

АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛОРУССКОЙ ССР
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ МАШИН

На правах рукописи
Для служебного пользования
Экз. № _____

ДУДАН Александр Витальевич

УДК 621.791.93.002

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ТОНКОСЛОЙНОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО
ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

05.02.01 – Материаловедение в машиностроении

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
профессор

Н.Н. ДОРОЖКИН

М и н с к – 1 9 8 6

О Г Л А В Л Е Н И Е

	стр.
I. ВВЕДЕНИЕ	4
2. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ. .	8
2.1. Анализ условий эксплуатации деталей машин, подверженных интенсивному абразивному изна- шиванию и основные пути повышения их работо- способности	8
2.2. Анализ современных способов электрошлаковой наплавки износостойких покрытий	17
2.3. Материалы для нанесения износостойких покры- тий методом горизонтальной электрошлаковой наплавки	30
2.4. Цель и задачи исследования	42
3. СПОСОБ УПРОЧНЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МА- ТЕРИАЛЫ. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	44
3.1. Способ горизонтального электрошлакового уп- рочнения	44
3.2. Оборудование для горизонтального электро- шлакового упрочнения и применяемые матери- алы	52
3.3. Методика определения основных технологичес- ких параметров наплавки	58
3.4. Методика исследования температурного цикла горизонтального электрошлакового упрочнения	66
3.5. Методика определения физико-механических ха- рактеристик металла покрытия, металлографи- ческий, микрорентгеноспектральный и рентге- ноструктурный анализы	76

4. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ С ПОРОШКОВЫМ ПРИСАДОЧНЫМ МАТЕРИАЛОМ НА СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ	80
4.1. Теоретический расчет термического цикла упрочняемой детали	80
4.2. Определение оптимальных технологических параметров процесса горизонтального электрошлакового упрочнения	87
4.3. Влияние технологических режимов на структуру и физико-механические свойства покрытий	101
4.4. Влияние технологических параметров горизонтального электрошлакового упрочнения на формирование покрытий	126
Выводы по главе	132
5. ТЕХНОЛОГИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ	135
5.1. Упрочнение деталей бурового оборудования	135
5.2. Упрочнение рабочих элементов тяговых машин	145
5.3. Упрочнение ножей землеройно-транспортных машин	149
5.4. Механическая обработка покрытий	153
5.5. Экономическое обоснование эффективности применения горизонтального электрошлакового упрочнения	159
Выводы по главе	163
6. ВЫВОДЫ	165
Литература	167
Приложение	185

ВВЕДЕНИЕ

Апрельский (1985 г.) Пленум ЦК КПСС поставил задачу перед машиностроением "... быстро перейти на производство новых поколений машин и оборудования, которые способны обеспечить внедрение прогрессивной технологии, многократно повысить производительность труда, снизить материалоемкость..." /1/. Вопросам существенного снижения материалоемкости производства большое внимание уделялось и на XXVII съезде КПСС /2/.

Развитие современного машиностроения требует повышения эксплуатационных параметров работы машин, связанных с увеличением их мощности и производительности. Это вызывает уменьшение ресурса работы деталей за счет увеличения интенсивности протекания поверхностных процессов, таких как износ, коррозия и др. Проблема борьбы с изнашиванием приобретает все большее значение во всех технически развитых странах /3,4/. Например, потери только от износа рабочих поверхностей подвижных сочленений по СССР составляют 8,3 млрд. рублей в год /5/. Потери США от механического изнашивания равны 20...100 млрд. долларов ежегодно /6/.

Разработка и внедрение высокоэффективных методов повышения прочностных свойств, коррозионной стойкости и износостойкости машин и механизмов является важной задачей, поставленной перед техническими науками. Одним из эффективных путей решения указанной задачи является создание на деталях машин специальных покрытий на основе порошковых материалов. Их высокие физико-механические свойства обеспечивают продолжительный срок службы машин даже в том случае, если последние изготавливаются из обычных конструкционных сталей. Упрочнение деталей путем нанесения покрытий позволяет снизить расход легированных сталей при

одновременном повышении ресурса работы машин.

Вместе с тем увеличение производства новых конструкционных материалов, покрытий и изделий на основе металлических порошков, порошков-сплавов и тугоплавких соединений приводит к необходимости проведения исследований, направленных на повышение эффективности методов упрочнения и восстановления деталей машин, подверженных абразивному изнашиванию.

В настоящее время разработано большое количество методов восстановления и упрочнения быстроизнашивающихся деталей машин с использованием различных порошковых композиций. Значительное место среди этих работ занимают способы создания покрытий, при которых в качестве источника тепла используется разогретая шлаковая ванна, а порошковая присадка служит легирующим компонентом.

Широко известен большой вклад в этой области советских ученых Быстрова А.В., Быстрова В.А., Волошкевича Г.З., Дорожкина Н.Н., Дудко Д.А., Ивочкина И.И., Ксендзька Г.В., Кускова Ю.М., Лычко И.И., Меликова В.В., Патона Б.Е., Суцук-Слюсаренко И.И., Фрумина И.И., Шварцера А.Я., Шехтера С.Я.

Исследованиями этих авторов установлено, что при упрочнении деталей машин, особенно тонкостенных необходимо обеспечивать минимальное проплавление основного металла. В то же время для обеспечения максимальной производительности процесса нанесения покрытий нужно применять технологии, предусматривающие использование мощных источников тепла, каковым является шлаковая ванна. Поэтому необходима разработка технологических приемов, обеспечивающих снижение тепловложения в основной металл при сохранении на высоком уровне суммарной тепловой мощности процесса.

В диссертационной работе:

1. Дано обоснование возможности формирования тонкослойных покрытий при горизонтальной электрошлаковой наплавке неплавящимся электродом.

Использование порошкового присадочного материала и формирующей стальной ленты обеспечивает улучшение формообразования покрытия, повышает его физико-механические свойства.

2. Предложена теоретическая модель распределения температурных полей, которая послужила основой для создания методики расчета технологических режимов процесса, обеспечивающих минимальную глубину проплавления основного металла.

3. Проведен анализ структуры покрытий, полученных при использовании в качестве порошковых присадочных материалов феррохрома ФХ-800 и борида хрома CrB_2 .

4. Исследовано влияние технологических режимов процесса упрочнения на износостойкость покрытий. Проведенный регрессионный анализ результатов экспериментальных исследований позволил получить математическую модель влияния концентраций элементов на свойства покрытий.

5. Разработан ряд устройств и методов, обеспечивающих нанесение тонкослойных покрытий как на плоские, так и на цилиндрические поверхности.

6. Исследованы особенности механической обработки покрытий.

7. Созданы технологические процессы нанесения износостойких покрытий на замки бурильных труб ЗУК-155, на лопатки дымососов Дх2 и мельничных вентиляторов ВВСМ-у, на ножи самоходных скреперов.

Результаты работы могут быть использованы в таких областях машиностроения, как химическая, энергетическая, в промышленности по производству сельскохозяйственных машин, а также при ре-

монте тяжелонагруженных деталей машин, подверженных различным видам как допустимого, так и недопустимого изнашивания.

Применение горизонтальной электрошлаковой наплавки по слою порошкового присадочного материала с использованием стальной ленты при упрочнении рабочих поверхностей зубьев ковшей экскаваторов, бил молотковых дробилок, ножей землеройно-транспортных машин, наряду с улучшением физико-механических и эксплуатационных свойств покрытий, позволит увеличить срок службы этих деталей в 1,5...2,5 раза и более.

Данная работа проводилась в соответствии с республиканской научно-технической программой 72.01р (задание 01, № гос. регистрации 0182.1.0441224) "Создать и освоить технологические процессы и специализированное оборудование для нанесения покрытий методами электродуговой металлизации, электроконтактного и индукционного припекания на детали машин и технологического оборудования с целью увеличения их долговечности в 1,5...2 раза" в Институте проблем надежности и долговечности машин АН БССР на протяжении 1981-1985 г.г.

2. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Анализ условий эксплуатации деталей машин, подверженных интенсивному абразивному изнашиванию и основные пути повышения их работоспособности

Функциональные нарушения работы сельскохозяйственных, горных, дорожно-строительных машин обуславливаются, в основном, износом деталей, лимитирующих длительность их нормальной эксплуатации. Особое значение при этом придается абразивному изнашиванию рабочих органов этих машин, приводящему к преждевременному выходу из строя агрегатов и требующему замены изношенной детали. В этой связи важно изучение и знание процессов изнашивания деталей, определение рациональных путей повышения сроков их службы.

Характер изменения размеров и геометрических параметров рабочих органов таких машин в значительной мере зависит от рода трения, условий механического нагружения, наличия и свойств абразивной среды, свойств материала детали и т.д. Подход к его изучению должен быть комплексным, базирующимся на путях обеспечения надежности и повышения срока службы узлов и деталей машин, связанный с выходом на практические меры повышения износостойкости.

Условия работы различных деталей и инструментов землеройных, дорожно-строительных и др. машин различны. Одни подвергаются чисто абразивному воздействию твердых частиц, другие - одновременно воздействию абразивной среды и ударов, третьи - в основном, действию ударов, хотя воздействие абразивной среды также имеет место. Причем, в каждой из этих групп степень активности абразивного воздействия и ударов может быть различной.

Современная строительно-дорожная и горно-рудная техника работает в различных условиях эксплуатации, а также в широком диапазоне изнашивающих сред, вплоть до агрессивных буровых растворов и суспензий. Поэтому решение задачи повышения долговечности деталей их рабочих элементов должно базироваться на разработанных количественных методах оценки условий работы машин.

Важным элементом горнодобывающей техники является буровое оборудование, наиболее ответственное звено которого — буровая колонна.

Условия работы колонны буровых труб определяются способом бурения скважин, а также способом разрушения горной породы /7/. Эта колонна является сложной механической системой, работающей как в устойчивом режиме, характеризующемся практически постоянным уровнем мощности, затрачиваемой на вращение, так и в сложном динамическом режиме, при котором отмечаются большие затраты мощности при той же скорости вращения и непостоянство во времени величины этой мощности, что связано с возникновением колебаний.

Колонна буровых труб, находящаяся под действием осевых и поперечных сил, представляет собой многоопорный криволинейный вал, обладающий свойствами гибкого длинного стержня, а на отдельных участках свойствами жесткого твердого тела. Для реальных скважин при малой скорости вращения на отдельных участках фиксируется вращение колонны буровых труб вокруг собственной оси, вокруг скважины или относительно некоторой оси, смещенной относительно обеих этих осей. При действии значительных сил сопротивления, а также при увеличении скорости вращения характер движения колонны буровых труб усложняется. Действие зна-

чительных сил сопротивления, представленных главным образом силами трения колонны о стенки скважины, приводит к сложному движению отдельных ее участков, которые могут вращаться с переменной угловой скоростью, изгибаться с переменной величиной амплитуды прогиба и с той или иной частотой. Переход от простейших форм движения колонны бурильных труб к более сложным также связан и с жесткостью указанной системы, потерей ею состояния устойчивого равновесия, изменениями упругих деформаций колонны. В процессе движения колонны бурильных труб участвует также и перемещающийся по ней поток бурового раствора. Этот поток перемещается по колонне с переменной скоростью, частота изменения которой обусловлена рабочей характеристикой насоса, а масса и собственная энергия движущейся жидкости зависят от количества и плотности раствора.

Таким образом, при вращении колонны бурильных труб ее начальное устойчивое статическое состояние может изменяться. При этом вращающаяся колонна принимает новую, динамическую форму движения при наличии источника энергии, требуемой для поддержания этой формы движения. При сложном динамическом характере движения усложняются простейшие формы движения, в основном, за счет действия сил трения, сопровождающегося колебаниями угловой скорости вращения колонны бурильных труб. Изменение угловой скорости вращения, в свою очередь, может вызвать потерю устойчивого динамического равновесия участков колонны, сопровождающегося поперечными колебаниями. Такие колебания приводят к изменению осевых сил, передаваемых системой, изменению сил трения и величины износа элементов колонны /7,8,9/.

В процессе работы колонна бурильных труб испытывает действие напряжения растяжения, сжатия, кручения и изгиба, характер

которых во многом влияет на величину износа /10,11/.

Важнейшим показателем надежности работы бурильной колонны являются постепенные отказы бурильных замков вследствие интенсивного изнашивания боковой поверхности. Статистические данные показывают, что отказы, вызванные износом бурильных замков, составляют 40% от общего числа /12/.

Основными факторами, определяющими вид изнашивания боковой поверхности замков бурильных труб, является среда, в которой они работают, динамика и кинематика относительного перемещения трущихся тел, характер контакта и свойства материала изнашиваемой детали.

Сложность процесса изнашивания замков обусловлена непрерывно меняющимися силами на поверхности трения, неоднородностью абразивной среды как по минералогическому, так и по химическому составу, сложностью динамики процессов контактирования и перемещения колонны в скважине.

Аналогичные условия работы рабочих органов почвообрабатывающих, строительных и дорожных машин. Перемещаясь в слое грунта, ножи скреперов, лемехи плугов, клыки ковшей экскаваторов, шины гусениц тракторов и другие подобные детали находятся под постоянным воздействием абразивных частиц. Величина этих частиц грунта колеблется в довольно широких пределах и достигает в некоторых песчаных грунтах величины сечения частицы в среднем до 0,5...0,6 мм, при этом абразивные частицы, как правило, имеют округленную форму без острых режущих граней /13, 14/.

Характер абразивного изнашивания во многом определяется соотношением совместного действия нормальных и тангенциальных сил абразивных зерен с пределом прочности материала трущейся

поверхности детали. Износостойкость металлов в большой степени зависит от структуры, в частности, от совокупности свойств отдельных микрообъемов, характеризующихся разными структурными составляющими. Большое влияние при этом оказывают преобладающий вид этих составляющих, их количество, морфология, взаимное расположение /7,15,16/.

Первоначально /15,16,17/ в зонах фактического контакта абразивных частиц с поверхностями трения деталей возникает концентрация напряжений и происходит пластическая деформация поверхностного слоя. Толщина деформированного слоя зависит от твердости структурных элементов составляющих и нагрузки на абразив и составляет 1...5 мкм. При многократном деформировании металла абразивом происходит его наклеп до предельного состояния, характеризуемого критической плотностью дислокаций, которая приводит к разупрочнению поверхностного слоя и образованию субмикроскопических трещин, развитие которых приводит к формированию частицы износа. При этом сильно деформированный слой, имея повышенную активность, вступает во взаимодействие с агрессивными компонентами среды, что приводит к образованию пленок окислов. В случае, когда растягивающие напряжения превышают действительное сопротивление разрыву перенаклепанного слоя металла, происходит его разрушение в виде скалывания и отделения микростружки вместе с окисными пленками. Возможно также и одновременное протекание этих процессов /18/.

Анализ характера изнашивания бурильных замков (рис. 2.1) в промышленных условиях показал, что износ распределен неравномерно /19/. Характерно, что он как у шпелей, так и у муфт замка увеличивается от упорного торца к торцу трубной резьбы, где наблюдается округление, что ухудшает условия захвата тру-

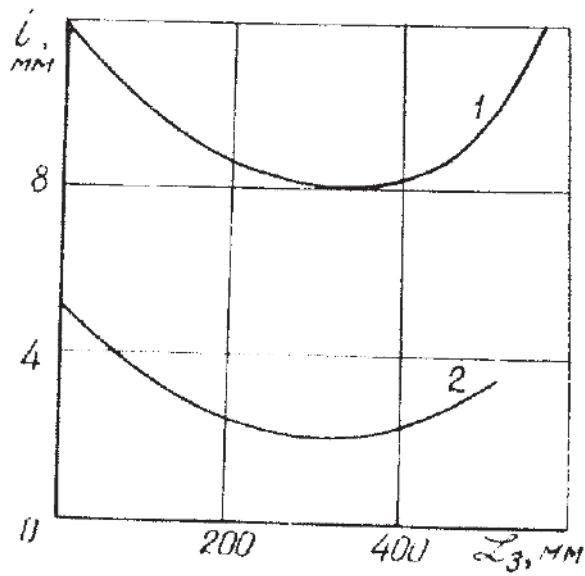


Рис. 2.1. Зависимость износа i наружной поверхности бурового замка от его длины L_3 /19/ :
 1 - замок ЗШ-178; 2 - замок ЗУК-155

бы элеватором при спуско-подъемных операциях.

Износ бурильных замков более 5...6 мм приводит к необходимости их немедленной замены, так как в противном случае может произойти обрыв бурильной колонны, поломка инструмента, создающие аварийную ситуацию при бурении. Именно поэтому борьба с преждевременным изнашиванием бурильных замков, повышение их износостойкости является актуальной задачей при проведении бурильных работ.

Для повышения износостойкости боковых поверхностей бурильных замков, а также рабочих элементов почвообрабатывающих, строительных и дорожных машин применяются различные методы:

- механическая защита посредством установки и крепления протекторов /20/;
- химико-термическая обработка /7,10/;
- упрочняющая обработка: закалка нагревом ТВЧ, поверхностно-пластическое деформирование и т.д. /7,21/;
- нанесение износостойких покрытий /19,22,23/.

Одним из наиболее простых является установка протекторов на бурильные замки, применяемая, в основном, за рубежом. Она не нашла широкого распространения вследствие низкой надежности их крепления к замкам.

Применение методов термической и химико-термической обработок обычно не позволяет кординально решить данную проблему вследствие необходимости применения специальных сталей, а также ограниченных возможностей упрочнения поверхностного слоя по глубине и значительной трудоемкости процессов.

Более перспективным, на наш взгляд, является нанесение на рабочие поверхности деталей металлических покрытий, обладающих необходимым комплексом свойств: износостойкостью, термо-

стойкостью, коррозионной стойкостью и т.п. При этом, как правило, условия эксплуатации деталей требуют использования способов, обеспечивающих нанесение тонкослойных покрытий (1...5мм). В современном машиностроении используются различные виды и методы нанесения таких покрытий /24/, отличающихся друг от друга источниками нагрева, способом ввода легирующей присадки в покрытие, ее видом, типом защиты зоны жидкого металла, степенью механизации процесса.

В качестве источника нагрева могут применяться пламя газовой горелки, световой луч, плазменная струя, токи высокой частоты, электрическая дуга и др. /25,26,27/. При упрочнении описанных выше деталей широко применяются способы электродуговой наплавки: открытой дугой, под слоем флюса, в защитной атмосфере /22,23/.

Наряду с преимуществами, эти методы обладают рядом недостатков:

- повышенным тепловложением в основной и наплавляемый металл;
- выгоранием, растворением и расплавлением легирующих компонентов присадки;
- возникновением в основном и наплавленном металлах больших остаточных напряжений;
- увеличенной глубиной проплавления основного металла, приводящей к снижению стойкости наплавляемого металла в условиях абразивного изнашивания;
- нестабильностью толщины наносимого слоя, достигающего 2...3 мм, что приводит к неравномерному износу.

Существует также способ плазменной наплавки бурильных замков с предварительным подогревом присадочного материала /19/.

Как и предыдущий, метод характеризуется увеличенным тепловложением в основной и присадочный металлы, вызывающим большие остаточные напряжения в замке, выгоранием и растворением легирующих компонентов. Кроме того, данная технология не обеспечивает высокую производительность, связана с большими материальными затратами, что ограничивает ее применение при упрочнении больших площадей.

Одним из перспективных методов нанесения износостойких покрытий на крупногабаритные детали является электрошлаковая наплавка /28,29/. Она обеспечивает рафинирование наплавленного металла, уменьшает угар легирующих элементов, позволяет наплавлять большие площади за один проход. Кроме того, покрытия, наносимые этим способом, за счет формирования их наружной поверхности специальным кристаллизатором, как правило, не требуют последующей механической обработки, особенно в тех случаях, когда упрочняемая деталь является рабочим органом дорожно-строительных, землеройных, почвообрабатывающих и др. типов машин.

В отдельных случаях предъявляются повышенные требования к геометрии и шероховатости наружной поверхности покрытий, что приводит к их последующей механической обработке. Однако вопросы обработки износостойких покрытий, полученных электрошлаковой наплавкой, критерии выбора технологических режимов упрочнения, обеспечивающих минимальные припуски на обработку, изучены еще недостаточно.

2.2. Анализ современных способов электрошлаковой наплавки износостойких покрытий

Упрочнение поверхностей деталей электрошлаковой наплавкой является перспективным и в ряде случаев эффективным методом /29, 30, 31/. Она обладает рядом преимуществ: высокой производительностью процесса, возможностью регулирования глубины проплавления основного металла в широких пределах, особыми условиями кристаллизации наплавленного металла /31, 32/. При установившемся электрошлаковом процессе отсутствует разбрызгивание, шлак надежно защищает жидкую металлическую ванну от окисления. Расход флюса на образование шлаковой корки на поверхности наплавленного металла составляет не более 5% его массы.

По сравнению с дуговым процессом, расход электроэнергии (рис. 2.2) в 1,5...2 раза, а флюса в 20 раз меньше /26, 33, 34/.

Особенности термического цикла электрошлаковой наплавки обеспечивают практически полное удаление из расплавленного металла растворенных в нем газов, а также неметаллических включений /29/. Вследствие создания условий направленной кристаллизации наплавленного металла значительно снижается его склонность к образованию кристаллизационных трещин. Этому также способствуют более низкие скорости нагрева и охлаждения околошовной зоны, кристаллизации ванны жидкого металла.

С помощью электрошлаковой наплавки можно наносить как толстые слои практически неограниченных размеров с принудительным формированием, так и тонкие толщиной до 3...5 мм при свободном формировании наплавленного металла /29, 30, 31, 35/. Процесс используется для наплавки на плоские, цилиндрические, конические наружные и внутренние поверхности, а также на детали, имеющие сложный пространственный контур.

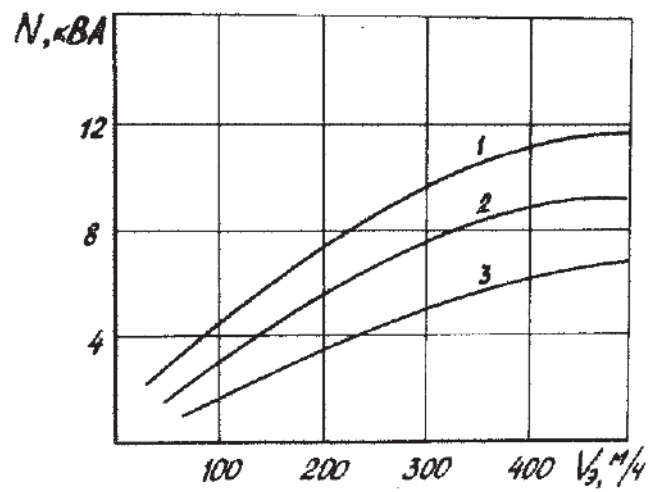


Рис. 2.2. Зависимость мощности процесса от скорости подачи электродной проволоки /34/ :
1 - под флюсом; 2 - в углекислом газе;
3 - электрошлаковый (диаметр электродной проволоки - 1,6 мм)

Электрошлаковый процесс может устойчиво протекать как на переменном, так и на постоянном токе прямой или обратной полярности /30,36/. В связи с тем, что тепловая инерция шлаковой ванны велика, низкочастотные (от нескольких Гц и более) изменения напряжения и даже кратковременные (до 5...10 с) отключения сварочного тока практически не ухудшают устойчивости электрошлакового процесса /29,31/. С этой точки зрения требования к источникам питания для электрошлакового процесса менее жестки, чем при дуговом процессе /37/. Более стабильный процесс можно получить, используя специализированные источники питания с низким напряжением холостого хода до 20...40 В и жесткой или пологопадающей внешней характеристикой /38,39,40/.

В настоящее время существуют различные способы электрошлаковой наплавки, основные из которых представлены на рис. 2.3 /29,41,42,43/.

Электрошлаковая наплавка обычно осуществляется на поверхностях деталей, расположенных вертикально (рис. 2.4). Процесс ведется, в основном, снизу вверх, так как удельный вес шлака обычно меньше удельного веса металла. Существуют также способы вертикальной наплавки, при которых процесс ведут сверху вниз /44,45/. В этом случае удельный вес шлака превышает удельный вес наплавляемого металла, и подача электродного металла осуществляется снизу.

Вертикальную наплавку выполняют электродной проволокой, плавящимся мундштуком и электродами большого сечения. Она позволяет, в основном, наносить слои толщиной 20 мм и более /29,33,33/. Существуют также специальные способы, с помощью которых можно получить покрытие с минимальной толщиной 8...12 мм /35,37,46/.

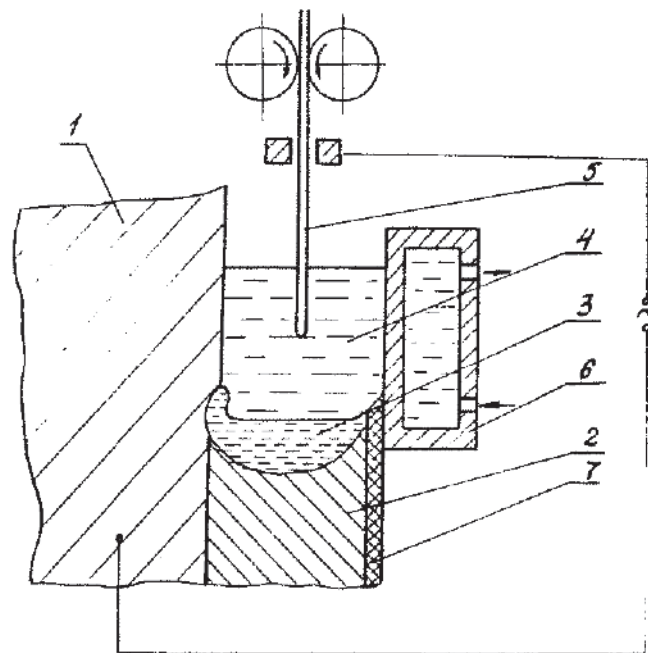


Рис. 2.4. Схема процесса вертикальной электрошлаковой наплавки /29/:

1 - наплавляемая деталь; 2 - покрытие;
 3 - ванна жидкого металла; 4 - шлаковая ванна;
 5 - электрод; 6 - водоохлаждаемый кристаллизатор;
 7 - шлаковая корочка

Как правило, такие методы наплавки используются очень редко из-за технологических трудностей, связанных с контролем уровня металлической ванны и ввода электродов в зазор между кристаллизатором и деталью без нарушения стабильности электрошлакового процесса /47,48/.

Особый интерес представляет горизонтальная электрошлаковая наплавка. Она позволяет наплавлять тонкие покрытия с толщинами 3...10 мм, а также получать минимальное перемешивание основного и наплавленного металлов.

Свободное формирование наплавленного металла обеспечивается четырьмя схемами с использованием проволочного, пластинчатого, наклонного пластинчатого и конического плавящихся электродов (рис. 2.5, 2.6) /49,50/. Для осуществления первой схемы, кроме движения подачи, нужны также продольное и поперечное перемещения электрода (рис. 2.5). Поперечные колебания электрода должны осуществляться по кривой линии, соответствующей очертанию свободно растекающегося края слоя наплавленного металла. При использовании электрошлаковой наплавки пластинчатым электродом можно обойтись без поперечных движений. С целью совмещения зоны падения капель электродного металла с краем слоя при наплавке пластинчатым электродом авторы рекомендуют от плоского электрода перейти к цилиндрическому, изогнутому по форме края наплавленного слоя. При наплавке пластинчатым наклонным электродом последний устанавливается под углом α к наплавленной поверхности. Наклон исключает еще одно движение - вдоль изделия. Конический электрод (рис. 2.6) позволяет производить наплавку площадей различного очертания при одном лишь вертикальном движении электрода.

Вышеприведенные схемы основаны на свободном распределении

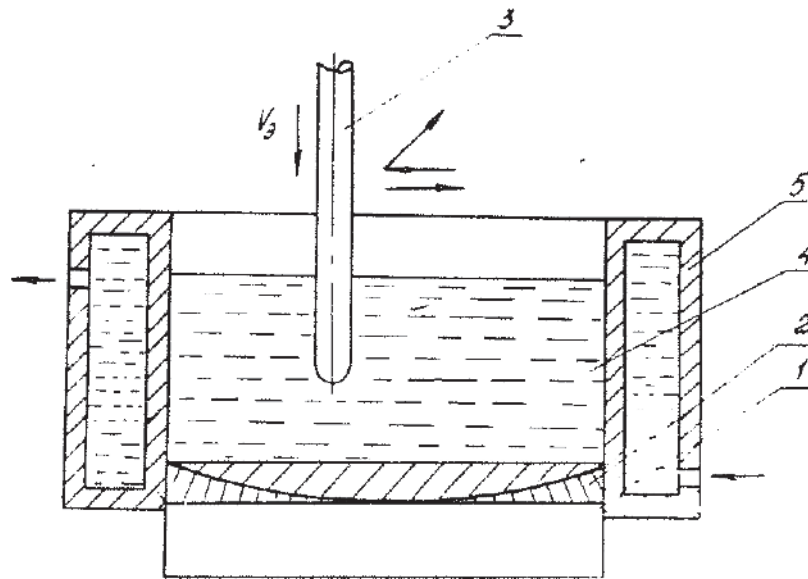


Рис.2.5. Схема горизонтальной электрошлаковой наплавки проволочным электродом при свободном формировании покрытия /49/:

1 - наплавляемая деталь; 2 - покрытие;
3 - плавящийся электрод; 4 - шлаковая ванна;
5 - водоохлаждаемый кристаллизатор

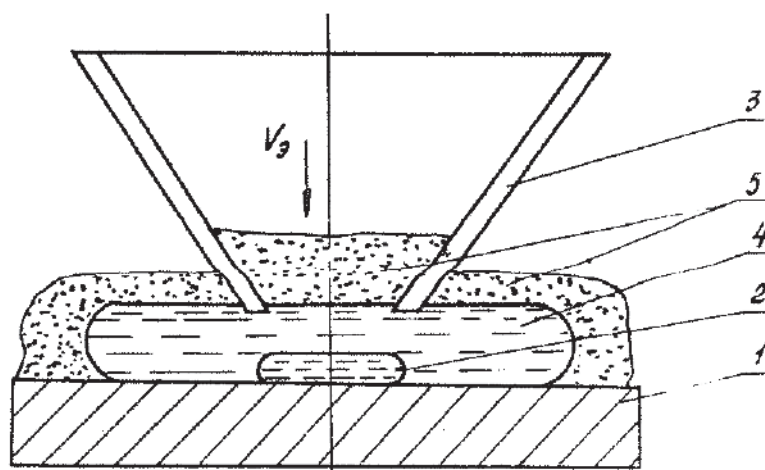


Рис.2.6. Схема горизонтальной электрошлаковой наплавки коническим электродом при свободном формировании покрытия /49/ :

1 - наплавляемая деталь; 2 - ванна жидкого металла (покрытие); 3 - плавящийся электрод;
4 - шлаковая ванна; 5 - флюс

наплавляемого металла по поверхности изделия, причем минимальная толщина наплавленного слоя, окруженного жидким шлаком, определяется условиями межфазного равновесия шлак - металл и условиями смачивания основного металла наплавленным. Так, например, для случая наплавки стали 65Г на Ст.3 под флюсом АН-8 толщина слоя составляет 8,8 мм, и ее заметно изменить, регулируя режим наплавки, не удастся /49/.

Основным недостатком горизонтальной электрошлаковой наплавки со свободным формированием наплавляемого металла являются дефекты несплавления, вызываемые опережением растекания. Чтобы их избежать, необходимо строгое соответствие между скоростью подачи плавящегося электрода и скоростью наплавки, при котором бы обеспечивалось образование слоя с расчетной высотой H , определяемой условиями межфазного равновесия. Кроме того, при использовании последней схемы необходима постоянная корректировка силы тока в процессе наплавки, так как с плавлением электрода площадь поперечного сечения его постоянно увеличивается. При применении конического электрода возможно также коробление наплавляемой детали.

Описанные методы электрошлаковой наплавки, при которых легирование наплавленного металла осуществляется через плавящийся электрод (проволоку, ленту, пруток), характеризуются узким диапазоном легирования материала покрытия из-за ограниченной номенклатуры выпускаемой промышленностью этих наплавочных материалов. Поэтому предпочтительнее для легирования материала покрытия использовать порошковые композиции, которые обеспечивают изменение химического состава покрытий в самом широком диапазоне.

В последнее время при получении износостойких покрытий

электрошлаковым методом широко применяются порошок /51, 52, 53, 54/, зернистый материал (литая и молотая дробь) /54, 55, 56/, дробленые пластины металлокерамических сплавов /57/, крупка /58/, стружка и др.

Использование порошковых присадок при различных способах электрошлаковой наплавки возможно с применением плавящегося, неплавящегося или секционно неплавящегося электрода.

Одним из наиболее простых методов подачи порошкового присадочного материала в шлаковую ванну является подача его через порошковую проволоку /59/. Натурные испытания, проведенные на ПЗ-15, при наплавке инструмента из стали 40X по данной технологии показали примерно одинаковую стойкость с инструментом, выполненным из стали 40X2B5ФМ. Химический состав наплавленного металла в мас. %: С - 0,62; С₂ - 2,73; W - 9,49; Mn - 0,94; Si - 0,19; V - 0,39; S - 0,004...0,005; P - 0,012...0,015.

Введение порошкового присадочного материала в зону наплавки может также осуществляться пластинчатым (проволочным) электродом, на поверхность которого с помощью специального связующего наносится слой легирующей шихты /60/. В частности, метод используется при получении износостойких покрытий из $W_2B_5 + WC$, которые совместно с флюсом, поверхностно активным веществом, смачивающим материалом с минимальным краевым углом смачивания (карбонат кальция) и жидким стеклом предварительно наносятся со всех сторон на электрод. Наплавленный металл при этом обладает высокими физико-механическими свойствами.

Широко распространенным методом подачи порошкового присадочного материала в шлаковую ванну является засыпка его при помощи специальных дозирующих устройств /61/. Например, наплавку звездочек дробилок агломерата производят проволочными

электродами, материал которых образует матрицу композиционного сплава, а зерна твердой фазы подают в шлаковую ванну дозатором /62/. При упрочнении малого конуса доменной печи, кроме того, установлено, что кристаллизатор целесообразнее размещать не в зените вращающейся детали, а сбоку, на уровне горизонтального сечения наплавляемого изделия /63/. Режим наплавки четырьмя электродными проволоками диаметром 4 мм: I – 1500 А; U – 35 В; количество подаваемого порошка карбидов – 350 г/мин. Равномерное распределение зерен карбидов по всей площади наплавленного слоя осуществляется специальным шнековым питателем /64/.

Авторы работ /53,58,65/ предлагают повысить скорость процесса в 2...2,5 раза и существенно улучшить структуру и механические свойства наплавленного металла, а также упростить дозировку порошкового материала, обладающего ферромагнитными свойствами, путем подачи присадки на вылет электрода за пределами шлаковой ванны (рис. 2.7). В качестве некомпактного материала используется кружка из проволоки ϕ 0,8...1,6 мм, которая подается из специального дозирующего устройства на вылет проволочного электрода диаметром 5 мм, где она концентрируется в результате действия магнитного поля сварочного тока и совместно с электродом поступает в шлаковую ванну. Процесс может осуществляться на повышенном токе, по сравнению с обычной электрошлаковой наплавкой, без нарушений формирования слоя и образования горячих трещин.

