

Министерство образования и науки Российской Федерации
Сибирский государственный индустриальный университет

Посвящается 400-летию города Новокузнецка

**МЕТАЛЛУРГИЯ:
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО**
«Металлургия – 2017»

15 – 16 ноября 2017 г.

Труды
XX Международной научно-практической конференции
Часть 1

Новокузнецк
2017

В процессе охлаждения стали в аустенитном состоянии (из области высоких температур) превращение аустенита происходит только после его переохлаждения ниже эвтектоидной температуры $A_{\Gamma_1} = 727^\circ\text{C}$, что объясняется изменением свободной энергии фаз и структур сплавов при нагреве и охлаждении. При низких температурах меньшим запасом свободной энергии обладает перлит по сравнению с аустенитом, поэтому при переохлаждении стали аустенит превращается в пластинчатый перлит (ферритно-цементитную смесь). Чем больше степень переохлаждения аустенита, тем мельче образуемая из него ферритно-цементитная смесь. Полученные перлитные структуры зависят от температуры. При малой степени переохлаждения аустенита в интервале температур $727 - 650^\circ\text{C}$ получается перлит. При большей степени переохлаждения в интервале температур $650 - 600^\circ\text{C}$ после превращения аустенита образуется сорбит (более мелкая, чем перлит, пластинчатая ферритно-цементитная смесь).

При еще больших степенях переохлаждения в интервале температур $600 - 500^\circ\text{C}$ получают троостит (более тонкопластинчатая ферритно-цементитная смесь по сравнению с сорбитом) [8].

Таким образом, предложенный способ позволит получать необходимую структуру металла шва, что в свою очередь позволит добиться высоких механических и эксплуатационных свойств стыкового соединения рельсов. Регулируя параметры изотермической выдержки можно устранить последствия влияния неблагоприятных химических элементов рельсовой стали на процесс сварки.

Библиографический список

1. Бесстыковой путь прогрессивная конструкция железнодорожного пути [Текст] / Л.В. Клименко // Приложение к журналу "Мир транспорта" МКЖТ МПС РФ, 2004. - № 1 с. 88-93.
2. Козырев Н.А. Железнодорожные рельсы из электростали [Текст] / Н.А. Козырев, В.В. Павлов, Л.А. Годик, В.П. Дементьев. – Новокузнецк: ЕвразХолдинг, Новокузнецкий металлургический комбинат, 2006. – 388 с.
3. Козырев Н. А. Современные методы получения бесстыковых рельсов / Н. А. Козырев, А. А. Усольцев, Р. Е. Крюков, Р. А. Шевченко, П. Е. Шишкин // Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении: сборник трудов Международной научно-практической конференции 18-21 апреля 2017 года / под ред. А. Н. Смирнова. – Кемерово: КузГТУ, 2017. с 123 - 127.
4. Шур Е.А. Комплексный метод контактной сварки рельсов: [Текст] / Е.А. Шур, В.А. Резанов // Вестник ВНИИЖТ. – 2012. – № 3. – С. 20 – 22.
5. Шевченко Р. А. Расчет оптимальных режимов электроконтактной сварки железнодорожных рельсов / Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Шишкин П.Е., Крюков Р.Е., Усольцев А.А. // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. Вып. 37. – Новокузнецк: СибГИУ, 2016. с 175 – 180.
6. Скугорова Л.П. Материалы для сооружения газонепроводов и хранилищ: уч. пособие / Л. П. Скугорова. – М.: Недра, 1989. – 344 с.

УДК 621.921.26

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ В ГАЛЬВАНИКЕ, КЕРАМИКЕ, МОДИФИЦИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТИ

Руднева В.В.¹, Галевский Г.В.¹, Галевский С.Г.², Черновский Г.Н.¹

¹Сибирский государственный индустриальный университет,

г. Новокузнецк, Россия, kafcmet@sibsiu.ru

²Санкт-Петербургский горный университет,

г. Санкт-Петербург, Россия, sgalevskii@gmail.com

Аннотация: Установлены в процессах композиционного электроосаждения покрытий, формирования конструкционной керамики, поверхностного упрочнения сталей электровзрывным легированием технологические преимущества и условия обеспечения нового качества покрытий и изделий, достигаемые при использовании нанокарбида кремния. Нанокарбид кремния рекомендован для использования в составе износостойких и коррозионностойких хром-карбидных электроосаждаемых покрытий, способных работать в условиях повышенных температур, для упрочнения инструмента и оснастки, в том числе с особо сложным микрорельефом рабочих поверхностей. Нанокарбид кремния в составе композиций «карбид кремния – бор – углерод» может быть использован для производства керамических заготовок твердофазным спеканием в аргоне при давлении 0,1 МПа и темпера-

туре 2273 К. Применение нанокарбида кремния в технологии поверхностного упрочнения инструментальных сталей электровзрывным легированием обеспечивает получение защитного слоя глубиной около 20 мкм с высокой микротвердостью, износостойкостью и жаростойкостью.

Ключевые слова: нанокристаллический карбид кремния, композиционное хромирование, конструкционная керамика, поверхностное модифицирование, электровзрывное легирование.

ASSESSMENT OF EFFICIENCY OF APPLICATION OF NANOCRYSTAL SILICON CARBIDE IN THE GALVANICS, CERAMICS, MODIFYING OF THE SURFACE

Galevskiy G.V.¹, Rudneva V.V.¹, Galevskiy S.G.², Chernovsky G.N.¹

¹*Siberian state industrial university,
Novokuznetsk, Russia, kafcmet@sibsiu.ru*

²*St. Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia, sgalevskii@gmail.com*

Abstract: *Technological advantages and conditions of ensuring new quality of coverings and products reached at silicon nanocarbide use in processes of composite electrodeposition of coverings, formations of constructional ceramics, superficial hardening steel by an electroexplosive alloying are established. Silicon nanocarbide is recommended for use as a part of wearproof and corrosion-resistant chrome - the carbide electrobesieged coverings capable to work in the conditions of the increased temperatures, for hardening of the tool and equipment, including with especially difficult microrelief of working surfaces. Silicon nanocarbide as a part of compositions "silicon carbide – boron – carbon" can be used for production of ceramic preparations by solid-phase agglomeration in argon with a pressure of 0,1 MPas and temperature 2273 K. Use of silicon nanocarbide in technology of superficial hardening of tool steel by an electroexplosive alloying provides a protective layer about 20 microns in depth with a high microhardness, wear resistance and heat resistance.*

