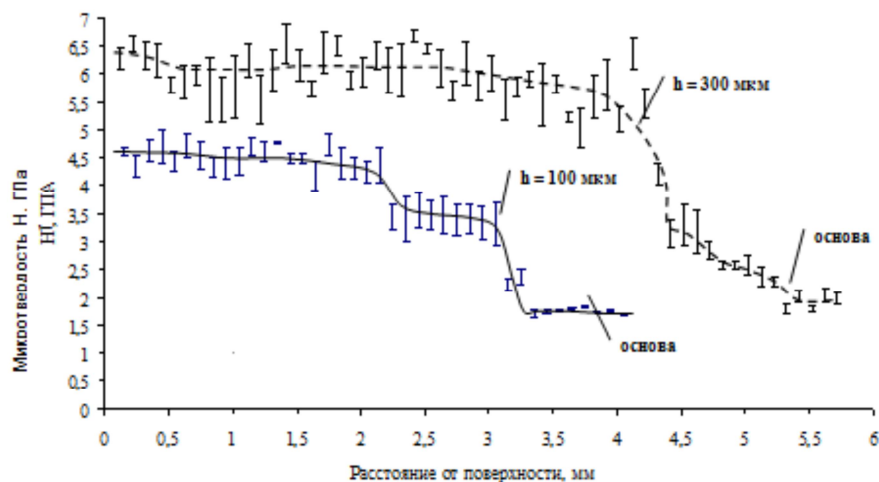


Рис. 4. Зависимости твердости от глубины хромированного слоя чугуна

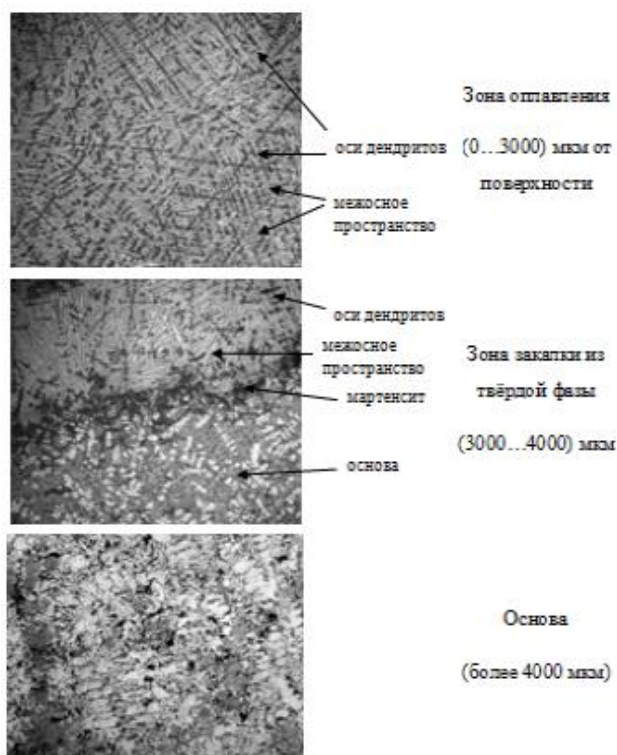


Рис. 5. Микроструктура диффузионного покрытия чугуна хромом (электролитический осадок хрома толщиной 100 мкм), ×200

