




**А. Г. Радюк,
А. Е. Титлянов,
С. Д. Сайфуллаев**

ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ В МЕТАЛЛУРГИИ

«Инфра-Инженерия» 

А. Г. Радюк, А. Е. Титлянов, С. Д. Сайфуллаев

**ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ
ПОКРЫТИЙ В МЕТАЛЛУРГИИ**

Монография

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2021

УДК 669...8
ББК 34.3
Р15

Рецензенты:

доктор технических наук, заведующий лабораторией физикохимии и технологии покрытий, главный научный сотрудник Института металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН *Калита Василий Иванович*;
кандидат технических наук, доцент *Бурякин Алексей Владимирович*
(РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина)

Радюк, А. Г.

Р15 Применение газотермических покрытий в металлургии : монография / А. Г. Радюк, А. Е. Титлянов, С. Д. Сайфуллаев. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 236 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-0640-6

Представлен опыт авторов по применению газотермических покрытий в условиях ведущих металлургических комбинатов страны. Рассмотрено применение газотермических покрытий для повышения стойкости кристаллизаторов и качества разливаемого металла. Приведен метод электродуговой металлизации для снижения потерь металла при горячей прокатке и повышения качества листов. Изложен процесс получения поверхностных слоев с улучшенными свойствами на деталях металлургического оборудования с использованием газотермических покрытий.

Для инженерно-технического персонала металлургических предприятий. Может быть полезно студентам металлургических специальностей.

УДК 669...8
ББК 34.3

ISBN 978-5-9729-0640-6

© Радюк А. Г., Титлянов А. Е., Сайфуллаев С. Д., 2021

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	9
1. ГАЗОТЕРМИЧЕСКОЕ НАПЫЛЕНИЕ	11
1.1. Электродуговая металлизация и газопламенное напыление	11
1.2. Газопламенное напыление гибкими шнуровыми материалами	15
2. ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДИСКОВ ВАЛКОВОГО ГРОХОТА ДЛЯ СОРТИРОВКИ КОКСА НАНЕСЕНИЕМ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ	19
2.1. Технологический процесс сортировки кокса	19
2.1.1. Необходимость увеличения срока службы дисков и улучшения качества сортировки кокса.....	19
2.1.2. Причины изнашивания дисков.....	20
2.2. Исследование закономерностей изнашивания серийных дисков из стали 65Г	23
2.2.1. Работа 14-валковых грохотов в КХП ПАО «Северсталь».....	23
2.2.2. Закономерности изнашивания серийных дисков из стали 65Г.....	27
2.3. Промышленный эксперимент по испытанию дисков с различными покрытиями	30
2.3.1. Режимы обработки поверхности дисков различными способами.....	30
2.3.2. Испытание дисков повышенной износостойкости на грохотах «Гризли» в КХП ПАО «Северсталь»	30
2.4. Установление закономерностей изнашивания дисков с покрытием	37
2.4.1. Изменение интенсивности износа дисков по радиусу и толщине во времени	37
2.4.2. Расчет относительной износостойкости поверхности дисков	39
2.4.3. Эксплуатация дисков с напылением материала, содержащего карбид вольфрама.....	40
2.4.4. Инженерные формулы прогнозирования износа дисков и изменения размеров сортировочной ячейки	43
2.5. Технология создания износостойкого покрытия на поверхности дисков валкового грохота с использованием материала (Ni-Cr-B-Si-C) + 40 % WC	47
2.6. Выводы по главе	48

3. НАПЫЛЕНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ НА ВОЗДУШНЫЕ ФУРМЫ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ	50
3.1. Изучение структуры и элементного состава медно-алюминиевого диффузионного слоя.....	51
3.2. Исследование свойств медно-алюминиевого диффузионного слоя	52
3.3. Создание защитного слоя на воздушных фурмах с использованием алюминиевого покрытия для ДП-5 ПАО «Северсталь»	55
3.3.1. Напыление покрытия методом электродуговой металлизации на опытную партию фурм	55
3.3.2. Исследование влияния покрытия на стойкость воздушных фурм	58
3.3.3. Исследование тепловых потерь через поверхность воздушных фурм	60
3.3.4. Нанесение алюминиевого покрытия на наружную поверхность и со стороны дутьевого канала	62
3.4. Повышение стойкости и снижение тепловых потерь на воздушных фурмах ДП-4 ПАО «Северсталь»	65
3.5. Выводы по главе	65
4. НАПЫЛЕНИЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ НА ВОЗДУШНЫЕ ФУРМЫ	66
4.1. Исследование влияния оксида алюминия на состав и свойства медно-алюминиевого диффузионного слоя	66
4.1.1. Улучшение свойств медно-алюминиевого диффузионного слоя путем добавления к алюминию оксидов алюминия.....	66
4.1.2. Исследование влияния покрытия на стойкость воздушных фурм	67
4.1.3. Рентгеноструктурный фазовый анализ поверхностного слоя.....	68
4.1.4. Толщина диффузионного слоя	69
4.1.5. Теплопроводность и тепловое сопротивление	69
4.1.6. Износостойкость	70
4.1.7. Жаростойкость	71
4.2. Создание диффузионных слоев на меди в защитной среде	72
4.2.1. Микроструктура	72
4.2.2. Микронзондовое исследование	74
4.2.3. Микротвердость	76
4.3. Создание защитного слоя на воздушных фурмах и их испытание на ДП-6 ПАО «НЛМК»	77
4.4. Техническое решение по нанесению оксида алюминия на фурмы.....	79
4.5. Выводы по главе	80

5. НАПЫЛЕНИЕ НИКЕЛЬСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ВОЗДУШНЫЕ ФУРМЫ	81
5.1. Исследование диффузионных процессов в системе «Cu основа – газотермическое покрытие, содержащее Al, Ni, Cr»	81
5.1.1. Методика проведения исследований	81
5.1.2. Исследование структуры поверхности меди с газотермическими покрытиями	82
5.1.3. Влияние алюминия на диффузию никеля и хрома в медь при нанесении и термообработке газотермических покрытий	83
5.1.4. Оценка адгезии поверхностного слоя на меди	85
5.2. Металлографические исследования поверхностного слоя на меди после напыления никельсодержащих покрытий на Cu-Al диффузионный слой	86
5.3. Оценка влияния АД1/НП2 покрытий на время проплавления деталей из меди при попадании на них жидкого чугуна.....	88
5.4. Эксплуатация фурм с никельсодержащими покрытиями в доменном цехе ПАО «Северсталь».....	89
5.5. Эксплуатация фурм с никельсодержащими покрытиями в доменном цехе ПАО «НЛМК»	91
5.6. Выводы по главе	92

6. ВОССТАНОВЛЕНИЕ УЗКИХ СТенок ТОЛСТОСТЕННЫХ СЛЯБОВЫХ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ В ПАО «СЕВЕРСТАЛЬ»	93
6.1. Анализ состояния проблемы и выбор направления исследований.....	93
6.1.1. Методика проведения исследований	93
6.1.2. Методы повышения эксплуатационной стойкости кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок из стали.....	96
6.2. Применение газотермических покрытий для уменьшения зазоров между стенками толстостенных кристаллизаторов	97
6.2.1. Анализ причин появления зазоров между стенками кристаллизатора и способов их уменьшения	97
6.2.2. Технология уменьшения зазоров между стенками кристаллизатора	98
6.3. Ремонт рабочих поверхностей толстостенных кристаллизаторов путем нанесения покрытий методом электродуговой металлизации	104
6.3.1. Анализ влияния технологических факторов на образование износа рабочей поверхности и способов его уменьшения	104

6.3.2. Уменьшение износа рабочей поверхности узких стенок кристаллизатора в ПАО «Северсталь»	111
6.4. Выводы по главе	113

7. ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ И КАЧЕСТВА РАЗЛИВАЕМОГО МЕТАЛЛА В ПАО «НЛМК»	115
7.1. Требования к подготовке поверхности и напыляемым материалам.....	115
7.1.1. Совершенствование процесса подготовки поверхности под нанесение покрытия	115
7.1.2. Способы повышения износостойкости кристаллизаторов.....	118
7.2. Влияние технологических параметров разливки и сортамента на износ узких стенок кристаллизатора	119
7.3. Ремонт рабочей поверхности широких стенок кристаллизаторов	125
7.3.1. Особенности восстановления рабочей поверхности широких стенок кристаллизаторов	125
7.3.2. Анализ износа рабочей поверхности широких стенок кристаллизатора	125
7.3.3. Влияние толщины базовой стенки и ширины сляба на стойкость кристаллизатора в условиях ПАО «НЛМК»	127
7.4. Разработка технологии восстановления рабочей поверхности стенок кристаллизаторов	129
7.4.1. Эксперименты по нанесению покрытий на нижнюю часть рабочей поверхности стенок.....	129
7.4.2. Технология восстановления рабочей поверхности стенок без разборки кристаллизатора	132
7.4.3. Влияние покрытия на расход материала стенок при эксплуатации и ремонте кристаллизаторов	133
7.5. Повышение качества поверхности непрерывнолитых слябов путем нанесения покрытия на рабочую поверхность узких стенок кристаллизатора	134
7.5.1. Факторы, влияющие на развитие дефектов слитка	134
7.5.2. Расчет по математической модели тепловой работы кристаллизатора температурных полей в слябе с учетом нанесения покрытия на рабочую поверхность стенок	136
7.5.3. Оценка качества разливаемого металла через кристаллизатор с покрытием рабочей поверхности узких стенок	138
7.6. Применение электродуговой металлизации для нанесения покрытий на рабочую поверхность узких стенок кристаллизаторов	140
7.6.1. Создание диффузионного слоя на узких стенках кристаллизаторов с использованием алюминиевого покрытия.....	140

7.6.2. Создание износостойкого слоя на узких стенках кристаллизаторов с использованием алюминиевого и хромоникелевого покрытий.....	144
7.7. Выводы по главе	150

8. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ МЕТАЛЛА ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ И ПОВЫШЕНИЯ

КАЧЕСТВА ЛИСТОВ	152
8.1. Защита поверхности стали при нагреве под прокатку	153
8.1.1. Влияние легирующих элементов в стали на окалинообразование.....	153
8.1.2. Влияние легирующих элементов в стали на трещинообразование.....	156
8.1.3. Обоснование выбранного направления создания защитного покрытия на слябах	157
8.2. Нанесение алюминиевого газотермического покрытия на широкие грани слябов	159
8.3. Нанесение алюминиевого газотермического покрытия на кромки граней слябов.....	172
8.4. Методика расчета толщины алюминиевого газотермического покрытия на поверхности низколегированной стали	180
8.5. Выводы по главе	186

9. ПОЛУЧЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ С УЛУЧШЕННЫМИ СВОЙСТВАМИ НА ДЕТАЛЯХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ

ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ.....	187
9.1. Напыление газотермических покрытий на конвертерные фурмы	187
9.1.1. Повышение стойкости наконечников конвертерных фурм с помощью электродуговой металлизации	187
9.1.2. Напыление алюмосодержащих газопламенных покрытий на конвертерные фурмы	189
9.2. Повышение эффективности работы оборудования для непрерывной разливки стали с использованием электродуговой металлизации.....	190
9.2.1. Использование покрытий для снижения потерь аргона через стаканы-дозаторы	190
9.2.2. Повышение антифрикционных свойств плит шиберных затворов.....	192
9.3. Экранирование подката на рольгангах ШПС горячей прокатки.....	192

9.4. Повышение качества поверхности печных роликов напылением никельалюминиевого газопламенного покрытия.....	196
9.5. Выводы по главе	202
10. ПОЛУЧЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НА МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ.....	203
10.1. Применение алюминиевого покрытия для повышения жаростойкости стальных заготовок при нагреве под обработку давлением	203
10.2. Использование композиционных покрытий для повышения эффективности нагрева заготовок из титановых сплавов под обработку давлением	207
10.3. Получение электросварных труб с внутренним покрытием из листовой заготовки с покрытием	209
10.4. Получение стальной проволоки с алюминиевым покрытием	211
10.5. Выводы по главе	216
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	217
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	219