Keywords: *nanocrystal silicon carbide, composite chromium plating, constructional ceramics, superficial modifying, electroexplosive alloying.*

Введение

Производство карбида кремния является одним из важнейших в структуре современной металлургии. Сочетание исключительных теплофизических, механических и физико-химических свойств карбида кремния делает его уникальным материалом для многих отраслей техники и определяет такие основные направления применения, как материалы на связках, керамика, композиционные материалы и покрытия. Мировое производство карбида кремния составляет около 800 тыс. т в год. Крупнейшими сферами использования карбида кремния являются металлургия (около 45 % мирового спроса), производство абразивов (до 30 %) и огнеупоров (до 25 %). Пока маломасштабными по фактическому объему (менее 1 %), но интенсивно развивающимися и имеющими высокую стоимостную оценку, являются рынки сбыта карбидокремниевых порошковых материалов: микронизированного порошка с размером частиц менее 1 мкм (т.н. «микронизированный карбид») для керамики и нанопорошка с размером частиц менее 100 нм (т.н. «нанокарбид») для высококачественных конструкционной и ударопрочной керамики и гальваники. Введение в обращение карбида кремния в виде нанокарбида открывает новые направления его применения, в том числе для поверхностного и объемного модифицирования металлических сплавов и полимеров, создания специальных красочных составов и др. Производителями микронизированного карбида являются предприятия мировых лидеров – компаний «Saint-Gobian» и «Exolon-ESK». Среди производителей нанокарбида – научно-производственные фирмы «Токуо Текко Со» (Япония), «Hefei Kaier Nanotechnology & Development Ltd. Co» (Китай), «NEOMAT Co» (Латвия) и др.

Целью настоящей работы явилась оценка эффективности применения нанокарбида кремния в технологии композиционных электроосаждаемых покрытий (КЭП), конструкционной керамики, электровзрывного легирования (ЭВЛ) сталей. При проведении экспериментальных исследований использовали нанокарбид кремния и композиции на его основе, полученные по инновационной технологии, предложенной авторами [1].

Применение нанокарбида кремния в технологии композиционных электрохимических покрытий

Нанокарбид кремния применялся в качестве упрочняющей фазы в процессах электрохимического осаждения покрытий из электролитов хромирования. Для решения задач композиционного

упрочнения использовали нанокарбид, полученный карбидизацией микропорошка кремния метаном – SiC (1) и плазменным модифицированием микропорошка – SiC (2). Характеристики нанопорошков (НП) карбида кремния SiC (1) и SiC (2) и их физико-химические свойства приведены в таблице 1 и подробно описаны в работах [1 - 3].

Таблица 1 Основные характеристики нанопорошков карбида кремния

Характеристики нанопорошков	SiC (1)	SiC (2)
Фазовый состав	β -SiC	β -SiC
Химический состав основной фазы	$\text{SiC}_{0,95}\text{N}_{0,05}$	$\text{SiC}_{0,95}\text{N}_{0,05}$
Содержание основной фазы, % масс.	99,21*	99,30*
Содержание примеси свободного углерода, % масс.	0,06	0,05
Удельная поверхность, м ² /кг	38000	37000
Размер** частиц, нм	62	61
Форма частиц	Огран.	
Коррозионная стойкость в растворах электролитов	Устойчив в электролитах любой кислотности	
Термоокислительная устойчивость на воздухе, К	до 913	
Примечание: * После рафинирования; ** Рассчитан по величине удельной поверхности.		

Для электроосаждения КЭП хром – нанокарбид использовали электролит хромирования, содержащий НП карбида кремния SiC (1) или SiC (2), следующего состава, кг/м³: хромовый ангидрид 250, серная кислота 3, хром трехвалентный 8. Для приготовления электролита – суспензии к навеске порошка добавляли небольшое количество чистого электролита, компоненты перемешивали до полного смачивания порошка, переносили в электролизер и разбавляли до требуемой концентрации. Корректировка pH производилась с помощью растворов NaOH или H₂SO₄.

Анализ результатов исследований и промышленного применения нанокарбида кремния SiC (1) и SiC (2) подтвердил установленные ранее для нанокарбидов и наноборидов и описанные в работах [4 – 6] параметрический, концентрационный, структурный и технологический эффекты. Так, используемый электролит хромирования характеризовался в зависимости от дисперсности наполнителя следующим изменением катодной плотности тока (МП – микропорошок карбида кремния с размером частиц менее 5 мкм):

Без наполнителя (5 кА/м²) → МП SiC (5,5-6,0) → НП SiC (2), SiC (4) (8-10).

Возрастание допустимой катодной плотности тока обусловлено, по-видимому, стабилизацией значений pH в прикатодном слое при введении в электролит второй фазы. Насыщение покрытия карбидными наночастицами происходит при меньшем их массовом содержании в покрытии и концентрации в электролите (таблица 2), что обусловлено возрастанием числа наночастиц в единице объема, способствующим дисперсионному твердению металлической матрицы. Микротвердость композиционных покрытий с наноконпонентами на основе хрома в 1,80-1,90 раза выше, чем у хрома, и в 1,10-1,20 выше по сравнению с композиционными покрытиями с микропорошками (таблица 2), причем во всех случаях величина микротвердости повышается с увеличением содержания частиц в композиционном материале. Повышение твердости связано с высокой эффективностью наночастиц как барьеров распространения дислокаций. Включение наночастиц в хромовую матрицу снижает интенсивность её изнашивания при изменении содержания наноразмерного порошка от 0,15 до 0,45 % масс. в 1,25-2,5 раза. Значительное повышение износостойкости материала Cr – НП SiC связано с устранением в структуре слоя возбудителей местной концентрации напряжений – микротрещин, присутствующих в значительных количествах в хромовых слоях. Определение коррозионной стойкости КЭП Cr – НП SiC в жидких средах показывает, что КЭП превосходят обычные покрытия на основе хрома в 1,3-1,5 раза (частотный показатель коррозии 0,3 %) и могут быть отнесены к группе стойких.

Для оценки возможности замены нанокарбидом кремния нанодетонационного синтеза, проведено сопоставление характеристик хром-карбидных и хром-алмазных покрытий (таблица 3).

Можно видеть, что хром-карбидные покрытия имеют сопоставимые с хром-алмазными износостойкость, микротвердость, коррозионную стойкость, более высокий срок службы при эксплуатации в условиях температур выше 473-573 К, достигаемые при более низких концентрациях нанопорошка карбида в электролите и существенном снижении стоимости 1 м³ электролита – суспензии.