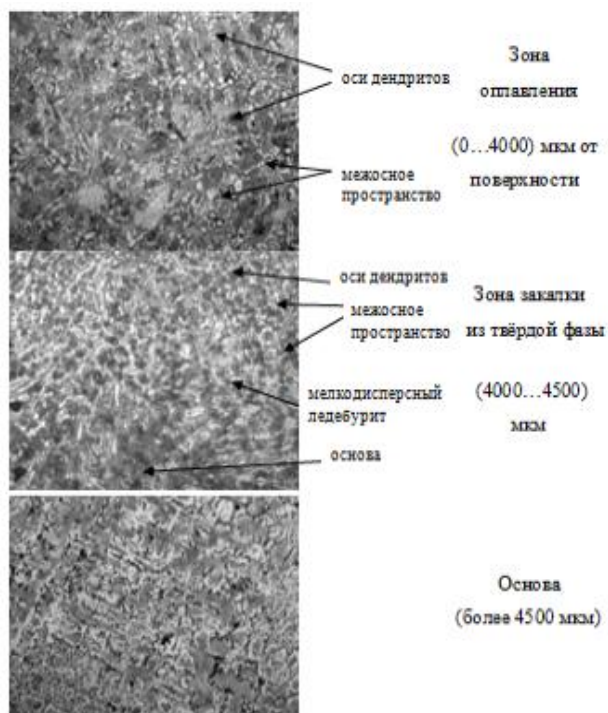


Рис. 6. Микроструктура диффузионного покрытия чугуна хромом (электролитический осадок хрома толщиной 300 мкм), ×200

Определение химического состава фаз, составляющих структуры в диффузионных хро-

мовых покрытиях и распределения отдельных химических элементов по модифицированной поверхности осуществлялись на микроскопе LEO EVO-50XVP (растровый, электронный) с возможностью микроанализа химического состава. Наименьший размер анализируемого участка составлял 1 мкм. Содержание химического элемента определялось по всей толщине диффузионного покрытия хрома с шагом, равным 500 мкм. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2  
Распределение химических элементов по толщине диффузионного покрытия хрома, %

Зона диффузионного покрытия	Хром	Железо	Кремний
Межосное пространство (зона оплавления)	17,9–25,3	66,9–71,6	0,9–1,1
Оси дендритов (зона оплавления)	19,3–7,0	77,4–86,4	1,1–1,9
Зона закалки из твердой фазы	10–0,7	86,5–94,5	1,2–2,2

Исследования выявили, что усредненная концентрация хрома (рис. 7) в межосном пространстве составляет 17,9–25,3%, в осях дендритов 7,0–19,3%, наличие хрома монотонно по толщине покрытия, резкое уменьшение наличия хрома в двух фазах происходит вблизи переходной зоны. Далее какого-либо наличия хрома не обнаруживается.

Содержание железа по толщине покрытия в межосном пространстве – 67–75%, в осях дендритов – 80–85% (рис. 8); а концентрация кремния в межосном пространстве – 0,5%, в осях дендритов – 1,5–2,0% (рис. 9).