Высокая производительность процесса достигается при электрошлаковой наплавке лежащим пластинчатым электродом (рис. 2.8), в которой под слоем флюса, равномерно насыпанного небольшим слоем (\sim 5 мм) на наплавляемую поверхность, укладывают пластинчатый электрод так, чтобы его обмазанная сторона или слой по-

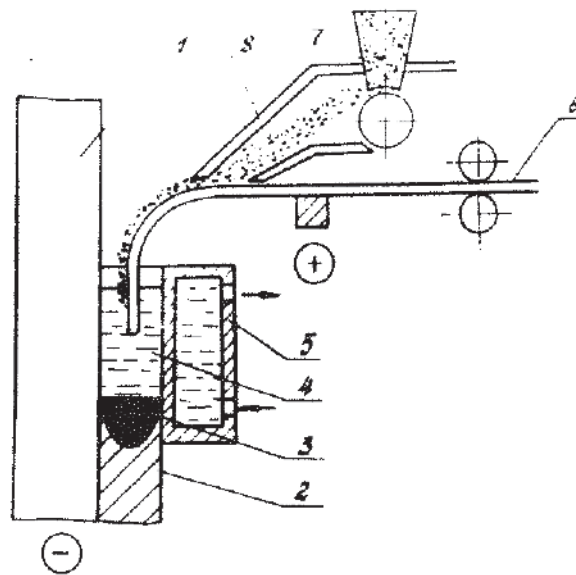


Рис.2.7. Схема электрошлаковой наплавки ферромагнитными порошковыми материалами /58/ :

1 - наплавляемая деталь; 2 - покрытие;
 3 - металлическая ванна; 4 - шлаковая ванна;
 5 - водоохлаждаемый кристаллизатор; 6 - электродная проволока; 7 - дозирующее устройство; 8 - лоток

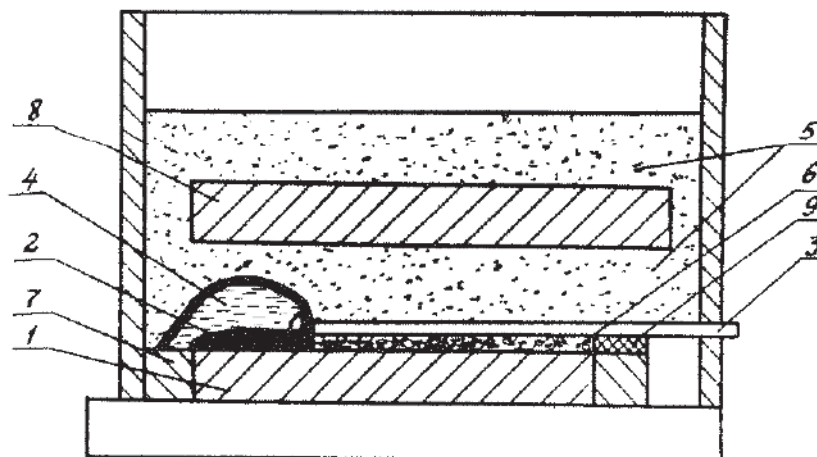


Рис.2.8. Схема горизонтальной электрошлаковой наплавки лежачим электродом /66/ :

1 - наплавляемая деталь; 2 - ванна жидкого металла (покрытие); 3 - плавящийся пластинчатый электрод; 4 - шлаковая ванна; 5 - флюс;
 6 - шихта; 7 - медный брусок; 8 - медная пластина; 9 - изолятор

рошкообразной легирующей шихты был снизу /66,67,68/. Затем его закрепляют в электродержателе, засыпают сверху слоем флюса толщиной 10...15 мм и прижимают медной плитой. При возбуждении электрической дуги между наплавляемой деталью и электродом последний начинает плавиться, образуя в зоне наплавки шлаковую ванну. После наведения необходимого объема шлаковой ванны (через 1...1,5 мин) начинается устойчивый электрошлаковый процесс.

Недостатком данного метода является высокая трудоемкость процесса, вызванная необходимостью проведения большого числа подготовительных операций, а также невозможность получения тонких слоев (1...3 мм) из-за опасности появления подрезов.

В последнее время широко применяется горизонтальная электрошлаковая наплавка по слою легирующей шихты (рис. 2.9) /69, 70, 71/. В этом способе многоэлектродный наплавочный аппарат движется по слою легирующей шихты, покрытой флюсом. Правильное пространство, в котором наведена шлаковая ванна, с трех сторон ограничено специальным водоохлаждаемым ползуном. С четвертой стороны преградой против растекания шлака служит слой шихты и нерасплавленного флюса. Процесс обладает высокой производительностью (200 кг и более наплавленного металла в час). С его помощью можно получить слой толщиной от 3 мм и более /29/, шириной 50...150 мм /71/ за один проход, при этом глубина проплавления основного металла при оптимальных режимах не превышает 1,5...2 мм /31/.

Таким образом, горизонтальная электрошлаковая наплавка по слою порошкового присадочного материала обеспечивает различную степень легирования и однородность наплавленного металла по химическому составу, изменение ширины слоя в широких пределах и высокую производительность.

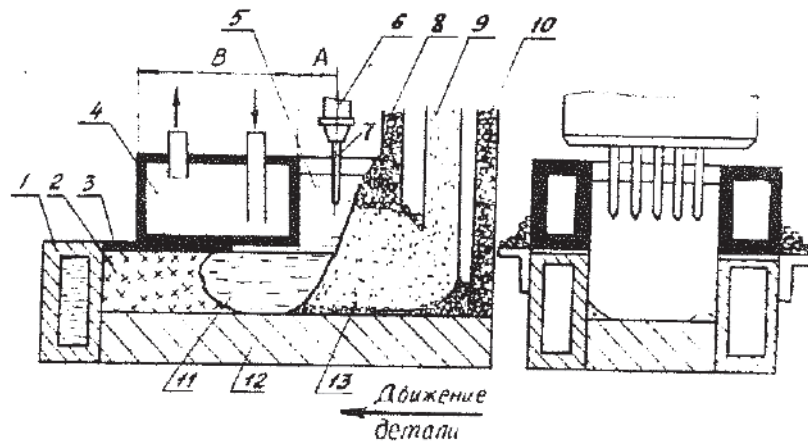


Рис.2.9. Схема многоэлектродной горизонтальной электрошлаковой наплавки /70/ :

1 - формирующие медные пластины; 2 - наплавленный металл; 3 - шлаковая корочка; 4 - охлаждающая коробка; 5 - ванна жидкого шлака; 6 - многоэлектродный мундштук; 7 - электродные проволоки; 8 - дозатор слоя флюса; 9 - дозатор слоя шихты; 10 - дозатор подслоя флюса для выравнивания поверхности; II - ванна жидкого металла; I2 - наплаваемая деталь; I3 - флюс; А и В - технологические расстояния

2.3. Материалы для нанесения износостойких покрытий методом горизонтальной электрошлаковой наплавки

Выбор присадочного материала при нанесении покрытия на тяжело нагруженные детали машин имеет большое значение, так как от него зависят физико-механические свойства слоя.

Химический состав покрытия определяется концентрацией элементов в основе, электродной проволоке, порошковой и ленточной присадке. В композиционном гетерогенном слое металл основы, электродной проволоки или присадочной ленты образуют матричный сплав, в который вкраплены твердосплавные частицы порошковой присадки. При получении легированного гомогенного покрытия все три составляющие части перемешиваются между собой, образуя монолитный слой.

Горизонтальная электрошлаковая наплавка позволяет оперативно в широких пределах изменять химический состав упрочненного слоя (рис. 2.9) /69,70/. При наплавке зубьев ковшей экскаваторов ЭКГ-4, 6 электродной проволокой Св-08, флюсом АН-60 и шихтой следующего состава (в %): молотый ферромарганец ФМ 75-50, молотый феррохром ФХ 600 - 42, электродный бой - 8 /71/, наплавленный металл - износостойкий высокоуглеродистый (около 5% С) хромомарганцевый сплав со структурой легированного заэвтектического белого чугуна. Исследование зоны сплавления показало отсутствие явно выраженных переходных структур от наплавленного к основному металлу. Большая часть границы сплавления в поперечном сечении представляла зону, "просущую" (со стороны основного металла) развитыми аустенитными дендритами, и эвтектическую зону со стороны наплавленного металла. За дендритами расположен участок шириной порядка 50 мкм мелких равноосных зерен аустенита, за которыми идут крупные

зерна. Эксплуатационные испытания зубьев показали повышение износостойкости в 2,5 раза.

Широкое распространение в последнее время получили методы легирования порошковыми материалами с использованием неплавящихся графитовых, вольфрамовых либо медных водоохлаждаемых электродов. При наплавке с графитовыми и вольфрамовыми электродами необходимо принимать во внимание диффузию графита или вольфрама в наплавленный слой. Например, при наплавке с присадкой дробленой стружки быстрорежущей стали через полый графитовый электрод на флесе АНФ-6 содержание углерода в наплавленном металле увеличивается на 30...60% /72/.

Стабильность процесса и его производительность зависят при прочих равных условиях от выбора зоны ввода порошкового присадочного материала и его грануляции /73/. Для более эффективного использования теплоты шлаковой ванны и увеличения производительности авторы считают наиболее целесообразным ввод порошка в ту часть ванны, где конвективные потоки некоторое время переносят подаваемые частицы на поверхности шлака, этим самым подогревая его перед погружением вглубь ванны. Для каждого режима наплавки рекомендуется выбирать такую фракцию порошка, частицы которой будут некоторое время перемещаться по поверхности шлаковой ванны. С целью защиты карбидов от расплавления и растворения их могут подавать в более холодную часть шлаковой ванны, ближе к внутренним стенкам кристаллизатора /57,62/. Проходя через шлаковую ванну, они нагреваются, очищаются от загрязнений, хорошо смачиваются сплавом-связкой и оседают в нем. При наплавке по этой схеме деталей, работающих в тяжелых условиях абразивного износа при температурах 700...900°C, например, звездочки дробилок агломерата применение в качестве

упрочняющей фазы релита, а также дробленых пластин металлокерамических сплавов позволило получить композиционный слой, обладающий высокой твердостью 56...62 HRC. Испытания на износостойкость наплавленных звездочек показали ее увеличение более чем в 4 раза, по сравнению со звездочками, наплавленными вручную электродами ЦС-1.

Применение в качестве износостойкой фазы литого карбида вольфрама на малом конусе доменной печи позволило получить трехслойное строение упрочненного слоя /63/. Частицы карбидов сосредоточены в среднем его слое. Зона сплавления с основным металлом и наружный слой, обрабатываемый резцом, свободны от этих частиц. Такая структура наплавленного металла обеспечивает некоторые технологические преимущества, наиболее важным из которых является повышенная стойкость против образования трещин, обусловленная отсутствием релита в наружном слое и зоне сплавления. Применение этой технологии позволило повысить стойкость конусов примерно в 1,5 раза.

Повышение износостойкости, а также твердости может происходить и за счет изменения условий кристаллизации и охлаждения наплавленного металла. Так, например, исследования, проведенные В.И.Рыбалко и др., показали, что твердость наплавленного хромистого чугуна Ч30Х15 увеличилась на 30...40%, а износ уменьшился в 1,5...2 раза, по сравнению с литым металлом аналогичного состава /74/. Наплавка плиток футеровки шнеков центрифуг, изготовленных из стали СТ.3, слоем высокохромистого чугуна в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе с применением графитового электрода позволила получить равномерное покрытие, требующее только шлифования, с твердостью HRC 55 /75,76/. Некомпактный материал при этом вводился в виде смеси чугунной

стружки и порошка феррохрома.

Для повышения физико-механических свойств композиционных покрытий Быстров В.А. и др. предлагают улучшить условия смазываемости и растворения твердой фазы в жидком металле за счет использования дробленых металлокерамических плиток из твердого сплава на основе карбида титана ТН-20 /77,78/. Исследования некоторых известных и новых систем металла-связки композиционных слоев, предназначенных для электрошлаковой наплавки деталей металлургического оборудования сплавом ТН-20 говорят о целесообразности применения порошков сормайт. Применяя в качестве металла-связки сормайт-I для ТН-20, можно создать композиционный сплав, который превосходит сплав на основе релита, что объясняется присутствием собственных карбидов в матрице сплава. На рис. 2.10 показана относительная износостойкость некоторых композиционных сплавов по данным работы /78/. Процентное содержание зерен керамического сплава ТН-20 в наплавленном металле в значительной степени влияет на износостойкость покрытия. На рис. 2.11 представлены результаты испытаний сплавов двух типов: ТН-20 + ПГ-СРЗ и ТН-20 + ПГ-С27 /77/. Из графика видно, что с увеличением карбидной фазы до некоторого предела относительная износостойкость повышается.

Наряду с карбидами, часто применяются и другие тугоплавкие материалы, такие как нитриды бора, кремния, титана, бориды хрома и титана /79,80,81/. На основной металл укладывается легирующая шихта, состоящая из тугоплавких соединений, смазывающих поверхностно-активных веществ и жидкого стекла, на которой разводится шлаковая ванна неплавящимся электродом. Состав флюса при этом выбирают так, чтобы сохранить в сплаве исходные свойства нитридов и боридов, исключив их диссоциацию, а поверхность наплаваемого изделия довести до температуры

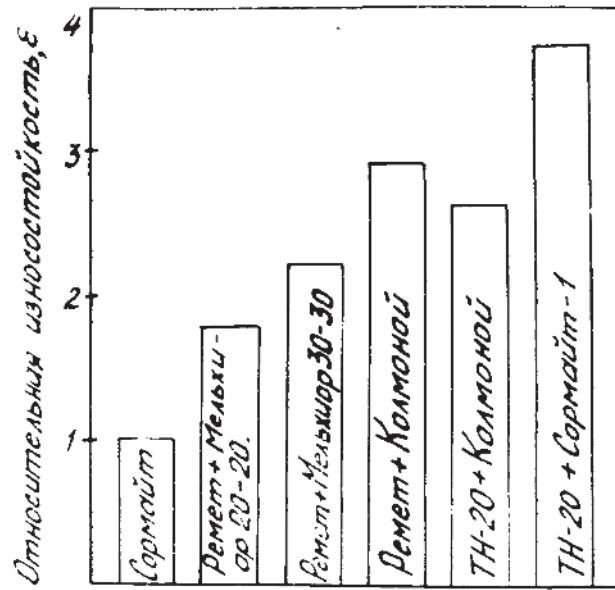


Рис.2.10. Диаграмма относительной износостойкости /78/

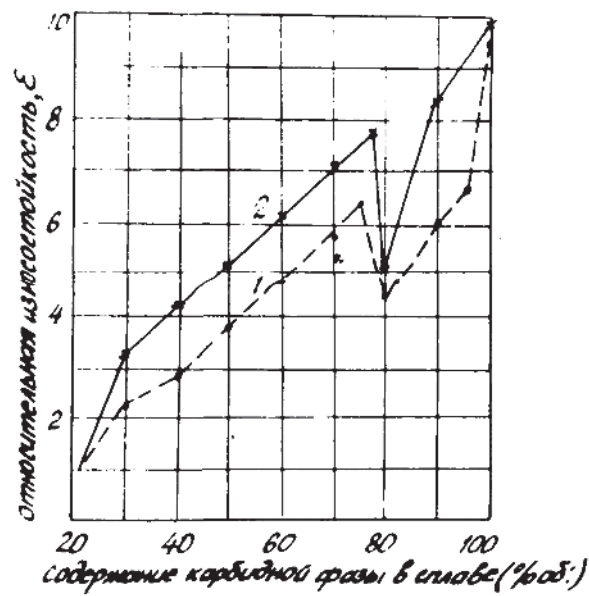


Рис.2.11. Зависимость ϵ от содержания карбидной фазы в сплаве /77/ :

1 - ТН-20 + ПГ-СРЗ; 2 - ТН-20 + ПГ-С27

плавления. Такими свойствами обладает смесь флюсов АН-20 и АН-348-А (1:1), поддерживающая температуру шлаковой ванны в интервале 1750...1760°С, что выше температуры плавления основного металла (сталь 35ХМЛ) и ниже температуры плавления тугоплавкого компонента шихты /81/. Бориды частично растворяются, а вокруг нерастворившихся, являющихся центрами кристаллизации, растут первичные кристаллиты боридов, связанные боридной эвтектикой. Обедненная жидкая фаза кристаллизуется в эвтектику. Наплавленные слои обладают высокими твердостью (80...97 НВ) и износостойкостью (в 7...10 раз выше стали 45) (рис. 2.12). Несмотря на высокую износостойкость покрытий, область применения этой технологии ограничена дороговизной и сложностью промышленного получения тугоплавких соединений.

Применение чугунной дроби в качестве некомпактного материала при наплавке износостойких покрытий секционным неплавящимся электродом позволяет при относительно небольшой твердости (44...54 НРС) повысить износостойкость слоя в 2...2,5 раза /82, 83/. Эта технология наплавки нашла свое применение при упрочнении внутренних и наружных поверхностей цилиндрических деталей /55,84/. Лабораторными испытаниями наплавленного материала установлено, что по комплексу механических свойств в условиях работы валков горячей прокатки хорошую стойкость может обеспечить высокохромистый чугун /85/. Наплавка стальных валков стана "300" высокохромистой чугунной дробью дала возможность применить при их изготовлении прокатку с обжатиями на 15...20% выше, чем для чугунных наплавленных валков и обеспечила повышение стойкости, по сравнению с литыми чугунными валками, в 2,2...2,6 раза /84/. Анализ исходного и наплавленного металлов приведен в таблице 2.1.

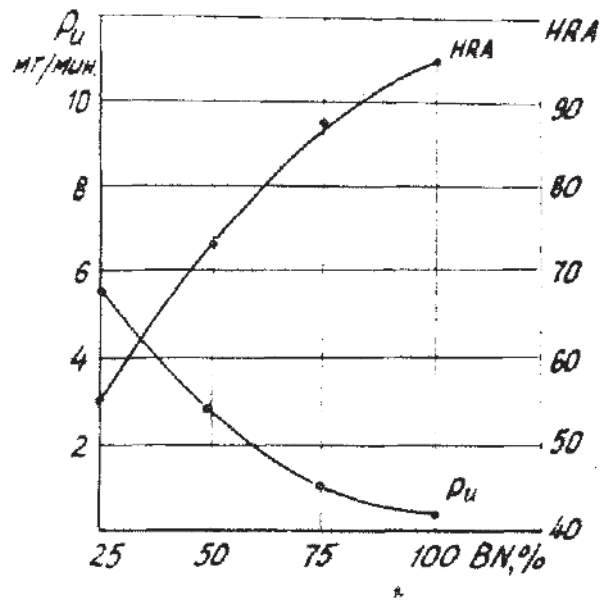


Рис. 2.12. Зависимость интенсивности абразивного изнашивания P_u и твердости HRA наплавленных слоев от содержания нитрида бора в шихте /81/

Таблица 2.1

Химический состав исходного и наплавленного металла /84/									
Материал	Содержание химических элементов, %								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Mo	S	P
Чугунная дробь	2,45	0,65	0,65	20,17	1,35	0,29	1,4	0,018	0,078
Наплавленный материал	2,36	0,67	0,72	19,29	1,47	0,11	1,2	0,015	0,101

Порошки различных сплавов, применяемые при электрошлаковой наплавке, позволяют создавать покрытия с самыми разнообразными физико-механическими свойствами. В приложении I представлены химические составы некоторых порошков высоколегированных сплавов (ГОСТ 21448-75) и порошков-смесей (ГОСТ 11546-75), наиболее часто применяемых при износостойкой наплавке /86-90/. Почти все широко используемые порошковые материалы (за исключением релита) являются представителями одной системы легирования $C-Cr-Fe$. Иногда в них добавляется бор. Высокие износостойкие свойства этих сплавов, в основном, обеспечиваются карбидами, боридами, а также карбоборидами хрома /71,89,91/. Эти сплавы дешевы.

Как видно из приложения I, максимальную концентрацию хрома и углерода имеет углеродистый феррохром ФХ-800, который почти полностью состоит из тригонального карбида хрома Cr_7C_3 . Поэтому этот феррохром наиболее целесообразно использовать в качестве порошкового присадочного материала для горизонтальной электрошлаковой наплавки.

Однако для обеспечения максимальной износостойкости покрытий в процессе наплавки необходимо уменьшить концентрации хрома и углерода на 50...60%, по сравнению с их содержанием в ФХ-800 /92/. В связи с этим следует вводить дополнительный металл с

невысоким содержанием легирующих элементов. В этом случае могут быть использованы различные комбинации сварочных или наплавочных проволок и лент /93/.

Регулируя количество порошка, вводимого в шлаковую ванну, а также объем матричного металла, получаемого за счет расплавления дополнительной присадки в виде ленты или проволоки и оплавления основного металла, можно получить покрытие с концентрацией легирующих элементов в широких пределах.

Для уменьшения растворения частиц твердого сплава в матрице их иногда покрывают слоем защитного металла. Например, перед газовой и плазменно-порошковой наплавкой частицы карбида вольфрама покрывают тонким слоем никеля /94/. Введение порошковой присадки в нижнюю часть шлаковой ванны исключает необходимость в покрытии такими защитными пленками, так как температура металлической ванны не превышает 1800°C , а сам слой жидкого шлака служит надежной защитой наплавляемого жидкого металла от азотирующего и окисляющего действия воздуха, участвует во взаимодействии с металлической и газовой фазами в зоне соединения, раскисляет, легирует, модифицирует и рафинирует металл покрытия, существенно влияет на его формирование и предотвращает образование дефектов.

Устойчивость электрошлакового процесса в значительной мере зависит от химического состава и структуры сварочных флюсов, их физических и технологических свойств. Поэтому к флюсам предъявляется целый ряд требований электрического, металлургического и технологического характера /29,30,95,96-100/. Расплавленный флюс должен обладать проводимостью, достаточной для стабильного протекания электрошлакового процесса /97,101,102/. Его проводимость должна находиться в определенном интервале. При очень вы-

сокой электропроводимости шлака (расплавленного флюса) возбуждается дуга между ним и электродом, при низкой - электрошлаковый процесс может прекратиться. От величины электропроводимости шлака в большой мере зависит также количество теплоты, выделяющейся в зоне наплавки, а значит, и величина проплавления основного металла. Шлаковая ванна является основным теплоносителем в процессе электрошлаковой сварки и наплавки.

Наряду с электропроводностью, шлак должен обладать определенной вязкостью /29,98,100/. По своему температурному коэффициенту вязкости шлаки разделяются на длинные и короткие. Вязкость коротких шлаков нарастает быстрее с понижением температуры. Если шлак будет чрезмерно жидкотекучим, он будет вытекать через зазоры, например, между кристаллизатором и наплавляемой поверхностью детали. Чрезмерно вязкий и тугоплавкий шлак способствует отжиманию кристаллизатора от наплавляемой поверхности, а также образованию у кромок покрытия подрезов. Характер изменения вязкости некоторых марок флюса в зависимости от температуры представлен на рис. 2.13 /29,42,103/.

Флюсы существенно отличаются температурой начала плавления и температурой кипения /29,30,100,104/.

Так, например, флюс АН-8 расплавляется при наиболее низкой температуре, далее следуют флюсы АН-8М, АН-22, АН-348-А, ФЦ-7. Наиболее тугоплавкий флюс АНФ-1. Наилучшим для наплавки длинномерных покрытий с применением формирующих устройств является флюс АН-8 /29/.

Чем ниже температура кипения флюса, тем меньшая устойчивость электрошлакового процесса и большая возможность перехода его в дуговой. Поскольку большинство флюсов, применяемых при электрошлаковой наплавке - сложные по химическому составу и структуре

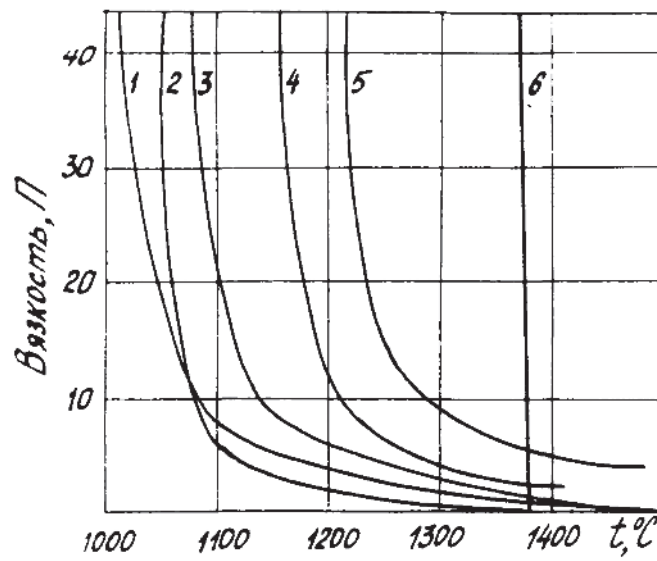


Рис.2.13. Изменение вязкости ^пфлюсов в зависимости от температуры /29,42/:

1 - АН-8; 2 - АН-22; 3 - АН-9; 4 - АН-348-А;
5 - ФЦ-7; 6 - АНФ-1

сплавы, а не простые вещества, то они кипят не при конкретной температуре, а в определенном диапазоне температур.

Для стабилизации электрошлакового процесса важна температура начала кипения флюса, определяемая наиболее летучим ее компонентом. В приложении 2 представлены данные о температуре плавления и кипения ряда соединений, которые могут быть в расплавленных флюсах. Наиболее низкую температуру кипения имеют фториды кремния, титана, алюминия, натрия и калия. Наличие в сварочной ванне этих соединений существенно снижает температуру кипения флюса и этим снижает устойчивость электрошлакового процесса /29/.

По химическому составу флюсы подразделяются на основные, нейтральные и кислые. Основность или кислотность флюса зависит от преобладания в нем кислотных или основных окислов с учетом их степени активности. Флюсы, содержащие фториды и хлориды, можно отнести к химическим нейтральным соединениям.

Учитывая сказанное, выбор флюса, отвечающего всем требованиям, при условии отсутствия в нем дефицитных компонентов, является чрезвычайно важной задачей.

При электрошлаковой наплавке порошковыми присадочными материалами, как уже было отмечено, применяются как плавящиеся, так и неплавящиеся электроды /72/.

В качестве неплавящегося электрода используют электроды из графита и вольфрама либо медные водоохлаждаемые. Последние применяются редко, так как подвержены электроэрозионному разрешению в агрессивной шлаковой среде и относительно быстро выходят из строя. Графитовые и вольфрамовые электроды при наплавке также изменяют свои размеры за счет окисления и оплавления, но

эти процессы идут достаточно медленно и позволяют использовать электроды как источники тепла периодического действия.

Окисление и оплавление электродов следует учитывать при наплавке сталей и сплавов, у которых жестко регламентировано содержание углерода и вольфрама. При наплавке многих износостойких сплавов и легированных сталей переход C и W из электрода в наплавленный металл практически не влияет на свойства последнего.

2.4. Цель и задачи исследования

Долговечность деталей рабочих органов машин, подверженных интенсивному абразивному изнашиванию, определяется, в основном, износостойкостью их рабочих поверхностей. При достижении критической величины износа деталь, как правило, выходит из строя. Это приводит к остановке в работе машины, так как связано с заменой изношенной детали.

Для увеличения срока службы этих деталей в настоящее время применяются технологические процессы нанесения защитных покрытий, получаемых при кристаллизации тонкого слоя жидкого металла, формируемого на упрочняемой поверхности, а необходимые физико-механические свойства обеспечиваются применением порошковых присадочных материалов. Существующие способы электродуговой и плазменной наплавки не позволяют получать качественные (без пор и шлаковых включений) тонкослойные гомогенные покрытия. Применение горизонтального электрошлакового упрочнения по слою порошкового присадочного материала с использованием стальной ленты обеспечит получение более качественных покрытий. Однако формирование покрытий, образующихся при кристаллизации

тонкого слоя жидкого металла методом горизонтального электрошлакового упрочнения, физико-механические и эксплуатационные свойства их изучены не достаточно. В литературе отсутствуют данные по нанесению указанным методом тонких покрытий толщиной от 1 до 5 мм.

Целью диссертационной работы является разработка технологии, обеспечивающей повышение надежности и долговечности деталей путем нанесения тонкослойных защитных покрытий с высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами методом горизонтального электрошлакового упрочнения по слою порошкового присадочного материала с использованием стальной ленты.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать тепловые особенности процесса горизонтального электрошлакового тонкослойного упрочнения с применением порошкового присадочного материала и стальной ленты.
2. Изучить влияние основных технологических режимов процесса упрочнения на формирование физико-механических свойств покрытий.
3. Составить математическую модель, объясняющую процесс изнашивания высоколегированных покрытий системы $Fe - C_2 - C - B$
4. Оценить влияние основных технологических параметров на геометрию и шероховатость покрытий и разработать рекомендации по механической обработке.
5. На основании проведенных исследований разработать технологию упрочнения быстроизнашивающихся деталей машин и дать ее технико-экономическое обоснование.

3. СПОСОБ УПРОЧНЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Повышение надежности и долговечности рабочих элементов строительных, землеройных, почвообрабатывающих, горно-рудных и др. машин может осуществляться с применением нового способа горизонтального электрошлакового упрочнения по слою порошкового присадочного материала, который позволяет получать тонкослойные покрытия 1...5 мм с высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Экспериментальные исследования проводились с целью определения рациональных технологических режимов горизонтального электрошлакового упрочнения по слою порошкового присадочного материала с использованием стальной ленты. Изучался характер распределения физико-механических свойств по сечению покрытий. Оценивалось влияние основных теплофизических характеристик на характер сплавления покрытия с основным металлом. При этом рассматривались особенности формообразования покрытий, проводилось уточнение параметров: тепловой мощности процесса, скорости наплавки, размеров детали.

Исследовалось влияние концентрации легирующих элементов на относительную износостойкость покрытий.

3.1. Способ горизонтального электрошлакового упрочнения

Технология упрочнения замков бурильных труб, ножей землеройных машин, противорезающих брусьев кормоуборочной техники, лопаток дымососов и мельничных вентиляторов должна предусматривать нанесение покрытий с высокими физико-механическими и эксплуата-

ционными характеристиками на рабочие поверхности. Толщина этих покрытий, как правило, не превышает максимально допустимой по условиям эксплуатации величины износа и обычно составляет 1...5 мм.

Для упрочнения такого класса деталей разработан способ горизонтальной электрошлаковой износостойкой наплавки по слою порошкового присадочного материала с использованием стальной ленты /ГО5/. Он заключается в наведении шлаковой и металлической ванн в кокиле-кристаллизаторе, который располагают над упрочняемой поверхностью и перемещают вдоль нее в направлении наплавки по слою порошкового присадочного материала, прижатого к детали стальной лентой.

На рис. 3.1 представлена принципиальная схема способа горизонтальной электрошлаковой наплавки по слою порошкового присадочного материала с использованием стальной ленты. Установка состоит из источника сварочного тока 1, графитового неплавящегося электрода 2, водоохлаждаемого кокиля-кристаллизатора 3 с поперечными канавками в нижнем торце передней и задней стенок и силового стола 6. Наплавляемая деталь 5 устанавливается на силовом столе. На упрочняемую поверхность детали насыпается слой порошкового присадочного материала 8 и прижимается к ней стальной лентой 7. Внутри кокиля-кристаллизатора вводится неплавящийся электрод, с помощью которого наводятся шлаковая 10 и металлическая 9 ванны. Жидкий металл ванны 9 попадает в канавку под нижний торец задней стенки кокиля-кристаллизатора и образует покрытие 4.

Кокиль-кристаллизатор устанавливается на упрочняемую поверхность детали. Затем на эту же поверхность насыпается слой порошкового присадочного материала и прижимается к ней лентой, ширина которой соответствует ширине канавки в нижнем торце передней

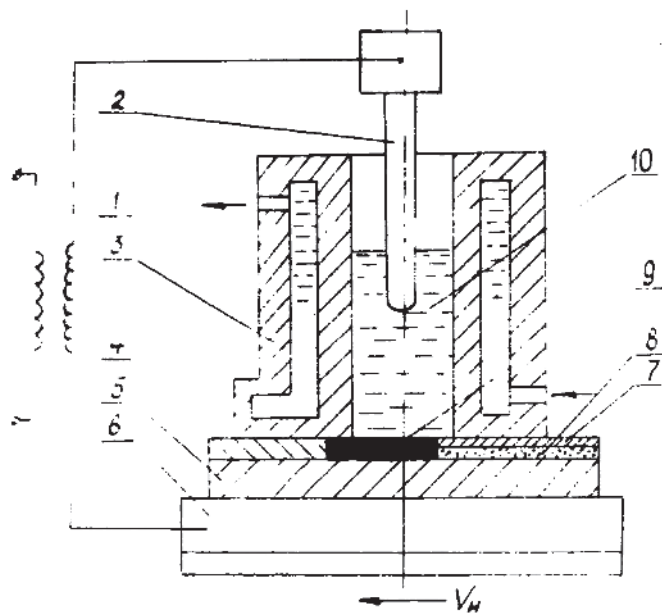


Рис.3.1. Схема способа горизонтальной электрошлаковой наплавки по слою порошкового присадочного материала (а.с. № 1235082):

- 1 - источник питания; 2 - графитовый электрод;
- 3 - водоохлаждаемый кокиль-кристаллизатор;
- 4 - покрытие; 5 - наплавляемая деталь; 6 - силовой стол; 7 - электродная стальная лента;
- 8 - порошковый присадочный материал;
- 9 - металлическая ванна; 10 - шлаковая ванна

стенки кокиля-кристаллизатора. При этом конец ленты вводится в канавку на всю длину внутренней полости кокиля-кристаллизатора. С помощью неплавящегося графитового электрода в кокилекристаллизаторе наводятся шлаковая и металлическая ванны. После наведения металлической ванны включают механизм поступательного перемещения детали со скоростью наплавки V_H . При этом жидкий металл затекает в канавку под нижний торец задней стенки кокиля и, кристаллизуясь, образует упрочненное покрытие.

С целью улучшения качества формирования покрытия кокилюкристаллизатору могут придаваться колебательные движения в вертикальной плоскости специальным вибратором с амплитудой $0,1 \dots 0,5$ мм. Ленте сообщается прерывистая подача, которая регулирует объем металла матрицы, что позволяет обеспечить получение покрытия с заданными физико-механическими свойствами. При этом его объем определяется из условия /108/:

$$0,1 V_n \leq V_A \leq 0,8 V_n \quad (3.1)$$

где V_n - объем металла наплавленного покрытия; V_A - объем металла ленты в общем объеме металла покрытия.

Нижний предел объема металла матричной ленты равен объему пространства, находящегося между частицами порошкового присадочного материала в свободно насыпанном состоянии. Верхний предел этого объема установлен экспериментально /105/, исходя из условия обеспечения требуемой износостойкости, так как физико-механические свойства покрытия при дальнейшем увеличении его постепенно ухудшаются, приближаясь к свойствам металла ленты, не обладающего высокой износостойкостью.

Необходимый объем матричного металла, получаемый путем прерывистой подачи ленты в шлаковую ванну, позволяет использовать ленту с различной толщиной, но не более 0,8 высоты канавки в

нижнем торце передней стенки кокиля-кристаллизатора. Направление подачи ленты при этом может как совпадать со скоростью наплавки V_H , так и быть направленным в противоположную сторону. Оно зависит от необходимого объема матричного металла, попадающего в металлическую ванну, а также от толщины ленты. Подача ее осуществляется в тот момент, когда кокиль-кристаллизатор, колеблющийся в вертикальной плоскости, приподнят над наплавляемой поверхностью. Частота колебаний кокиля-кристаллизатора и частота импульса подачи ленты должны быть взаимозависимыми. При этом частота колебаний кокиля-кристаллизатора выбирается равной или кратной частоте импульса прерывистой подачи ленты /105/.

Устройство, реализующее описанный способ горизонтальной электрошлаковой износостойкой наплавки (рис. 3.1), позволяет наносить покрытия только с определенной высотой, соответствующей глубине поперечной канавки в нижнем торце задней стенки кокиля-кристаллизатора. Для получения другого типоразмера (высоты) покрытия необходимо изменять глубину указанной канавки либо механической обработкой, либо установкой дополнительной прокладки, либо заменить кокиль-кристаллизатор другим, имеющим требуемую глубину канавки. Кроме того, данное устройство не позволяет изменять количество порошкового присадочного материала как в процессе наплавки, так и при технологических переходах между упрочнением различных деталей.