Таблица 2 - Зависимость содержания упрочняющей фазы (а) и микротвердости (Н) КЭП* от концентрации НП и МП в электролите

Концентрация НП, МП в электролите, кг/м ³	а, % масс. / Н, ГПа		
	Cr – НП SiC (1)	Cr – НП SiC (2)	Cr – МП SiC
1,0	0,20/9,0	0,24/9,1	0,47/8,4
3,0	0,41/9,3	0,43/9,2	0,72/8,6
10,0	0,59/9,7	0,58/9,4	0,89/8,9
20,0	0,82/10,1	0,84/10,1	1,1/9,0

Примечание: * Условия электроосаждения: КЭП Cr – НП, МП SiC – катодная плотность тока 8,0 кА/м², рН 2,0, Т = 323 К.

Таблица 3 - Сравнительные характеристики покрытий на основе хрома с нанопорошками карбида кремния SiC (1) и алмаза [7]

Условия электроосаждения и достигаемые результаты		Технологические варианты					
		1	2	3	4	5	6
Состав электролита, кг/м ³	Хромовый ангидрид	250	250	250	250	250	260
	Кислота серная	3	3	3	3	3	0,34
	Хром трехвалентный	8	8	8	8	8	–
	Калий кремнефтористый	–	–	–	–	–	19
	Барий сернокислый	–	–	–	–	–	7
	НП карбида кремния	4	6	7	8	10	–
	НП алмаза	–	–	–	–	–	20
Режим осаждения	Температура, К	328	328	328	328	328	331
	Плотность тока, А/дм ²	55	55	55	55	55	55
Результаты	Износостойкость*	0,96	1,0	1,05	1,07	1,08	1,0
	Микротвердость, ГПа	8,9	9,0	9,1	9,15	9,15	9,0
	Коррозионная стойкость*	0,96	1,05	1,07	1,10	1,10	1,0
	Срок службы при температуре выше 473-573 К*	1,1	1,50	1,70	2,00	2,06	1,0
	Стоимость 1 м ³ электролитной суспензии*	0,13	0,16	0,18	0,20	0,23	1,0

Примечание: * Износостойкость, коррозионная стойкость, срок службы при эксплуатации при температуре выше 473-573 К, стоимость 1 м³ электролитной суспензии приведены по отношению к варианту 6, для которого значения этих показателей приняты за 1,0.

Результаты исследований свидетельствуют о технологической целесообразности применения нанопорошков с удельной поверхностью не более 40000 м²/кг (таблица 4) с ограниченным (менее 1,0 % масс.) содержанием свободного углерода (таблица 5).

Таблица 4 - Сравнительные характеристики покрытий на основе хрома с НП карбида кремния с различной удельной поверхностью (для условий технологического варианта 4, таблица 3)

Величина удельной поверхности НП карбида кремния, м ² /кг	11000	22000	32000	38000	51000
Износостойкость	0,89	0,99	1,0	1,03	0,93
Микротвердость, ГПа	7,92	9,27	9,32	9,39	8,51
Коррозионная стойкость	0,82	1,0	1,0	1,0	0,91
Срок службы при эксплуатации при температуре выше 473-573 К	0,72	1,0	1,0	1,0	0,88

Таблица 5 - Сравнительные характеристики покрытий на основе хрома с НП карбида кремния при различном содержании в нем свободного углерода (для условий технологического варианта 4, таблица 3)

Содержание в НП карбида кремния свободного углерода, % масс.	0,8	1,5	2,4
Износостойкость	1,0	0,86	0,79
Микротвердость, ГПа	932	760	710
Коррозионная стойкость	1,0	0,89	0,79
Срок службы при эксплуатации при температуре выше 473-573 К	1,0	не рекомендуются к эксплуатации в этих условиях	

Использование более дисперсных наноматериалов усложняет технологию приготовления и эксплуатации электролита – суспензии. Это обстоятельство отмечается также в работах других исследователей. Так, авторы работы [7], использовавшие при композиционном хромировании алмазные нанопорошки с удельной поверхностью 400000-500000 м²/кг (размер частиц 4-5 нм), отмечают, что при реализации обычных приемов приготовления электролита – суспензии нанопорошки вводятся в электролит с большим трудом (длительность перемешивания может составить 50-80 часов), в связи с чем ими разработана специальная длительная многооперационная технология. Авторы работы [8], использовавшие для композиционного хромирования нанопорошок оксида алюминия с удельной поверхностью 100000-150000 м²/кг (размер частиц 15-18 нм), также отмечают возникающие при приготовлении электролита – суспензии трудности, в связи с чем рекомендуют вводить нанопорошок в электролит в виде концентрированной суспензии, обработанной ультразвуком частотой 22 кГц. Отмеченные особенности подтверждают значительное развитие в объеме электролита процессов коагуляции наночастиц, приводящих к их укрупнению, и усиливающихся при применении нанопорошков с удельной поверхностью 50000-500000 м²/кг. Развитие процессов коагуляции обусловлено такими причинами, как неустойчивость наносистем, обладающих избыточной поверхностной энергией, и неудовлетворительная смачиваемость нанопорошков, связанная с состоянием поверхности их частиц и наличием или отсутствием на них поверхностного заряда. В результате возникает технологическая необходимость реализации процессов электроосаждения покрытий из электролитов – суспензий с повышенной концентрацией в них нанопорошков.

По результатам исследований разработаны способ получения композиционных электрохимических покрытий на основе хрома [9] и технологические процессы композиционного упрочнения с нанокарбидом кремния. КЭП на основе Cr – НП SiC рекомендуются для защиты деталей и технологической оснастки, подверженных износу (например, нитевые датчики крутильных машин, штоки амортизаторов и др.), одновременному износу и коррозии (например, пресс-формы для отпрессовки изделий из термопластов, детали нефте- и газопромыслового оборудования и др.). Но экономически и технологически наиболее целесообразно применение их взамен хром-алмазных КЭП для поверхностного упрочнения инструмента, оснастки, деталей машин и механизмов, эксплуатирующихся в условиях повышенных температур (выше 473-573 К): прессовый инструмент для порошковой металлургии, детали инструментального производства – пуансоны, штампы, матрицы, державки пуансонов и др., детали поршневой группы двигателей внутреннего сгорания и т.п.

Применение нанокарбида кремния в технологии конструкционной керамики

Для технологии конструкционной керамики применяли нанокарбид кремния, полученный карбидизацией микропорошка кремния метаном – SiC (1) и модифицированием микропорошка карбида в плазменном потоке азота – SiC (2) с последующим рафинированием.