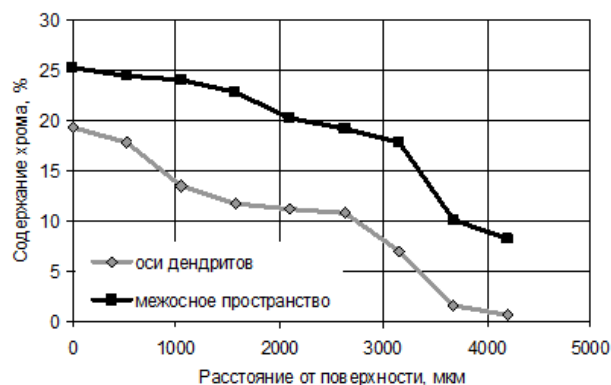


Рис. 7. Распределение концентрации хрома по толщине покрытия



Рис. 8. Распределение концентрации железа по толщине покрытия

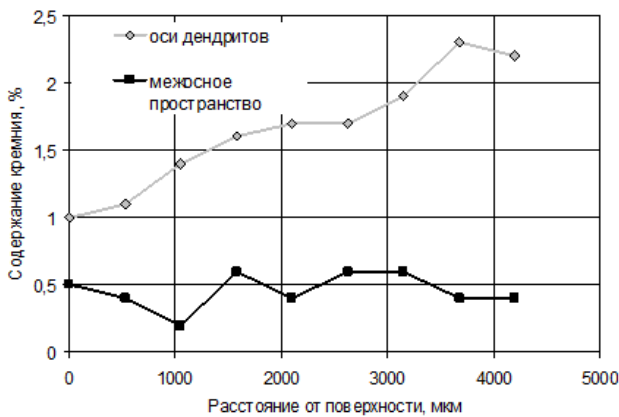


Рис. 9. Распределение концентрации кремния по толщине покрытия

Для идентификации фазового состава, составляющего структуру, использовали фазовый рентгеновский анализ. Изучение хромированных образцов проводили на приборе «Дрон-4». Съемку осуществляли в монохроматизированном MoCu $\alpha$ -излучении с длиной волны  $\lambda = 0,7093 \text{ \AA}$  при ускоряющем напряжении 45–50 кВ.

Выявлено (рис. 10), что диффузионная зона представляет карбидную структуру:  $(\text{Cr, Fe})_7\text{C}_3$  и  $(\text{Cr, Fe})_{23}\text{C}_6$ . Сравнение кривых распределения элементов и результатов рентгеноспектрального анализа показывает, что в состав легированного ледобурита (межосное пространство) входит высокохромистый карбид  $(\text{Cr, Fe})_{23}\text{C}_6$ , а оси дендритов – карбид гетерогенный  $(\text{Cr, Fe})_7\text{C}_3$ . По мимо этого, установлено, что в структуре зоны диффузии хромированных покрытий кроме карбидной составляющей имеется  $\text{Fe}_3\text{C}$  и  $\alpha\text{-Fe}$  (мартенсит) и небольшое количество  $\text{A}_{\text{ост}}$ .

Результаты исследований (микротвёрдость, толщина покрытий, химический и фазовый составы) показывают, что плазменные диффузионные покрытия из хрома хорошо препятствуют абразивному износу, также и при повышенной температуре. Повышенную толщину и микротвёрдость покрытия имеет диффузионная зона, получаемая при обработке плазмой слоя электролитического хрома толщиной 300 мкм. Фазовый и химический составы, а также микротвердость чугуна с плазменным диффузионным хромовым покрытием отвечают правилам эксплуатации валков горячей прокатки листовой стали.

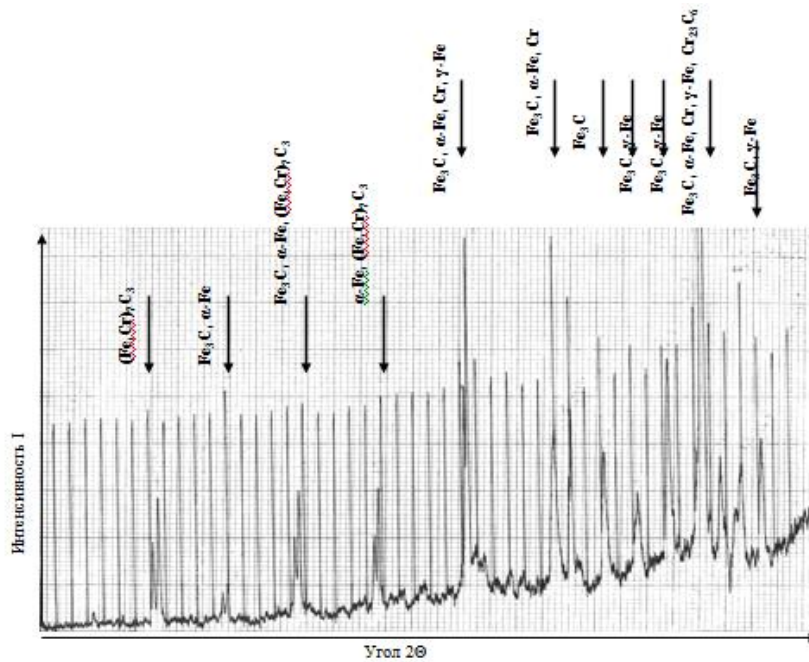


Рис. 10. Рентгеновская спектрограмма хромированных образцов

Поэтому отработан метод восстановления двухслойных валков из материала серый чугун с отбелённым рабочим слоем, применяющиеся при горячей прокатке листовой стали, подвергающихся воздействию термической усталости при использовании в высокотемпературной области и при циклических напряжениях. Отбелённый рабочий слой, имеющий глубину 15–30 мм, периодически перешлифовывают по мере выработки, а при достижении переходной зоны валок снимают с производства.