Указанные недостатки устранены специально разработанным устройством, представляющим собой кокиль, впереди которого (по ходу движения) устанавливается шибер для дозирования порошкового присадочного материала, а сзади - кристаллизатор, формирующий наносимое покрытие (рис. 3.2) /106/. Оно состоит из кокиля 1, который прижимается к наплавляемой детали 2 нижней тор-

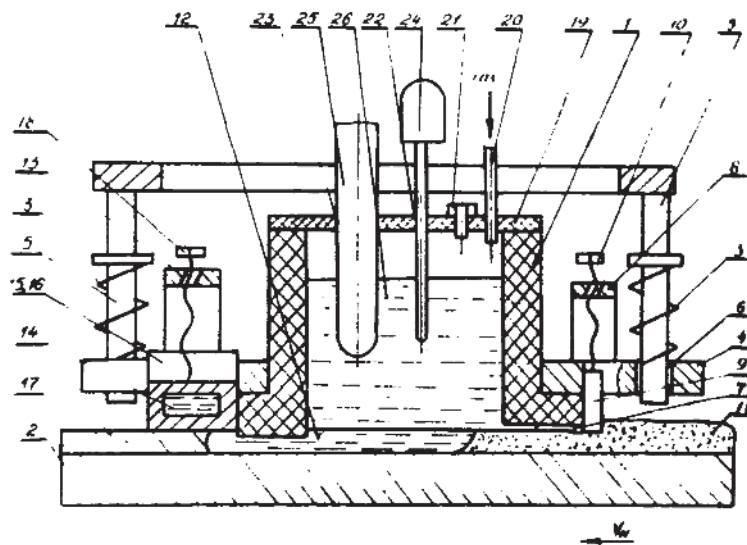


Рис. 3.2. Устройство для горизонтальной электрошлаковой наплавки (а.с.№ II67835)

1 - кокиль; 2 - упрочняемая деталь; 3 - пружина;
 4 - прижимная плита; 5 - палец; 6 - отверстие;
 7 - передняя канавка; 8 - передний кронштейн;
 9 - шибер; 10 - передний винт; 11 - порошковый
 присадочный материал; 12 - задняя канавка; 13 -
 задний кронштейн; 14 - горизонтальный кристалли-
 затор; 15, 16 - вертикальные кристаллизаторы;
 17 - покрытие; 18 - задний винт; 19 - крышка;
 20 - газовый патрубок; 21 - предохранительный
 клапан; 22 - отверстие под плавящийся электрод;
 23 - отверстие под неплавящийся электрод; 24 -
 плавящийся электрод; 25 - неплавящийся электрод

цовой нерабочей поверхностью четырьмя пружинами 3 через прижимную плиту 4. Пружины устанавливаются на центрирующих пальцах 5, посаженных в отверстия 6 упомянутой плиты. В нижнем торце рабочей поверхности передней стенки кокиля выполнена поперечная канавка 7, перед которой на кронштейне 8, жестко связанном с плитой, крепится шибер 9. Канавка 7 и шибер 9, имеющий возможность вертикального перемещения с помощью винта 10, предназначены для дозированной подачи порошкового присадочного материала 11 в зону наплавки. Задняя стенка кокиля также выполнена с поперечной канавкой 12 в нижнем торце, за которой на кронштейне 13, жестко связанном с упорной плитой, устанавливаются три кристаллизатора: горизонтальный и два вертикальных 15 и 16, формирующие наплавляемый слой 17. Горизонтальный кристаллизатор снабжен винтом 18 для регулировки толщины наплавляемого покрытия. К верхнему концу кокиля может крепиться неэлектропроводная крышка 19, предназначенная для избыточного давления над шлаковой и металлической ваннами. На крышке располагаются газовый патрубок 20, предохранительный клапан 21 и два отверстия 22 и 23 для подачи плавящегося 24 и неплавящегося 25 электродов.

Принцип работы данного устройства заключается в следующем. Кокиль устанавливается на наплавляемую деталь в крайнем левом положении и прижимается к ней нижней нерабочей торцовой поверхностью прижимной плитой через пружины, установленные на центрирующих пальцах. Регулировочными винтами выставляется необходимая высота порошкового присадочного материала, поступающего в шлаковую ванну, и наносимого покрытия, а также регулируется скорость подачи плавящегося электрода. Неплавящийся электрод вводится в соприкосновение с наплавляемой деталью, после чего в кокиль засыпается флюс, а на верхнем торце крепится крышка. При

включении сварочного тока между неплавящимся электродом и деталью возникает электрическая дуга, и флюс начинает плавиться. По мере расплавления его неплавящийся электрод поднимают вверх и добиваются перехода электродугового процесса в электрошлаковую. После наведения шлаковой ванны и разогрева детали до плавления ее поверхностного слоя включают механизмы подачи плавящегося электрода и детали. При этом с целью улучшения перемещения жидкого металла через канавку в торце задней стенки кокиля над шлаковой ванной может создаваться избыточное давление 0,1...0,2 атмосферы путем подачи через патрубок газа. Высота этой канавки выбирается 0,4...0,9 от высоты наплавляемого слоя, но не менее 0,5 мм в связи с тем, что с уменьшением высоты слоя жидкого металла, подаваемого в зазор, возрастает скорость его остывания и увеличивается вероятность преждевременного затвердения в проходном канале, а также некачественного формирования покрытия. Наносимый слой формируется описанными выше тремя кристаллизаторами.

Конструкция устройства, таким образом, позволяет получать тонкие покрытия толщиной до 0,6 мм. Регулируя высоту подъема горизонтального кристаллизатора, можно получать покрытие с различной высотой слоя, а изменяя скорость подачи плавящегося электрода и количество порошкового присадочного материала, получать покрытия с переменным химическим составом по длине упрочняемой детали.

Данный способ горизонтальной электрошлаковой наплавки по слою порошкового присадочного материала с использованием стальной ленты и устройство для его осуществления послужили основой для разработки технологических процессов упрочнения быстроизнашивающихся деталей машин с плоской и цилиндрической рабочей по-

верхностью, которые приведены в разделах 5.1, 5.2 и 5.3.

3.2. Оборудование для горизонтального электрошлакового упрочнения и применяемые материалы

Процесс горизонтального электрошлакового упрочнения деталей осуществлялся при помощи автомата А-1416, изготавливаемого серийно Каховским заводом электросварочного оборудования для дуговой сварки под флюсом /107/.

С целью расширения технологических возможностей установки и применения ее для горизонтальной электрошлаковой наплавки по слою порошка была проведена ее модернизация (рис.3.3). С автомата А-1416 снят флюсовый бункер, а на его место установлен механизм подачи электродной проволоки, ранее крепившийся к пульту управления. В качестве источника питания применялся универсальный сварочный выпрямитель ВДУ-1201, имеющий как падающую, так и жесткую внешние характеристики сварочного тока и обеспечивающий плавное дистанционное регулирование выходных параметров тока и напряжения, что очень важно для электрошлакового процесса /108, 109/.

Горизонтальное перемещение упрочняемых деталей осуществлялось с использованием силового стола модели УМ-2434 (рис.3.4). Для обеспечения плавного регулирования скорости перемещения (0,5...10,5 м/ч) он был дополнительно снабжен теристорным приводом типа ЭТО 1-3У4, который вместе с пультом управления смонтирован в специальном блоке питания (рис. 3.5). При этом асинхронный двигатель рабочего хода силового стола был заменен на двигатель постоянного тока.

Для вращения цилиндрических деталей типа вала применялась делительная головка УДГ-250, а также специальные центры, уста-

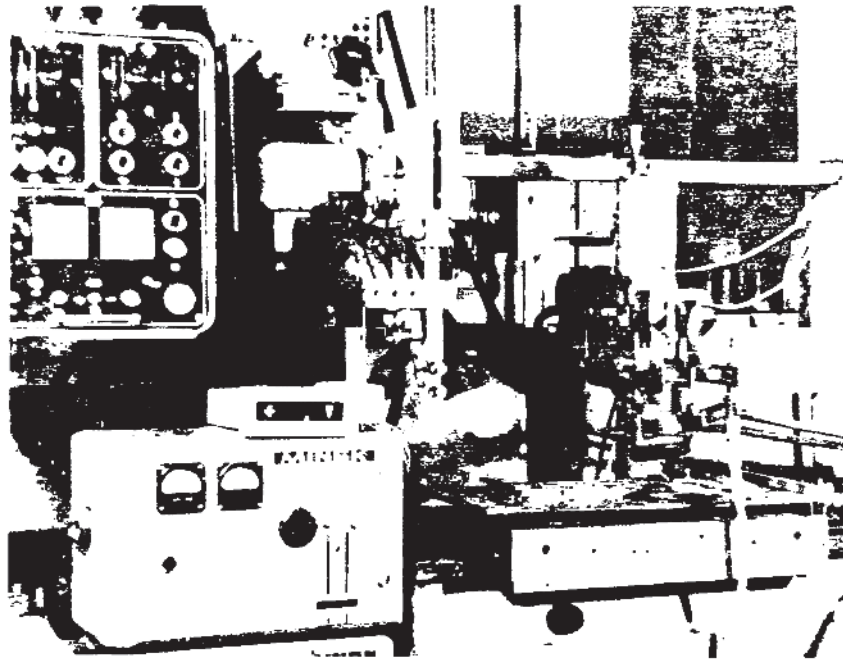


Рис. 3.3. Внешний вид установки, предназначенной для горизонтальной электрошлаковой наплавки по слою порошкового присадочного материала

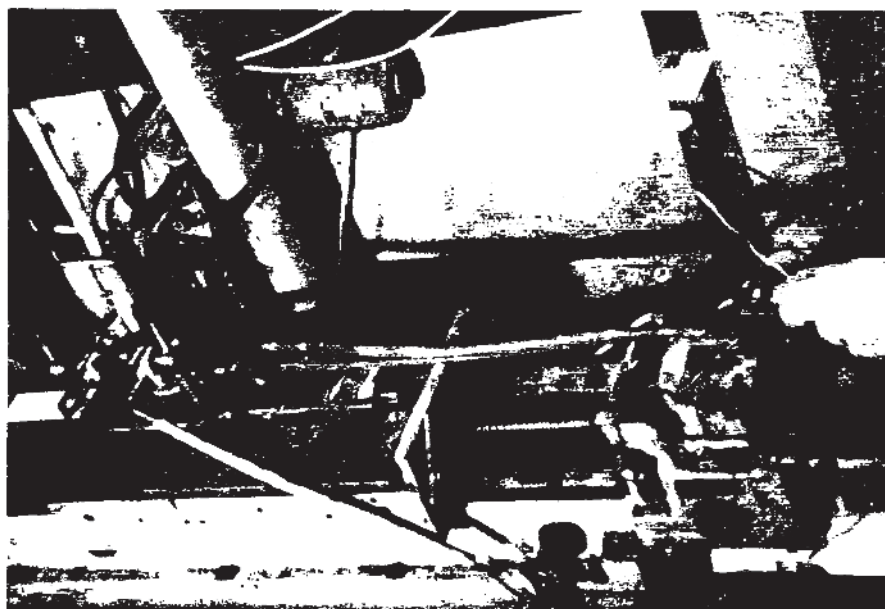


Рис. 3.4. Внешний вид силового стола УМ-2434

навливаемые на силовом столе.

Для наведения и перемещения шлаковой и металлической ванны, а также осуществления самого процесса горизонтальной электрошлаковой наплавки по слою порошка разработаны и изготовлены специальные конструкции кокилей-кристаллизаторов.

Цилиндрический кокиль-кристаллизатор предназначен для упрочнения плоских поверхностей деталей (рис. 3.6). В нижнем торце его выполнен сквозной паз, позволяющий с одной стороны вводить порошковый присадочный материал, а с другой - осуществлять формирование покрытия.

Для регулировки объема вводимого порошкового присадочного материала путем подъема или опускания шибера у передней стенки предусмотрена более совершенная конструкция прямоугольного кокиля-кристаллизатора (рис. 3.7). Изменение высоты зазора между нижним торцом задней стенки этого кокиля-кристаллизатора и поверхностью упрочняемой детали позволяет регулировать толщину наносимого покрытия.

Упрочнение криволинейных поверхностей деталей, например, типа вала можно осуществлять с помощью кокиля-кристаллизатора, конструкция которого так же, как и предыдущего, предусматривает устройство для регулировки толщины покрытия, а форма его нижней кромки выполнена в соответствии с геометрией упрочняемой детали (рис. 3.8).

Крепление графитовых электродов осуществлялось при помощи специальных медных водоохлаждаемых зажимов, позволяющих быстро сменять электроды и обеспечивающих надежный контакт в местах токоподвода (рис. 3.9).

Ведение процесса горизонтального электрошлакового упрочнения предусматривает применение ряда вспомогательных приспособ-

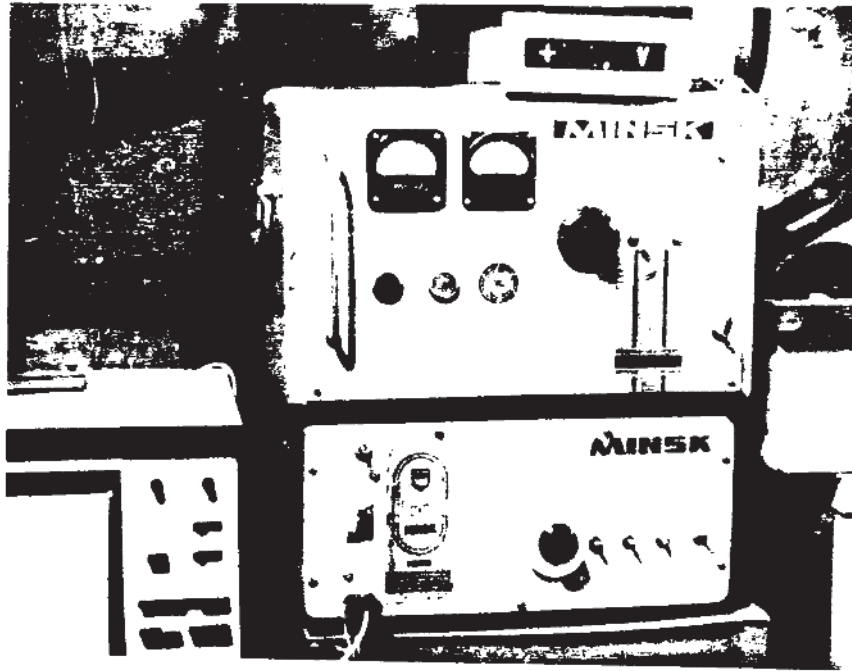


Рис. 3.5. Внешний вид блока питания установки для горизонтального электрошлакового упрочнения порошковым присадочным материалом



Рис. 3.6. Внешний вид цилиндрического кристаллизатора для горизонтального электрошлакового упрочнения плоских поверхностей деталей

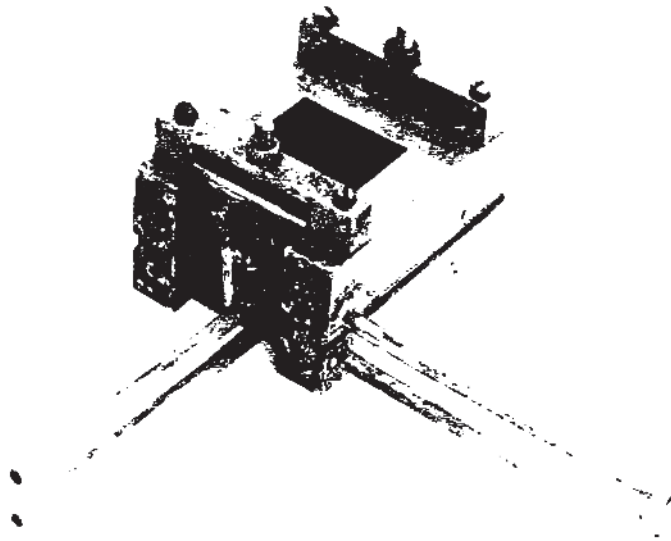


Рис. 3.7. Внешний вид прямоугольного кристаллизатора для горизонтального электрошлакового упрочнения плоских поверхностей деталей

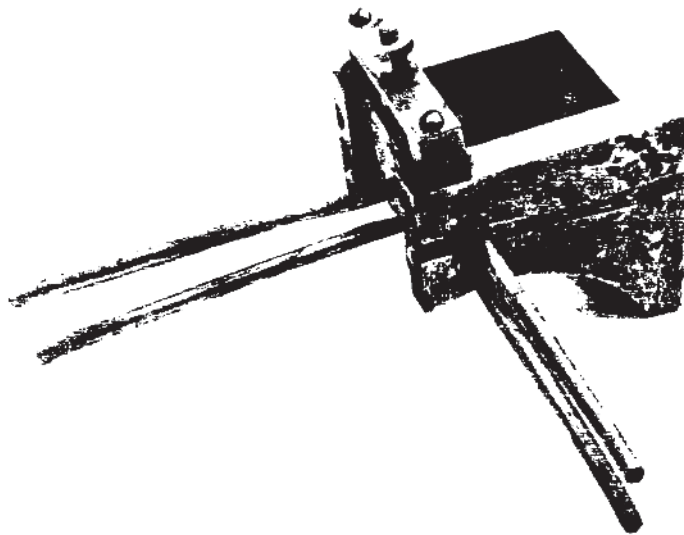


Рис. 3.8. Внешний вид прямоугольного кристаллизатора для горизонтального электрошлакового упрочнения криволинейных поверхностей деталей

собленин, устанавливаемых на силовом столе УМ-2434 и служащих для установки и вертикального перемещения кокиля, зажимов с электродами, а также механизмов крепления наплавляемых деталей на подвижном столике силового стола.

При упрочнении рабочих поверхностей строительных, дорожных, горно-рудных и других типов машин, работающих при абразивном воздействии внешней среды, как указывалось в разделе 2.3, может использоваться большая группа наплавочных материалов (Приложение I). Однако при выборе порошкового присадочного материала предпочтение следует отдать ферросплавным порошковым материалам, которые недефицитные и дешевые, а наряду с этим обладают высокими физико-механическими свойствами. Поэтому в качестве модельных порошковых материалов, образующих износостойкую твердую фазу, были выбраны углеродистый феррохром ФХ-800 (ГОСТ 4757-79), содержащий 6,6...8,0% С и 65% C_2 и борид хрома C_2B_2 (ТУ 88 УССР 147006-77), включающий не менее 27,5% В и 68,5% хрома. По концентрации хрома и углерода они превосходят все остальные порошковые материалы, представленные в Приложении I.

Гранулометрический анализ применяемых порошков производился на установке "Coulter TA-2" (Франция). Результаты анализов приведены в Приложении 3.

Для снижения теплового воздействия шлаковой ванны на основной и присадочный материалы, а также расширения технологических возможностей способа горизонтальной электрошлаковой наплавки в качестве одного из компонентов присадочного материала могут применяться металлические ленты. При этом обеспечивается повышение физико-механических свойств слоя за счет снижения угара и растворения легирующих компонентов, а также улучшение качества наносимых покрытий. Кроме того, применение ленты при

данном способе наплавки дает возможность использовать ферромагнитный порошковый присадочный материал. В приложении 4 представлены химические составы наиболее широко применяемых в промышленности наплавочных холоднокатанных стальных лент /86/. При проведении экспериментов нами использовалась металлическая лента (толщиной 0,1...0,9 мм) из стали 65Г (ГОСТ 2283-79).

Анализ основных физико-химических свойств наиболее распространенных химических соединений, применяющихся в виде компонентов существующих флюсов (приложение 5), как показано в разделе 2.3, а также экспериментальные исследования показали, что исходя из требований, указанных выше, для горизонтальной электрошлаковой наплавки по слою порошка наиболее приемлемым является флюс, содержащий 50% флюса АН-8 и 50% флюса АН-9.

Для проведения экспериментов в качестве неплавящихся электродов использовались графитовые стержни (рис. 3.10).

3.3. Методика определения основных технологических параметров наплавки

Основные технологические параметры горизонтальной электрошлаковой наплавки по слою порошкового присадочного материала неплавящимся электродом также, как и в других способах электрошлаковой наплавки, делятся на первичные, или независимые, и вторичные, или зависимые. К первичным параметрам режима относятся: суммарное падение напряжения на вылете электрода и в шлаковой ванне U , В; глубина шлаковой ванны h_s , мм; сечение $F_{\text{э}}$, мм², и число электронов $n_{\text{э}}$; поперечное сечение внутренней полости кокиля F_K , мм².

К зависимым, или вторичным, параметрам режима следует от-

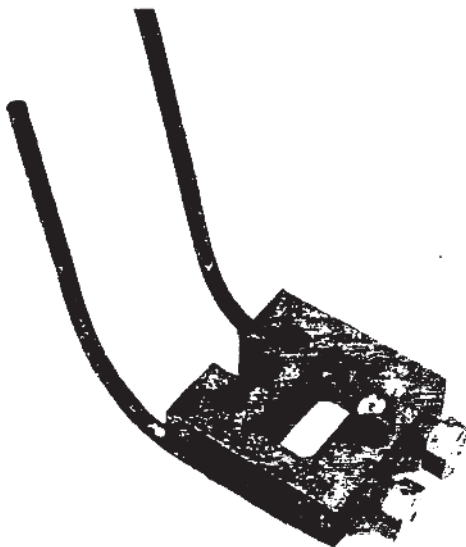


Рис. 3.9. Внешний вид водоохлаждаемого зажима под графитовые электроды сечением 20x40 мм и \varnothing 10 мм

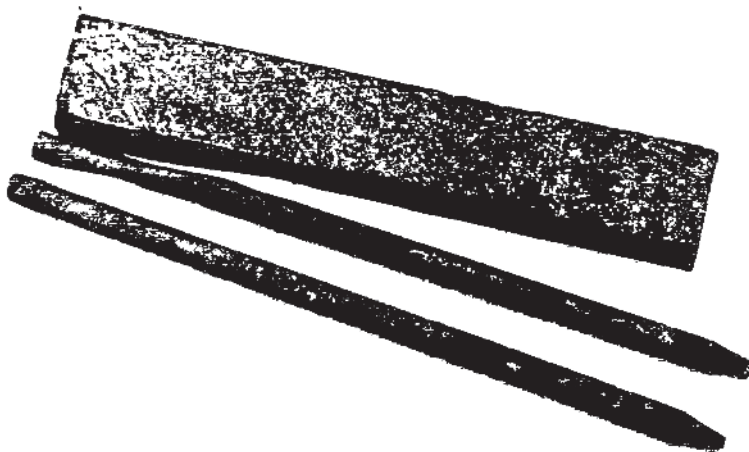


Рис. 3.10. Графитовые электроды, применяемые для горизонтальной электрошлаковой наплавки по слою порошкового присадочного материала

нести, прежде всего, сварочный ток I , А. Он определяется сечением электрода, а также в некоторой степени проводимостью шлаковой ванны и скоростью наплавки V_H /29/.

Мощность процесса и скорость наплавки должны быть строго согласованы во избежание несплавлений или чрезмерного проплавления основного металла.

Форма и размеры электрода (во поперечном сечении) определялись, исходя из необходимости создания условий для обеспечения стабильного устойчивого протекания электрошлакового процесса, требуемого подогрева наплавляемой поверхности и ее оплавления по всей ширине наносимого покрытия /30,72/. Кроме того, они зависят от размера внутренней полости кокиля-кристаллизатора и выбираются из условия, чтобы расстояние от боковых поверхностей неплавящегося электрода до внутренних боковых поверхностей кокиля было не менее 4...5 мм /34,41/. Поэтому после предварительных исследований для проведения экспериментов был выбран графитовый электрод прямоугольной формы сечением 40 x 20 мм, а также круглый \varnothing 10 мм (рис. 3.10).

Ведение процесса электрошлакового упрочнения с применением плавящихся электродов не позволяет существенно увеличить скорость наплавки V_H , так как она находится в прямой зависимости от скорости подачи электродов, а последняя имеет свое критическое значение. Использование неплавящихся электродов исключает эту зависимость, и скорость наплавки V_H можно регулировать в достаточно широком диапазоне. Нижний предел скорости наплавки ограничен увеличением зоны термического влияния и глубины проплавления основного металла D более 1,5 мм. Верхний — зависит от появления несплавлений на границе основного и наплавляемого металла.

Скорость наплавки зависит также и от состава флюса. Обогащая или обедняя его поверхностно-активными веществами, имеющими различную температуру плавления и кипения, можно увеличить или уменьшить межфазное натяжение, а также и температуру шлаковой ванны /110/.

На рис. 3.11 представлен обобщенный график, построенный на основе опытных данных, показывающий зависимость глубины проплавления основного металла от скорости наплавки при использовании флюсов АН-8, АН-9, 50% АН-8 и 50% АН-9.

Учитывая сказанное, диапазон скоростей наплавки равен 1...1,8 м/ч.

Устойчивое протекание электрошлакового процесса во многом определяется родом полярности сварочного тока /29/. При ведении горизонтальной электрошлаковой наплавки по слою порошка необходимо до минимума уменьшить тепловложение в боковые поверхности кокиля и увеличить в основной и наплавляемый металлы. Такому распределению тепловых потоков в большой степени соответствует постоянный ток прямой полярности, позволяющий увеличить тепловложение в покрытие на 10...15% /36/. Очень важно, что при прямой полярности в разрядном промежутке, где сильно перегретый шлак, выделение газовых пузырьков у поверхности электрода уменьшается, уменьшается и разрушение графитового электрода.

На основании литературных данных /80,111-114/ и их экспериментальной проверки был выбран оптимальный диапазон напряжения U и тока I для горизонтальной электрошлаковой наплавки по слою порошкового присадочного материала графитовым электродом сечением 40 x 20 мм на прямой полярности тока с использованием флюса АН-8 - 50% и АН-9 - 50% (рис. 3.12).

Опыт применения электрошлаковой наплавки показал, что та-

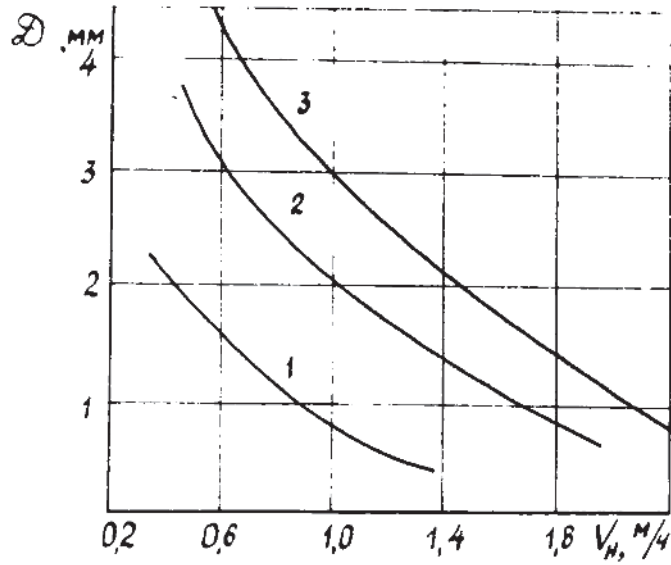


Рис.3.11. Зависимость глубины проплавления основного металла от скорости наплавки :

1 - флюс АН-8; 2 - флюс 50% АН-8 и 50% АН-9;
 3 - флюс АН-9; ($U = 30$ В, $h_s = 30 \dots 35$ мм)

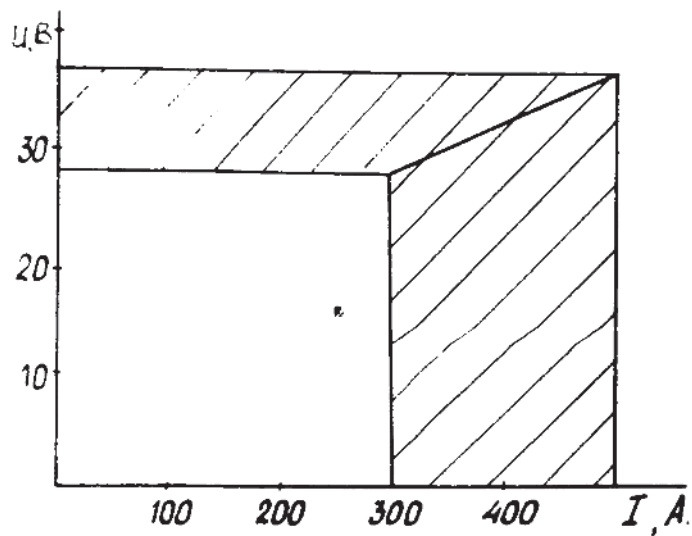


Рис.3.12. Диапазон изменения напряжения и силы тока

кой элемент режима как высота шлаковой ванны практически не зависит от толщины наносимого покрытия и имеет оптимальное значение 30...50 мм /37,41,70,115/. Проведенные эксперименты с использованием кокилей размерами внутренней полости в сечении 50 x 50 мм и 50 x 60 мм показали, что электрошлаковая наплавка устойчиво протекает при глубине шлаковой ванны 30...35 мм. Поэтому при проведении всех последующих экспериментов глубина шлаковой ванны выбиралась именно в этих пределах.

Важной отличительной особенностью способа являются специфические условия растекания наплавляемого металла по поверхности изделия, при которых образуется граница раздела трех фаз: твердого тела основного металла, сыпучего порошкового материала и жидкого металла.

Полная высота покрытия определяется как (рис. 3.13) /49/:

$$H = H_1 + D \quad (3.2)$$

где H_1 - высота покрытия над исходной поверхностью основного металла, мм; D - глубина проплавления основного металла, мм.

Высота покрытия над исходной поверхностью основного металла определяется, главным образом, высотой канавки в нижнем торце задней стенки кокиля-кристаллизатора. Глубина проплавления основного металла зависит от многих факторов: режима наплавки, дисперсности порошкового присадочного материала и условия смачивания твердого основного металла жидким наплавляемым. При этом существенную роль играют наличие на твердой поверхности окисной или адсорбционной пленки, сродство одного металла другому и близость их температур плавления /49/.

Таким образом, высота покрытия H имеет прямую зависимость с температурами нагрева основного и наплавляемого металлов.

Наплавка производилась на пластины из малоуглеродистой

стали Ст. 3 размером 360 x 120. С целью исследования параметров режима электрошлакового упрочнения, температурного воздействия на основной и наплавляемый металл, а также применяемых материалов толщина пластины изменялась в интервале 8...15 мм. Перед наплавкой на пластинах выфрезывалась канавка шириной 50...60 мм (соответствующая ширине внутренней полости кокиля-кристаллизатора) и глубиной 1...5 мм, которая впоследствии за-плавлялась.

К основным параметрам качества получаемого покрытия относятся геометрические размеры наносимого слоя и диапазон их колебаний по длине упрочняемой поверхности.

Контроль изменения геометрических параметров покрытия при формировании слоя в процессе наплавки является очень сложной технологической задачей. Область между поверхностью шлаковой ванны и фронтом кристаллизации металла является весьма перспективной и важной с физической и практической точек зрения, но тем не менее она наименее доступна для непосредственного наблюдения.

В настоящее время в литературе имеется очень мало данных по проведению такого рода экспериментов [31, 116, 117]. Применение их для изучения геометрических параметров покрытия при горизонтальной электрошлаковой наплавке по слою порошкового при-садочного материала весьма затруднительно.

Нами определялось влияние режимов наплавки на геометрию получаемых покрытий и конфигурацию линии сплавления по ширине наносимого слоя. Измерялись следующие параметры (рис. 3.14): высота покрытия H ; глубина проплавления основного металла D ; неравномерность проплавления основного металла N_1 ; высота канавки под наплавку K ; толщина шлаковой корочки M ; толщина

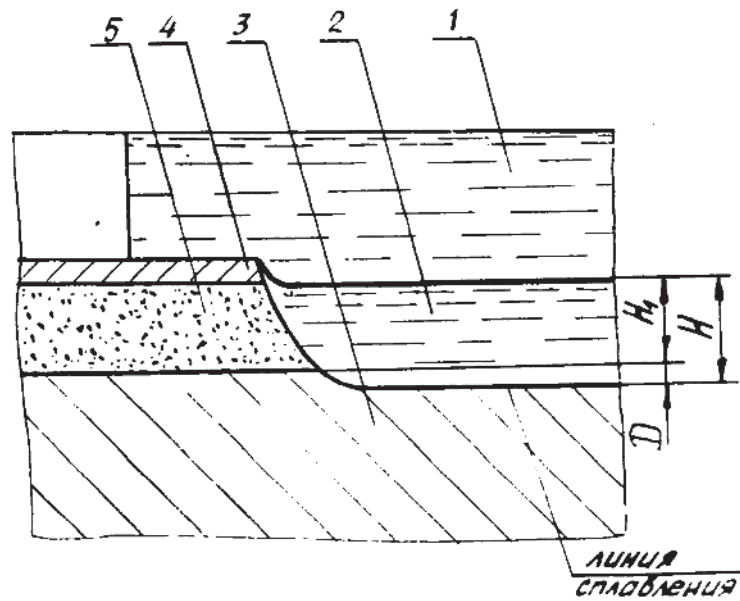


Рис. 3.13. Профиль края наплавляемого покрытия:

1 - жидкий шлак; 2 - жидкий наплавляемый металл; 3 - деталь; 4 - электродная лента; 5 - порошковый присадочный материал; H - высота (толщина) покрытия; H_1 - высота покрытия над исходной поверхностью основного металла; D - глубина проплавления основного металла

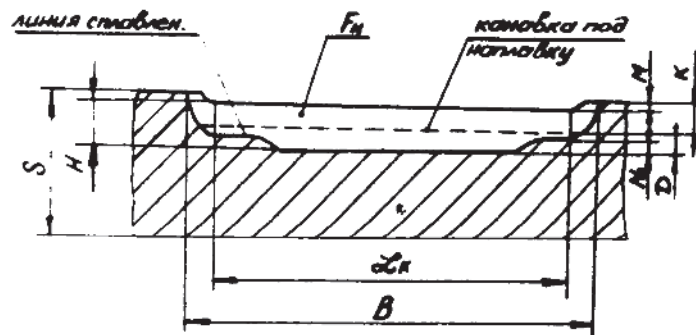


Рис. 3.14. Размеры поперечного сечения наплавленного покрытия:

B - ширина наплавки; H - высота покрытия; L_k - ширина канавки под наплавку; K - высота канавки под наплавку; D - глубина проплавления основного металла; M - толщина шлаковой корочки; F_H - площадь поперечного сечения наплавленного металла; S - толщина наплавляемой детали

наплавляемой детали S ; площадь поперечного сечения наплавляемого металла F_H .

Изучение поперечного сечения покрытия осуществлялось на макрошлифах, вырезанных из различных участков упрочняемой детали и обработанных по общим рекомендациям приготовления образцов для исследования макроструктуры сварных швов /II8,II9/. Травление производилось по *Adlez* /II9/. Каждый параметр определялся в 5 сечениях на 3-х образцах, а результаты усреднялись.

Для измерений использовались инструментальные микроскопы 24-Г 250а *CARL ZEISS IENA* и МНБ-2.

3.4. Методика исследования температурного цикла горизонтального электрошлакового упрочнения

Большое влияние на физико-механические свойства наплавленного и основного металлов в зоне термического влияния оказывает величина температуры, ее распределение, а также длительность термического цикла. Повышение температуры выше допустимой способствует растворению в металле-связке тугоплавких карбидов, снижение - вызывает несплавление матрицы с наполнителем и основным металлом.

Значение вышеуказанных параметров поможет в выборе тех режимов процесса, которые обеспечивают оптимальные свойства наносимых покрытий. Полученные на основании экспериментальных исследований данные о температуре и ее распределении в основном и наплавленном металлах, в шлаковой и металлической ваннах могут использоваться в термодинамических расчетах.

При проведении экспериментов по изучению температурных

особенностей горизонтальной электрошлаковой наплавки по слою порошкового присадочного материала с использованием неплавящегося электрода ставились следующие задачи:

1. Оценить распределение температурных полей как в объеме шлаковой ванны, так и по ее границам с атмосферой, кристаллизатором и особенно деталью.
2. Изучить температурный градиент в металлической ванне при использовании данного вида упрочнения.
3. Охарактеризовать термические циклы процессов при различных режимах наплавки.
4. Определить диапазон технологических параметров, в котором обеспечивается значительное улучшение свойств как наплавленного материала, так и металла детали.

Одним из наиболее распространенных способов определения температуры жидких металлов является калориметрирование /120, 121, 122/. С его помощью довольно точно можно определить средне-массовую температуру, теплоемкость материалов. Однако получить характеристику распределения температурных полей в упрочняемой детали этим методом невозможно, так как точность измерений зависит от полноты выливания металла в калориметр, а отбор пробы, особенно металлической, при электрошлаковой наплавке затруднен.