Нанокарбид кремния по основным характеристикам (уровню дисперсности, фазовому и химическому составу) не уступает карбидокремниевым порошкам конструкционного назначения зарубежных фирм (таблица 6). Технологическим преимуществом вводимого в обращение материала является возможность поставки его в виде композиции заданного состава, содержащей активирующие процесс спекания добавки (реакционноспособные бор и углерод).

Таблица 6 - Химический и фазовый составы, режимы ТФС и физико-механические свойства карбидокремниевых керамических материалов

Характеристики порошков карбида кремния, условия подготовки и режимы ТФС	Торговая марка, изготовитель			
	СибГИУ SiC (1)	СибГИУ SiC (2)	A-10 "Hermann Starck Co."	B-10 "Hermann Starck Co."
Фазовый состав	β-SiC	β-SiC	α-SiC	β-SiC
Химический состав, % масс.				
SiC	90,16	90,00	97,0	95,0
C _{своб.}	2,70	2,69	1,0	1,9
B _{своб.}	2,52	2,63	–	–
Si _{своб.}	0,03	0,02	0,01	0,02
SiO ₂	4,51	4,60	1,88	3,02
Al	0,04	0,03	0,1	0,04
Fe	0,04	0,04	0,01	0,02
Соотношение SiO ₂ : C в шихте, моль/моль (стехиометрическое "на карбид" 1 : 3)	1 : 3,01	1 : 2,98	1 : 2,69	1 : 3,17

Характеристики порошков карбида кремния, условия подготовки и режимы ТФС	Торговая марка, изготовитель			
	СибГИУ SiC (1)	СибГИУ SiC (2)	A-10 "Hermann Starck Co."	B-10 "Hermann Starck Co."
Удельная поверхность, м ² /кг	38000	37000	11000	15000
Размер* частиц, нм	67	66	700	600
Термообработка шихты T = 1073 К, P = 100 Па, τ = 1 ч	+	+	+	+
Пластифицирование шихты 5 %-ным раствором ПВС	+	+	+	+
Холодное прессование заготовок в стальной разборной прессформе P = 50 МПа	+	+	+	+
Относительная плотность до спекания	0,63	0,62	0,64	0,61
Твердофазное спекание в аргоне T = 2273 К, P = 0,1 МПа, τ = 2 ч	+	+	+	+
Относительная плотность спеченных образцов	0,95	0,96	0,86	0,87
^{20°С} σ ^{изг.} , МПа	340	380	310	320
Примечание: * Рассчитан по величине удельной поверхности.				

С целью импортозамещения безразмольного порошка карбида кремния печного синтеза фирмы "Hermann Starck Co." марок А-10 и В-10 проведено опробование и применение нанокарбида кремния в процессах твердофазного спекания заготовок для изготовления керамических уплотнительных колец серий 156.017 и 156.073 с наружным диаметром от 16 до 30 мм и высотой от 18 до 30 мм для насосов и погружных электродвигателей, перекачивающих нефть, нефтепродукты, сжиженные углеводородные газы. При этом подтверждены технологические преимущества нанокарбида кремния и получены следующие результаты (таблица 6). Использование нанокарбида кремния позволяет исключить при подготовке шихты введение в неё органических соединений и их карбонизацию для получения равномерно распределенного реакционно-способного углерода и восстановления пленки кремнезема на карбидных наночастицах, перемешивание на валках, что упрощает и удешевляет технологию и позволяет реализовать её по следующему промышленно приемлемому варианту: термообработка порошка в вакууме при 1073 К, введение пластификатора, смешивание и прессование при давлении 50 МПа, обжиг в течении 2-х часов в аргоне при давлении 0,1 МПа при температуре 2273 К. Соблюдение технологии обеспечивает относительную плотность после формования 0,62-0,63, после спекания 0,95-0,96 и стабильную усадку 26-29 %.

Применение нанокарбида кремния в технологии поверхностного упрочнения сталей электровзрывным легированием

В технологии поверхностного упрочнения сталей электровзрывным легированием в качестве порошковой добавки впервые опробован нанокарбид кремния SiC (1) (таблица 1), содержащий 99,21 % масс. β-SiC, с удельной поверхностью 38000 м²/кг. Исследовалось формирование композитных поверхностных слоев на образцах инструментальной стали Х12 при электровзрыве алюминиевой фольги с внесением в зону взрыва нанокарбида кремния по технологии, описанной в [10]. Выбор этой стали обусловлен тем, что она широко используется для изготовления инструментов, предназначенных для обработки материалов давлением (штампов, пуансонов и т.п.), в связи с чем для неё важна повышенная устойчивость против истирания. Это обстоятельство и предопределило повышенный интерес исследователей к нанокарбиду кремния. Определялись фазовый состав поверхностных слоев стали после обработки, а также их свойства – микротвердость, износо- и жаростойкость.

В качестве взрываемого проводника использовали алюминиевую фольгу массой 30 мг, на которую помещали навеску нанокарбида кремния массой 7,5 мг. Обработке подвергали образцы стали размерами 25 x 20 x 5 мм. Время воздействия на поверхность составляло 100 мкс, эффективное значение поглощаемой плотности мощности – 6,0 ГВт/м², динамическое давление, оказываемое струей на поверхность, достигало 14,2 МПа. При таком режиме воздействия глубина зоны легирования составляла около 20 мкм.

Электровзрывное легирование в высокоинтенсивном режиме плазменного воздействия на поверхность приводило наряду с оплавлением к насыщению поверхностных слоев стали продуктами взрыва алюминиевой фольги и наночастицами карбида кремния с последующей самозакалкой с образованием аустенитной структуры. Микротвердость поверхности образцов без обработки оказалась

равной 2513 ± 205 МПа, а после обработки возросла в среднем в 2,8 раза. Потеря массы образцов стали в состоянии поставки при испытаниях на износостойкость составила $27,4 \pm 7,3$ мг, а после электро-взрывной обработки – $3,3 \pm 2,5$ мг, т.е. износостойкость увеличилась в 8 раз. Испытания на жаростойкость показали, что значения массового показателя коррозии образцов в исходном состоянии составили 2,7; 5,2 и 10,6 г/(м²·ч) при температурах 800, 850 и 900 °С соответственно. После защитной обработки были получены значения 0,3; 1,5 и 5,3 г/(м²·ч). Увеличение жаростойкости при указанных температурах испытаний составило 9; 3,5 и 2 раза, что в среднем в 2 раза выше соответствующих показателей жаростойкости этой стали после двухкомпонентного электровзрывного легирования, например, бором и гадолинием.