Были исследованы образцы, вырезанные из отработанного чугунного валка марки ЛПХд-70 после удаления в процессе эксплуатации отбелённого слоя.

Из такого валка получали образец с сохранённым поверхностным слоем на глубину 50 мм. Осадок электролитического хрома толщиной 300 мкм наносился на боковую поверхность такого образца с дальнейшим модифицированием низкотемпературной плазмой по выше приведённому режиму. Сведения о химическом составе обрабатываемого слоя показаны в табл. 3.

**Таблица 3**  
Сведения о химическом составе валка из чугуна марки ЛПХд-70

Сведения о химическом составе чугунного валка, %							
Зона	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Отбелённый слой (остатки, h = 100 мкм)	2,52	0,42	0,62	0,5	0,09	0,78	0,3
Переходный слой (h = 500 мкм)	3,32	1,02	0,6	0,28	0,12	0,1	0,3
Основа	3,2	1,5	0,7	0,16	0,12	0,15	0,3

Рис. 11 показывает сопоставление микротвёрдости чугуна ЛПХд-70 без обработки плазмой и модифицированного плазменной обработкой. Измерение микротвёрдости осуществлялось от поверхности по сечению до структуры серого чугуна с помощью микротвердомера ПМТ-3 с нагрузкой 0,98 Н.

Послойный анализ выявил, что полученная структура обладает максимальным значением в поверхностных слоях при более глубоком проплавлении при некотором удалении от поверхности. Твёрдость структуры, полученной на сером чугуне, значительно ниже, чем переходного слоя. Разница в распределении микротвёрдости возникла из-за неоднородных условий охлаждения. Микротвёрдость после модификации возросла с 1,5 до 2,0 ГПа. При этом уровень твёрдости, полученный после обработки плазмой, примерно соотносится с твёрдостью отбелённого слоя валка марки ЛПХд-70 5,1–5,2 ГПа.

Структура необработанного образца - это переходный слой, оставшийся после эксплуатации валка, и сердцевина валка – серый чугун на перлитной основе (рис. 12).

Обработанный плазмой чугун (рис. 13) в зоне оплавления имеет дендритную структуру. Направление дендритов в сторону теплоотвода. Зона оплавления имеет глубину 4500–5000 мкм. При отдалении от поверхности дендриты уменьшаются. Зона закалки из твёрдой фазы 5500–6500 мкм имеет структуру легированного ледобурита, перлита, мартенсита и остаточного аустенита. Далее находится основа – серый чугун на перлитной основе.