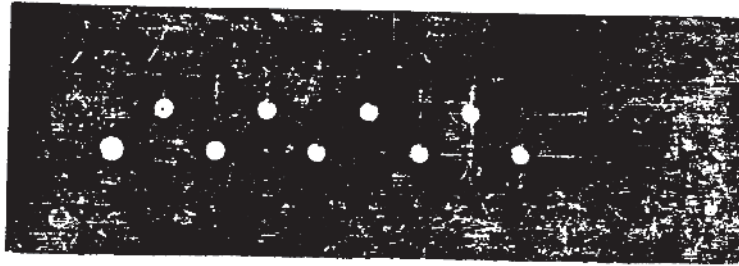
Широко известен способ яркостной пирометрии. Он позволяет исследовать распределение температуры по поверхности тела при помощи снятия на киноплёнку его поверхности и дальнейшего сравнения плотности ее почернения с записями излучения эталонной лампы /121/. Проведение экспериментов такого рода для металла, находящегося под слоем жидкого шлака, невозможно.

Наиболее перспективным, на наш взгляд, является изучение распределения температуры в металлической ванне с помощью тер-

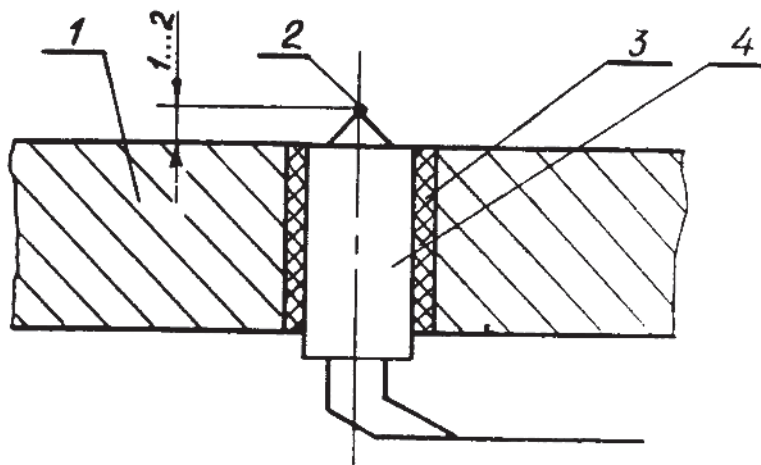
мопар /52,59,120,123/. При этом, если термопару не перемещать вслед за ванной в направлении наплавки, а оставить неподвижной относительно детали, то по мере перемещения источника нагрева с ее помощью можно фиксировать распределение температурных полей в металлической ванне вплоть до ее задней границы, а затем, после "вмораживания" термопары в покрытие, вести запись термического цикла наплавленного металла. Схема зачеканки термопар представлена на рис. 3.15,а. Рабочий спай термопары устанавливался на высоте 1...2 мм над поверхностью упрочняемой детали (рис. 3.15,б). В качестве термопар использовались вольфрам-рениевые термоэлектрические преобразователи ТВР с термоэлектродами диаметром 0,2 мм (ГОСТ 3044-77), для которых рабочий диапазон измеряемых температур равен 400...2800 К /124/. Так как среда, в которой измеряется температура, является электропроводной, то нельзя допускать непосредственного соприкосновения термопары с жидким металлом /125/. Поэтому перед измерением температуры спай термопары окунался в водную суспензию каолина. Полученная корочка на спае подвергалась сушке при температуре 250...280°C в течение часа.

Для измерения температуры в упрочняемой детали также использовались вольфрам-рениевые термопары ВР-5/20, спай которых зачеканивался на глубине 3, 5, 7 мм от поверхности наплавленной детали (рис. 3.16).

Определение температуры квазистационарного теплового поля в определенных точках шлаковой ванны осуществлялось на основании методики, изложенной в работе /113/. Температуру в каждом элементарном объеме внутри шлаковой ванны измеряли параллельно двумя способами: прямым — термопарой и косвенным — с использованием устройства для оценки удельной электропроводности



а)



б)

Рис. 3.15. Определение термограмм наносимого покрытия
 $K = 2$ мм:

- а) расположение термопар на детали;
 б) схема зачеканки термопар

жидких сред. Установка датчика и подготовка к измерению при прямом и косвенном способах аналогичны, но несколько различаются конструкцией измерительных устройств и методикой оценки температуры.

В первом случае датчиком служила та же вольфрам-рениевая термопара ВР-5/20, которая устанавливалась в герметичный алундовый чехол с наружным диаметром 11 мм и толщиной стенки 3 мм. Рабочий спай термопары упирался в торец чехла. Собранный таким образом датчик устанавливался горизонтально в неподвижной заглушке из карбонитрида бора (рис. 3.17). С целью повышения сохранности в период наведения ванны датчик смещался в отверстие заглушки до уровня ее внутренней боковой поверхности. После наведения шлаковой ванны и стабилизации процесса датчик устанавливался так, чтобы рабочий спай термопары совмещался с центром изучаемого локального объема шлаковой ванны, находившегося в плоскости ее симметрии. При полном наведении ванны измерения температуры начинали через 1,5...2 минуты.

Второй способ измерения температуры в локальном объеме шлаковой ванны основан на том, что удельная электропроводность большинства расплавленных флюсов для электрошлаковой наплавки существенно зависит от температуры. Для каждого флюса соответствующая зависимость может быть получена известными способами в лабораторных условиях /97/. Используя ее, температуру в каждой точке шлаковой ванны можно косвенно оценивать по удельной электропроводности шлака, измеряемой в этой точке разработанным устройством /113/. Устройство включает в себя датчик, источник напряжения на 100 мВ с частотой 5 кГц, цифровой вольтметр с диапазоном измеряемых напряжений до 100 мВ, универсальный амперметр с диапазоном измеряемых токов 0,03...300 мА, пе-

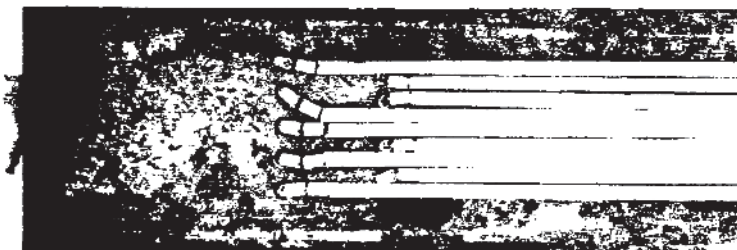


Рис. 3.16. Расположение термодпар при определении температуры в поперечном сечении наплавляемой детали

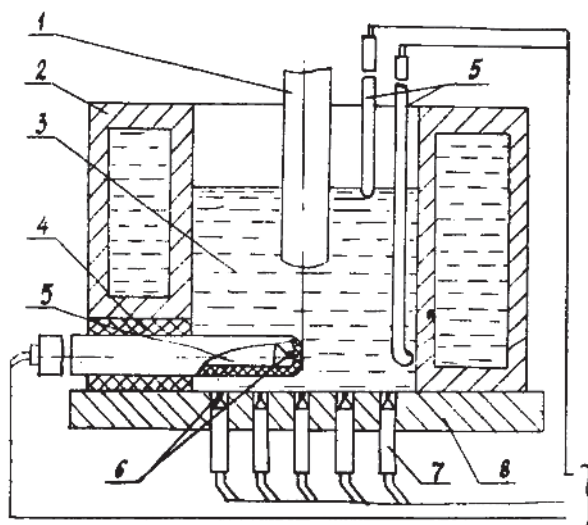


Рис. 3.17. Схема измерения температур шлаковой ванны:
 1 - электрод; 2 - кокиль-кристаллизатор; 3 - шлаковая ванна; 4 - заглушка; 5 - термопара в чехле; 6 - рабочий снай термопары; 7 - алундовая соломка; 8 - деталь

реключатель П, выключатель В (рис. 3.18).

Датчик содержит восемь электродов из вольфрамовой проволоки диаметром 0,5 мм, которые введены в алундовые трубки с наружным диаметром 3,4 мм. Трубки помещены в кварцевый цилиндр, а пространство между ними заполнено специальным алундовым порошком. На рабочем конце датчика, погружаемом в шлаковую ванну, электроды выступают из алундовых трубок на 1 мм и непосредственно контактируют с расплавленным шлаком.

Устройство работает следующим образом. Один конец измерительной цепи через переключатель П соединяется с вспомогательными (контрольными) электродами 3...8 датчика, размещенными радиально вокруг основного (токового) электрода 1, который подсоединен ко второму концу токовой цепи. Под токовыми электродами 1 и 2 понимаются электроды, через которые протекает ток от источника питания устройства по цепи: источник — токовый электрод 1 — шлаковая ванная — токовый электрод 2 — амперметр А — выключатель В — источник.

Датчик погружен в шлаковую ванну так, чтобы выступающий из трубки рабочий конец токового электрода 1 совпадал с центром изучаемой локальной области. В момент измерения ток наплавки отключали, а тумблер В устройства включали. Последовательно измеряли падения напряжения $U_3 \dots U_8$ между первым токовым электродом 1 и каждым из контрольных электродов 3...8. Дополнительно измеряли ток, протекающий через электроды 1,2. Для повышения точности измерения температуры проводились по пять раз. В промежутках между опытами шлаковая ванна подогревалась до рабочих температур. Общее время всех замеров одним датчиком не превышало 5 мин.

После статистической обработки данных параллельных измере-

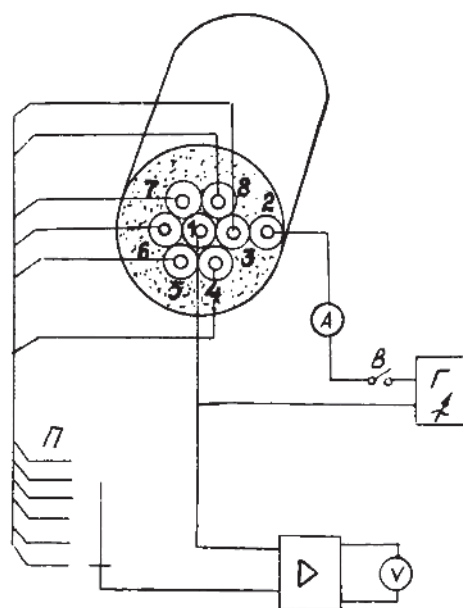


Рис.3.18. Принципиальная электрическая схема устройства для косвенного измерения температуры /ИЗ/:

1 - первый токовый электрод; 2 - второй токовый электрод; 3...8 - вспомогательные (контрольные) электроды

ний удельную электропроводность локального объема шлаковой ванны оценивали по формуле /П13/:

$$\hat{q} = \frac{K' \bar{I}'}{0,773(\bar{U}'_3 + \bar{U}'_6) + 1,322(\bar{U}'_4 + \bar{U}'_5 + \bar{U}'_7 + \bar{U}'_8)} \quad (3.3)$$

где K' – константа устройства; \bar{I}' – ток, усредненный по результатам параллельных опытов, А; $\bar{U}'_3 \dots \bar{U}'_8$ – среднее (по данным параллельных опытов) падение напряжения на участке ванны между первым токовым и соответственно одним из контрольных электродов 3...8, В.

Константу K' предварительно определяли по данным контрольных измерений. Для этого в нагревательную печь устанавливали термостойкий стакан с флюсом. Флюс равномерно прогревался до определенной температуры. В стакан опускали идентичный рассмотренному датчик устройства и проводили 6...8 измерений тока и падения напряжения $U'_3 \dots U'_8$. Удельная электропроводность равномерно прогретого шлака известна. Подставляя в формулу (3.3), вместо \hat{q} , величину q' , по найденным значениям \bar{I}' , $\bar{U}'_3 \dots \bar{U}'_8$ определяли K' /П13/.

Относительная погрешность косвенного способа измерения температуры через удельное электросопротивление с восьмиэлектродным датчиком при рабочих температурах до 1900°C составляет около 5% /П13/.

Целесообразность комплексного измерения обуславливается наличием случайных помех, влияющих на оценки температуры. Для повышения достоверности результатов оценки значения температур, полученные прямым и косвенным способами, усредняли.

Температуру приграничных зон шлаковой ванны определяли прямым методом с помощью термопар ВР-5/20. Использование для этой цели косвенного способа невозможно, так как удельная

электропроводность шлака при температурах приграничных слоев ниже 1050°C близка к нулю.

При изучении приграничного с кристаллизатором слоя шлаковой ванны использовали кварцевый чехол с изогнутой под 45° концевой частью. Его опускали в ванну и в исследуемой точке втыкали концом в образующийся на стенке кристаллизатора горнисаж (рис. 3.17).

Замер температуры в приграничной с деталью области осуществляли термопарами, выведенными в алундовых соломках через сквозные отверстия на уровень ее поверхности.

При измерении температуры на границе шлак - воздух применяли чехол, который вместе с термопарой погружали в шлак на 2...3 мм.

В каждой исследуемой точке ванны измерения проводили пять-восемь раз. Для нахождения параметров в промежуточных точках шлакового объема между экспериментальными точками использовалась линейная интерполяция по методике, изложенной в работе /113/.

Регистрация термо-ЭДС при прямом методе измерения во всех случаях осуществлялась светолучевым осциллографом Н 043.1. Градуировка термопар ВР-5/20 проводилась на основании "Положения о Международной температурной шкале" в сравнении с показаниями эталонной платинородиевой (10% Rh) - платиновой термопарой. Расчет поправок на температуру свободных концов, не равную 0°C , и на сопротивление измерительного прибора проводили по известной методике /125/.

3.5. Методика определения физико-механических характеристик металла покрытия, металлографический, микрорентгеноспектральный и рентгеноструктурный анализы

Металлографический анализ проводился с целью изучения макро- и микроструктуры наплавленного металла, зоны его сплавления с основным металлом, а также зоны термического влияния в последнем. Подготовка образцов к исследованиям проводилась по общим рекомендациям /118,119,120/. Травление для выявления макроструктуры проводилось в насыщенном растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Для исследования микроструктур использовались не травленные полированные образцы. Изучение макроструктуры производилось на микроскопе МБС-9 при увеличении 40...100 крат. Исследование микроструктуры покрытия производилось на металлографических микроскопах МММ-8, *VERTIVAL*, *REICHERT* при увеличении от 70 до 900 крат.

Одним из показателей, характеризующих физико-механические свойства покрытий, является твердость, которая оказывает существенное влияние на износостойкость упрочненного слоя.

Выбор метода определения твердости основывался на следующих факторах: величине твердости порошка, из которого в основном состоит покрытие, толщине покрытия, размерах образца.

Твердость нанесенного слоя определялась на приборе Виккерса ТП-7Р-1 с нагрузкой 10 кг (ГОСТ 2999-75). Измерения проводились с пятикратной повторяемостью.

Микротвердость структурных составляющих определяли на приборе ПМТ-3 согласно ГОСТ 9450-76 при нагрузке 0,5; 1,0; 1,5 Н. Каждую структурную составляющую измеряли не менее 3 раз при разбросах значений твердости 2...4% и по 5 раз при разбросах более 4%.

Анализ современных методов испытаний деталей на изнашивание показал, что наиболее полно имитирующим такие условия работы является способ Бринеля, который в последнее время широко применяется для оценок сравнительной износостойкости /I27, I28/. При испытании упрочненное покрытие истирается абразивом, который подается в зазор между ним и вращающимся стальным диском. Материал диска - отожженная сталь 20; диаметр диска - 100 мм (первичный), 98 мм - выбраковочный; толщина диска - 4 мм; число оборотов - 100 об/мин; усилие на образец - 100 Н; путь трения - 250 м; применяемый абразив - кварцевый песок с размером зерен 0,1...0,2 мм; расходом - $(15...16) \cdot 10^{-8}$ м³/с; твердостью - 2400 кг/мм².

После истирания каждого образца производилась правка диска и корректировка времени изнашивания. Испытанию подвергались 5 серий образцов:

1-я - из закаленной стали 45 (эталон), HRC 45;

2-я - наплавленные вертикальной электрошлаковой наплавкой неплавящимся трубной-электродом с введением порошка в шлаковую ванну через внутреннюю полость электрода;

3-я - наплавленные вертикальной электрошлаковой наплавкой неплавящимся электродом с вводом порошка в периферийные зоны шлаковой ванны;

4-я и 5-я - упрочненные по исследуемой технологии.

Расход порошка во 2-й и 3-й сериях экспериментов был одинаковым.

В качестве порошкового присадочного материала использовался порошок ФХ-800 грануляцией 0,1...1,0 мм, а для 5-й серии дополнительно - небольшие добавки бориды хрома (~9%). Величина износа определялась путем взвешивания на аналитических ве-

сах WA-2I с точностью до 0,0005 г. Перед взвешиванием образцы промывались в бензине Б-70 и подвергались сушке в сушильном шкафу.

Величина относительной износостойкости рассчитывалась по формуле:

$$\varepsilon = \frac{(\rho_3 - \rho'_3)\rho_3}{(\rho_0 - \rho'_0)\rho_0} \quad (3.5)$$

где ρ_3 - вес эталона (закаленной стали 45) до истирания; ρ'_3 - вес эталона (закаленной стали 45) после истирания; ρ_0 - вес образца с покрытием до истирания; ρ'_0 - вес образца с покрытием после истирания; ρ_3 - плотность эталона (закаленной стали 45); ρ_0 - плотность металла покрытия.

Исследование изменения относительной износостойкости по высоте покрытия проводилось послойным анализом вплоть до зоны сплавления. При этом после каждого испытания образец шлифовался на определенную высоту.

Важное влияние на структуру, следовательно, и свойства покрытия оказывает содержание упрочняющей фазы, которая в рассматриваемом случае зависит в основном от количества хрома, бора и углерода, вводимых в покрытие через порошки феррохрома и бориды хрома, а также графитовый электрод. Учитывая, что образцы для исследований изготавливались на оптимальных режимах наплавки, то количество углерода, попадающего в покрытие за счет выгорания графитового электрода, во всех случаях было практически постоянным и сравнительно невелико. Поэтому содержание углерода в слое определялось, исходя из количества его в порошке ФХ-800, вводимого в покрытие.

С целью изучения распределения легирующих элементов по толщине, ширине наплавленного слоя и в переходной зоне применяли микрорентгеноспектральный анализатор MS-46 фирмы "Камека".

Параметры исследования на MS-46 были следующие:

- диаметр электронного зонда - 2 мкм;
- скорость движения зонда - 0,6 мкм/с;
- ток электронного пучка зонда - 24 нА;
- ускоряющее напряжение - 19 кВ.

Размеры образцов для анализа - 5 x 5 x 5 мм. Исследуемая поверхность шлифовалась.

Рентгеноструктурный анализ наплавленного металла производился с целью определения фазового состава покрытия: наличия и вида карбидов и других структурных составляющих как по толщине, так и по ширине наплавленного слоя. Исследование производилось на установке ДРОН-2 с фокусировкой от плоского образца по Бреггу-Брентано в кобальтовом и медном излучениях /129/.

Предварительно, перед проведением измерения, образцы подвергались электрополированию в течение трех минут при плотности тока $5 \cdot 10^3 \text{ А/м}^2$ /130/. Состав электролита: H_2SO_4 - 19%; H_3PO_4 - 63%; H_2O - 18%. Процесс полирования осуществлялся при температуре раствора 45...55°C.

4. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ С ПОРОШКОВЫМ ПРИСАДОЧНЫМ МАТЕРИАЛОМ НА СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ

Современный уровень развития техники предъявляет высокие требования к используемым в производстве машинам и оборудованию. Работая в условиях высокой энергонагруженности, при повышенных температурах, больших скоростях и высоких давлениях, детали этих машин должны в течение всего периода эксплуатации сохранять свое функциональное назначение. Максимальному воздействию вышеперечисленных параметров чаще всего подвержены изнашивающиеся поверхности рабочих элементов дорожно-строительных, землеройных, горно-рудных и т.д. машин. При восстановлении или упрочнении качество и стабильность физико-механических свойств этих поверхностей во многом определяются тепловыми особенностями наплавки.

Процесс горизонтальной электрошлаковой наплавки протекает при высоких температурах ($T \approx T_{\text{пл}}$ порошка), поэтому повышение заданной температуры может сказываться отрицательно на качестве наносимого покрытия. Его толщина отклоняется от заданной, понижается износостойкость слоя, а также может наблюдаться значительное увеличение глубины проплавления упрочняемой детали. Следовательно, стабилизация температурного режима на протяжении всего процесса наплавки является немаловажной задачей.

4.1. Теоретический расчет термического цикла упрочняемой детали

Выбор оптимального температурного режима наплавки зависит от таких параметров процесса, как его скорость, температура шлаковой ванны (мощность тепловых источников), толщина наноси-

мого слоя, размеры детали и т.д.

В качестве модели упрочняемой детали применялся прямоугольный параллелепипед, ширина которого равна $2l_1$, длина l_2 , высота l_3 . По верхней поверхности параллелепипеда, которая упрочняется, по слою порошка, прижатого матричной лентой со скоростью V_H , движется кокиль-кристаллизатор. Пусть он в сечении плоскостью, параллельной верхней поверхности детали, имеет форму прямоугольника (рис. 4.1). Нижнюю и боковые поверхности детали примем теплоизолированными. При постановке тепловой задачи будем считать, что на верхней поверхности детали действуют два тепловых источника: один из них подводит тепло к детали q_1 с шириной $2b_1$ и длиной b_2 (в области шлаковой ванны), другой отводит тепло q_2 с габаритными размерами $2d_1 \times d_2$ (площадь основания кокиля-кристаллизатора). Оба эти источника перемещаются с одной и той же скоростью V_H . Значения теплофизических характеристик процесса будем считать постоянными. Температурное поле в данном случае пространственное, и поэтому будем рассматривать трехмерный случай, а также учтем, что распределение температуры не является стационарным. Температуру детали в начальный момент считаем равной 0°C .

Математическая постановка задачи теплопроводности для данного случая имеет вид* :

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right) \quad (4.1)$$

$$0 < x < l_1; \quad 0 < y < l_2; \quad 0 < z < l_3; \quad t > 0$$

При краевых условиях

$$T(x, y, z, t) \Big|_{t=0} = 0 \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} \Big|_{x=l_1} = 0 \quad (4.3)$$

* В постановке задачи теплопроводности принимали участие к.ф.-м.н. Жорник А.И. и Кихтенко С.Н.

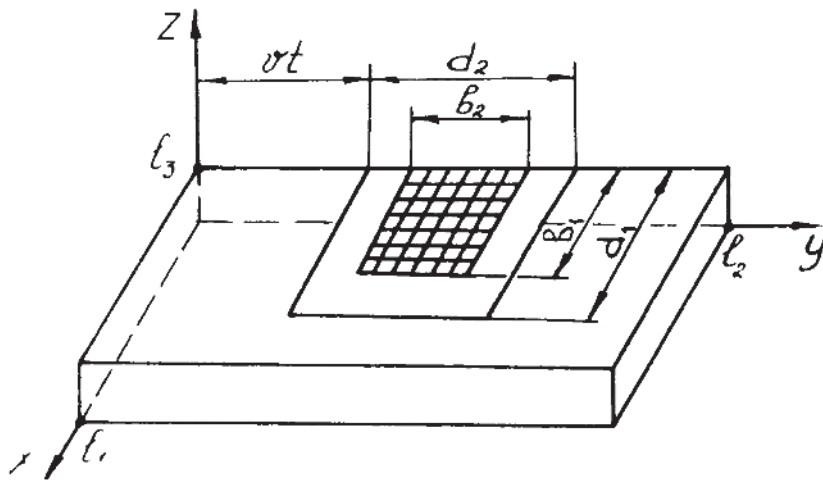


Рис. 4.1. Схема расположения тепловых источников при горизонтальном электрошлаковом упрочнении

$$\left. \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} \right|_{y=l_2} = 0 \quad (4.4)$$

$$\left. \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad (4.5)$$

Для задания граничных условий на поверхности $z=l_3$ используем функцию Хевисайда $\chi(U) / |3|$, которая задается следующим образом:

$$\chi(U) = \begin{cases} 0, & U < 0 \\ 1, & U > 0 \end{cases} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} \right|_{z=l_3} = & \frac{q_2}{\lambda} \left\{ \chi \left[y - \left(v \cdot t + \frac{d_2 - b_2}{2} \right) \right] - \right. \\ & \left. - \chi \left[y - \left(v \cdot t + \frac{d_2 + b_2}{2} \right) \right] \right\} \left[\chi(x) - \chi(x - b_1) \right] - \\ & \frac{q_1}{\lambda} \left\{ \chi(y - v \cdot t) - \chi \left[y - (v \cdot t + d_2) \right] \right\} \left[\chi(x) - \chi(x - d_1) \right] \end{aligned} \quad (4.7)$$

где $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ - коэффициент температуропроводности;

λ - коэффициент теплопроводности;

ρ - плотность;

c - удельная теплоемкость;

$v = v_H$ - скорость движения источников в направлении, параллельном оси ОУ.

$$q_1 = q'_1 + q_2 \quad (4.8)$$

Расчет тепловых потоков q_1 и q_2 приведен в приложении 6.

Так как задача носит симметричный характер относительно плоскости $X = 0$, то вместо величин $2l_1, 2b_1, 2d_1$, мы берем только l_1, b_1 и d_1 .

Для получения большей общности решения перейдем к безразмерным координатам, учитывая, что

$$x_0 = \frac{x}{l_2}; \quad y_0 = \frac{y}{l_2}; \quad z_0 = \frac{z}{l_2}; \quad Fo = \frac{at}{l_2^2}; \quad d_{0i} = \frac{d_i}{2};$$

$$b_{0i} = \frac{b_i}{l_2}; \quad i = 1, 2, \text{ а также } v_0 = \frac{vl_2}{a}$$

Тогда условие задачи (4.1)-(4.7) запишется в виде

$$\frac{\partial T}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T}{\partial x_0^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y_0^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z_0^2} \quad (4.9)$$

$$0 < x_0 < l_{01}; \quad 0 < y_0 < 1; \quad 0 < z_0 < l_{03}; \quad Fo > 0$$

$$T(x_0, y_0, z_0, Fo) \Big|_{Fo=0} = 0 \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x_0} \Big|_{x_0=0} = \frac{\partial T}{\partial x_0} \Big|_{x_0=l_{01}} = 0 \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y_0} \Big|_{y_0=0} = \frac{\partial T}{\partial y_0} \Big|_{y_0=1} = 0 \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z_0} \Big|_{z_0=0} = 0 \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z_0} \Big|_{z_0=l_{03}} = \frac{q_2 l_2}{\lambda} \left\{ \chi \left[y_0 - \left(v_0 Fo + \frac{d_{02} - b_{02}}{2} \right) \right] - \right.$$

$$\left. - \chi \left[y_0 - \left(v_0 Fo + \frac{d_{02} + b_{02}}{2} \right) \right] \right\} \left[\chi(x_0) - \chi(x_0 - b_{01}) \right] - \quad (4.14)$$

$$- \frac{q_1 l_2}{\lambda} \left\{ \chi(y_0 - v_0 Fo) - \chi \left[y_0 - (v_0 Fo + d_{02}) \right] \right\} \left[\chi(x_0) - \chi(x_0 - d_{01}) \right]$$

Решение задачи (4.9)-(4.14) осуществляем, применяя интегральное преобразование Фурье-Лапласа вида [132]:

$$\bar{T}(\alpha_n, \beta_m, \gamma_k, p) = \int_0^{l_{01}} \cos(\alpha_n x_0) \int_0^1 \cos(\beta_m y_0) \int_0^{l_{03}} \cos(\gamma_k z_0) \times$$

$$\times \int_0^\infty T(x_0, y_0, z_0, Fo) \exp(-pFo) dFo dx_0 dy_0 dz_0 \quad (4.15)$$

где $\alpha_n = \frac{n\pi}{l_{01}} \quad n=0, 1, 2, 3, \dots$

$$\beta_m = m\pi \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$\gamma_k = \frac{k\pi}{l_{03}} \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Уравнение (4.9) приводится к виду

$$(-1)^k \frac{\partial \bar{T}(\alpha_n, \beta_m, z_0, \rho)}{\partial z_0} \Big|_{z_0=l_{03}} - (\alpha_n^2 + \beta_m^2 + \gamma_k^2) \times \bar{T}(\alpha_n, \beta_m, \gamma_k, \rho) = \rho \bar{T}(\alpha_n, \beta_m, \gamma_k, \rho) \quad (4.16)$$

Решая уравнение (4.16), получим

$$\bar{T}(\alpha_n, \beta_m, \gamma_k, \rho) = \frac{(-1)^k}{\alpha_n^2 + \beta_m^2 + \gamma_k^2 + \rho} \times \frac{\partial \bar{T}(\alpha_n, \beta_m, z_0, \rho)}{\partial z_0} \Big|_{z_0=l_{03}} \quad (4.17)$$

Для перехода от изображения функции $\bar{T}(\alpha_n, \beta_m, \gamma_k, \rho)$ к ее оригиналу $T(x_0, y_0, z_0, F_0)$ воспользуемся формулами приращения для преобразований Лапласа и Фурье.

Обратное преобразование Лапласа /I33/:

$$s \xrightarrow{+a} \exp(-a\tau) \quad (4.18)$$

$$F_1(s)F_2(s) = \int_0^z f_1(z-\theta)f_2(\theta)d\theta \quad (4.19)$$

Обратное преобразование Фурье /I33/

$$f(x) = \frac{\bar{f}(0)}{l} + \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \bar{f}(n) \cos\left(\frac{n\pi}{l}x\right) \quad (4.20)$$

Тогда решение краевой задачи (4.1)-(4.7) запишется в виде

$$\begin{aligned} T(x_0, y_0, z_0, F_0) = & \frac{l_2}{l_{01}l_{02}} \left\{ \frac{1}{\lambda} (q_2 b_{01} b_{02} - q_1 d_{01} d_{02}) [F_0 + \right. \\ & + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \cos(\gamma_k z_0) \frac{(-1)^k}{\gamma_k^2} (1 - \exp(-\gamma_k^2 F_0))] + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\beta_m y_0) \times \\ & \times \left(\frac{2q_2 b_{01}}{\lambda \beta_m} K(\sigma_m) \sin\left(\beta_m \frac{b_{02}}{2}\right) \{ A(\sigma_m) N(\sigma_m, F_0) + \right. \\ & + B(\sigma_m) \sin(\beta_m v_0 F_0) \} - \frac{q_1 d_{01}}{\lambda \beta_m} K(\sigma_m) \{ D(\sigma_m) \sin(\beta_m v_0 F_0) - \\ & \left. \left. - C(\sigma_m) N(\sigma_m, F_0) \} \right\} + 4 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \cos(\beta_m y_0) \cos(\gamma_k z_0) \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \frac{(-1)^K}{\lambda \beta_m} K(\sigma_{m,\kappa}) (2q_2 b_{01} \sin(\beta_m \frac{b_{02}}{2}) \{ A(\sigma_{m,\kappa}) N(\sigma_{m,\kappa}, F_0) + \\
& + B(\sigma_{m,\kappa}) \sin(\beta_m v_0 F_0) \} - q_1 d_{01} \{ D(\sigma_{m,\kappa}) \sin(\beta_m v_0 F_0) - \\
& - C(\sigma_{m,\kappa}) N(\sigma_{m,\kappa}, F_0) \}) - (2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\alpha_n x_0) \frac{1}{\lambda \alpha_n^3} (1 - \exp(-\alpha_n^2 F_0)) + \\
& + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} \cos(\alpha_n x_0) \cos(\gamma_\kappa z_0) \frac{(-1)^K}{\lambda \alpha_n (\sigma_{n,\kappa})} (1 - \exp(-\sigma_{n,\kappa} F_0))) \times \\
& \times [q_2 b_{02} \sin(\alpha_n b_{01}) - q_1 d_{02} \sin(\alpha_n d_{01})] + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\alpha_n x_0) \times \\
& \times \cos(\beta_m y_0) \frac{1}{\lambda \beta_m \alpha_n} K(\sigma_{n,m}) (2q_2 \sin(\alpha_n b_{01}) \sin(\beta_m \frac{b_{02}}{2}) \times \\
& \times \{ A(\sigma_{n,m}) N(\sigma_{n,m}, F_0) + B(\sigma_{n,m}) \sin(\beta_m v_0 F_0) \} - q_1 \sin(\alpha_n d_{01}) \times \\
& \times \{ D(\sigma_{n,m}) \sin(\beta_m v_0 F_0) - C(\sigma_{n,m}) N(\sigma_{n,m}, F_0) \}) + \\
& + 8 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} \cos(\alpha_n x_0) \cos(\beta_m y_0) \cos(\gamma_\kappa z_0) \frac{(-1)^K}{\lambda \alpha_n \beta_m} K(\sigma_{n,m,\kappa}) \times \\
& \times (2q_2 \sin(\alpha_n b_{01}) \sin(\beta_m \frac{b_{02}}{2}) \{ A(\sigma_{n,m,\kappa}) N(\sigma_{n,m,\kappa}, F_0) + \\
& + B(\sigma_{n,m,\kappa}) \sin(\beta_m v_0 F_0) \} - q_1 \sin(\alpha_n d_{01}) \{ D(\sigma_{n,m,\kappa}) \times \\
& \times \sin(\beta_m v_0 F_0) - C(\sigma_{n,m,\kappa}) N(\sigma_{n,m,\kappa}, F_0) \}) \} \quad , \tag{4.21}
\end{aligned}$$

$$\text{где } A(\sigma) = \sigma \cos(\beta_m \frac{d_{02}}{2}) + \beta_m v_0 \sin(\beta_m \frac{d_{02}}{2});$$

$$B(\sigma) = \beta_m v_0 \cos(\beta_m \frac{d_{02}}{2}) - \sigma \sin(\beta_m \frac{d_{02}}{2});$$

$$C(\sigma) = \beta_m v_0 (\cos(\beta_m d_{02}) - 1) - \sigma \sin(\beta_m d_{02});$$

$$D(\sigma) = \sigma (\cos(\beta_m d_{02}) - 1) + \beta_m v_0 \sin(\beta_m d_{02});$$

$$K(\sigma) = \frac{1}{\sigma^2 + (\beta_m v_0)^2}$$

$$N(\sigma) = \cos(\beta_m v_0 F_0) - \exp(-\sigma F_0);$$

$$\sigma_m = \beta_m^2; \quad \sigma_{n,m} = \alpha_n^2 + \beta_m^2; \quad \sigma_{n,\kappa} = \alpha_n^2 + \gamma_\kappa^2;$$

$$\sigma_{m,\kappa} = \beta_m^2 + \gamma_\kappa^2; \quad \sigma_{n,m,\kappa} = \alpha_n^2 + \beta_m^2 + \gamma_\kappa^2.$$

Расчет термического цикла в покрытии и основном металле по уравнению (4.21) проводился с использованием специальной ЭВМ (приложение 7).

Программа написана на языке ФОРТРАН IV и выполнена на ЭВМ М-6000 под управлением дисковой операционной системы реального времени (ДОСРВ). Численные расчеты были проведены для случаев нанесения покрытий толщиной 1, 2, 3, 5 мм с твердосплавными порошками ФХ-800 и C_2B_2 на пластины, выполненные из стали ст.3, имеющие размеры $2l_1 = 120$ мм, $l_2 = 360$ мм, $l_3 = 8, 10, 12, 15$ мм для различных точек на упрочняемой поверхности. Примеры расчета по этой программе представлены в приложении 8. На основании расчетов построен график зависимости температуры от времени наплавки (рис. 4.2, кривые 1, 2, 3, 4). Пик на кривой температуры соответствует моменту прохождения шлаковой ванны над данной точкой. Соединяя вершины пиков, получим изменение температуры наносимого слоя, соответствующее данной скорости (рис. 4.3, кривые 1, 2, 3). При этом увеличение скорости наплавки снижает градиент температуры $\Delta T = T_K - T_H$ (T_H , T_K - соответственно температура металлической ванны на начальном и заключительном этапах упрочнения).