Таким образом, зона легирования обладает высокой микротвердостью и устойчивостью против абразивного изнашивания и высокотемпературного окисления на воздухе.

Выводы

Подтверждена высокая эффективность применения нанокарбида кремния в технологии композиционного хромирования, конструкционной керамики, поверхностного модифицирования сталей электровзрывным легированием. Хром-карбидные покрытия имеют сопоставимые с хром-алмазными износостойкость, микротвердость, коррозионную стойкость, более высокий ресурс работы. Спеченные карбидокремниевые керамические заготовки характеризуются высокой плотностью и стабильной усадкой. Зона легирования, содержащая нанокарбид кремния, обладает высокой микротвердостью, стойкостью против абразивного износа, термоокислительной устойчивостью.

Библиографический список

1. Наноматериалы и нанотехнологии в производстве карбида кремния : монография : в 3 т. / В.В. Руднева; науч. ред. Г.В. Галевский. Дополнительный том : Плазмометаллургическое производство карбида кремния: развитие теории и совершенствование технологии. – М.: Флинта: Наука, 2008. – 387с.
2. Руднева, В.В. Термоокислительная устойчивость нанопорошков тугоплавких карбидов и боридов / В.В. Руднева, Г.В. Галевский // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2007. - № 4. – С. 20 – 24.
3. Галевский, Г.В. Особенности применения традиционных методов исследования физико-химических и технологических свойств тугоплавких карбидов и боридов для аттестации их высокодисперсного состояния / Г.В. Галевский, В.В. Руднева, С.Г. Галевский // Вестник ГМС РАЕН. Отделение металлургии : сб. науч. тр. – 2003. - № 12. – С. 78 – 86.
4. Ноздрин, И.В. Особенности свойств композиционного материала никель – нанодисперсный диборид хрома / И.В. Ноздрин, Г.В. Галевский, В.В. Руднева // Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. - № 2. – С. 46 – 48.
5. Ширяева, Л.С. Исследование композиционных электрохимических покрытий никель – нанокarbonитрид хрома / Л.С. Ширяева, И.В. Ноздрин, Г.В. Галевский, В.В. Руднева // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2014. – Т. XXII. - № 2. – С. 51 – 57.
6. Ширяева, Л.С. Производство и применение карбида титана (оценка, тенденции, прогнозы) / Л.С. Ширяева, А.К. Гарбузова, Г.В. Галевский // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2014. - № 2(195). – С. 100 – 108.
7. Пат. 2156838 РФ, МПК С25D15/00. Способ получения композиционных металлоалмазных покрытий / Е.В. Никитин, Л.А. Поляков, Н.А. Калугин. Комбинат "Электрохимприбор". - № 99108896/02; заявл. 21.04.99; опубл. 27.09.2000.
8. Пат. 2148109 РФ МПК С25D3/04. Способ получения термостойких хромовых покрытий / И.Г. Идрисов, В.В. Ковалев. БТИ АГТУ. - № 99102009/02; заявл. 01.02.99 : опубл. 27.04.2000.
9. Пат. № 2318083 РФ, МПК С25Д 15/00. Способ получения композиционных электрохимических покрытий на основе хрома / Г.В. Галевский, В.В. Руднева, О.А. Полях. - № 2006129821/02; заявл. 17.08.2006; опубл. 27.02.2008. – Бюл. 6. – 5 с.
10. Цвиркун, О.А. Упрочнение и защита поверхности стали Х12 электровзрывным легированием / О.А. Цвиркун, Е.А. Будовских, В.В. Руднева, В.Ф. Горюшкин, В.Е. Громов // Журнал функциональных материалов. – 2007. – Т. 1. - № 3. – С. 117-119.

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ТЕОРИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	4
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАВКИ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОСТАВНЫХ СОПЕЛ В КИСЛОРОДНЫХ ФУРМАХ БОЛЬШЕГРУЗНЫХ КОНВЕРТЕРОВ.....	4
Солоненко В.В., Протопопов Е.В., Фейлер С.В., Темлянцев М.В. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ: ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СТРОИТЕЛЬСТВО, ИНЖИНИРИНГ	8
Чжан Кэ НОВОКУЗНЕЦКИЙ АЛЮМИНИЕВЫЙ ЗАВОД НАКАНУНЕ 75-ЛЕТИЯ	11
Жирнаков В.С., Большаков Д.Г., Пинаев А.А., Казанцев М.Е. «КУЗНЕЦКИЕ ФЕРРОСПЛАВЫ» - 75 ЛЕТ ОТВЕЧАЯ НА ВЫЗОВЫ - В НОГУ СО ВРЕМЕНЕМ.....	18
Коренная К.А. ИННОВАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ВУЗА КАК РЕСУРС РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИКИ И СОЦИАЛЬНОЙ СФЕРЫ РЕГИОНА (ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТНОГО ОБУЧЕНИЯ В СИБГИУ)	21
Протопопов Е.В., Феоктистов А.В., Галевский Г.В., Гордеева О.В., Васильева М.Б. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ.....	27
Спирин Н.А., Павлов А.В., Полинов А.А., Онорин О.П., Лавров В.В. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МИРОВОГО И ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ АЛЮМИНИЯ.....	34
Галевский Г.В., Руднева В.В., Александров В.С. РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В СПЛАВАХ СИСТЕМЫ Al-Zr-Fe-Si.....	39
Достаева А.М., Смагулов Д.У., Немчинова Н.В. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОЛИЗА И КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ АЛЮМИНИЯ.....	44
Крюковский В.А., Сиразутдинов Г.А., Минцис М.Я., Поляков П.В. РАСЧЁТ ПРОЦЕССА ОБЖИГА РУДОУГОЛЬНЫХ ОКАТЫШЕЙ НА КОНВЕЙЕРНОЙ МАШИНЕ	49
Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г., Спирин Н.А., Лавров В.В. ТЕРМОДИНАМИКА РАСТВОРОВ КИСЛОРОДА В РАСПЛАВАХ СИСТЕМЫ Fe-Co, СОДЕРЖАЩИХ УГЛЕРОД	55
Дашевский В.Я., Александров А.А., Леонтьев Л.И. ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ОЛОВА, РАСТВОРЕННОГО В ЖИДКОМ НИКЕЛЕ, ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ЭКЗОГЕННЫМИ ТУГОПЛАВКИМИ НАНОФАЗАМИ ZrO ₂	60
Анучкин С.Н. ПРИМЕНЕНИЕ БОРА В ПРОЦЕССАХ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ	65
Кель И.Н., Жучков В.И. МОДЕРНИЗАЦИЯ КАТОДНОГО УЗЛА АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ С АНОДОМ СОДЕРБЕРГА ПРИ ВНЕДРЕНИИ АПГ	70
Минцис М.Я., Галевский Г.В. ВОССТАНОВИТЕЛЬНАЯ ПЕРЕРАБОТКА ТЕХНОГЕННОГО МИКРОКРЕМНЕЗЕМА С ПРИМЕНЕНИЕМ БУГОУГОЛЬНОГО ПОЛУКОКСА.....	73
Аникин А.Е., Галевский Г.В., Руднева В.В., Галевский С.Г. ВЛИЯНИЕ АЛЮМИНИЯ НА РАСТВОРИМОСТЬ КИСЛОРОДА В РАСПЛАВАХ Ni-Co и Ni-Co-Cr.....	80
Александров А.А., Дашевский В.Я. МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОИЗВОДСТВА ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА	85
Крушенко Г.Г., Назаров В.П., Платонов О.А., Решетникова С.Н. ВЫПЛАВКА ЧЕРНОВОЙ СУРЬМЫ В УСЛОВИЯХ МАЛОТОННАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	90
Галевский Г.В., Руднева В.В., Галевский С.Г. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАСЧЁТА ПРОЦЕССА ОБЖИГА МЕТАЛЛИЗОВАННЫХ ОКАТЫШЕЙ.....	93
Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г., Спирин Н.А., Лавров В.В. О РАСЧЕТЕ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТОПРОВОДОВ ИНДУКЦИОННЫХ ТИГЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ.....	98
Левшин Г.Е.	