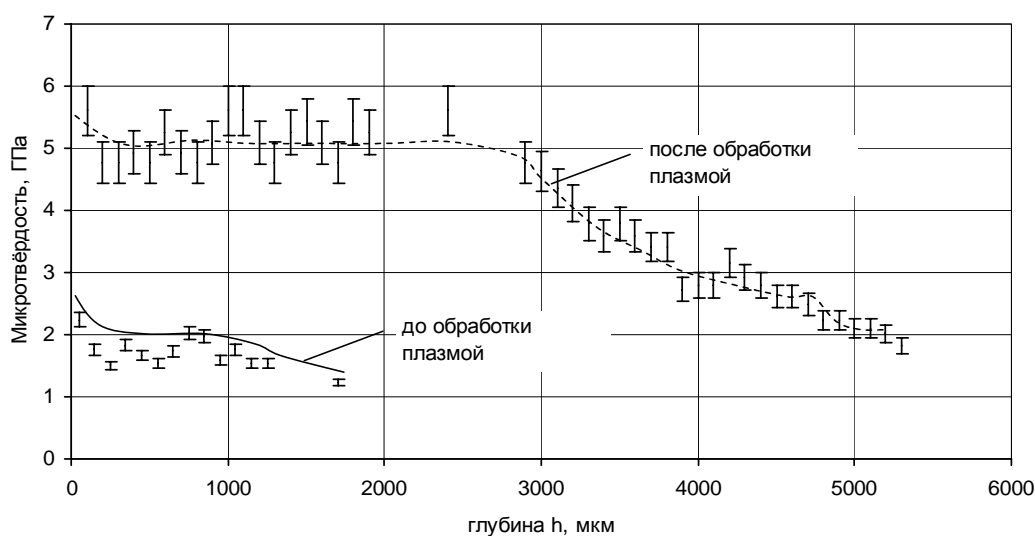


Рис. 11. Зависимость микротвёрдости исходного образца чугуна и чугуна, обработанного плазмой от глубины

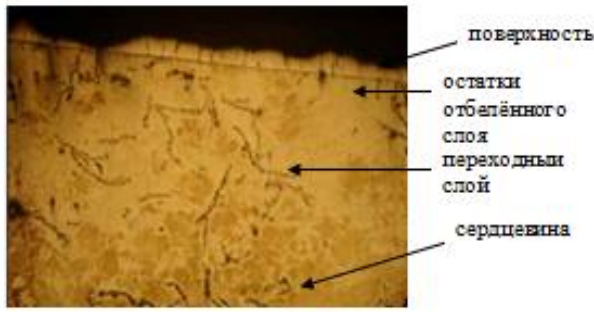


Рис. 12. Структура исходного чугуна (x100)

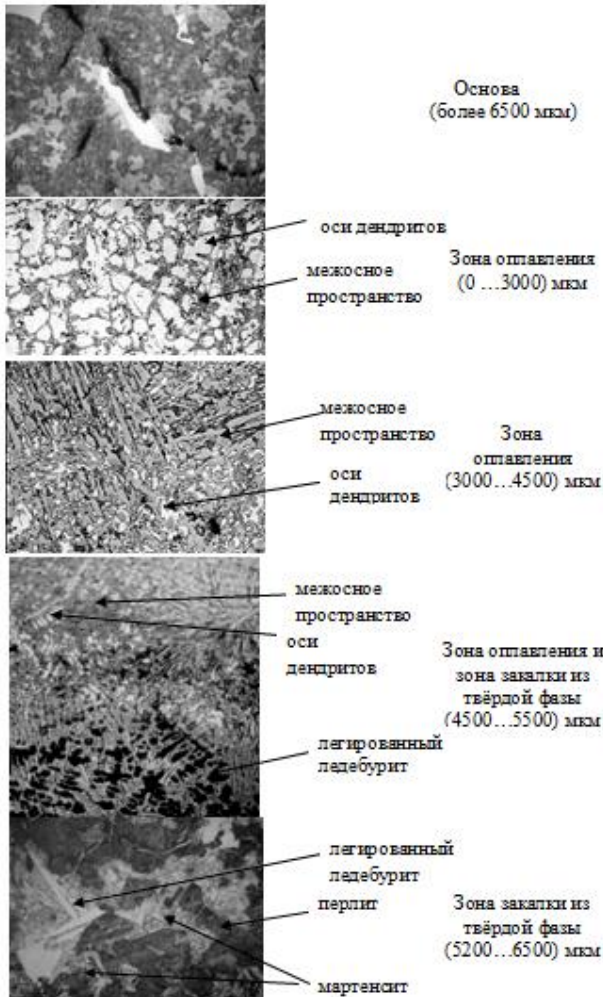


Рис. 13. Структура плазменно-обработанного чугуна (x500)