4.2. Определение оптимальных технологических параметров процесса горизонтального электрошлакового упрочнения

При электрошлаковом процессе наибольшая плотность тока наблюдается у торца электрода и наименьшая - у свободной поверхности металлической ванны /134/. Поэтому наибольшая объемная плотность теплоты выделяется в шлаковой ванне вблизи торца электрода, меньшая - вблизи металлической ванны и минимальная -

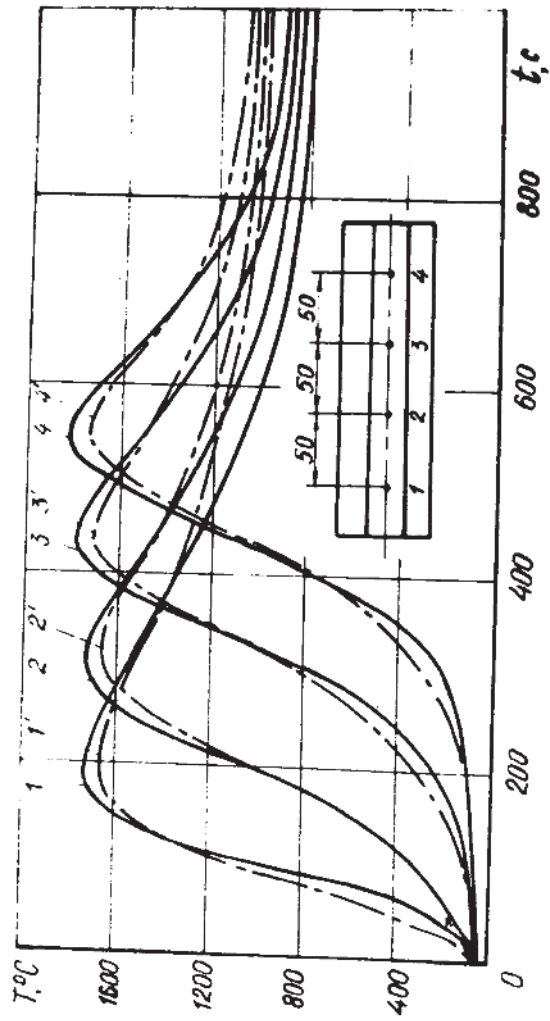


Рис. 4.2. Термограмма наплавленного металла ($U = 30 \text{ В}$, $V_H = 1,4 \text{ м/ч}$, $h_s = 30 \text{ мм}$) при высоте покрытия $H = 2 \text{ мм}$:

1, 2, 3, 4 - расчетные данные; 1', 2', 3', 4' - экспериментальные данные

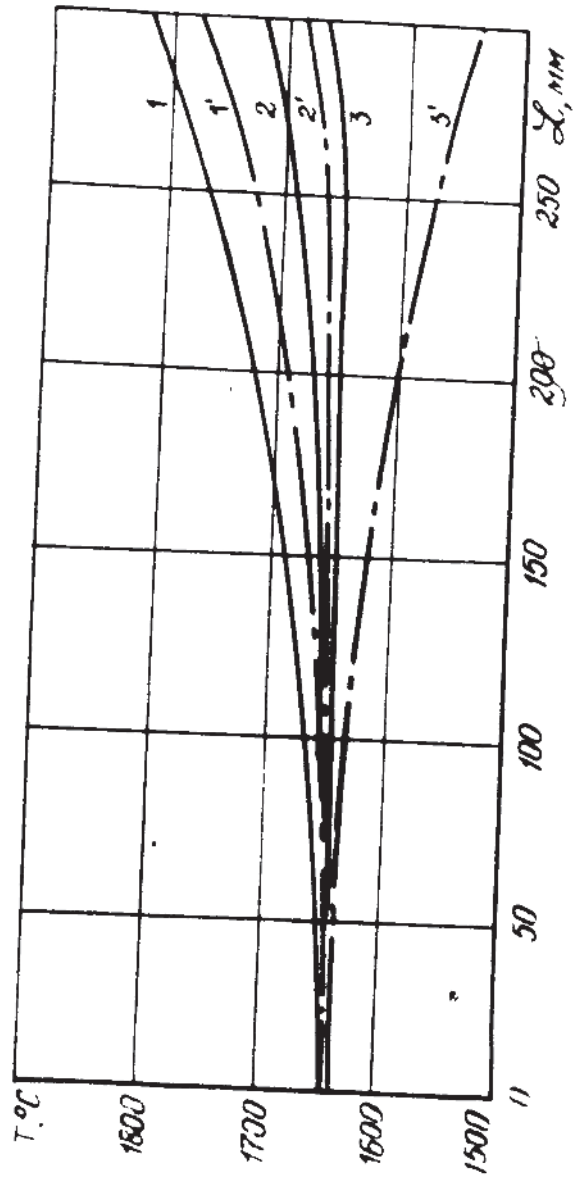


Рис. 4.3. Распределение температуры в покрытии по длине :
 1, 1' - $V_H = 1$ м/ч; 2, 2' - $V_H = 1,4$ м/ч; 3, 3' - $V_H = 1,8$ м/ч;
 - - - - - экспериментальные данные; ———— - расчетные данные

вблизи стенок кокиля-кристаллизатора. Следовательно, у торца электрода температура шлака должна быть наибольшей /117/. Она максимальна на некоторой глубине, близкой к глубине погружения электрода в ванну /29/.

Температура шлаковой ванны в приэлектродных областях во многом определяется родом и полярностью сварочного тока I . С использованием постоянного тока выделение теплоты у границы между анодом и шлаком больше, чем между катодом и шлаком /135/ (см. §3.3). Этому способствует работа выхода электрона $U_{вых.}$, которая на аноде увеличивает выделение тепловой энергии, а на катоде уменьшает его /29/. Шлак в разрядном промежутке равномерно нагревается до высокой температуры /36/.

Проведенные эксперименты позволили выбрать оптимальное расстояние от поверхности металлической ванны до торца электрода - 9...11 мм (рис. 4.4).

Так же, как и в шлаковой ванне, наибольшая температура металлической ванны наблюдается в центре. В поперечном сечении температура падает при приближении к периферии. При подходе металлической ванны к задней стенке кокиля-кристаллизатора, наряду с жидкой фазой, появляется некоторое количество твердой фазы наплавленного металла. После завершения кристаллизации распространение тепла определяется теплопроводностью, а распространение температур в твердом металле отвечает закономерностям, соответствующим положениям теории распределения тепла при сварке Н.Н. Рыкалина /120/.

Результаты измерений распределения температурного поля шлаковой ванны показаны на рис. 4.5.

Высокий нагрев участков шлаковой ванны (до 2000°C) наблюдается вблизи графитового электрода (катада). Область повышен-

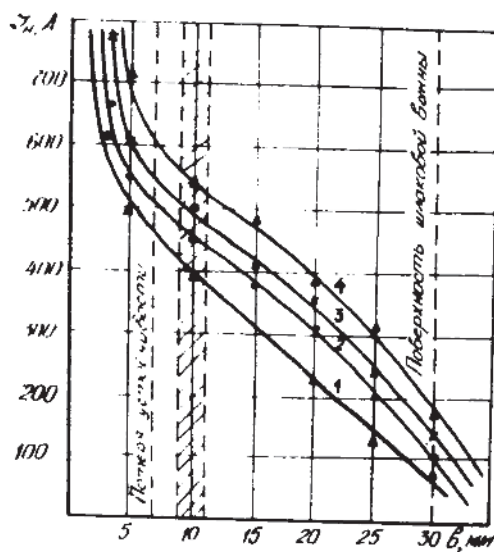



Рис. 4.4. Экспериментальная зависимость величины тока от зазора между электродом и упрочняемой деталью

( - зона оптимального зазора): 1 - $U = 28$ В; 2 - $U = 30$ В; 3 - $U = 32$ В; 4 - $U = 35$ В

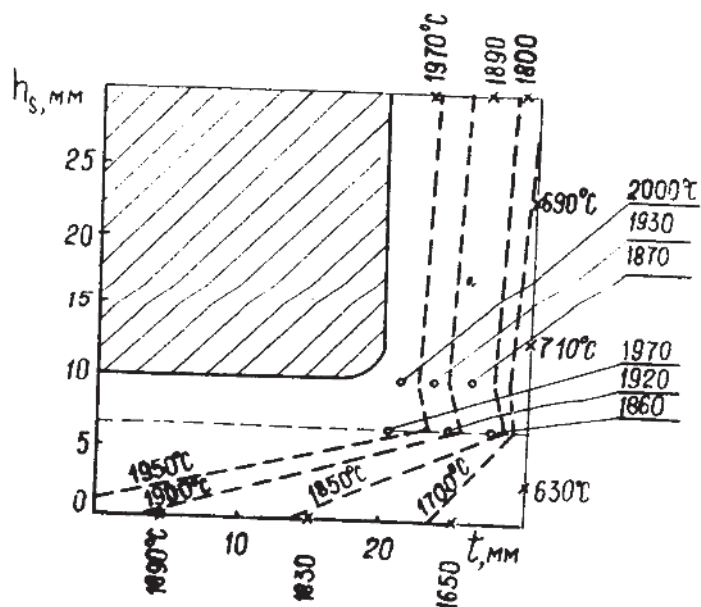


Рис. 4.5. Температурное поле шлаковой ванны:

○ - температура внутри шлаковой ванны;
 × - температура в приграничной области
 шлаковой ванны;
 - - - - - изотермы

ных температур расширяется до конца электрода не глубже 3...4 мм от его среза и ниже вновь сужается. Сужение высокотемпературной области ванны, находящейся под электродом, подтверждает правильность выбора расстояния электрода до поверхности металлической ванны. Так как подача порошкового присадочного материала в кокиль осуществляется снизу, то исходя из сказанного, это расстояние должно быть как можно меньше (9...11 мм), но не нарушая при этом устойчивости электрошлакового процесса (возникновение электрической дуги). Увеличение последнего приводит к уменьшению тепловложения в наплавляемый и основной металлы и в конечном счете - к появлению несплавлений.

Разработанный способ горизонтальной электрошлаковой наплавки, в основном, предусматривает широкослойную наплавку за один проход, что создает благоприятный термический цикл для наносимого и основного металла. Подобный цикл в изученном диапазоне параметров режима обеспечивается при длине наплавляемых участков от 100 до 600 мм и ширине 50...60 мм.

Экспериментальные исследования температурных полей в детали и покрытии проводились по методике, изложенной в разделе 3.4.

Были записаны термические циклы различных точек покрытия и детали. На рис. 4.2 представлены экспериментальные зависимости (1', 2', 3', 4') температуры от времени. Как видно из графика, расчетные данные удовлетворительно совпадают в пределах 20% с экспериментальными (рис. 4.2). Некоторое расхождение расчетных и опытных данных на определенных участках упрочняемой детали можно объяснить теплоотводом в реальных условиях наплавки, а также погрешностями измерительной системы.

Установлено, что значение температуры металлической ванны по мере перемещения кокиля несколько увеличивается (до 50...100°C),

что объясняется накоплением тепла у торца детали. Это вызывает перегрев наплавляемого материала, ухудшение его физико-механических свойств за счет более интенсивного растворения упрочняющей фазы. Поэтому для повышения качества покрытия необходимо разработать методы стабилизации температуры металлической ванны. Исследования показали, что стабилизировать температурный режим можно уменьшением напряжения, выбором оптимального значения скорости наплавки или изменением расстояния от нижнего торца электрода до поверхности металлической ванны.

Оптимальная скорость наплавки при проведении указанных выше экспериментов равна 1,4 м/ч (рис. 4.3). Уменьшение скорости наплавки до 1 м/ч (кривая 1) вызывает значительный перегрев наплавляемого металла по мере движения детали, что неблагоприятно сказывается на физико-механических свойствах покрытия. С увеличением скорости наплавки температурный градиент уменьшается и при некотором значении $V_H \geq 1,8$ м/ч приобретает отрицательное значение (кривая 3). Это определяется особенностями горизонтальной электрошлаковой наплавки по слою порошка и приводит к появлению несплавлений.

Проведенные исследования распределения температуры по объему основного металла детали позволили установить, что температурное поле в поперечном сечении характеризуется существенной неоднородностью у поверхности наплавленного слоя (рис. 4.6).

Такое распределение объясняется интенсивным теплоотводом в кристаллизатор, который ограничивает шлаковую и металлическую ванны. Однако по мере удаления от поверхности покрытия градиент температуры быстро уменьшается, и на расстоянии 11 мм от этой же поверхности поле практически равномерно. Градиент температур в различных поперечных сечениях упрочняемой по длине детали со-

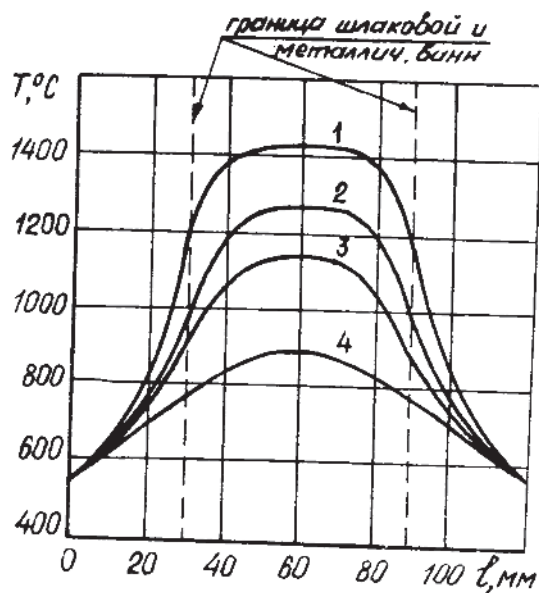


Рис. 4.6. Распределение температуры в поперечном сечении детали ($U = 30$ В, $V_H = 1,4$ м/ч, $d = 30$ мм) на расстоянии от зоны сплавления:

I - 2 мм; 2 - 3 мм; 3 - 5 мм; 4 - II мм;

----- - граница шлаковой ванны

храняется постоянным. Изменение его не превышает 2...3%.

За критерий оптимального теплового режима процесса принята степень сплавления наносимого покрытия с основным металлом, которую можно оценить коэффициентом сплавления K'' , представляющим отношение длины участка сплавления к общей ширине покрытия в поперечном сечении.

На основании предварительных экспериментов установлено, что при горизонтальной электрошлаковой наплавке по слою порошкового присадочного материала допускается изменение K'' в пределах 0,92...1,00. Это оптимальное значение K'' обеспечивается при глубине проплавления детали D 0,75...1,5 мм (рис. 4.7).

Глубина проплавления основного металла D и, следовательно, коэффициент сплавления K'' зависят от температуры расплавленного металла, которая в свою очередь зависит от эффективной тепловой мощности процесса Q_5 (см. приложение 6). На рис. 4.8 показана зависимость K'' и D от температуры в зоне сплавления для различных соотношений порошков ФХ-800 и C_2B_2 . Оптимальные значения K'' и D обеспечиваются при следующей температуре в зоне сплавления покрытия с основным металлом: 1600...1650°C (25% ФХ-800); 1620...1670°C (50% ФХ-800); 1660...1710°C (50% ФХ-800 + 3% C_2B_2); 1690...1740°C (50% ФХ-800 + 9% C_2B_2). Температурный интервал во всех случаях составляет 50°C.

На основании расчета температурных полей плоской детали при горизонтальной электрошлаковой наплавке по слою порошкового присадочного материала с использованием стальной матричной ленты построена диаграмма для выбора технологических режимов, обеспечивающих получение заданного температурного градиента (рис. 4.9).

Определение технологических режимов на основании диаграммы производится следующим образом. По составу порошкового приса-

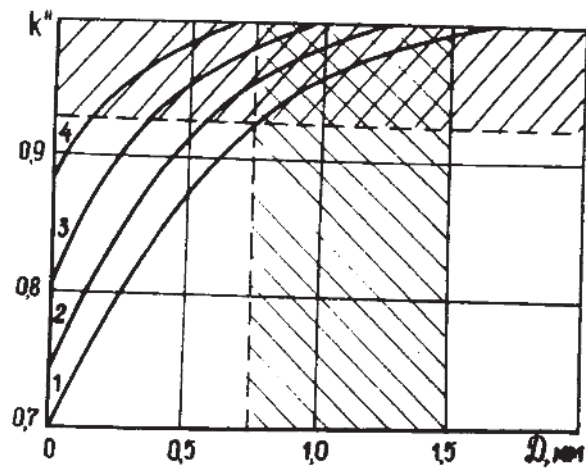


Рис. 4.7. Зависимость коэффициента сплавления от глубины проплавления основного металла D при различном U :
 1 - 28 В; 2 - 30 В; 3 - 32 В; 4 - 35 В

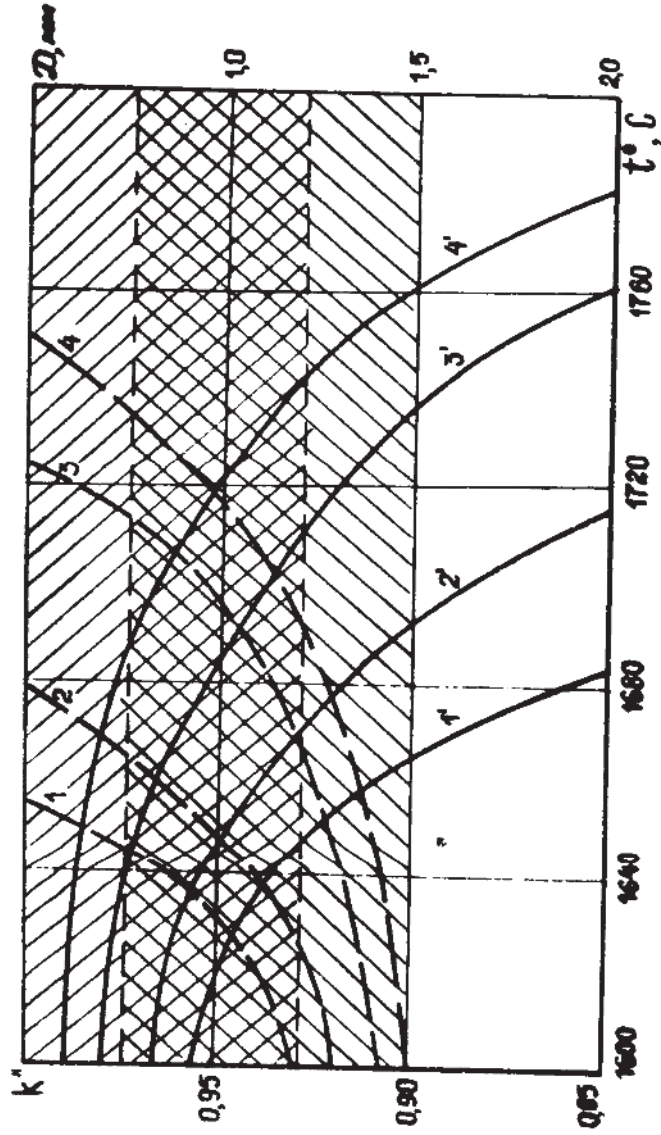


Рис. 4.8. Зависимость глубины проплавления основного металла D и коэффициента сплавления K' от температуры в зоне сплавления для различных наплавляемых материалов:

1 - сталь + 25% ФХ-800; 2 - сталь + 50% ФХ-800; 3 - сталь + 50% ФХ-800 + 3% С2В2; 4 - сталь + 50% ФХ-800 + 9% С2В2

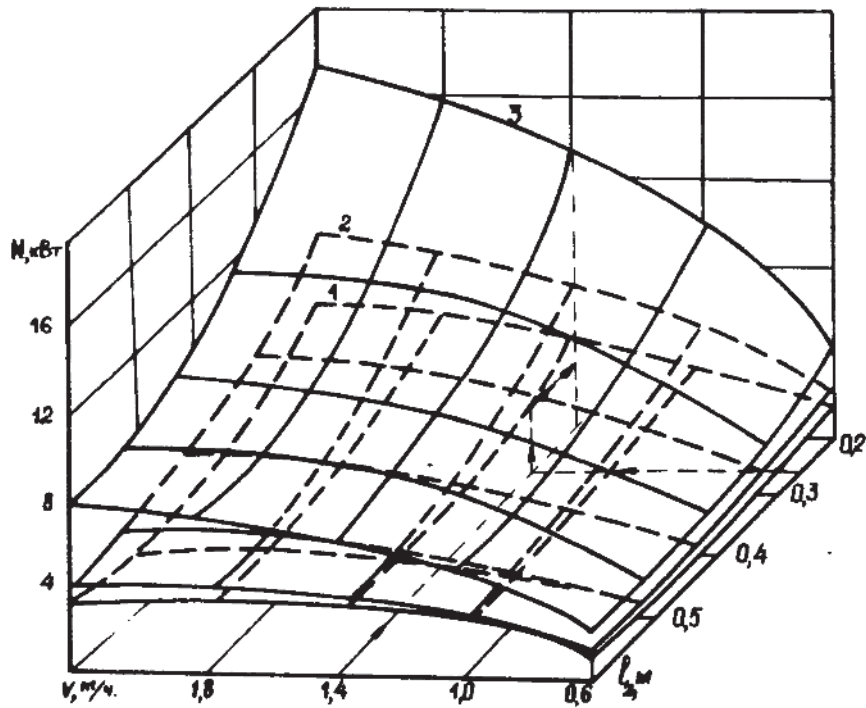


Рис. 4.9. Диаграмма определения параметров электрошлакового упрочнения, обеспечивающих получение заданного перепада температуры по длине детали:

1 - $\Delta T = 50^{\circ}\text{C}$; 2 - $\Delta T = 80^{\circ}\text{C}$; 3 - $\Delta T = 120^{\circ}\text{C}$;

— — — ключ

дочного материала определяется диапазон оптимальных температур в зоне сплавления (см. рис. 4.8). Затем по заданной длине детали l_2 и скорости наплавки V_H по диаграмме (см. рис. 4.9) находится тепловая мощность процесса. Далее, задаваясь напряжением U , вычисляем значение тока $I = N/U$, после чего с помощью графика $I-\delta$ (см. рис. 4.4) находим величину зазора между электродом и поверхностью наплавляемой детали.

Учитывая ранее выведенные зависимости, разработана методика определения оптимальных технологических параметров процесса, укрупненная блок-схема которой представлена на рис. 4.10.

Как отмечено выше, основным параметром, управляющим процессом плавления при распределении энергии в условиях электрошлаковой наплавки, является тепловой поток, передаваемый от шлаковой ванны в ванну металлическую. Однако при одном и том же значении теплового потока геометрические параметры наплавляемых покрытий и зоны проплавления основного металла могут быть весьма различными в силу влияния ряда факторов на теплоперенос от шлаковой ванны к основному металлу.

Для оценки влияния этих факторов при горизонтальном электрошлаковом упрочнении были построены математические модели (приложение 9) с использованием методики математического планирования двухфакторного эксперимента /136,137/ следующих зависимостей:

$$K'' = f_1(N, D) \quad (4.22)$$

$$K'' = f_2(C, \delta) \quad (4.23)$$

$$D = f_3(C, \delta) \quad (4.24)$$

где K'' - коэффициент сплавления;
 N - мощность источника тепла;

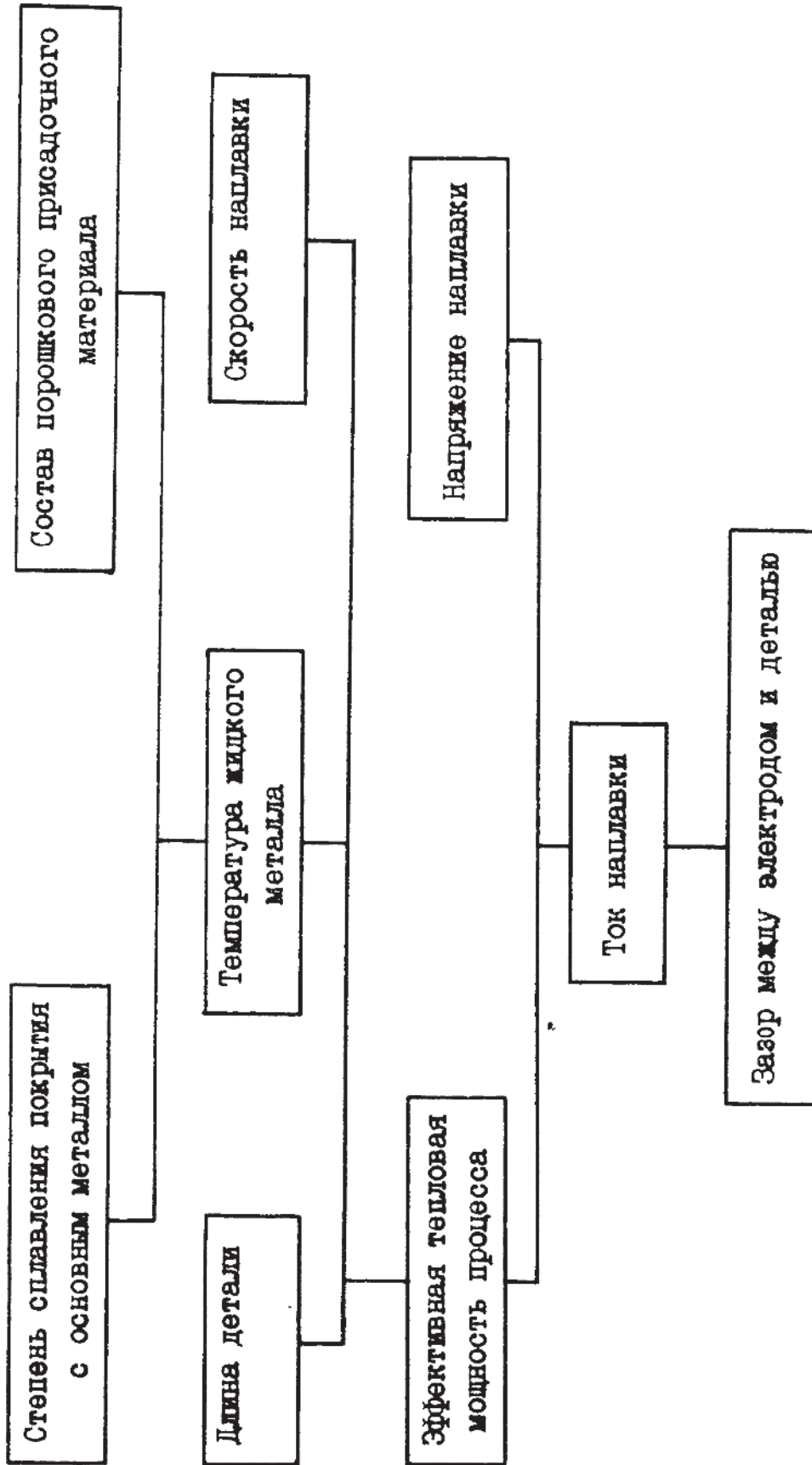


Рис. 4.10. Блок-схема определения оптимальных технологических параметров процесса горизонтального электрошлакового литья

D - глубина проплавления основного металла;
 C - концентрация бора в покрытии;
 $\vartheta = \frac{T^{\circ} + 273^{\circ}}{1000^{\circ}}$ - относительная температура в зоне сплавления.

Для построения модели (4.22) использовались экспериментальные данные, представленные на рис. 4.7, а для моделей (4.23) и (4.24) - данные рис. 4.8. Интервалы варьирования уровней равны: мощность процесса наплавки $N = 11 \dots 16$ кВт; глубина проплавления основного металла $D = 0,5 \dots 1,5$ мм; концентрация бора в покрытии $C = 0,0033 \dots 0,03$; температура в зоне сплавления $T^{\circ} = 1600 \dots 1720^{\circ}\text{C}$.

На основании полученных математических моделей для геометрических факторов K'' и D построены номограммы (рис. П.9.1, П.9.2, П.9.3), посредством которых можно варьировать режимы наплавки, обеспечивающие качественные геометрические и прочностные характеристики тонкослойных покрытий.

4.3. Влияние технологических режимов на структуру и физико-механические свойства покрытий

Физико-механические и эксплуатационные характеристики металла, полученного при горизонтальной электрошлаковой наплавке, в значительной степени определяются типом используемого материала и технологическими параметрами процесса. В частности, для ферросплавных материалов значительное влияние на свойства получаемого покрытия оказывает соотношение упрочняющей фазы (карбидной и боридной) и матричного металла. Такие материалы могут обеспечить концентрацию основного легирующего компонента (хрома) в наплавленном слое до 30...40% и более [138,139].

Важнейшей характеристикой покрытия, во многом определяющей его физико-механические и эксплуатационные свойства, является

микроструктура. Металлографические исследования, проведенные по методике, изложенной в § 3,5, позволили установить, что наплавленный слой по высоте состоит из пяти основных зон /I40, I4I/: заэвтектической, эвтектической, доэвтектической, граничной и диффузионной (рис. 4.II).

Основной структурной зоной наплавленного покрытия является заэвтектическая, которая составляет 70...80% общей толщины слоя и состоит из первичных карбидов хрома, в основном правильной шестигранной формы, размерами 20...350 мкм, микротвердостью 16000...18600 Н/мм² в ледебуритной эвтектике (твердость HV 5600...6600 Н/мм²) и небольшого количества остаточного аустенита. Причем, в верхней части этой зоны в связи с более интенсивным теплоотводом в кокиль-кристаллизатор размеры карбидов значительно меньше (20...130 мкм), чем в средней и нижней частях (100...350 мкм).

Эвтектическая зона представляет ледебуритную эвтектику со средним межпластинчатым расстоянием 1...2 мкм и составляет 5...10% от общей высоты покрытия.

Доэвтектическая зона характеризуется наличием дендритов твердого раствора (легированного аустенита) с осями I-го и 2-го порядков, мартенсита игольчатой формы и карбидной эвтектики. Высота - 10...15% от общей высоты.

Граничная зона - тонкая полоска твердого раствора (легированного аустенита). Толщина полоски - 10...25 мкм (рис. 4.I2).

Диффузионная зона имеет структуру тонкопластинчатого перлита и образуется вследствие диффузии углерода из покрытия в упрочняемую деталь.

Анализ структурных составляющих каждой зоны позволяет объяснить распределение твердости покрытия по его толщине (рис. 4.I3, кривые I и 2). У поверхности твердость максимальная (HV 7900...



Рис. 4.II. Микроструктура покрытия, полученного на основе порошкового присадочного материала ФХ-800 (X120)

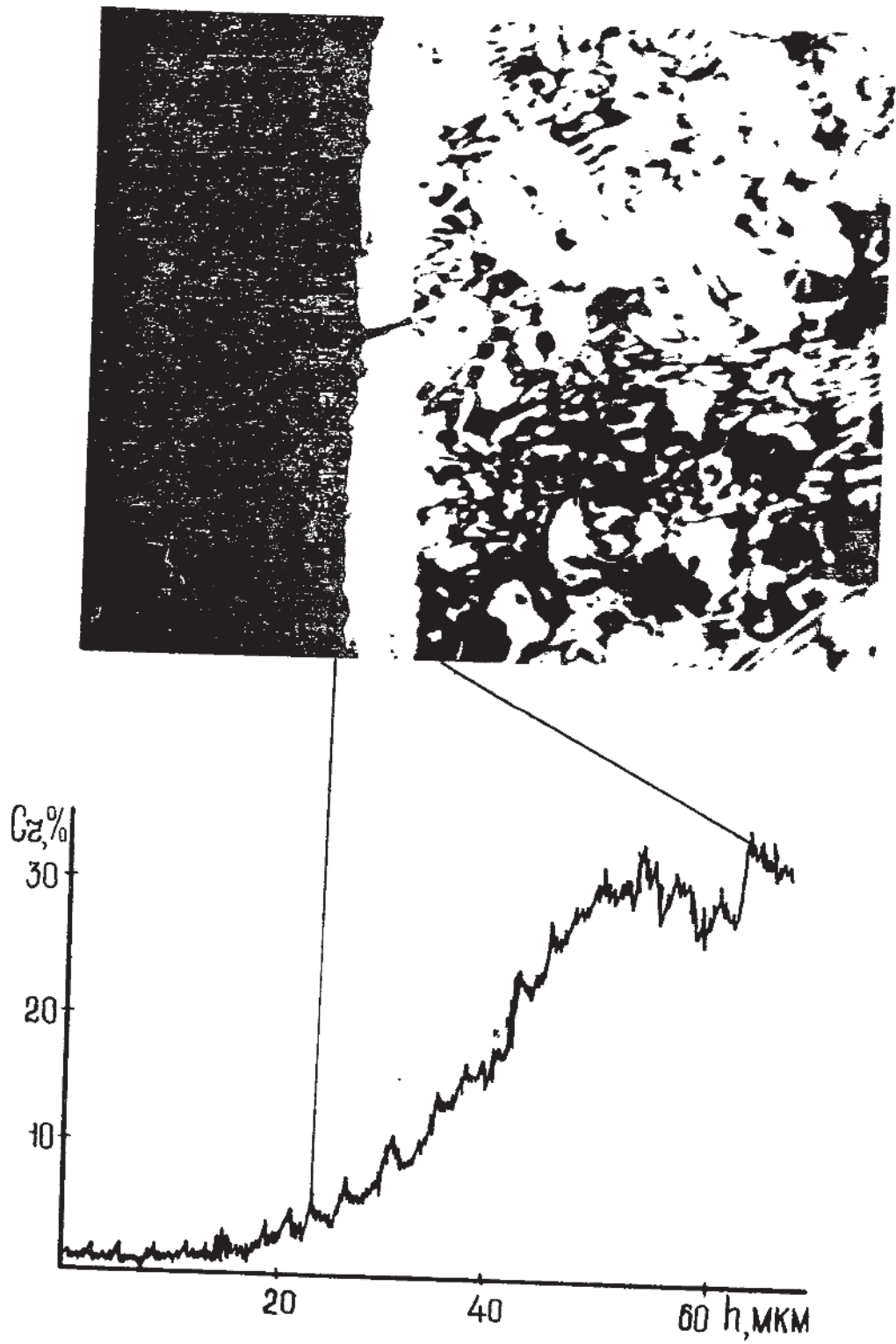


Рис. 4.12. Распределение хрома в зоне сплавления покрытия с основным металлом

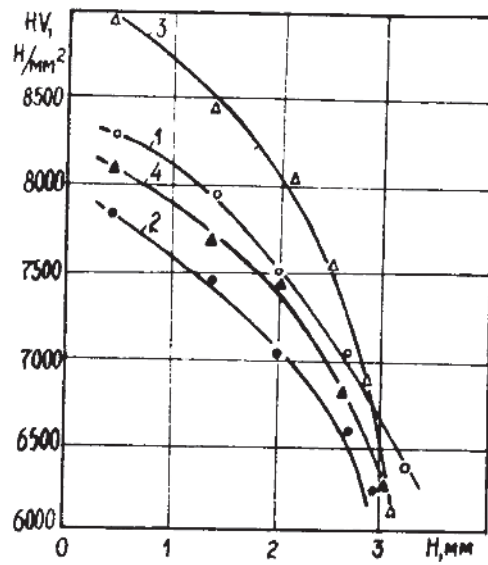


Рис. 4.13. Изменение твердости по высоте покрытия при содержании легирующих элементов, об. % :

1 - 33% C₂ ; 2 - 17% C₂ ; 3 - 33% C₂ + 3% В;
 4 - 33% C₂ + 4% В

8300 Н/мм²), определяется мелкой карбидной фазой, далее твердость снижается и у границы покрытие – основной металл равна HV 6200...6700 Н/мм².

Испытания образцов на абразивное изнашивание проводились, в основном, в эвтектической зоне, так как она занимает основную часть упрочненного слоя (рис. 4.14).

Рентгеноструктурный анализ покрытий, полученных на основе порошка ФХ-800, показал, что основным видом карбидов в эвтектической зоне является тригональный карбид хрома Cr_7C_3 . Обнаружены следы орторомбического карбида Cr_3C_2 и кубического карбида хрома $Cr_{23}C_6$.

При определенной концентрации хрома и углерода дополнительное введение в известных пределах бора /126,139/ вызывает повышение твердости и износостойкости. Этому способствует образование наиболее износостойких карбидов и появление добавочной фазы – карбоборидной, что, в целом, и обеспечивает высокую износостойкость /91/. Рекомендуемое количество бора для системы легирования ($Fe - Cr - C - B$) колеблется от 0,5 до 6% /142/.