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ РАСПЛАВОВ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШЛАКА.....	104
Журавлев А.А. ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ ПЕРЕРАБОТКИ МОЛИБДЕНОВЫХ РУД	107
Полях О.А., Журавлев А.Д. ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЛАВКИ НА СТЕПЕНЬ УДАЛЕНИЯ ФОСФОРА.....	111
Настюшкина А.В., Шевченко Е.А., Шевченко А.А. К ВОПРОСУ О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ СТАЛИ КОНВЕРТЕРНЫМ ВАНАДИЕВЫМ ШЛАКОМ	114
Рыбенко И.А., Голодова М.А., Нохрина О.И., Рожихина И.Д. ПОИСК ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИЙ РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ «ИККИЖЕЛОН» (РЕСПУБЛИКА ТАДЖИКИСТАН).....	118
Рахманов О.Б., Аксенов А.В., Немчинова Н.В., Солихов М.М., Черношвец Е.А. ВЕДЕНИЕ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАВКИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА.....	123
Ёлкин К.С., Ёлкин Д.К., Карлина А.И. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ В УСЛОВИЯХ ОБНОВЛЕНИЯ ЦЕННОСТЕЙ МОЛОДЕЖИ	127
Власов А.А., Бажин В.Ю., Копцев А.Е. ПРЯМОЕ ПОЛУЧЕНИЕ ЖЕЛЕЗА: СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ТЕНДЕНЦИИ.....	130
Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Ходосов И.Е.	
СЕКЦИЯ 2: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ: ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО, ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ, ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА.....	135
ИССЛЕДОВАНИЕ УГАРА РЕССОРНО-ПРУЖИННОЙ СТАЛИ МАРКИ 40С2 ПРИ НАГРЕВЕ ПОД ПРОКАТКУ И ОСОБЕННОСТЕЙ СТРОЕНИЯ, ХИМИЧЕСКОГО И ФАЗОВОГО СОСТАВА ЕЕ ОКАЛИНЫ	135
Темлянец М.В., Коноз К.С., Кузнецова О.В., Деев В.Б., Живаго Э.Я. ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ 100-М ДИФФЕРЕНЦИРОВАННО ЗАКАЛЕННЫХ РЕЛЬСОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ	140
Юрьев А.А., Громов В.Е., Морозов К.В., Иванов Ю.Ф., Коновалов С.В., Семин А.П. РАЗРАБОТКА ИННОВАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА АВТОЛИСТА ПОВЫШЕННОГО КАЧЕСТВА В УСЛОВИЯХ СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ 2500.....	144
Кондрашов С.А., Голубчик Э.М., Мартынова Т.Ю. МИКРОСТРУКТУРА И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ ХАРДОКС 450, МОДИФИЦИРОВАННОЙ НАПЛАВКОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ Fe-C-Cr-Nb-W И ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ	151
Громов В.Е., Кормышев В.Е., Глезер А.М., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Семин А.П. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ПОСЛЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ В СТЕСНЕННЫХ УСЛОВИЯХ	155
Нго Као Кыонг, С.А. Зайдес	155
ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ДЕФОРМИРОВАННОЙ ПРОВОЛОКИ	159
Сычков А.Б., Столяров А.Ю., Камалова Г.Я. Ефимова Ю.Ю., Егорова Л.Ю., Гулин А.Е. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИМ ТЕХНОЛОГИЯМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ	165
Деев В.Б., Приходько О.Г., Пономарева К.В., Куценко А.И., Сметанюк С.В. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО ПРЕССОВАНИЯ СПОСОБОМ “КОНФОРМ”	169
Фастыковский А.Р., Селиванова Е.В., Федоров А.А. ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ ПОРИСТЫХ СТРУКТУР	172
Куницина Н.Г., Ташметова М.О. ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕГАТИВНЫХ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАВЛЕНИЕМ ТОНКИХ ШИРОКИХ СТАЛЬНЫХ ПОЛОС	176
Кожевникова И.А., Кожевников А.В. АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПРОКАТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	180
Фастыковский А.Р.	