Двухслойные валки из серого чугуна с отбеленным рабочим слоем, используемые для горячей прокатки листовой стали, подвергают воздействию термической усталости при использовании в области циклических напряжений и высоких температур. Отбеленный рабочий слой периодически перешлифовывают по мере выработки, и когда перешлифовка затронет переходную зону, валок снимают с производства. Поэтому

исследовали образцы, вырезанные из отработанного двухслойного чугунного вала марки ЛПХд-70 после удаления отбеленного слоя. Образец вырезали из отработанного вала с сохранением поверхностного слоя. Осадок электролитического хрома толщиной 300 мкм наносили на боковую поверхность полученного образца с последующей обработкой низкотемпературной плазмой по режиму, приведенному выше.

Химический состав рабочего слоя вала значительно влияет на жаростойкость и жаропрочность. С помощью микроструктурных и микрозондовых исследований установлено распределение основного легирующего элемента хрома в избыточных фазах и в основе по толщине диффузионной зоны (табл. 4).

Таблица 4

Распределение хрома по фазам, находящимся в плазменном покрытии и глубине, %

Глубина, мм	Оси дендритов	Межосное пространство	Легированный ледебурит	Мартенсит
0	8,5	40,6	-	-
0,45	8,3	39,9	-	-
0,9	8,3	37,1	-	-
1,35	8	34,4	-	-
1,8	7,2	32,8	-	-
2,25	6,6	31,2	-	-
2,7	6,6	30,8	-	-
3,15	5,8	28,7	-	-
3,6	4,9	15,5	-	-
4,05	4,7	14,8	-	-
4,5	-	5,9	1,9	-
4,7	-	1,8	1,8	-
4,9	-	-	1,6	-
5	-	-	1,5	-
5,2	-	-	-	0,6
5,4	-	-	-	0,6
5,6	-	-	-	0,6
5,8	-	-	-	0,5

Микрозондовое исследование позволило установить, что распределение хрома монотонно варьируется по толщине покрытия, резкое падение возникает в переходной зоне.

Для изучения фазового состава этих зон применяли метод рентгеноструктурного анализа. Исследования хромированных образцов проводились на дифрактометре «ДРОН-4». Рентгеноструктурный анализ показал, что образующийся в поверхностном слое карбид распознается как Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>. А в глубоких слоях



часть хрома замещается железом с возникновением сложного карбида  $(Cr, Fe)_7C_3$ . Также выявлено присутствие остаточного аустенита. При переходе к чугуновой основе в структуре покрытия возникали другие фазы, в которых было меньшее процентное содержание хрома и значительное – углерода и кремния. Твердый раствор включал 4,0–8,0% хрома, а карбидные фазы – 15,0–40,0% хрома. На глубине более 5 мм имеются нерастворившиеся карбидные включения. При удалении от поверхности кристаллы легированного ледебурита увеличиваются. Содержание хрома в этой фазе соответствует содержанию хрома в легированном цементите.

Таким образом, можно сделать вывод, что эксплуатация валков с предлагаемым типом покрытий из-за значительного содержания остаточного аустенита будет качественно препятствовать трещинообразованию.

Соотношение результатов данного исследования со свойствами высокохромистых валков выявило, что по твердости и содержанию хрома полученное плазменное покрытие соответствует химическому составу и свойствам хромистых валков. Таким образом, можно сказать, что, вне зависимости от меньшей толщины, использование этих покрытий может быть достаточно эффективным. Присутствие значительного процентного содержания остаточного аустенита препятствует трещинообразованию. А значит, целесообразно восстановление изношенных валков путем нанесения на поверхность электролитического хрома с последующей обработкой плазмой вместо замены хромистого валка.

Полученные результаты (толщина покрытий, микротвёрдость, фазовый и химический составы) дают основание считать, что диффузионные плазменные хромовые покрытия хорошо противостоят абразивному износу, в том числе при повышенной температуре.