Поэтому представлялось целесообразным изучить влияние дополнительного легирования наплавленного металла бором. В качестве порошка для этих экспериментов использовалась шихта, обеспечивающая содержание в покрытии 30...33% хрома и 3...4% углерода, в которую в виде боридов хрома (CrB_2) вводилось 0,5...7% бора. При этом твердость слоя у поверхности возросла до HV 8200...9100 Н/мм² (рис. 4.13, кривые 3 и 4), а износостойкость в среднем увеличилась на 30...35%.

Дополнительное легирование наплавленного металла бором приводит к существенному изменению его микроструктуры. В эвтектике происходит замещение в твердом растворе бором части атомов α -

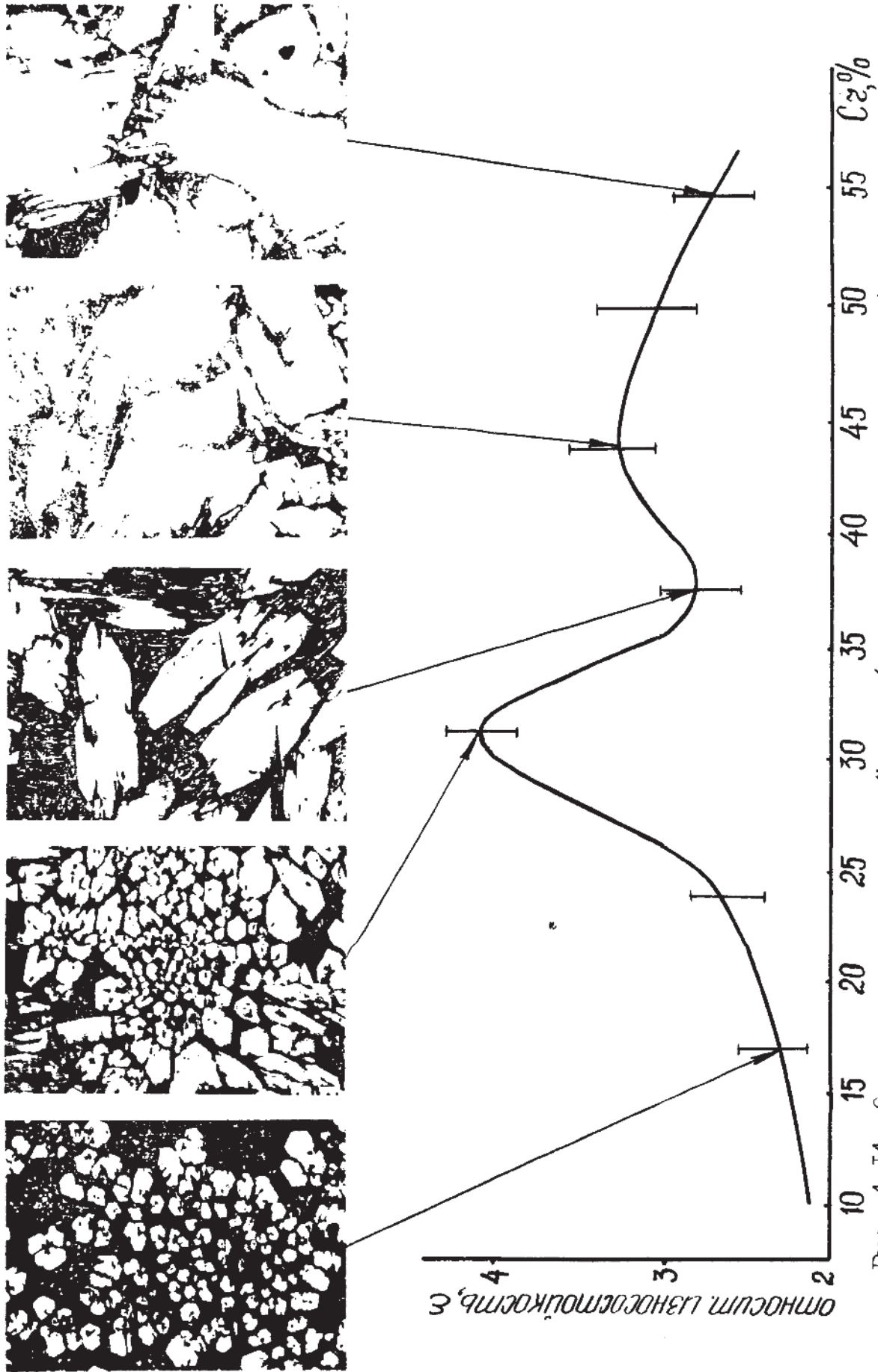


Рис. 4.14. Относительная износостойкость (эталон - сталь 45, НРС 45) и микроструктура (x 120) наплавов в зависимости от содержания хрома, об. %

железа и распределение в ней мелкодисперсных боридов /142/. Карбиды и карбобориды, в основном, приобретают игольчатую форму, имеют длину 50...600 мкм, толщину 10...60 мкм, что также способствует увеличению износостойкости /141/.

Рентгеноструктурный анализ указал на наличие в покрытии карбидов $C_{27}C_3$ и $C_{23}C_2$, а также борида хрома C_2B_3 и соединения типа $C_{22}(B,C)$.

Анализ износостойкости образцов показал, что максимальное значение \mathcal{E} обеспечивается при наличии в покрытии 2,5...3% бора (рис. 4.15, 4.16). Введение в покрытие такого количества бора обеспечивает повышение износостойкости слоя в 1,1...1,2 раза. Характер изменения износостойкости при увеличении содержания бора от 0,5 до 7% аналогичен наплавкам без бора (см. рис. 4.13).

Для объяснения сложной зависимости относительной износостойкости наплавленного металла в заэвтектической зоне от концентрации легирующих элементов можно предложить следующую модель, основанную на анализе теории упругих модулей композита.*

Согласно /128, 143/, определяющей износостойкость технически чистых металлов и сплавов величиной может служить модуль упругости E :

$$\mathcal{E} = K_0 E^{1,3} \quad (4.25)$$

Рассмотрим с позиций соотношения (4.25) пути повышения износостойкости сплавов, обусловленные наличием твердых фаз M_nX_m (карбиды, бориды). Примем, что объемная доля матричного металла f_1 и объемная доля дисперсной фазы $f_2 = f$ так, что

$$f_1 = 1 - f \quad (4.26)$$

Рассматривая наплавленный металл как композиционный изо-

* Модель относительной износостойкости разработана совместно с к.т.н. Абрамовичем Т.М.

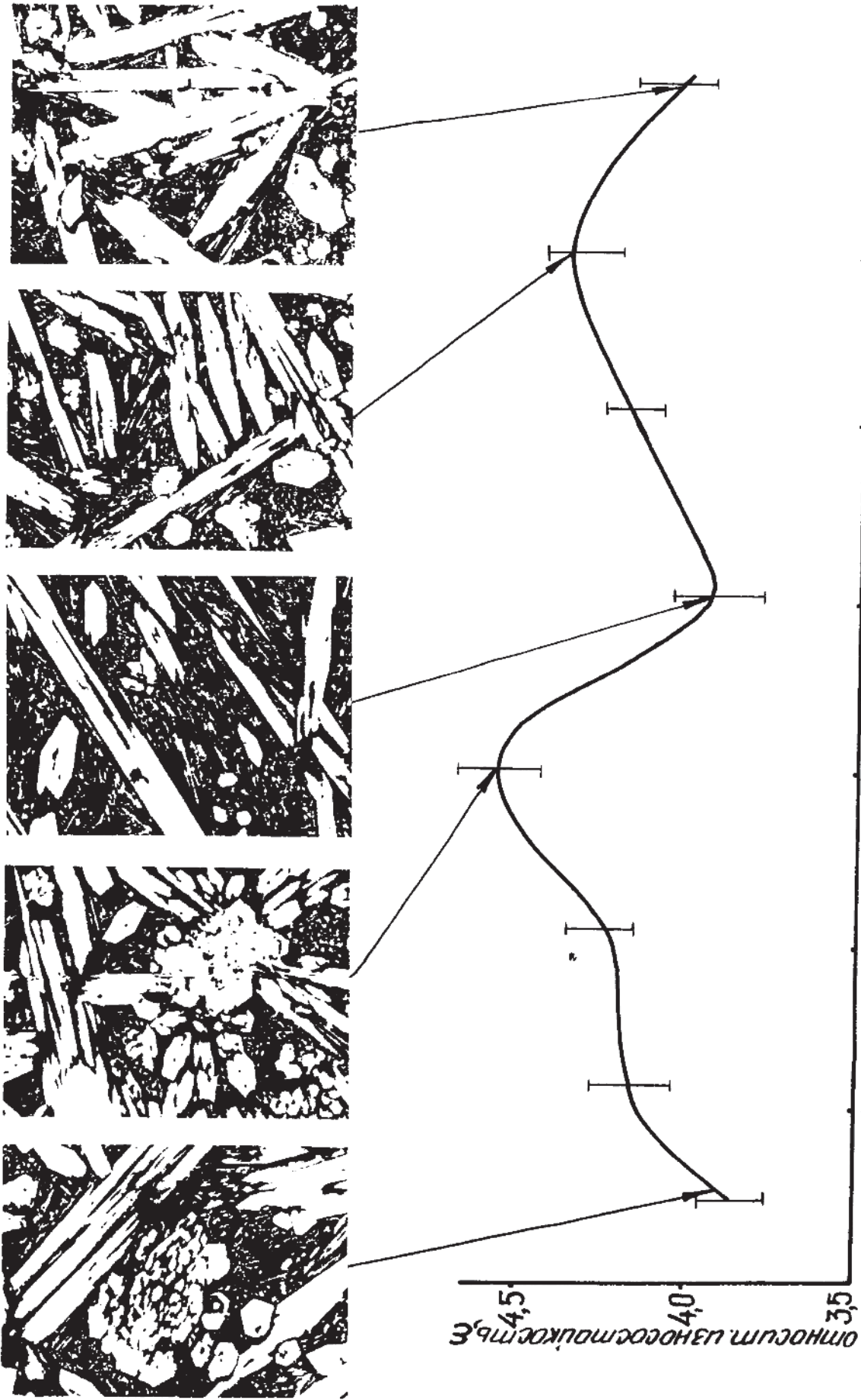


Рис. 4.15. Зависимость относительной износостойкости (эталон - сталь 45, НРС 45) наплавов с содержанием 33 % Cr от количества В и микроструктура (x 120) покрытий

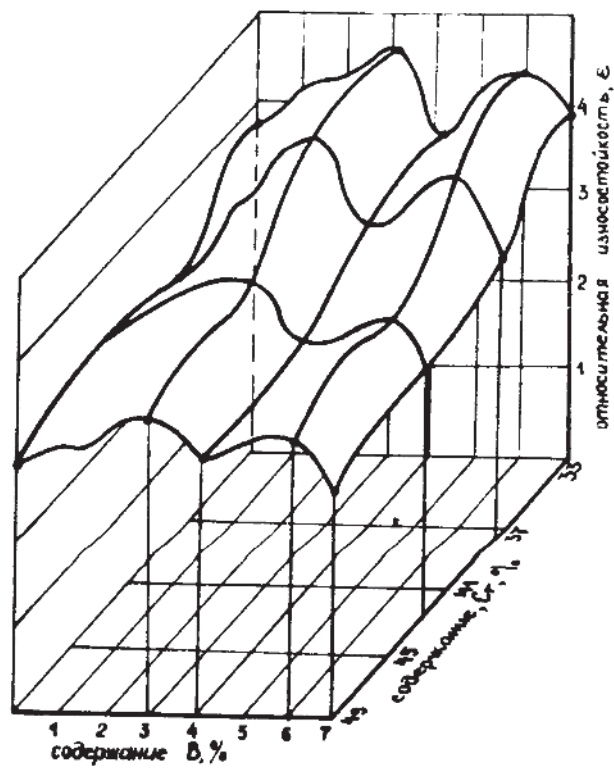


Рис. 4.16. Зависимость относительной износостойкости (эталон - сталь 45, HRC 45) покрытий от содержания в них хрома и бора, об. %

тропный материал со сферoidalными включениями, имеем для него /I44, I45/ выражения эффективных упругих модулей:

$$K = f_1 X_1 K_1 + f_2 X_2 K_2 \quad \left. \vphantom{K} \right\} \quad (4.27)$$

$$G = f_1 g_1 G_1 + f_2 g_2 G_2$$

$$\frac{1}{K} = \frac{f_1 X_1}{K_1} + \frac{f_2 X_2}{K_2}$$

$$\frac{1}{G} = \frac{f_1 \tilde{g}_1}{G_1} + \frac{f_2 \tilde{g}_2}{G_2} \quad \left. \vphantom{\frac{1}{G}} \right\} \quad (4.28)$$

где K, K_1, K_2 - упругие модули композита, матричного металла и твердой фазы соответственно;

G_1, G_1, G_2 - модули сдвига композита, матричного металла и твердой фазы соответственно;

X_1, X_2, g_1, g_2 - коэффициенты концентрации средних объемных и девиаторных деформаций;

$\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \tilde{g}_1, \tilde{g}_2$ - коэффициенты концентрации объемных и девиаторных напряжений.

Соотношения (4.27) и (4.28) получаются при сопоставлении свободных энергий композита как изотропной среды и свободных энергий матричного металла (объемная доля его f_1) и дисперсной фазы (объемная доля $f_2 = f$). Имеем, например, в случае всестороннего сжатия:

$$\int \frac{P^2}{2K} dV = f_1 \int \frac{P^2 \tilde{X}_1}{2K_1} dV + f_2 \int \frac{P^2 \tilde{X}_2}{2K_2} dV \quad (4.29)$$

где P - давление при всестороннем сжатии.

Отсюда следует I-е уравнение (4.27) и т.д.

Имеем, согласно (4.27) и (4.28) и /I44/:

$$\frac{1}{\sum \frac{f_i}{K_i}} \leq K \leq \sum f_i K_i; \quad \frac{1}{\sum \frac{f_i}{G_i}} \leq G \leq \sum f_i G_i \quad (4.30)$$

Нижние границы эффективных модулей K и G называются границами по Фойгту, а верхние - границами по Рейссу.

При применении соотношений (4.27), (4.28) и оценок (4.30) следует иметь ввиду, что в реальном сплаве твердая фаза представляет из себя включение различных размеров и формы, и теоретические результаты механики композитов могут существенно отличаться от реальных модулей. Приведем результаты последовательных расчетов /I44/ для случая малых и больших значений f .

Для малых f Дьюи получил выражение для модуля сдвига:

$$\frac{g}{g_1} = 1 - \frac{15(1-\nu_1) \left[1 - \frac{g_2}{g_1} \right] f}{7 - 5\nu_1 + 2(4 - 5\nu_1) \frac{g_2}{g_1}} \quad (4.31)$$

где $g_1 = g_m$, $\nu_1 = \nu_m$ - упругие параметры для матричного металла.

В случае $\frac{g_2}{g_1} \rightarrow \infty$ имеем приближенную оценку

$$\frac{g}{g_1} = 1 + 7,5 \frac{(1-\nu_1)f}{4-5\nu_1} \quad (4.32)$$

Для модуля всестороннего сжатия имеем:

$$K = K_1 + \frac{(K_2 + K_1) f}{1 + \frac{(K_2 - K_1) f}{K_1 + 4/3 K_2}} \quad (4.33)$$

Итак, согласно (4.31) и (4.33), с ростом объемной доли включений увеличиваются величины K и g .

Для композита, представляющего из себя несжимаемую непрерывную среду с абсолютно жесткими включениями имеем /I44/:

$$g = \frac{3\pi g_1}{16 \left[1 - \left(\frac{f}{f_{\max}} \right)^{1/3} \right]} \quad (4.34)$$

где $f_{\max} = \frac{\pi}{6}$.

Отметим еще эмпирическое выражение для модуля сдвига, которое можно применять в диапазоне объемных концентраций $0 < f < 0,5$

$$g = \frac{g_1(2+f)}{2(1-2f)} \quad (4.35)$$

Для оценки энергии решетки растворов $E_2(C)$, где $C_2 = C = \frac{N_2}{N}$ атомная концентрация добавки, можно воспользоваться результатами работы /146/. В ней показано, что

$$E_2(C) = E_{201}(1-C) + E_{202}C + C(1-C)E_{см}, \quad (4.36)$$

где энергия смешения

$$E_{см} = Z E_{12} - \frac{1}{2} Z (E_{11} + E_{22}) \quad (4.37)$$

причем E_{11}, E_{22}, E_{12} - энергии парных взаимодействий частиц I и 2;

Z - координационное число; $C_I + C_2 = 1$.

При $E_{см} < 0$ кривая зависимости $E_2(C)$ имеет минимум; это соответствует случаю, благоприятному для образования твердого раствора или химического соединения.

При $E_{см} > 0$ имеем максимум $E_2(C)$ в диапазоне концентраций $0 \leq C \leq 1$, и это будет ситуация гетерогенной смеси кристаллов (разнородные частицы I, 2 взаимодействуют слабо).

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что износостойкость покрытий, полученных горизонтальной электрошлаковой наплавкой с введением порошковых присадочных материалов на основе тугоплавких компонентов в нижнюю часть шлаковой ванны, зависит от состояния, природы и свойств двух основных составляющих нанесенного слоя: карбидов, боридов, карбоборидов (их состава, кристаллического строения, размеров, твердости и пр.) и матричного сплава, в котором эти фазы расположены (ее составом, кристаллическим строением, твердостью).

Легирование сплава карбидообразующими элементами, а также бором, замещающем углерод в карбидных фазах, приводит к повышению упругих модулей во всем диапазоне концентраций, к увели-

чению энергии решетки матричного металла и, как следствие, к нарастанию твердости и износостойкости в определенном диапазоне концентрации (см. формулу (4.25)). В экспериментах с системой $Fe-C_2-C-B$ износостойкость нарастала в диапазоне концентрации C_2 (при $C_B=0$) вплоть до $C_{C_2} = 33\%$, причем $\epsilon_{max} = 3,8 \dots 4,2$, а затем падала до $2,8 /I4I/$.

При добавлении бора и фиксированной концентрации хрома $C_{C_2} = 33\%$ в диапазоне концентраций B до 3% имело место увеличение износостойкости ϵ до $4,5 \dots 4,7$, а затем спад до $3,8 /I4I/$.

Наращение относительной износостойкости можно объяснить приведенной выше теорией для упругих модулей композита, а также нарастанием энергии решетки матричного металла (раствора).

Снижение износостойкости, на наш взгляд, можно объяснить тем, что чрезмерное повышение объемной доли твердой фазы $M_n X_m$ и растворение этих компонентов в матрице приводит к уменьшению объема металла связки, в результате чего изменяется механизм изнашивания и наблюдается выкрашивание твердых составляющих структуры слоя. Снижение пластичности матричного металла также способствует уменьшению износостойкости.

Перегиб на участке с содержанием хрома $33 \dots 44\%$ (рис. 4.14) связан с некоторым уменьшением карбидной фазы за счет укрупнения карбидов и увеличения при этом менее износостойкой эвтектики $/I4I/$.

Проведенные экспериментальные исследования позволили оценить влияние концентраций хрома и бора на относительную износостойкость наплавленного слоя. В то же время оценка взаимного влияния указанных компонентов на износостойкость требует проведения значительного количества экспериментов. Поэтому был проведен регрессионный анализ влияния химического состава покрытия на его относительную износостойкость. Планирование эксперимента осуществля-

лось по методике /136, 147, 148/.

На основании ранее проведенных исследований границами областей варьирования компонентов были приняты: для хрома - 22...39%; для бора - 1...4%. Учитывая сложный характер влияния химического состава покрытия на относительную износостойкость (см. рис. 4.14 и 4.15), данные диапазоны варьирования факторов были разбиты на три области:

$$\text{Область 1. } 0,22 \leq C_1 \leq 0,33; \quad 0,01 \leq C_2 \leq 0,03.$$

$$\text{Область 2. } 0,33 \leq C_1 \leq 0,39; \quad 0,01 \leq C_2 \leq 0,03.$$

$$\text{Область 3. } 0,33 \leq C_1 \leq 0,39; \quad 0,03 \leq C_2 \leq 0,04,$$

где C_1 - концентрация хрома; C_2 - концентрация бора.

Для каждой области был поставлен полный факторный эксперимент плана 2^2 с учетом корреляции факторов и дополнительной центральной точкой, повторенной дважды /136/.

План опытов предусматривал три уровня для каждой переменной. Кодирование осуществлялось таким образом, чтобы нижней границе концентрации каждой компоненты C_i соответствовал уровень $X_i = -1$, верхней границе - $X_i = 1$.

Матрица планирования имела вид:

$$\begin{array}{cccc} X_0 & X_1 & X_2 & X_1 X_2 \\ \hline 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

Области изменения износостойкости могут быть описаны следующей математической моделью:

$$y = b'_0 + b'_1 X_1 + b'_2 X_2 + b'_{12} X_1 X_2 \quad (4.38)$$

где $Y = \lg \varepsilon_{cp}$ - есть износостойкость в логарифмическом масштабе;

X_1 и X_2 - концентрации хрома и бора в логарифмическом масштабе с учетом кодирования, которое будет указано в дальнейшем.

При постоянстве одной из концентраций (4.38) соответствует монотонному изменению износостойкости с изменением другой. Последнее слагаемое в (4.38) учитывает эффект корреляции.

Оценка коэффициентов производилась по методу наименьших квадратов [136, 149]:

$$B' = (X'X)^{-1} X'Y \quad (4.39)$$

где X' - матрица, транспонированная по отношению к матрице X ;
 $(X'X)^{-1}$ - обратная матрица.

$$\text{матрица } B' = \begin{vmatrix} b'_0 \\ b'_1 \\ b'_2 \\ b'_{12} \end{vmatrix} \quad \text{матрица } Y = \begin{vmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \end{vmatrix}$$

y_i - экспериментальное значение y в i -ом опыте.

$$b'_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ij} y_i}{N}, \quad (4.40)$$

где $j = 0, 1, 2, \dots, K$ - номер фактора;
 N - число опытов.

Тогда

$$\begin{cases} b'_0 = \frac{1}{6}(y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6) \\ b'_1 = \frac{1}{4}(-y_1 + y_2 - y_3 + y_4) \\ b'_2 = \frac{1}{4}(-y_1 - y_2 + y_3 + y_4) \\ b'_{12} = \frac{1}{4}(y_1 - y_2 - y_3 + y_4) \end{cases} \quad (4.41)$$

Коэффициенты $b'_0, b'_1, b'_2, b'_{12}$ не коррелируют между собой.

Решение данной системы уравнений (4.41) для каждой из областей варьирования позволило определить численные значения коэффициентов $b'_0, b'_1, b'_2, b'_{12}$. Ввиду того, что характер изменения износостойкости в различных областях существенно отличается, то для каждой области варьирования определялось свое уравнение регрессии. При этом кодирование факторов производилось по соотношениям:

$$X = \frac{2(\ln C - \ln C_{\max})}{\ln C_{\max} - \ln C_{\min}} + 1 \quad (4.42)$$

где C - концентрация элемента в пределах области варьирования фактора;

C_{\max} - максимальная концентрация элемента в области;

C_{\min} - минимальная концентрация элемента в области.

Проверка адекватности модели осуществлялась по критерию Фишера /136/. При этом расчетный критерий Фишера F_p сравнивался с табличным F_T .

$$F_p = \frac{\int^2_{ad}}{\int^2(y)} \quad (4.43)$$

где \int^2_{ad} - дисперсия адекватности;

$\int^2(y)$ - дисперсия воспроизводимости.

Дисперсия адекватности характеризует рассеивание результатов эксперимента относительно предложенной модели и определяется

$$\int^2_{ad} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta \hat{y}_i^2}{f} = \frac{\sum_{i=1}^5 (y_i - \hat{y}_i)^2}{6-4-1} \quad (4.44)$$

где \hat{y}_i - среднее значение y ;

$$f = N - (K + 1) = 6 - (4 + 1);$$

K - фактор планирования.

Дисперсия воспроизводимости определяется как:

$$(4.45)$$

$$S^2(y) = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{i0} - \bar{y}_0)^2}{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^2 (y_{i0} - \bar{y}_0)^2}{2-1} \quad (4.45)$$

где y_{i0} - результаты измерений в нулевой точке;
 \bar{y}_0 - среднее значение y в нулевой точке;
 $(n-1)$ - число степеней свободы.

Значимость коэффициентов $b'_0, b'_1, b'_2, b'_{12}$ оценивалась по критерию Стьюдента /149/.

Для оценки относительного вклада каждой из компонент (C_I и C_2) на изменение износостойкости покрытия, а также влияния корреляции строилась упрощенная математическая модель при $b'_{12} = 0$.

Далее указываются результаты экспериментов для каждой из областей, строится модель типа (4.38) и обсуждаются полученные результаты.

Область I.

Кодирование производилось по соотношениям

$$\begin{cases} x_1 = \frac{2(\ln C_1 - \ln 0,33)}{\ln 0,33 - \ln 0,22} + 1 \\ x_2 = \frac{2(\ln C_2 - \ln 0,03)}{\ln 0,03 - \ln 0,01} + 1 \end{cases} \quad (4.46)$$

В таблице П.10.1 (приложение 10) приведены условия экспериментов и полученные в них значения износостойкости в обычном и логарифмическом масштабах.

Расчитанные по уравнению (4.41) значения коэффициентов соответственно равны:

$$b'_0 = 1,21728; \quad b'_1 = 0,23254; \quad b'_2 = 0,09275; \quad b'_{12} = -0,03521.$$

Тогда математическая модель примет вид

$$\hat{y} = 1,21728 + 0,23254x_1 + 0,09275x_2 - 0,03521x_1x_2, \quad (4.47)$$

где \hat{y} - относительная износостойкость в логарифмическом мас-

штабе, вычисленная по (4.47).

Проверка адекватности модели (4.47) осуществлялась по (4.43) с использованием расчетных значений таблицы П.10.2 (приложение 10).

$$\int_{\sigma\sigma}^2 = 0,00486; \quad \int^2(y) = 0,00048; \quad F_p = 10,1.$$

Принимая уровень значимости $\alpha' = 0,05$, находим в этом случае табличные значения критерия Фишера при данных степенях свободы $F_T = 161 / 136 /$.

Так как $F_p < F_T$, то уравнение (4.47) адекватно описывает закономерности зависимости износостойкости от концентраций хрома и бора при данном уровне значимости в области I, представленной на рис. 4.17.

Оценка значимости полученных коэффициентов $b'_0, b'_1, b'_2, b'_{12}$ показала, что все коэффициенты статистически значимы.

Упрощенная модель износостойкости (без учета корреляции) в обычной шкале имеет вид

$$\tilde{\varepsilon} = 3,4 C_1^{1,15} C_2^{0,17} \quad (4.48)$$

Экспериментальные значения износостойкости ε , значения $\hat{\varepsilon}$, рассчитанные по формуле (4.47), а также значения $\tilde{\varepsilon}$, рассчитанные по упрощенной формуле представлены в таблице П.10.3 (приложение 10).

Область 2.

Кодирование производилось по соотношениям

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = \frac{2(\ln C_1 - \ln 0,39)}{\ln 0,39 - \ln 0,33} + 1 \\ x_2 = \frac{2(\ln C_2 - \ln 0,03)}{\ln 0,03 - \ln 0,01} + 1 \end{array} \right. \quad (4.49)$$

В таблице П.10.4 (приложение 10) приведены условия экспериментов и полученные в них значения износостойкости в обычном и логарифмическом масштабах.

Расчетные значения параметров

$$b'_0 = 1,40464; \quad b'_1 = 0,07307; \quad b'_2 = 0,10838; \quad b'_{12} = 0,05084$$

Математическая модель при этом имеет вид

$$\hat{y} = 1,40464 - 0,07307X_1 + 0,10838X_2 + 0,05084X_1X_2 \quad (4.50)$$

Проверка адекватности модели (4.50) осуществлялась на основании таблицы П.10.5 (приложение 10).

Отсюда

$$S_{ад}^2 = 0,000140; \quad S^2(y) = 0,00030; \quad F_p = 4,66$$

Как уже отмечалось, при уровне значимости $\alpha' = 0,05$ табличные значения критерия Фишера в условиях данной расчетной схемы $F_T = 161$. Так как $F_p < F_T$, уравнение (4.50) адекватно описывает закономерности изменения износостойкости в области 2.

На основании полученных результатов (см. табл. П.10.6) строились кривые равной износостойкости (рис. 4.18). Упрощенная модель без учета корреляции имеет вид:

$$\tilde{\xi} = 3,7 c_1^{-0,87} c_2^{0,20} \quad (4.51)$$

Область 3.

Кодирование производилось соотношениями

$$\begin{cases} x_1 = \frac{2(\ln c_1 - \ln 0,39)}{\ln 0,39 - \ln 0,33} + 1 \\ x_2 = \frac{2(\ln c_2 - \ln 0,04)}{\ln 0,04 - \ln 0,03} + 1 \end{cases} \quad (4.52)$$

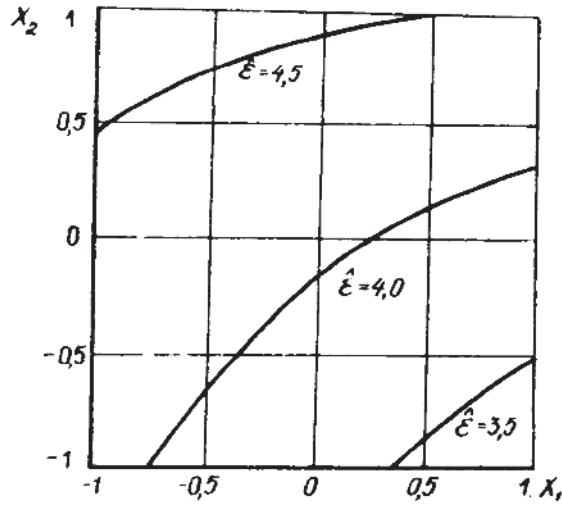


Рис. 4.17. Кривые равной износостойкости для области I:
 $22\% \leq C_2 \leq 33\%$; $1\% \leq B \leq 3\%$

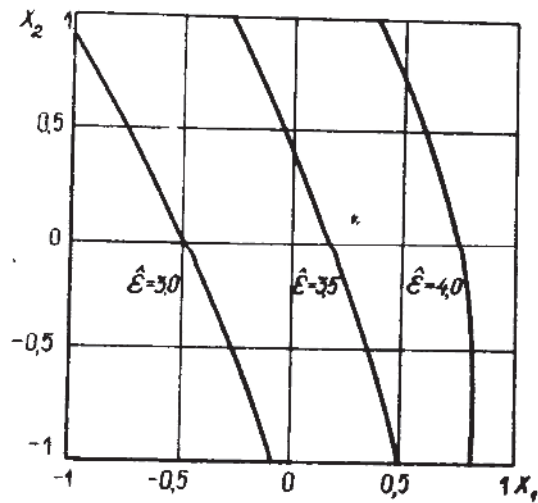


Рис. 4.18. Кривые равной износостойкости для области 2:
 $33\% \leq C_2 \leq 39\%$; $1\% \leq B \leq 3\%$

В таблице П.10.7 (приложение 10) приведены условия экспериментов и полученные в них значения износостойкости в обычном и логарифмическом масштабах.

Расчетные значения параметров

$$b'_0 = 1,41485; \quad b'_1 = -0,03167; \quad b'_2 = -0,10497; \quad b'_{12} = -0,00944.$$

Математическая модель принимает вид

$$\hat{y} = 1,41485 - 0,03167X_1 - 0,10497X_2 - 0,00944X_1X_2 \quad (4.53)$$

Для проверки адекватности формулы (4.53) строилась таблица П.10.8 (приложение 10).

$$\text{Отсюда } S_{\sigma\sigma}^2 = 0,00310; \quad S^2(y) = 0,00038; \quad F_p = 11,08.$$

Так как $F_p < F_r = 161$, модель (4.53) адекватно описывает изменение износостойкости в области 3.

Кривые равной износостойкости представлены на рис. 4.19.

Приближенное соотношение без учета корреляции

$$\tilde{\epsilon} = 0,23 C_1^{-0,38} C_2^{-0,74} \quad (4.54)$$

Сопоставим в обычной шкале значения износостойкости, полученные экспериментально, вычисленные по формуле (4.53) и по упрощенной формуле (4.54) (см. табл. П.10.9, приложение 10).

Для всех рассмотренных нами областей математическая модель (4.38) адекватно описывает характер изменения износостойкости с изменением концентраций как хрома, так и бора, и может служить для количественных расчетов концентраций C_1 и C_2 с уровнем значимости $\alpha' = 0,05$.

Справедливость модели (4.38) для всех областей, построенные для них приближенные модели и сопоставление коэффициентов $b'_0, b'_1, b'_2, b'_{12}$ позволяют сделать и некоторые качественные выводы.

Тенденция монотонного изменения износостойкости в интервале

значении каждой из компонент сохраняется при любом фиксированном значении одной компоненты и одновременном изменении другой. Т.е., если, например, в интервале значений концентрации бора $0,01 \dots 0,03$ износостойкость с увеличением концентраций бора при некоторой концентрации хрома увеличивается, то тенденция увеличения будет иметь место и при некоторой другой постоянной концентрации хрома.

Вместе с тем имеет место эффект корреляции концентраций. Для его оценки можно использовать величину относительного изменения износостойкости при изменении концентрации одной из компонент, например, C_2 в интервале монотонности от C_{20} до C_{2K} при постоянстве C_1 .

Обозначим износостойкость при C_{20} через \mathcal{E}_0 , при C_{2K} через \mathcal{E}_K (при постоянном C_1).

Так как $\mathcal{E} = f(C_1, C_2)$, где f — некоторая функция концентраций, то

$$\mathcal{E}_K = \mathcal{E}_0 + \int_{C_{20}}^{C_{2K}} \frac{\partial f}{\partial C_2} dC_2 \quad (4.55)$$

Относительное изменение износостойкости

$$\gamma_2 = \frac{1}{\mathcal{E}_0} \int_{C_{20}}^{C_{2K}} \frac{\partial f}{\partial C_2} dC_2 \quad (4.56)$$

При отсутствии корреляции можно представить в виде

$$\mathcal{E} = A f_1(C_1) f_2(C_2) \quad (4.57)$$

где A — некоторая константа.

Тогда:

$$\mathcal{E}_0 = A f_1(C_1) f_2(C_{20}) \quad (4.58)$$

$$\int_{C_{20}}^{C_{2K}} \frac{\partial f}{\partial C_2} dC_2 = A f_1(C_1) [f_2(C_{2K}) - f_2(C_{20})] \quad (4.59)$$

$$\gamma_2 = \frac{f_{2K} - f_{20}}{f_{20}} \quad (4.60)$$

Как видно из (4.60), относительное изменение износостойкости в этом случае не зависит от постоянно: концентрации C_I .

При наличии корреляции $\gamma_2 = \gamma_2(C_2, C_{20}, C_{2K})$ тенденция изменения γ_2 с изменением C_I определяет характер и значимость корреляции. Аналогично можно утверждать и для $\gamma_1 = \gamma_1(C_2, C_{10}, C_{1K})$. Так, в области I для бора в интервале I...3% относительное изменение износостойкости γ_2 уменьшается от 22% при $C_I = 22\%$ до 13% при $C_I = 33\%$. Отметим, что в этой области повышение концентрации хрома при $C_2 = \text{const}$ ведет к повышению износостойкости.

Таким образом, процесс повышения износостойкости с увеличением концентрации бора C_2 в области I частично подавляется одновременно происходящим увеличением концентрации хрома C_I .

В области 2 для бора в интервале I...3% относительное изменение износостойкости γ_2 увеличивается от 13% при $C_I = 33\%$ до 37% при $C_2 = 39\%$. Отметим, что здесь повышение концентрации хрома ведет к уменьшению износостойкости при постоянной концентрации бора ($C_2 = \text{const}$).

Таким образом, в области 2 процесс повышения износостойкости с увеличением C_2 стимулируется увеличением C_I .