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС И АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ АНАЛИЗА ДЕФЕКТНОСТИ ОТЛИВОК.....	184
Князев С.В., Скопич Д.В., Фатьянова Е.А., Усольцев А.А., Чепрасов А.И. ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ В РАБОТЕ ПРОКАТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	190
Фастыковский А.Р. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ МАРКИ 30ХГСА НА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОМ ОБОРУДОВАНИИ	194
Иванов А.А., Осколкова Т.Н. ПЛАЗМЕННАЯ ЗАКАЛКА ЗАЭВТЕКТОИДНЫХ СТАЛЕЙ.....	199
Сафонов Е.Н. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛИТЬЯ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ.....	205
Князев С.В., Усольцев А.А., Куценко А.И., Куценко А.А., Пономарева К.В., Соколов Б.М., Ознобихина Н.В. АЛЬТЕРНАТИВНОЕ ВОЛОЧЕНИЕ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОЙ ПРОВОЛОКИ	208
Полякова М.А., Гулин А.Е. ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА РЕЛЬСОВОЙ ПРОДУКЦИИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ УНИВЕРСАЛЬНОГО РЕЛЬСОБАЛОЧНОГО СТАНА	213
Уманский А.А., Головатенко А.В., Дорофеев В.В. АВТОМАТИЗАЦИЯ УСТАНОВКИ МЕЖКЛЕТЬЕВОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА В ЛПЦ-1 АО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ».....	219
Ковальчук Т.В., Макаров Я.В., Лицин К.В. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗАЛИВКИ НА СТРУКТУРУ ОТЛИВОК ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ.....	222
Аринова С.К., Исагулов А.З., Квон Св.С., Куликов В.Ю., Щербакова Е.П., Достаева А.М.	
СЕКЦИЯ 3: ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ, ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ И ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ.....	228
ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА АГЛОМЕРИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ ТАНТАЛА (АГП) С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ.....	228
Кайназарова А.Э., Кокаева Г.А., Ревуцкий А.В. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОИЗВОДСТВА КАРБИДА ЦИРКОНИЯ	232
Алексеева Т.И., Галевский Г.В., Руднева В.В., Черепанов А.Н., Стафецкий Л., Галевский С.Г. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СПЛАВА БАББИТА Б83, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПРУТКОВ.....	235
Калашников И.Е., Болотова Л.К., Кобелева Л.И., Быков П.А., Колмаков А.Г., Михеев Р.С. СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ, СФОРМИРОВАННЫХ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ ГЕТЕРОФАЗНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ	239
Рашковец М.В., Никулина А.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПОСОБА ПОДГОТОВКИ ШИХТЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОШКОВ КАРБИДА ТИТАНА	245
Крутский Ю.Л., Ложкина Е.А. О МЕХАНИЗМЕ ОБРАЗОВАНИЯ ДИБОРИДА ТИТАНА В УСЛОВИЯХ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА.....	248
Галевский Г.В., Руднева В.В., Ефимова К.А. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ	254
Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Усольцев А.А., Крюков Р.Е., Патрушев А.О. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ В ГАЛЬВАНИКЕ, КЕРАМИКЕ, МОДИФИЦИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТИ.....	257
Руднева В.В., Галевский Г.В., Галевский С.Г., Черновский Г.Н. МНОГОФАКТОРНЫЙ РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА КОНТАКТНОЙ СВАРКИ РЕЛЬСОВ НА МАШИНЕ К1000	264
Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Патрушев А.О., Усольцев А.А. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СВАРОЧНЫХ ФЛЮСОВ.....	267
Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Усольцев А.А., Князев С.В., Чинин Н.А.	

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ШВА ПРИ СВАРКЕ С ВЫСОКОЙ СТЕПЕНЬЮ ФИЗИЧЕСКОЙ ОДНОРОДНОСТИ. Ч.1. ОСНОВОПОЛАГАЮЩИЕ ПРИНЦИПЫ	271	
Апасов А.М.		
МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ШВА ПРИ СВАРКЕ С ВЫСОКОЙ СТЕПЕНЬЮ ФИЗИЧЕСКОЙ ОДНОРОДНОСТИ. Ч.2. СИСТЕМА АКТИВНОГО ВОЗДЙСТВИЯ НА ЗАРОЖДАЮЩИЕСЯ ДЕФЕКТЫ.....	278	
Апасов А.М.		
РАЗРАБОТКА НОВЫХ СВАРОЧНЫХ ФЛЮСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОВШЕВОГО ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ШЛАКА И БАРИЙ - СТРОНЦИЕВОГО МОДИФИКАТОРА	288	
Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Михно А.Р., Уманский А.А.		
ПРИМЕНЕНИЕ КАРБИДА ЦИРКОНИЯ: ОЦЕНКА, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОМИНИРУЮЩИХ ТЕНДЕНЦИЙ И ПЕРСПЕКТИВ	293	
Алексеева Т.И., Галевский Г.В., Руднева В.В., Галевский С.Г.		
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАРИЙ-СТРОНЦИЕВОГО КАРБОНАТИТА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СВАРОЧНЫХ ФЛЮСОВ НА ОСНОВЕ ШЛАКА ПРОИЗВОДСТВА СИЛИКОМАРГАНЦА.....	296	
Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Бурнаков М.А., Михно А.Р., Федотов Е.Е.		
ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ И СОСТАВА ПРОДУКТОВ ПЛАЗМООБРАБОТКИ МИКРОПОРОШКА КАРБИДА КРЕМНИЯ.....	299	
Руднева В.В., Галевский Г.В., Черновский Г.Н.		
ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛА, НАПЛАВЛЕННОГО ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ СИСТЕМЫ Fe-C-Si-Mn-Cr-Mo-Ni-V-Co.....	305	
Гусев А.И., Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Попова М.В., Корнев Е.С.		
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОГО СИНТЕЗА КАРБИДА ЦИРКОНИЯ	311	
Алексеева Т.И., Галевский Г.В., Руднева В.В.		
ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ КОБАЛЬТА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ МЕТАЛЛА НАПЛАВЛЕННОГО ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ СИСТЕМЫ Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo-V	316	
Осетковский И.В., Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Попова М.В., Корнев Е.С.		
ИЗГОТОВЛЕНИЕ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ КАРБИДА БОРА ГОРЯЧИМ ПРЕССОВАНИЕМ.....	321	
Крутский Ю.Л., Непочатов Ю.К., Пель А.Н. Черкасова Н.Ю.		
О ВОЗМОЖНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ WO ₃ ПРИ ДУГОВОМ РАЗРЯДЕ.....	324	
Бояринцев С.Е., Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Наумчик А.Д., Усольцев А.А.		
ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ФЛЮСОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ НАПЛАВКЕ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ	327	
Уманский А.А. Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Соколов П.Д., Думова Л.В.		
ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ СВАРКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ	332	
Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Патрушев А.О., Усольцев А.А.		
ПОРОШКОВАЯ ПРОВОЛОКА НА ОСНОВЕ ПЫЛИ ГАЗООЧИСТКИ СИЛИКОМАРГАНЦА	336	
Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Федотов Е.Е., Непомнящих А.С.		
СЕКЦИЯ 4: ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ И АГРЕГАТАХ. РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ, ЭКОЛОГИЯ И УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ.....		340
РОЛЬ ТЕПЛОФИЗИКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ В МЕТАЛЛУРГИИ.....		340
Дружинин Г.М., Зайнуллин Л.А., Казяев М.Д., Лисиенко В.Г., Спириин Н.А., Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г.		
СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ДИАГНОСТИКЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ЛИТЕЙНО-ПРОКАТНЫХ АГРЕГАТОВ НА УЧАСТКЕ МНЛЗ – НАГРЕВАТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО	348	
Бирюков А.Б., Иванова А.А.		
ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ШАХТНЫХ ПЕЧЕЙ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ	352	
Матюхин В.И., Ярошенко Ю.Г., Матюхин О.В., Журавлев С.Я		
КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА АГЛОМЕРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ О МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ УХОДЯЩИХ ГАЗОВ	358	
Петрышев А.Ю., Колясников А.Ю., Лопатин А.С., Клейн В.И., Берсеньев И.С.		
ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ВЫПЛАВКИ СТАЛИ В ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ.....	362	
Рощупкина Е.Ю., Кожухова В.И., Кожухов А.А., Бондарчук А.А.		
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	364	
Михайличенко Т.А., Сюсюкин А.Ю., Гальчун А.Г.		