Лучшие характеристики (микротвёрдость, толщина покрытия) имеет диффузионная зона, получаемая при плазменной обработке слоя электролитического хрома толщиной 300 мкм. Фазовый и химический составы, а также микротвёрдость чугуна с плазменным диффузионным хромовым покрытием удовлетворяет необходимым требованиям использования валков горячей прокатки листовой стали.

Таким образом, был разработан метод восстановления валков из серого чугуна, используемых при горячей прокатке сталей.

### Выводы

1. Толщина электролитического осадка хрома перед плазменной обработкой детали, обеспечивающая наилучшие эксплуатационные характеристики, составляет 300 мкм, причем возникает диффузионный слой толщиной около 4,5 мм.

2. Обработка чугуна с электролитическим хромовым покрытием плазмой позволяет повысить микротвёрдость в 3–4 раза, получить на поверхности карбидные фазы  $(Cr, Fe)_7C_3$  и  $(Cr, Fe)_{23}C_6$ , аналогичные фазовому составу при диффузионном хромировании. Процентное содержание хрома при этом около 20–25%.

3. Сопоставление экспериментальных данных с известными свойствами высокохромистых валков, показывает, что по твердости и процентному содержанию хрома полученное плазменное покрытие соответствует химическому составу и свойствам хромистых валков. Поэтому, несмотря на меньшую толщину, промышленной применение таких покрытий будет достаточно эффективным. А значит, целесообразно и экономически более выгодно восстановление изношенных валков путем нанесения на поверхность электролитического хрома с дальнейшей обработкой плазмой вместо нового хромистого валка.

При написании настоящей статьи были использованы литературные источники [1–5].

### Список литературы

1. Антропов Л.И., Лебединский Ю.Н. Композиционные электрохимические покрытия и материалы. К.: Техника, 1986. 200 с.
2. Металлография металлов, порошковых материалов и покрытий, полученных электроискровыми способами / В.Н. Гадалов, В.Г. Сальников, Е.В. Агеев, Д.Н. Романенко. Курск: Инфра-М, 2011. 468 с.
3. Буркат Г.К., Долматов В.Ю. Ультрадисперсные алмазы в гальванотехнике // Физика твёрдого тела. 2004. Т. 46. Вып. 4. С. 685–692.
4. Ставрев Д.С., Ников Н.Я. Упрочнение серых чугунов при поверхностном отбеле низкотемпературной плазмой // Металловедение и термическая обработка металлов. 1985. №4. С. 15–18.
5. Костиков В.Н., Шестерин Ю.А. Плазменные покрытия. М.: Металлургия, 1978. 180 с.
6. Лащенко Г.И. Плазменное упрочнение и напыление. Киев: Экотехнология, 2003. 64 с.

Материал поступил в редакцию 15.12.15.

## THE STRUCTURE AND PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CHROMIUM DIFFUSION COATINGS USED FOR RECOVERY OF GREY CAST IRON ROLLS THROUGH PLASMA TREATMENT

**Gadalov Vladimir Nikolaevich** – D.Sc. (Eng.), Professor, South-West State University, Kursk, Russia. E-mail: Gadalov-vn@yandex.ru.

**Cherenkova Irina Sergeevna** – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: mailbox@stu.lipetsk.ru.

**Vornacheva Irina Valerievna** – Postgraduate Student, South-West State University, Kursk, Russia. E-mail: vornairina2008@yandex.ru.

**Zhuravlev Gennady Modestovich** – D.Sc. (Eng.), Professor, Tula State University, Tula, Russia. E-mail: info@tsu.tula.ru.

**Abakumov Andrey Vladimirovich** – Postgraduate Student, South-West State University, Kursk, Russia. E-mail: 747-067@mail.ru.

**Abstract.** The available literature describing the effects of high heating and cooling rates on the properties of gray cast iron with electroplates seems to be rather limited and ambiguous. Therefore, the problem of identifying structural regularities and studying the composition factors and their effect on the properties of the material under examination is of high relevance in both academic and practical terms.