Одним из преимуществ разработанного метода горизонтального электрошлакового упрочнения является возможность обеспечения более полного перехода в наплавленный металл легирующих элементов, по сравнению с традиционно применяемыми способами вертикальной и горизонтальной электрошлаковой наплавки. Это приводит к соответствующему повышению износостойкости. Проверка данного предположения осуществлялась при сравнительных испытаниях образцов, полученных различными методами электрошлаковой наплавки, на износостойкость (рис. 4.20). Для получения сопоставимых результа-

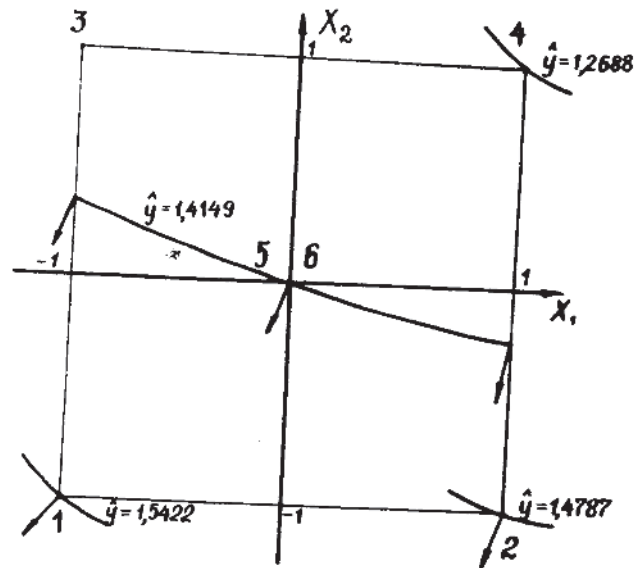


Рис. 4.19. Кривые равной износостойкости для области 3:
 $33,0 \leq C_2 \leq 39\%$; $3\% \leq B \leq 4\%$

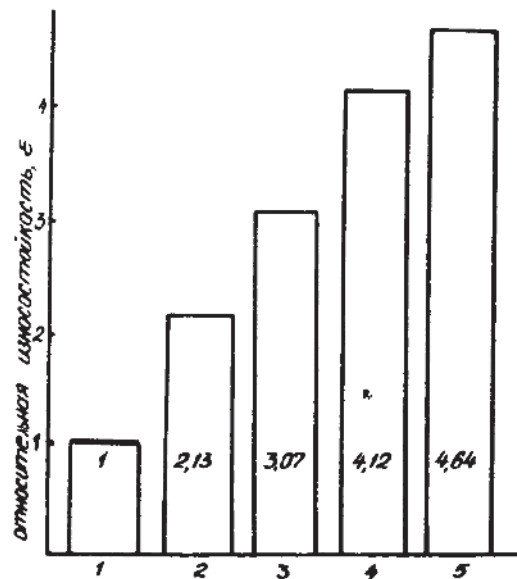


Рис. 4.20. Относительная износостойкость образцов
 1 - эталон (закаленная сталь 45); 2 - вертикальная ЭШН неплавящимся трубкой-электродом с введением ППМ в шлаковую ванну через электрод;
 3 - вертикальная ЭШН неплавящимся электродом с введением ППМ в периферийные зоны шлаковой ванны;
 4 - исследуемый процесс ($33\% C_2$); 5 - исследуемый процесс ($33\% C_2 + 3\% B$)

тов во всех случаях количество вводимого порошкового присадочного материала было одинаково.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что по отношению к эталону (№ I - закаленной стали 45) наибольший износ был зафиксирован у образцов, наплавленных с введением порошкового присадочного материала через внутреннюю полость неплавящегося электрода (№ 2). Это объясняется большими потерями легирующих компонентов при прохождении порошка через высокотемпературную область шлаковой ванны (разрядный промежуток). Зерна карбидов, попадая в указанную область, могут диссоциировать на углерод и низшие карбиды /57/. Это приводит к уменьшению твердости и износостойкости зерен.

При вертикальной электрошлаковой наплавке неплавящимся электродом с введением порошка в периферийные зоны шлаковой ванны износостойкость наплавленного покрытия несколько повышается (№ 3). Это объясняется снижением степени диссоциации и расплавления карбидов за счет введения их через более низкотемпературную область шлаковой ванны.

Технологические особенности исследуемого процесса способствуют созданию благоприятных структур в наплавленном металле, обеспечивающих более высокую износостойкость (№№ 4,5).

✓ 4.4. Влияние технологических параметров горизонтального электрошлакового упрочнения на формирование покрытия

При одинаковых значениях эффективной тепловой мощности, как отмечено в разделе 4.2, геометрические параметры наплавляемых покрытий и зоны проплавления основного металла могут быть разными под влиянием ряда факторов, изменяющих условия теплопере-

дачи от шлаковой ванны к металлу. Такими параметрами, в частности, являются дисперсность и состав порошкового присадочного материала. Однако анализы зависимостей геометрических размеров покрытий от параметров режима процесса на основании уравнений теории теплопроводности и математического планирования будут не полными без экспериментальных исследований этих зависимостей.

Основным технологическим параметром, влияющим на геометрию наносимого слоя, является напряжение U и сила тока I . С увеличением U и I высота покрытия H и глубина проплавления основного металла D возрастают (рис. 4.21). Эта зависимость сохраняется при использовании любых объемных соотношений металла электродной ленты и порошкового присадочного материала. Она характерна для всех видов электрошлаковой наплавки /29, 150, 151/. При увеличении напряжения наплавки от 28 В до 35 В глубина проплавления увеличивается в 1,5...1,7 раза. Уменьшить ее значительно, понижая сварочное напряжение, невозможно, так как в этом случае нарушается соотношение выделяемой и отдаваемой тепловых мощностей, и процесс дестабилизируется /152/. Глубина проплавления прямо пропорциональна площади наплавленного металла F_H (рис. 4.22) ввиду того, что ширина наносимого слоя B (рис. 3.14) практически не изменяется ($L = const$ для всех опытов).

При возрастании скорости наплавки V_H глубина проплавления основного металла D уменьшается, что связано с понижением погонной энергии наплавки (рис. 4.23). Изменение V_H от 1 м/ч до 1,8 м/ч уменьшает глубину проплавления основного металла в 2,5 раза при удельной плотности тока $i = 2 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2$. Дальнейшее увеличение скорости наплавки V_H приводит к несплавлению. Повышение плотности тока от $1,5 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2$ до $2,5 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2$ увеличивает параметр D в 1,5...2,5 раза. Площадь наплавленного

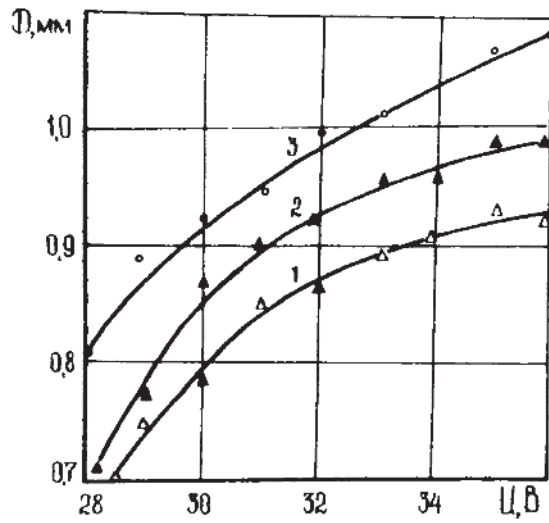


Рис. 4.21. Зависимость глубины проплавления основного металла D от напряжения наплавки U :

1 - плотность тока $1,5 \cdot 10^5$ А/м²;

2 - плотность тока $2 \cdot 10^5$ А/м²;

3 - плотность тока $2,5 \cdot 10^5$ А/м²

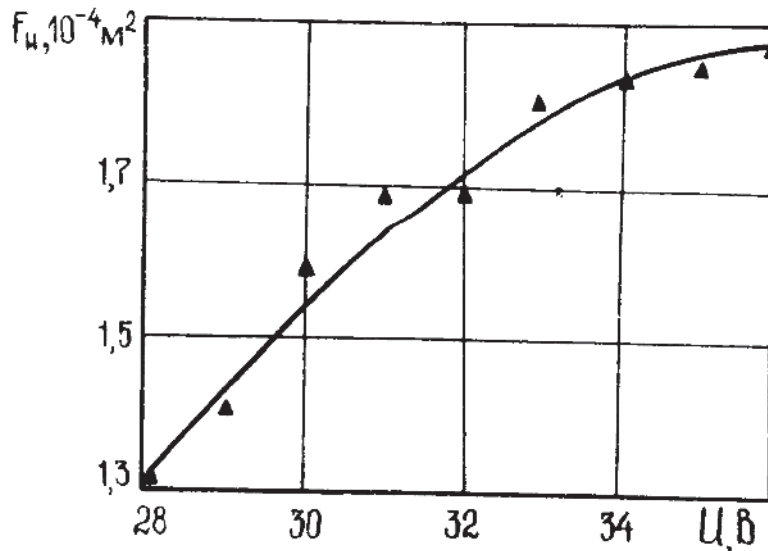


Рис. 4.22. Зависимость площади наплавленного металла в поперечном сечении от напряжения наплавки U (плотность тока $2 \cdot 10^5$ А/м²)

металла F_H также, как и D , при увеличении скорости наплавки V_H уменьшается (рис. 4.24), что также связано с сокращением тепловложения в основной металл. При увеличении V_H от 1 м/ч до 1,8 м/ч F_H уменьшается на 20%.

На высоту покрытия H и глубину проплавления основного металла D влияет и доля порошкового присадочного материала в общем объеме наплавляемого металла (рис. 4.25). С увеличением объемного содержания порошка ЭХ-800 от 40% до 70% (при $K = 2$ мм) глубина проплавления D увеличивается на 0,2 мм. Происходящее при этом увеличение неравномерности проплавления N_1 связано с уменьшением объемного веса наплавляемого слоя, так как с увеличением процентного содержания порошка пропорционально уменьшается и объем матричного металла электродной ленты. Это способствует повышению тепловложения в основной металл, а тем самым — увеличению глубины проплавления основного металла D .

Изменению высоты покрытия H и глубины проплавления основного металла D наблюдается при использовании порошкового присадочного материала различной дисперсности (рис. 4.26). В этом случае параметры H и D связаны с насыпной плотностью порошка. При увеличении дисперсности порошкового присадочного материала уменьшается его плотность, а с ней и объем наплавляемого слоя. В связи с тем, что ширина покрытия B остается неизменной во всех опытах, то с уменьшением объема жидкого металла ванны увеличивается неравномерность проплавления N_1 . Глубина проплавления основного металла D также, как и в предыдущем случае, возрастает из-за уменьшения объемного веса порошка. Причем, с увеличением дисперсности порошка от 0...0,1 до 0,3...0,6 высота покрытия уменьшается только на 10%, в то время как глубина проплавления возрастает на 20%, что связано с ростом N_1 .

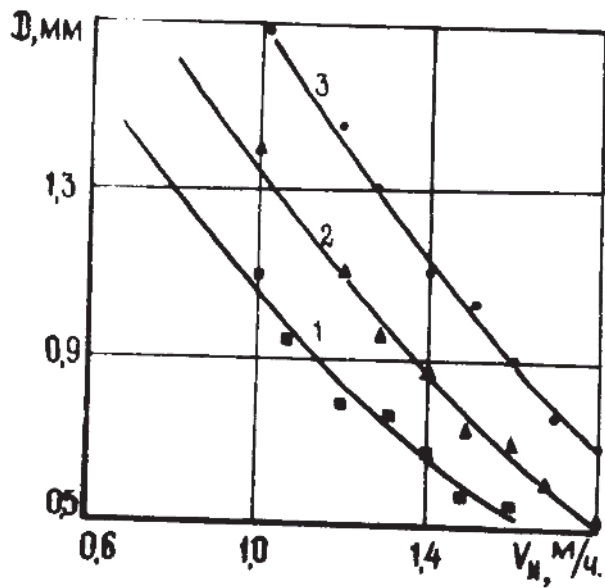


Рис. 4.23. Зависимость глубины проплавления основного металла D от скорости наплавки V_H :

1 - плотность тока $1,5 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$;

2 - плотность тока $2 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$;

3 - плотность тока $2,5 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$

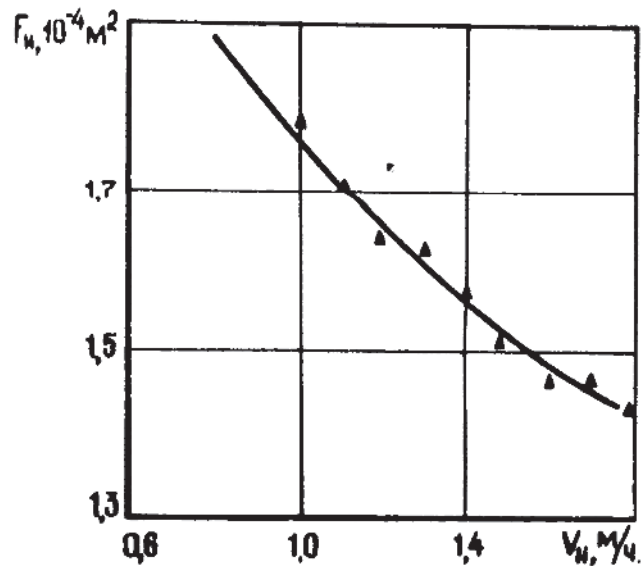


Рис. 4.24. Зависимость площади проплавления наплавленного металла F_H в поперечном сечении от скорости наплавки V_H (плотность тока $2 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$)

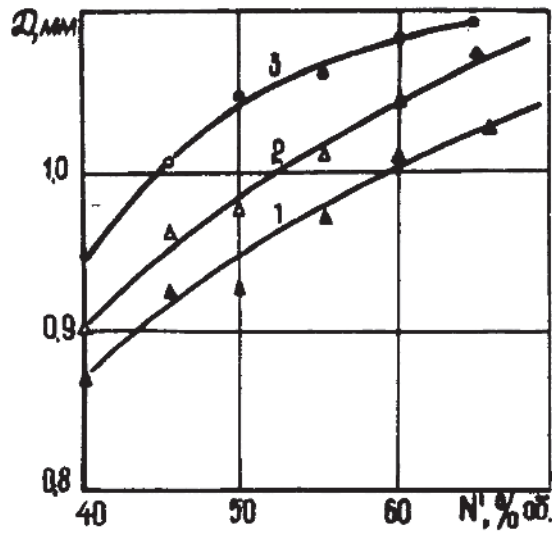


Рис. 4.25. Зависимость глубины проплавления основного металла D от процентного содержания порошка N :

1 - плотность тока $1,5 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$;

2 - плотность тока $2 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$;

3 - плотность тока $2,5 \cdot 10 \text{ A/m}^2$

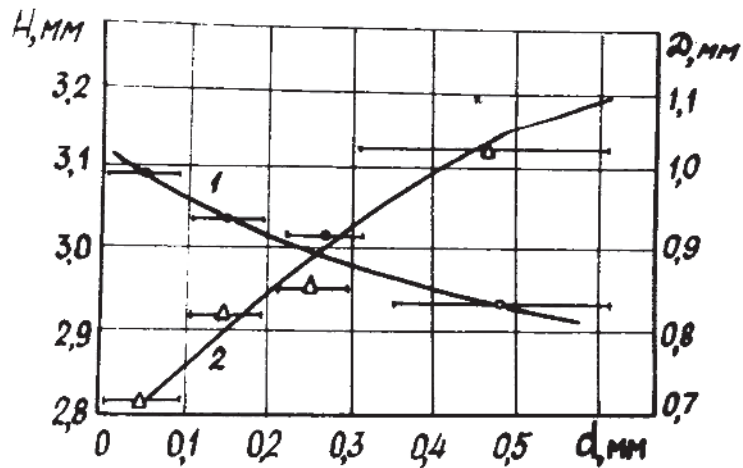


Рис. 4.26. Зависимость высоты покрытия H и глубины проплавления основного металла D от дисперсности порошка d : 1 - H ; 2 - (плотность тока $2 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$)

Высота покрытия H и глубина проплавления основного металла находятся в прямо пропорциональной зависимости от толщины наплавляемой детали S . С увеличением толщины детали S высота покрытия H и глубина проплавления основного металла D уменьшаются (рис. 4.27). Сокращение параметров H и D вызвано увеличением теплоотода в массу детали, увеличение которой в 2 раза (от $S = 8$ мм до $S = 16$ мм) способствует снижению H от 3,6 мм до 2,6 мм, а D — от 1,7 мм до 0,6 мм ($i = 2 \cdot 10^5$ А/м²).

Эксперименты, связанные с изменением глубины заплавляемой канавки K , показали обратно пропорциональную зависимость высоты покрытия H от глубины проплавления основного металла (рис. 4.28). При увеличении глубины канавки K от 1 мм до 4 мм глубина проплавления соответственно уменьшается от 0,9...1,3 мм до 0,4...0,7 мм.

Результаты экспериментального исследования влияния технологических режимов на геометрические характеристики покрытий показали, что использование порошкового присадочного материала при горизонтальной электрошлаковой наплавке позволяет эффективно воздействовать не только на физико-механические свойства слоя, тепловые особенности процесса, но и на формирование покрытий.

Выводы по главе

I. Предложена теоретическая модель термического цикла горизонтального электрошлакового упрочнения по слою порошкового присадочного материала с использованием стальной ленты, на основании которой составлена программа расчета на ЭВМ температуры в различных точках покрытия и основного металла.

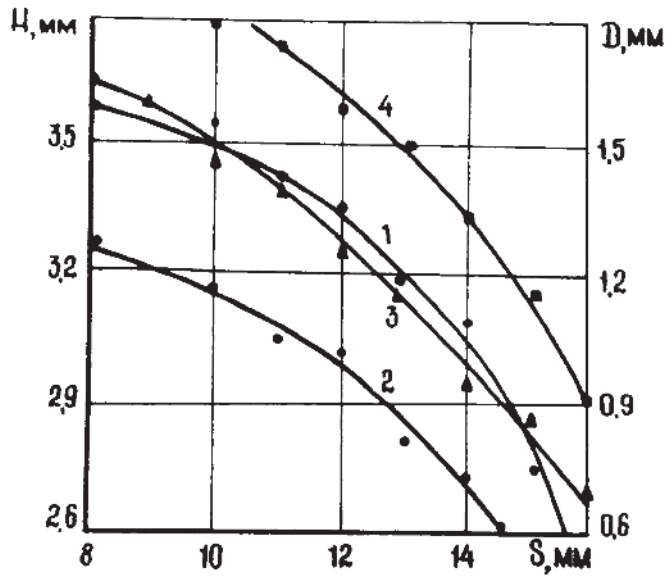


Рис.4.27. Зависимость высоты покрытия H и глубины проплавления основного металла D от толщины детали S :

1 - H (плотность тока $2 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$); 2 - (плотность тока $1,5 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$); 3 - (плотность тока $2 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$); 4 - (плотность тока $2,5 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$)

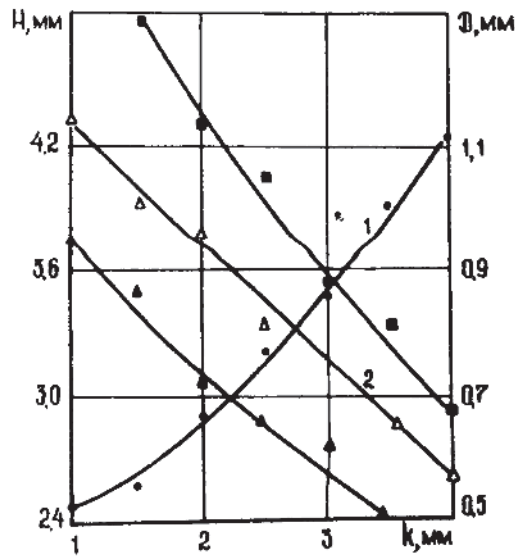


Рис.4.28. Зависимость высоты покрытия H и глубины проплавления основного металла D от глубины канавки K :

1 - H (плотность тока $2 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$); 2 - (плотность тока $1,5 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$); 3 - (плотность тока $2 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$); 4 - (плотность тока $2,5 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$)

2. Определены оптимальные технологические параметры процесса упрочнения, обеспечивающие минимальное проплавление основного металла детали 0,75...1,50 мм. Для этого введен критерий K'' - коэффициент сплавления, представляющий отношение длины участка сплавления к общей ширине покрытия в поперечном сечении. Оптимальное значение K'' должно находиться в пределах 0,92...1,00.

3. Установлена зависимость износостойкости покрытия от структуры наплавленного металла и его химического состава, предложена теоретическая модель процесса изнашивания, проведен регрессионный анализ влияния концентрации легирующих элементов (хрома и бора) на относительную износостойкость.

4. Установлено, что износостойкость покрытий, полученных горизонтальной электрошлаковой наплавкой по слою порошкового присадочного материала с использованием стальной ленты в 1,3...2,1 раза выше, чем при электрошлаковой наплавке традиционными методами (вертикальной электрошлаковой наплавкой неплавящимся трубной-электродом с введением порошкового присадочного материала в шлаковую ванну через электрод и вертикальной электрошлаковой наплавкой неплавящимся электродом с введением порошкового присадочного материала в периферийные зоны шлаковой ванны).

5. ТЕХНОЛОГИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ

В данном разделе приводятся материалы по разработке технологических процессов упрочнения ряда деталей машин, в том числе замков бурильных труб с использованием горизонтального электрошлакового упрочнения. Представлены устройства для горизонтальной и центробежной электрошлаковых наплавки, позволяющие наносить тонкослойные покрытия /1...5 мм/ с изменяющимися физико-механическими свойствами, а также толщиной по длине покрытия.

Показаны результаты и выданы рекомендации по механической обработке твердосплавных покрытий на основе карбида и борида хрома.

Приводятся технико-экономические характеристики оборудования, разработанного для упрочнения деталей.

5.1. Упрочнение деталей бурового оборудования

Длительность эксплуатации элементов бурильной колонны во многом определяется процессами трения и изнашивания. Так, в различных районах Советского Союза потери материала бурильных труб изменяются от 10 до 20 кг и выше на один метр проходки скважины /153/. При этом на пополнение выбракованного количества бурильных труб вследствие износа, прихватов и аварий затрачиваются средства, исчисляемые миллионами рублей.

Прогнозирование и профилактика внезапных отказов бурильной колонны связаны со значительными затруднениями, а в ряде случаев невозможны /154/. В то же время предупреждение износовых отказов за счет изнашивания наружной поверхности бурильных замков не представляет большой технической сложности, так как динамика их развития наблюдается визуально, что позволяет своевременно

предупредить аварию путем восстановления наружной поверхности замка или замены его новым /I55/. В отечественной практике бурения почти не используются бурильные замки с износостойкой наружной поверхностью, что связано со сложностью организации наплавочного участка на обычно не достаточно технически оснащенных трубных базах.

Способ упрочнения наружной поверхности бурильных замков должен отвечать следующим требованиям:

1. Температурный цикл процесса наплавки не должен отрицательно влиять на механические свойства основного металла и на геометрические параметры резьбы замка.

2. Наплавленный слой должен обладать высокой износостойкостью по всей толщине слоя, что связано с необходимостью в минимальном проплавлении основного металла.

3. При наплавке композиционных покрытий необходимо предусмотреть возможность введения карбидов не только через плавящиеся электроды, но и в виде порошкового материала любой дисперсности.

4. С учетом массовости деталей, подлежащих упрочнению, процесс наплавки должен быть высокопроизводительным и обеспечивать возможность автоматизации.

Технология упрочнения бурильных замков ЗУК-155 (ГОСТ 5286-75), разработанная на основании изложенных в работе результатов исследований (см. § 3.1), состоит из двух последовательных операций: подготовительной и заключительной (упрочняющей) /I56/. Толщина получаемых покрытий, как правило, не превышает максимально допустимой по условиям эксплуатации величины износа и обычно составляет 1...5 мм.

В основном, на трубных базах бурильные замки хранятся на

специальных стеллажах под открытым небом. При разгрузочно-погрузочных работах, транспортировке, а также хранении наружная поверхность их подвергается воздействию окружающей среды. Поэтому перед проведением процесса наплавки поверхность замка подвергается механической очистке металлической щеткой или наждачной шкуркой.

Упрочнение замков производилось на модернизированном сварочном автомате А-1416, а также на специально разработанной установке, предназначенной для промышленного использования (рис. 5.1). При этом установка и вращение деталей осуществляется при помощи специальных центров (рис. 5.2). Для наведения шлаковой и металлической ванн, а также формирования наносимого покрытия сконструирован и изготовлен кокиль-кристаллизатор (см. рис. 3.8), позволяющий изменять толщину покрытия в процессе упрочнения. Кроме того, в комплект установки входят вспомогательные приспособления, предназначенные для установки и вертикального перемещения кокиля-кристаллизатора, подачи в зону наплавки неплавящихся электродов (см. рис. 5.1), а также их крепления (рис. 5.3).

Принципиальная схема процесса горизонтального электрошлакового упрочнения по слою порошкового присадочного материала с использованием стальной ленты замков бурильных труб ЗУК-155 представлена на рис. 5.4.

В качестве порошкового присадочного материала использовали углеродистый феррохром ФХ-800 (ГОСТ 4757-79). Лента применялась сечением 50 x 0,3 мм из стали 65Г (ГОСТ 2283-79). Наплавку производили неплавящимися графитовыми электродами (два электрода \varnothing 10 мм и один сечением 40 x 20 мм) (рис. 5.3) с использованием флюсов - 50% флюса АН-8 и 50% флюса АН-9.

Порядок технологических переходов при нанесении покрытия:

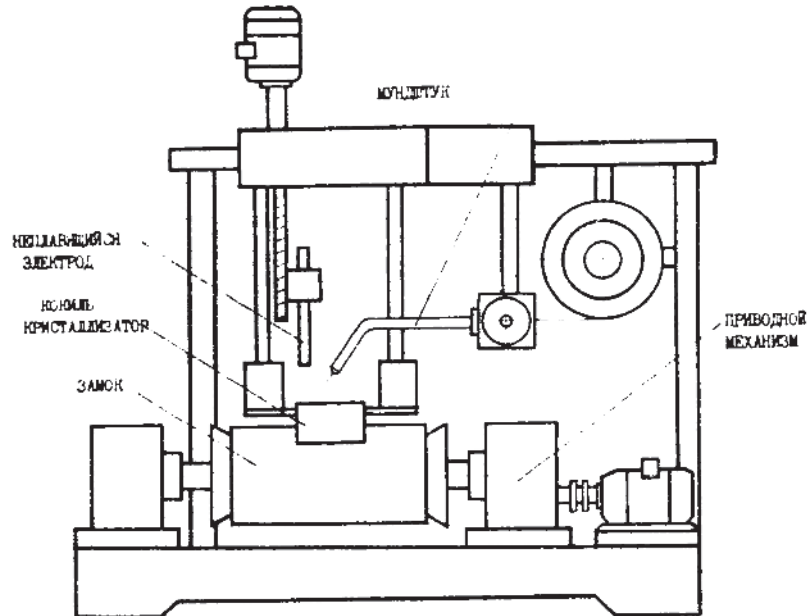


Рис. 5.1. Схема установки, предназначенной для горизонтальной электрошлаковой наплавки по слою порошкового присадочного материала наружной поверхности замка бурильных труб ЗУК-155

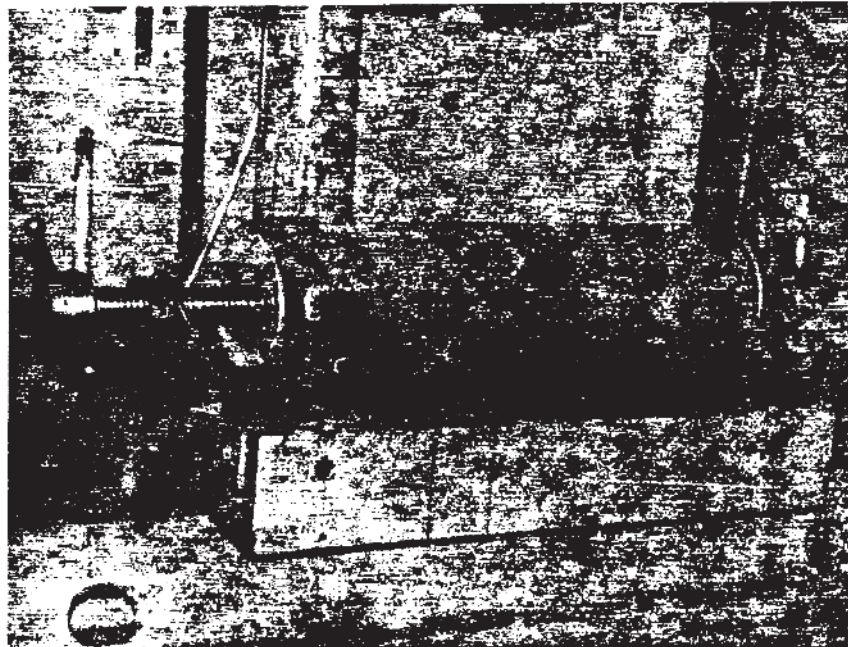


Рис. 5.2. Установка замка бурильных труб ЗУК-155 в специальных центрах под наплавку

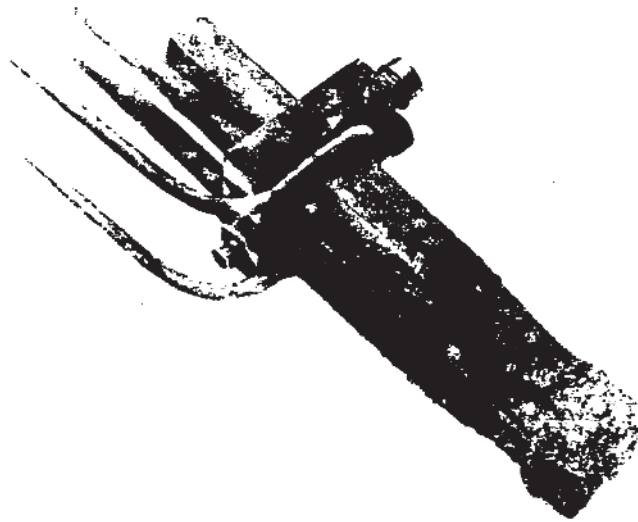


Рис. 5.3. Водоохлаждаемый зажим с графитовыми неплавящимися электродами

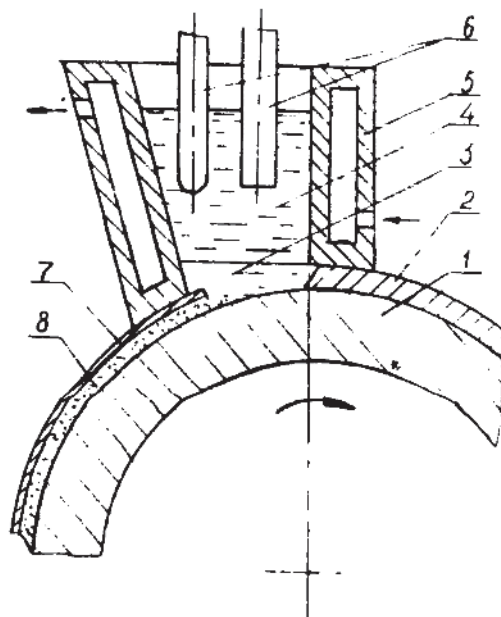


Рис. 5.4. Схема процесса вертикальной электрошлаковой наплавки по слою порошкового присадочного материала замка буровых труб ЗУК-155 :

1 - деталь-замок ЗУК-155; 2 - покрытие; 3 - металлическая ванна; 4 - шлаковая ванна; 5 - водоохлаждаемый кокиль-кристаллизатор; 6 - электроды; 7 - стальная лента; 8 - порошковый присадочный материал

- установить замок в сборе (нипель совместно с муфтой) в центры на силовом столе УМ-2434;
- закрепить на упрочняемой поверхности замка стальную матричную ленту с предварительно нанесенным на нее порошком на клеевой основе;
- установить на замок кокиль-кристаллизатор, при этом одновременно прижать концы электродной ленты с порошком к наплавляемой поверхности детали;
- ввести электроды внутрь кокиля-кристаллизатора до соприкосновения с электродной лентой;
- включить подачу воды в системе охлаждения кокиля-кристаллизатора и зажима электродов и установить требуемые ее расходы;
- включить источник питания ВДУ-1201; на "твердом старте" навести шлаковую и металлическую ванны;
- установить электроды на расстоянии 9...11 мм от поверхности металлической ванны;
- после прогрева упрочняемой поверхности (2...3 мин) включить привод вращения замка с установленной угловой скоростью;
- наносится покрытие (режимы $V_H = 1,4$ м/ч; $I = 500...550$ А; $U = 30$ В; $h_s = 30...35$ мм).

Эксплуатационные испытания замков ЗУК-155, упрочненных по данной технологии, проведенные на буровой № 19-Быстрица (Надворнянское УБР), показали, что нанесение покрытия можно производить не по всему периметру, а отдельными секторами (рис. 5.5.). При этом долговечность деталей практически не изменяется и составляет 1,6...1,7 раза, а производительность процесса увеличивается в среднем на 50% при снижении расхода материалов в 1,7...1,9 раза.

Разработанный технологический процесс внедрен в Надворнян-

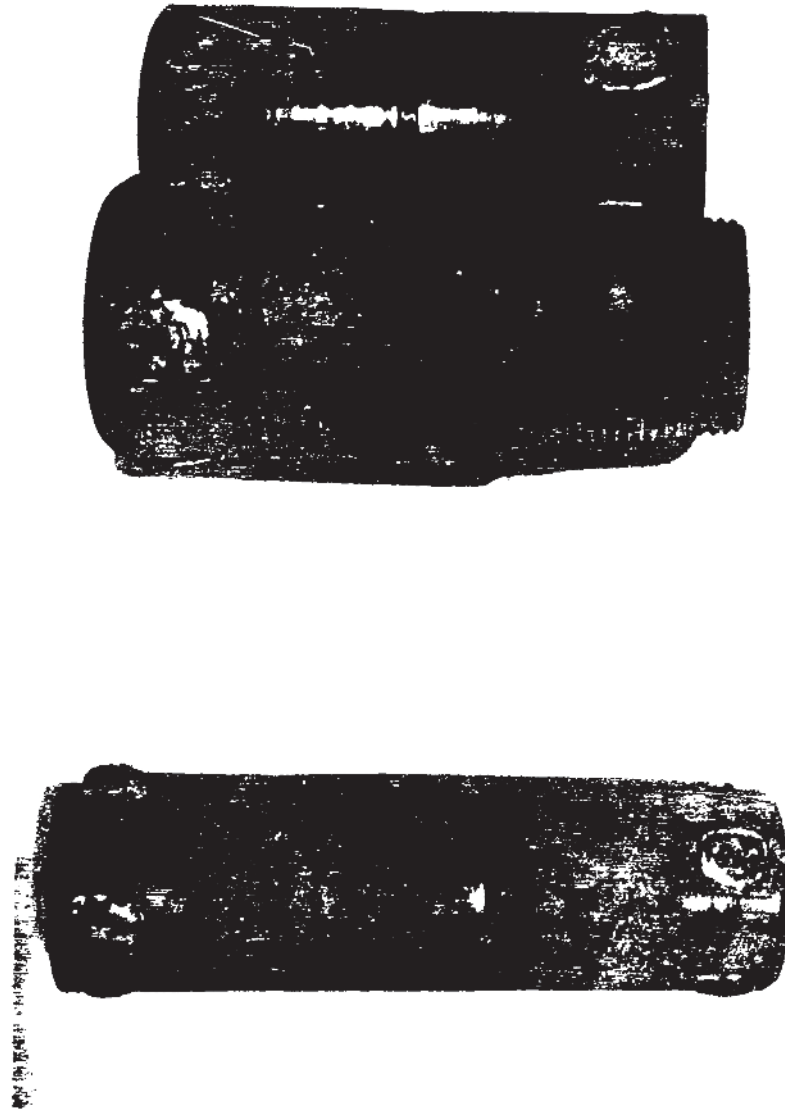


Рис. 5.5. Замки буровых труб ЗУК-155, наплавленные горизонтальной электрошлаковой наплавкой по слою порошкового присадочного материала

ском Управлении буровых работ объединения Укрнефть с годовым экономическим эффектом 12603 руб.