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРМИЧЕСКИ ПОДГОТОВЛЕННОЙ УГОЛЬНОЙ ШИХТЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ДОМЕННОГО КОКСА	369
Прошунин Ю.Е., Школлер М.Б. О РЕШЕНИИ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПО ТЕМПЕРАТУРНОМУ ПОЛЮ СТАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ, ИЗМЕРЕННОМУ В ТРЕХ ТОЧКАХ.....	373
Соколов А.К. СНИЖЕНИЕ УГАРА МЕТАЛЛА В МЕТОДИЧЕСКИХ ПЕЧАХ С МЕХАНИЗИРОВАННЫМ ПОДОМ НА ОСНОВЕ ПОВЫШЕНИЯ РАВНОМЕРНОСТИ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК	378
Кузнецова О.В., Коноз К.С., Темлянец М.В., Темлянец Н.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУР И ТОЛЩИН ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЗОН ПРОХОДНЫХ ПЕЧЕЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ	381
Соколов А.К. СЕЛЕКТИВНОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ИЗМЕЛЬЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ОТХОДОВ	386
Ахметвалиева З.М., Куленова Н.А., Такасаки Я., Мамяченков С.В., Анисимова О.С., Мудаширу Л.К, Фокина Е.Л. МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ЛОМ – ВАЖНЫЙ ВТОРИЧНЫЙ РЕСУРС УЛУЧШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И СБЕРЕЖЕНИЯ ПЕРВИЧНЫХ РЕСУРСОВ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ	392
Гордон Я.М., Спирин Н.А., Швыдкий В.С, Ярошенко Ю.Г. РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ПЕРЕРАБОТКИ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ШЛАКА С ЦЕЛЮ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ	396
Свиридова Т.В., Боброва О.Б., Ильина О.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛОКОКСА В КОКСОХИМИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ.....	400
Павлович Л.Б., Ермолова Н.Ю. Страхов В. М. МИКРОКРЕМНЕЗЕМ В ПРОИЗВОДСТВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ: РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРОБОВАНИЯ И ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРСПЕКТИВ	406
Руднева В.В., Галевский Г.В., Галевский С.Г. ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТЕСОДЕРЖАЮЩЕЙ ОКАЛИНЫ ПРОКАТНЫХ ПРОИЗВОДСТВ АО «СЕВЕРСТАЛЬ».....	413
Бульжёв Е.М., Кокорин В.Н., Еменев П.В., Григорьев В.Ф. ИЗМЕНЕНИЕ УСЛОВИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ СЛОЯ КУСКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ВЕРТИКАЛЬНОМ БУНКЕРЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ДУТЬЯ.....	416
Дудко В.А., Матюхин В.И., Матюхина А.В. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧАХ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В ВИДЕ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ И ИНЖЕКТОРОВ	420
Корнеев С.В., Трусова И.А. БАЛАНС ФТОРА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ АЛЮМИНИЯ В ЭЛЕКТРОЛИЗЕРАХ С АНОДОМ СОДЕРБЕРГА.....	425
Галевский Г.В., Минцис М.Я. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ И КОНСТРУКЦИИ КОЛЬЦЕВОЙ ПЕЧИ ОАО «ЧТПЗ» С ЦЕЛЮ УЛУЧШЕНИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЕЕ РАБОТЫ	427
Щукина Н.В., Черемискина Н.А., Лошкарев Н.Б., Лавров В.В. РЕКОНСТРУКЦИЯ АСПИРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ В ЦЕХЕ ТОПЛИВОПОДАЧИ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ТЭЦ г. НОВОКУЗНЕЦКА.....	432
Соловьев А.К., Полынцев М.П. К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ПЫЛЕВЫХ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ОБОЖЖЕННЫХ АНОДОВ В МЕТАЛЛУРГИИ КРЕМНИЯ.....	437
Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Рыбина М.Н. ИЗВЛЕЧЕНИЕ ФТОРА ИЗ УГОЛЬНОЙ ЧАСТИ ОТРАБОТАННОЙ ФУТЕРОВКИ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ ПРОИЗВОДСТВА АЛЮМИНИЯ.....	441
Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Сомов В.В., Бараускас А.Э., Яковлева А.А. ПРИМЕНЕНИЕ УЛОВЛЕННОЙ ПЫЛИ ОТ ОТКРЫТЫХ РУДОВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ИНДУСТРИИ	446
Полтойнин А.И., Шупик А.Ю. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ РАБОТОЙ ШАХТНОЙ ПЕЧИ.....	450
Фатхутдинов А.Р., Швыдкий В.С., Спирин Н.А.	

Научное издание

**МЕТАЛЛУРГИЯ:
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО**
«Металлургия – 2017»

Труды XX Международной научно-практической конференции

Часть 1

Под общей редакцией профессора Е.В. Протопопова

Технический редактор	В.Е. Хомичева
Компьютерная верстка	Н.В. Ознобихина

Подписано в печать 23.10.2017 г.

Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага офисная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 27,0 Уч.-изд. л. 29,4 Тираж 300 экз. Заказ № 521

Сибирский государственный индустриальный университет
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.
Издательский центр СибГИУ