This research focused on composite chromium-based electrochemical coatings and the interaction area between a coating and a substrate (i.e. the surface modified layer). Composite coatings were applied in a self-alloying sulphate electrolyte (CrO<sub>3</sub> – 250 g/l, SrSO<sub>4</sub> – 6 g/l) at 60°C and the current density of 50 A/dm<sup>2</sup> to ensure the formation of a hard wear-resistant chromium deposit. Coatings with thicknesses of 15 to 130 μm were produced, determined by the electrolysis time (60 to 180 min).

Gray cast iron of grade SCh-20 and a double-layer roll foundry iron with a working layer made of LPKhd-70 were used as substrates for plasma electrolytic diffusion coatings. The casting was plated with chromium at 60°C and the current density of 50 A/dm<sup>2</sup> to obtain 100 and 300 μm thick coatings. After that the chromium deposit was plasma-treated under the following process parameters: the current density of 7 to 8 MA/m<sup>2</sup>, the flow rate of plasma-forming argon of 5 to 6 l/min, the specific power of the plasma torch of 240 to 250 MW/m<sup>2</sup>, the diameter of the nozzle of 8 mm, the linear speed of the plasma torch of 70 m/s. The hardened layers were formed with no forced cooling applied but merely due to heat dissipation in the metal. The above process parameters were designed to cause the surface layer of the casting to melt.

The physical and mechanical properties of chromium coatings can be enhanced through the application of heat treatment (HT). Various HT techniques are applicable at high heating and cooling rates, with plasma treatment being one of them. HT helps improve the adhesion strength of coatings and achieve an excellent wear resistance of the surface modified layer due to hard finely dispersed chromium carbides.

**Keywords:** Diffusion coatings, wear resistance, plasma treatment, double-layer rolls, solid solution.

### References

1. Antropov L.I., Lebedinskii Iu.N. *Kompozitsionnye elektrokhimicheskie pokrytiia i materialy* [Composite electrochemical coatings and materials]. Kiev: Tekhnika, 1986, 200 p.
2. Gadalov V.N., Salnikov V.G., Ageev E.V., Romanenko D.N. *Metallografiia metallov, poroshkovykh materialov i pokrytii poluchennykh elektroiskrovymi sposobami* [Metallography of metals, powder materials and coatings obtained by spark erosion]. Kursk: Infra-M, 2011, 468 p.
3. Burkat G.K., Dolmatov V.Iu. Ultra-dispersed diamonds in electroplating. *Fizika tverdogo tela* [Solid-state physics]. 2004, vol. 46, iss. 4, pp. 685-692.
4. Stavrev D.S., Nikov N.Ia. Hardening of gray iron through surface chilling with low-temperature plasma. *Metallovedenie i termicheskaia obrabotka metallov* [Metallography and heat treatment of metals]. 1985, no. 4, pp. 15-18.
5. Kostikov V.N., Shesterin Iu.A. *Plazmennye pokrytiia* [Plasma coatings]. Moscow: Metallurgii, 1978, 180 p.
6. Lashchenko G.I. *Plazmennoe uprochnenie i napylenie* [Plasma hardening and plasma spraying]. Kiev: Ekotekhnologiya, 2003, 64 p.

Структурообразование и физико-механические свойства электрохимических диффузионных покрытий на основе хрома, используемых для восстановления валков из серого чугуна плазменной обработкой / Гадалов В.Н., Щеренкова И.С., Ворначева И.В., Журавлев Г.М., Абакумов А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №2. С. 53–62. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-2-53-62

Gadalov V.N., Cherenkova I.S., Vornacheva I.V., Zhuravlev G.M., Abakumov A.V. The structure, physical and mechanical properties of chromium diffusion coatings used for the recovery of grey cast iron rolls through plasma treatment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 2, pp. 53–62. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-2-53-62