Горизонтальное электрошлаковое упрочнение применимо при наплавке наружных поверхностей цилиндрических деталей (замки буровых труб). При упрочнении (восстановлении) внутренних цилиндрических поверхностей деталей с внутренним диаметром 50... 500 мм этот вид наплавки вообще не применим.

С целью упрочнения такого класса деталей разработано специальное устройство для центробежной электрошлаковой наплавки, защищенное авторским свидетельством на изобретение (рис. 5.6)/157/.

Устройство состоит из неплавящегося мундштука I с наконечником 2, выполненным в виде шевронной шестерки с канавкой 3 в средней части. В мундштуке выполнены продольные каналы 4 с выходом в упомянутую канавку, для подачи электродной проволоки. С мундштуком жестко связана диафрагма 5, в которой выполнены каналы 6 для подачи флюса или шихты, состоящей из порошкового присадочного материала и флюса. Упрочняемая деталь 7 устанавливается на технологическую пластину 8, имеющую возможность вращения при помощи радиально-упорного подшипника 9, расположенного на упорной плите 10. Вращение детали осуществляется при помощи привода II через муфту 12, связанную с технологической пластиной, а ее центровка — прижимными роликами 13, установленными на трех кронштейнах 14, имеющих возможность радиального перемещения на упорной плите.

Процесс упрочнения осуществляется следующим образом.

При опускании мундштука вниз до соприкосновения его наконечника с технологической пластиной между ними возникает дуга, так как силовая цепь выпрямителя подключена к детали и мундштуку. В этот момент начинается подача флюса по каналам и медленное вращение самой детали (10...15 об/мин) с помощью приводного меха-

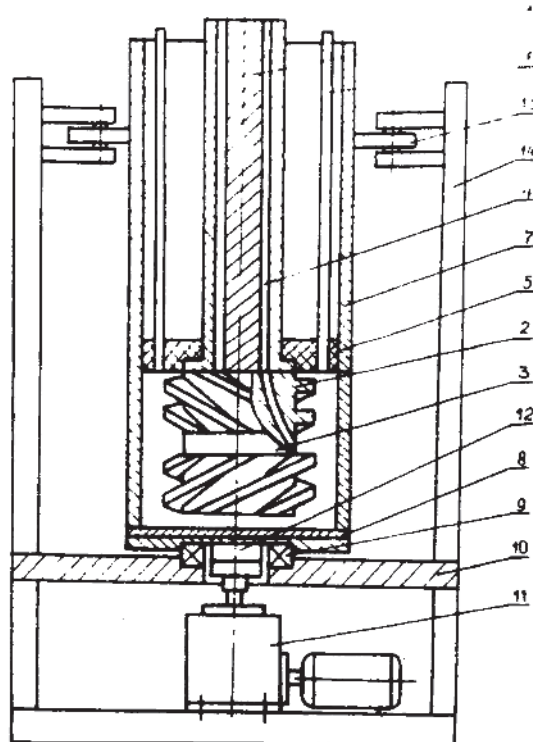


Рис. 5.6. Устройство для центробежной электрошлаковой наливки (а.с. № II469I3)

1 - мундштук; 2 - наконечник мундштука; 3 - канавка; 4 - электродный канал; 5 - диафрагма; 6 - флюсовый канал; 7 - упрочняемая деталь; 8 - технологическая пластина; 9 - подшипник; 10 - упорная плита; 11 - привод; 12 - муфта; 13 - прижимной ролик; 14 - кронштейн

низма. При этом в зазоре между наконечником мундштука и технологической пластиной наводится шлаковая ванна. Когда ванна поднимется выше канавки, а, следовательно, и выше отверстий для выхода проволочных электродов, включается механизм подачи этих электродов. Одновременно детали придается вращение со скоростью, обеспечивающей равномерное распределение жидкого металла по наплавляемой поверхности за счет центробежных сил. При этом мундштук начинают поднимать со скоростью, определяемой требуемой толщиной покрытия. Флюс, постоянно поступающий через каналы в зону наплавки, плавится, обеспечивая этим передвижение шлаковой и металлической ванн по внутренней упрочняемой поверхности цилиндрической детали. Шлак и наплавляемый металл, оказавшиеся вне зоны плавления (ниже наконечника мундштука), охлаждаются окружающей средой и, закристаллизовавшись, ограничивают передвижение неостывших верхних слоев. Диафрагма препятствует распределению жидкого металла вверх.

Устройство позволяет наплавлять тонкие покрытия. Распределение наносимого на поверхность детали металла по толщине зависит от внутреннего ее диаметра, количества расплавленного электродного металла и скорости подъема мундштука. При увеличении скорости движения мундштука и неизменной скорости подачи электродной проволоки уменьшается толщина наплавляемого слоя. Определенные соотношения внутреннего диаметра детали, скорости подачи электродной проволоки и подачи мундштука дают возможность получить покрытия с минимальной толщиной до 1 мм. Изменяя скорость подъема мундштука по заранее рассчитанной зависимости, можно нанести слой с переменной толщиной по высоте упрочняемой детали.

5.2. Упрочнение рабочих элементов тяговых машин

Центробежные дымососы двустороннего всасывания типа Дх2 (Д-20х2 и Д-18х2) предназначены для отсасывания дымовых газов из топек паровых стационарных котлов. Ими комплектуются пылеугольные котлы с уравновешенной тягой паропроизводительностью 220...480 т/ч, а также газомазутные котлы с уравновешенной тягой такой же производительности /158/.

Центробежные мельничные вентиляторы одностороннего всасывания типа ВВСМ-у (ВВСМ-1у, ВВСМ-2у, ВВСМ-3у) служат для пневматической транспортировки угольной пыли от валково-среднеходовых мельниц к горелкам котлоагрегата. Вентиляторы обеспечивают производительность 3,5...30 т/ч угля и допускают работу при запыленности потока до 500 г угольной пыли на 1 кг воздуха /158, 159/.

Основным узлом мельничного вентилятора и дымососа является рабочее колесо, представляющее собой ступицу, на которой закреплены лопатки (64 - у дымососа Дх2 и 6 - у мельничного вентилятора ВВСМ-у) /158,159/. Они изготавливаются штамповкой из листовой стали Ст.3 (ГОСТ 380-71) толщиной 8 мм. Лопатки дымососов имеют вид изогнутых листов, приваренных к ступице. Вентиляторные лопатки - плоские пластины, крепятся к ступице болтами.

Лопатки наиболее интенсивно подвергаются абразивному изнашиванию /160/. Частицы пыли, проходя через колесо радиальной машины, отклоняются к основному диску. Вследствие этого износ возрастает в направлении от входной кромки лопатки к выходной. Наибольший износ происходит на расстоянии около 150 мм от вершины лопатки. После 2000...3600 часов работы толщина их у вершины, по осевой линии, уменьшается примерно вдвое, а ближе к выходной

кромки сходит на нет. Вследствие износа производительность лопаток значительно уменьшается уже через 800...1200 часов работы, а через 3000 часов хода она сокращается настолько, что может вызвать ограничение нагрузки блока.

Лопатки дымососов Дх2 и мельничных вентиляторов ВВСМ-у на предприятии "Североэнергоремонт" упрочняются по технологии, разработанной в ИИДМАШ АН БССР. Технология состоит из двух стадий: газопламенного напыления покрытий и последующее их оплавление электрошлаковым методом.

Газопламенное напыление осуществлялось универсальной термораспылительной установкой УПТР-1-78М, предназначенной для нанесения защитных, износостойких, антифрикционных покрытий из порошковых материалов на детали машин и конструкций /161/.

Установка состоит из пульта с блоками автоматического управления подачи рабочих газов, термораспылительного пистолета с бункером-питателем и устройства для крепления пистолета при работе в полу- и автоматическом режиме.

В качестве рабочих газов использовался ацетилен (пропан-бутан) и кислород. Для "обжима" пламени применялся очищенный от масла и влаги воздух.

Перед напылением поверхности упрочняемых участков лопаток подвергались предварительной подготовке обезжириванием специальной эмульсией с последующей струйно-абразивной обработкой. Процесс осуществлялся с применением порошка ПГ-10Н-01 (ТУ 48-4206-156-82). Основные технологические характеристики газопламенного напыления представлены в таблице 5.1.

Покрытия, напыленные на поверхности лопаток, обладают пористостью 15...20% и невысокой прочностью сцепления с основным металлом. Поэтому без последующей термообработки они не могут

Таблица 5.1

Технологические характеристики процесса
газопламенного напыления

Показатели	Единица измерения	Величина
Полезный объем порошкового пистолета	л	0,66
Размер частиц напыляемого порошка	мкм	30...160
Дистанция напыления	мм	160...260
Рабочее давление газов:	МПа	
кислород		0,15
ацетилен		0,095
сжатый газ (воздух)		0,04...0,25
Расход газов:	м ³ /ч	
кислород		1,75
ацетилен		0,95
сжатый газ (воздух)		0,4...0,9
Производительность установки	кг/ч	9,6
Коэффициент использования порошкового материала	-	0,95...0,98
Толщина наносимого покрытия	мм	4...5
Ширина наносимого покрытия	мм	150...200

использоваться в процессе эксплуатации. Обычно термообработка таких слоев осуществляется путем нагрева до температуры так называемого оплавления. Для этих целей чаще всего применяется пламя газовой горелки и токи высокой частоты. Однако применение этих методов в данном случае не целесообразно из-за сравнительно большой площади упрочняемого слоя и значительной массы деталей.

Более рационально и экономично применять для оплавления напыленного слоя электрошлаковый метод.

Оплавление предварительно напыленных покрытий на лопатки дымососов Дх2 и мельничных вентиляторов ВВСМ-у осуществлялось на аппарате А-820К, выпускаемом Каховским заводом электросварочного оборудования. Рабочее колесо дымососа вращалось при помощи кантователя специальной конструкции, имеющего возможность плавного перемещения в осевом направлении. Для наведения и перемещения шлаковой ванны использовался кокиль-кристаллизатор с размерами внутренней полости 200x80 мм. В качестве неплавящегося электрода применяли два графитовых электрода сечением 50x50 мм. Шлаковую ванну наводили на флюсе АН-8. Режим процесса электрошлакового оплавления: U 30...32 В, I 650...700 А, h_s 30...35 мм, $V_H = 1,8$ м/ч.

Применение описанной технологии позволяет формировать износостойкое покрытие, повышающее в 3...4 раза долговечность лопаток тягодувных машин.

Предлагаемая технология горизонтального электрошлакового упрочнения лопаток дымососов Д-20х2, Д-18х2 и мельничных вентиляторов ВВСМ-1у, ВВСМ-2у, ВВСМ-3у внедрена на специализированном производственном предприятии "Североэнергоремонт" с годовым экономическим эффектом 13590,7 руб.

5.3. Упрочнение ножей землеройно-транспортных машин

Скреперы предназначены для послойной разработки грунта, транспортировки его к месту разгрузки и отсыпки слоем заданной толщины при разработке котлованов и рытье траншей без установки креплений, срезке бугров и засылке низин, возведении насыпей и разработке вымоков /162, 163/. Основным рабочим органом скрепера служит прямой нож, отделяющий грунт от массива и подающий его в ковш, который открыт сверху и ограничен боковыми, задней и передней стенками (заслонкой или элеватором) /163, 164/.

Производительность и долговечность таких машин во многом определяются состоянием их рабочих органов в процессе эксплуатации. Изменение геометрических размеров ножа вследствие абразивного изнашивания оказывает существенное влияние на величину сопротивления копанью. Установлено, что износ режущего органа, допускаемый в процессе эксплуатации, вызывает увеличение силы, необходимой для резания ножами на 90...200%, что делает сопротивление рабочих органов преобладающей частью сопротивлений копанью /165/.

Перспективным, с точки зрения устранения этих недостатков, является упрочнение режущей кромки ножа износостойкой наплавкой (рис. 5.7, б) /166/.

Изнашивание неупрочненного ножа землеройных машин происходит по передней режущей кромке (пунктир на рис. 5.7, а). Если нож имеет твердосплавную наплавку на передней плоскости, то характер изнашивания изменяется (пунктир на рис. 5.7, б), и срок службы увеличивается за счет преобладающего износа по задней плоскости. Кроме того, в этом случае изнашивание детали проис-

ходит более равномерно. Одновременно будет происходить самозатачивание ножа (его режущая кромка будет оставаться заостренной), в результате чего повышается производительность и износостойкость последнего /166/.

Для упрочнения режущей кромки ножей скрепера разработан способ горизонтальной электрошлаковой наплавки, в котором толщина покрытия определяется зазором между наплавляемой поверхностью и кокилем, в котором жидкий металл от выливания удерживается струей защитного газа /167/. Требуемая ширина слоя при этом задается снижением давления газа на определенном участке задней стенки кокиля.

Кокиль (рис. 5.8), состоящий из водоохлаждаемой 1 и неводоохлаждаемой 2 частей, устанавливается на упрочняемой детали 3. С помощью плавящегося 4 и неплавящегося 5 электродов в кокиле наводятся шлаковая 6 и металлическая 7 ванны, причем, высота металлической ванны должна превышать высоту наносимого покрытия 6. Для получения композиционных износостойких покрытий в ванну может подаваться из специального бункера-питателя 9 порошковый присадочный материал. После наведения металлической ванны кокиль поднимают на высоту наносимого покрытия и одновременно через газовые каналы 10 подают защитный газ по всему периметру кокиля. Величина давления газа P_r должна компенсировать суммарное давление слоя жидкого металла $\rho_1 h_1$ и столба жидкого шлака $\rho_2 h_2$ и поэтому выбирается из соотношения

$$P_r \geq \frac{(\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2) \cdot g}{\sin \alpha} \quad (5.1)$$

где P_r - давление газа, Па;

ρ_1 - плотность жидкого металла, кг/м³;

ρ_2 - плотность жидкого шлака, кг/м³;

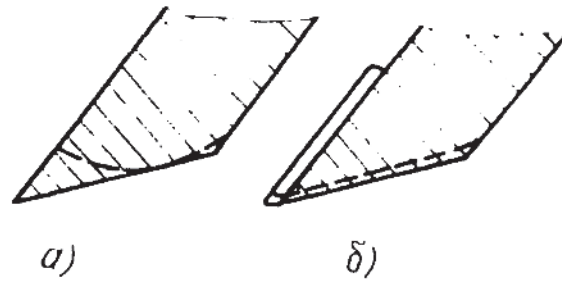


Рис. 5.7. Схема изнашивания режущей кромки ножа скрепера:

а) неупрочненный нож; б) упрочненный нож

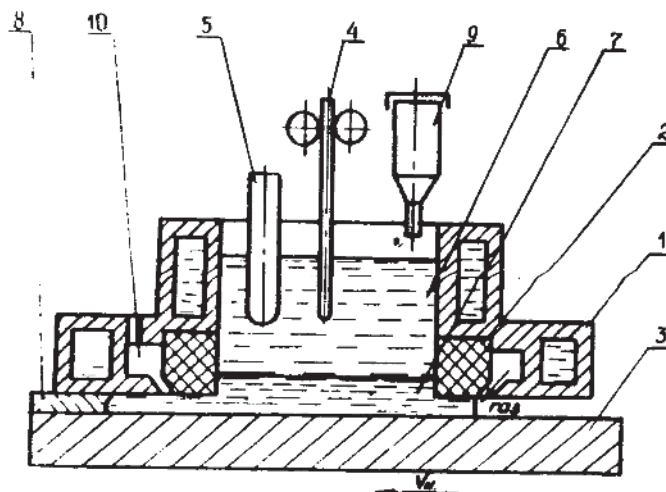


Рис. 5.8. Схема горизонтального электрошлакового упрочнения с использованием защитного газа (а.с.1181217)

1 - водоохлаждаемая часть кокиля; 2 - неохлаждаемая часть кокиля; 3 - упрочняемая деталь; 4 - плавящийся электрод; 5 - неплавящийся электрод; 6 - шлаковая ванна; 7 - металлическая ванна; 8 - покрытие; 9 - бункер-питатель; 10 - газовые каналы

- h_1 – высота слоя жидкого металла, м;
 h_2 – высота слоя жидкого шлака, м;
 g – ускорение свободного падения, м/с²;
 α – угол наклона газовой струи.

Жидкий металл при этом затекает под нижний торец неохлаждаемой части кокиля, обжимается газовой струей и удерживается в зазоре между деталью и кокилем. Затем давление газа на участке наплавки, соответствующем ширине покрытия, снижается до величины остаточного давления (давление, необходимое для предотвращения затекания жидкого металла в газовый канал соответствующей секции задней стенки кокиля) и включается механизм перемещения детали со скоростью наплавки V_H . Жидкий металл затекает под водоохлаждаемую часть кокиля и кристаллизуется, образуя наплавленное покрытие.

Упрочнение ножей скреперов осуществлялось на аппарате А-1416, переоборудованном под горизонтальную электрошлаковую наплавку (рис. 3.3) (см. § 3.2). Установка и перемещение ножей производилось при помощи силового стола УМ-2434 (рис. 3.4). Наведение и перемещение шлаковой и металлической ванн выполнялось с использованием кокиля-кристаллизатора, состоящего из двух частей: водоохлаждаемой медной и неохлаждаемой графитовой с размерами внутренней полости 60x60 мм (рис. 5.8). Электрод – неплавящийся графитовый сечением 40x20 мм. Режим процесса наплавки: напряжение 30...32 В, сила тока 550...600 А, высота шлаковой ванны 30...35 мм, скорость наплавки 1,4 м/ч. Процесс вели с применением защитного газа – аргона, подаваемого в зазор между кокилем-кристаллизатором и упрочняемой деталью с давлением 2300...2370 Па. На участке наплавки, соответствующем ширине внутренней полости кокиля (60 мм), давление газа в канале между

водоохлаждаемой и неохлаждаемой частями снижалось до величины 1500...1700 Па. В качестве порошкового присадочного материала применяли ферросплавный материал ФХ-800 дисперсностью 0,3...0,6 мм. Расход порошка 2,5...3,0 кг/ч. Толщина покрытия 3...4 мм.

Упрочненные по данной технологии ножи самоходного скрепера МоАЗ-546П-Д357П проходят опытно-промышленные испытания на Могилевском автомобильном заводе. Предварительно установлено, что износостойкость наплавленных ножей в 1,5...1,6 раза выше серийных не упрочненных.

5.4. Механическая обработка покрытий

При планировании процесса нанесения покрытий должна учитываться система размерных, временных, экономических и других связей с целью обеспечения необходимых показателей качества слоя, в том числе надежности и долговечности. Поэтому технологический процесс упрочнения должен состоять из ряда последовательных взаимодополняющих операций, включающих технологические переходы, связанные с окончательной обработкой покрытий. Важным этапом при этом является выбор метода и определения режимов механической обработки.

Известно, что механическая обработка приводит, как правило, к уплотнению или разрыхлению поверхностного слоя детали. Поэтому необходимым условием в процессе обработки покрытий на основе порошковых присадочных материалов является сохранение высоких свойств, характерных для этих материалов.

Механическая обработка высокохромистых сплавов и наплавов производится лезвийным или абразивным инструментом. Многочисленные исследования в этой области позволили установить основные физические особенности процесса обработки и разработать рекомен-

дании по их применению в промышленности /168-171/.

При токарной обработке успешно применяются инструменты, армированные твердым сплавом, в частности, ВКЗМ /172, 173/. Поверхностный слой после обработки таким инструментом состоит из уплотненной тонкой прослойки, под которой находятся зерна сплава, подвергшиеся срезу, сколу и пластической деформации. Шероховатость обработанной поверхности Ra 2,5...0,32.

Высокую производительность обеспечивают инструменты с режущим элементом на основе нитрида бора (эльбор-Р, белбор-Р и гексанит-Р) /168, 174/. Их использование позволяет повысить скорость в 10...20 раз и значительно уменьшить шероховатость /174, 175/.

Шероховатость поверхности детали значительно влияет на ее эксплуатационные свойства: износостойкость, коррозионную стойкость, усталостную прочность. Для каждого метода механической обработки характерен свой диапазон получаемых шероховатостей, также как и для каждого метода наплавки. Особенно важно знать высоту микронеровностей, когда наплавленная поверхность механически обрабатывается. В этом случае необходимо наносить покрытия с учетом припуска под последующую обработку. Наличие шероховатости при горизонтальной электрошлаковой наплавке по слою порошка определяется интенсивной конвекцией в шлаковой ванне и периодичностью кристаллизации жидкого металла (рис. 5.9)

Увеличение напряжения процесса электрошлакового упрочнения приводит к возрастанию шероховатости покрытия от R_z 200...400 мкм при $U = 28$ В до R_z 600...850 мкм при $U = 35$ В (рис. 5.10).

Скорость наплавки также влияет на величину шероховатости, но в меньшей степени (рис. 5.11). В этом случае увеличение ско-

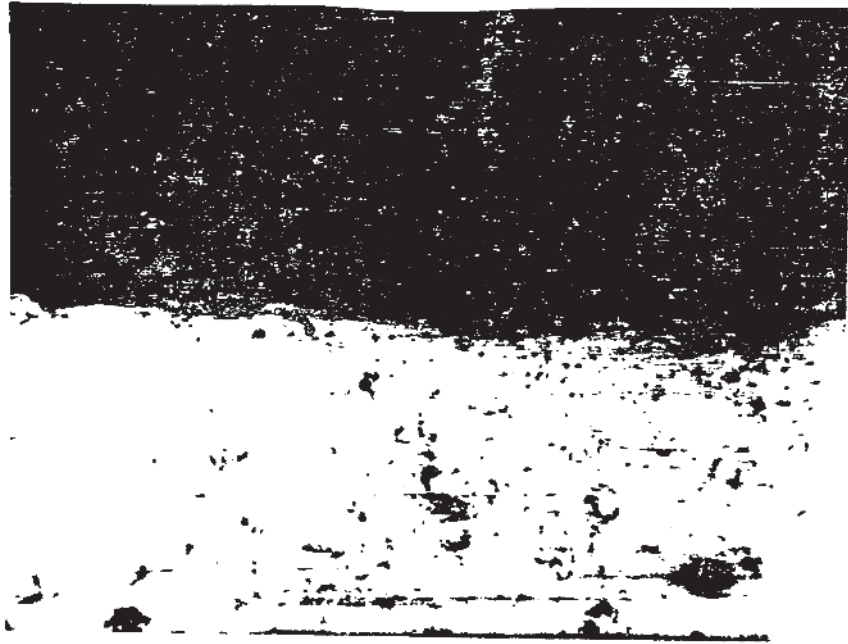


Рис.5.9. Микрорельеф поверхности наплавленного металла (x 70)

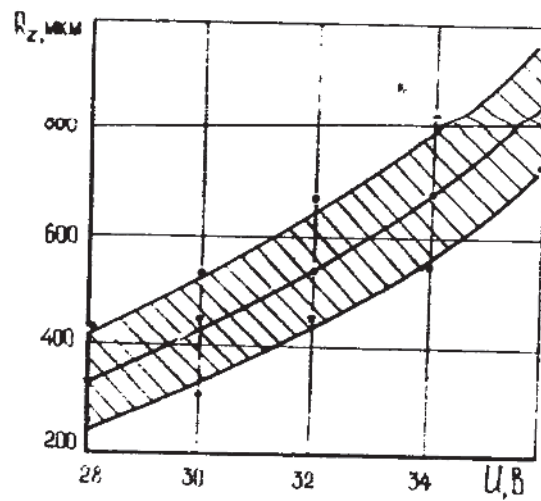


Рис.5.10. Зависимость шероховатости покрытия от напряжения процесса упрочнения

рости перемещения кокиля-кристаллизатора по поверхности детали приводит к увеличению расстояния между отдельными "чешуйками" (чешуйка - местное увеличение высоты слоя, рис. 5.12), в то время как высота их существенно не изменяется.

Таким образом, доминирующее влияние на шероховатость упроченной поверхности оказывает напряжение наплавки. Для уменьшения шероховатости необходимо выбирать максимально допустимое значение напряжения, обеспечивающее качественное сплавление покрытия с основным металлом ($K'' \geq 0,92$).

Исследования качественных характеристик упроченной поверхности проводились с целью определения влияния технологических параметров механической обработки (подачи, глубины резания и скорости резания) на шероховатость обработанной поверхности.

Наибольшее влияние на шероховатость поверхности, обработанной резцом из бейбор-Р (передний угол резца $\gamma = -10 \dots -15^\circ$, радиус при вершине резца $r = 0,4 \dots 0,5$ мм), оказывает подача. С ее увеличением от 0,11 до 0,3 мм/об высота микронеровностей (R_z) возрастает в 1,8 раза, от 25 мкм до 45 мкм (рис. 5.13).

Установлен характер влияния скорости резания на шероховатость обработанной поверхности (рис. 5.14). При скорости менее 50 м/мин шероховатость поверхности относительно высокая (R_z 35...40 мкм). С увеличением скорости резания до 90...110 м/мин шероховатость уменьшается до R_z 25 мкм. Дальнейшее увеличение скорости приводит к росту шероховатости.

Таким образом, минимальная шероховатость покрытий, полученных горизонтальной электрошлаковой наплавкой, обеспечивается при подаче $S = 0,10 \dots 0,15$ мм/об в диапазоне скорости резания $V = 60 \dots 150$ м/мин.

При установленных оптимальных режимах была проведена токар-

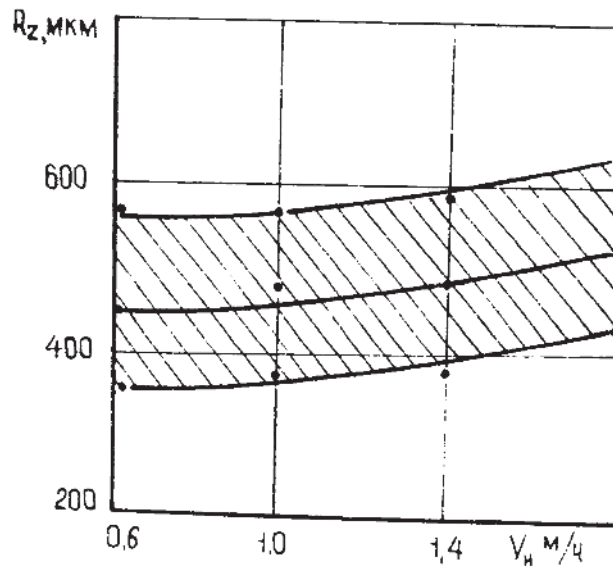


Рис. 5.11. Зависимость шероховатости покрытия от скорости наплавки



Рис. 5.12. Внешний вид покрытия, наплавленного горизонтальной электрошлаковой наплавкой по слою порошкового присадочного материала

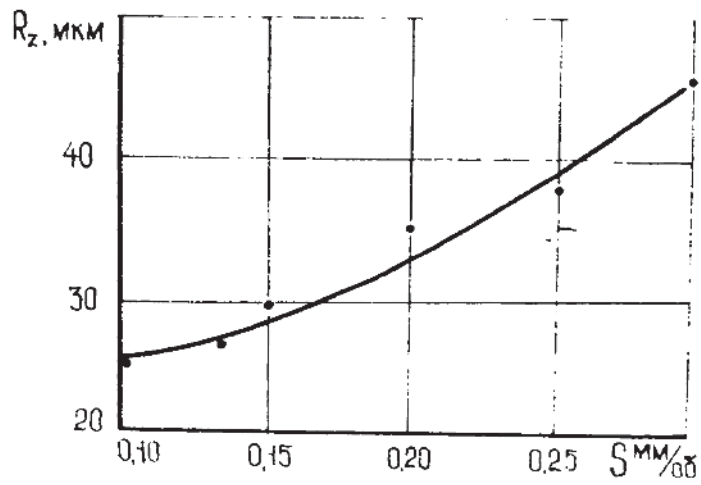


Рис. 5.13. Влияние подачи S на шероховатость обработанной поверхности ($t = 0,5$ мм; $V = 60$ м/мин; $Z = 0,5$ мм)

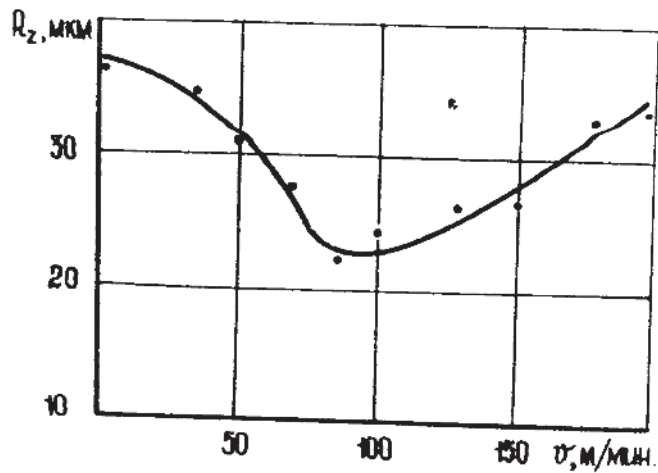


Рис. 5.14. Влияние скорости резания V на шероховатость обработанной поверхности ($S = 0,2$ мм/об; $t = 0,5$ мм)

ная обработка (наружное обтачивание) бурильного замка ЗУК-155. Режимы обработки и соответствующие им значения шероховатости приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2

Точение	Глубина резания, мм	Подача, мм/об	Скорость резания, м/мин	Шероховатость, мкм
Черновое	0,3...0,5	0,15...0,20	50...160	25...40
Чистовое	0,08...0,12	0,06...0,10	75...180	2...5

Обработка опытной партии бурильных замков показала, что черновое обтачивание высокохромистого наплавленного металла резцом из бейбора-Р обеспечивает шероховатость рабочей поверхности в пределах R_z 30...50 мкм.

5.5. Экономическое обоснование эффективности применения горизонтального электрошлакового упрочнения

Сравнительный технико-экономический анализ разработанной технологии проводился на примере упрочнения замков бурильных труб ЗУК-155 (ГОСТ 5286-75) в Надворнянском Управлении буровых работ объединения Укрнефть.

Расчеты выполнялись в соответствии с Методикой определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений, утвержденной Постановлением ГК СМ СССР по науке и технике, Госпланом СССР, АН СССР, ГК по делам изобретений и открытий СМ СССР от 14 февраля 1977 г. № 48116/13/3-38/14; Рекомендациями по эксплуатации, организации технического обслуживания и ремон-

та бурового оборудования и нормативно-техническими данными по текущему обслуживанию и ремонту, представленными Надворнянским Управлением буровых работ.

Годовой экономический эффект от применения указанной технологии при упрочнении одного замка рассчитывался по формуле:

$$\mathcal{E} = Z_1 \frac{P_1 + E_H}{P_2 + E_H} - Z_2 \quad (5.2)$$

где Z_1 - стоимость замка;

Z_2 - стоимость упрочнения замка;

$P_1 = \frac{1}{T_1}$; T_1 - срок службы замка без наплавки;

$P_2 = \frac{1}{T_2}$; T_2 - срок службы упрочненного замка;

E_H - нормативный коэффициент эффективности ($E_H = 0,15$).

Стоимость упрочнения замка определялась по формуле:

$$Z_2 = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + H \quad (5.3)$$

где C_1 - стоимость материалов и затраты на электроэнергию;

C_2 - зарплата с начислением;

C_3 - накладные расходы от основной зарплаты;

C_4 - амортизационные отчисления;

C_5 - затраты по текущему ремонту и обслуживанию;

H - накопления ($H = 16\%$).

Затраты на материалы и электроэнергию представлены в таблице 5.3, в таблице 5.4 - расчет затрат труда и заработной платы, а в таблице 5.5 - расчет затрат на эксплуатацию оборудования.

Таблица 5.3

Расчет стоимости материалов и электроэнергии,
расходуемых на упрочнение замка

№ п/п	Наименование материалов	Цена за единицу (Р/кг; Р/кВт.ч)	Количество во (кг, кВт.ч)	Сумма, руб.
1.	Порошковая присадка ФХ-800	0,289	0,21	0,061
2.	Флюс АН-8	0,26	0,006	0,002
	АН-9	1,00	0,006	0,006
3.	Графитовый электрод	0,12	0,04	0,005
4.	Электроэнергия	0,035	4,5	0,158
5.	Сумма затрат на материалы и электроэнергию			0,232

Таблица 5.4

Расчет труда и зарплаты при упрочнении замка

№ п/п	Выполняемые работы	Часовая тариф- ная ставка, коп.	Время, ч	Зарплата, руб.
1.	Рабочий сварщик-авто- матчик 4-го разряда	67,0		
2.	Время наплавки замка		0,375	
3.			0,017	
3.	Основная зарплата			0,263
4.	Дополнительная зарплата (14%)			0,037
5.	Отчисления на социаль- ное страхование (7,9%)			0,024
6.	Всего заработная плата сварщика-автоматчика			0,324
7.	Накладные расходы от основной зарплаты (15%)			0,039

Таблица 5.5

Расчет затрат по эксплуатации оборудования при
упрочнении замка

№ п/п	Показатели	Сумма, руб.
1.	Балансовая стоимость оборудования	2125
2.	Амортизационные отчисления (34,2% от общей стоимости оборудования), приходящиеся на один замок	0,242
3.	Текущий ремонт (20% от стоимости оборудования), приходящийся на один замок	0,142

В таблице 5.6 представлена калькуляция стоимости упрочнения замка.

Таблица 5.6

Калькуляция стоимости упрочнения замка

№ п/п	Статьи затрат	Сумма, руб.
1.	C_1	0,232
2.	C_2	0,324
3.	C_3	0,039
4.	C_4	0,242
5.	C_5	0,142
6.	Себестоимость	0,979
7.	H	0,157
8.	Полная стоимость	1,136

В таблице 5.7 представлены исходные данные для расчета экономического эффекта технологического процесса упрочнения замков бурильных труб на предприятиях Надворнянского Управления буровых работ электрошлаковым методом.

Таблица 5.7

Исходные данные для расчета экономического эффекта

№ п/п	Показатели	Значения показателей
1.	Z_1	45 руб.
2.	Z_2	1,136 руб.
3.	T_1	0,5 г
4.	T_2	0,85 г
5.	P_1	2
6.	P_2	1,18
7.	E_H	0,15

Годовой экономический эффект от внедрения данного технологического процесса при упрочнении одного замка составляет:

$$\Theta = 45 \frac{2 + 0,15}{1,18 + 0,15} - 1,136 = 71,608 \text{ руб.}$$

Выводы по главе

1. Технологический процесс упрочнения замков бурильных труб ЗУК-155 обеспечивает увеличение межремонтного цикла их работы на 60...70%. Экономический эффект от внедрения данной технологии составил 12603 руб.

2. Технология нанесения покрытий на быстроизнашивающиеся части лопаток дымососов Д-20х2, Д-18х2 и мельничных вентиляторов ВВСМ-1у, ВВСМ-2у, ВВСМ-3у позволяет продлить срок службы этих машин в 3...4 раза с экономическим эффектом 13590,7 руб.

3. Нанесение покрытия на рабочую поверхность ножа самоходного скрепера МоАЗ-546П-Д357П позволяет повысить их износостой-

кость в 1,5...1,6 раза по сравнению с серийными.

4. Разработаны устройство для центробежного электрошлакового упрочнения и способ горизонтальной электрошлаковой наплавки с использованием защитного газа, защищенные авторскими свидетельствами на изобретения.

5. Механическая обработка полученных покрытий лезвийным инструментом на основе бельбора-Р и тексанита-Р обеспечивает шероховатость обработанной поверхности в пределах R_z 2...40 мкм.

ВЫВОДЫ

1. Показана возможность получения тонкослойных (1...5 мм) покрытий с высокими физико-механическими свойствами горизонтальной электрошлаковой наплавкой неплавящимся электродом по слою порошкового присадочного материала с использованием стальной ленты (а.с. № 1235062). При этом обеспечивается существенное уменьшение глубины проплавления упрочняемой детали, что позволяет наносить покрытия на тонкостенные детали.

2. Построена теоретическая модель термического цикла нагрева плоской детали при электрошлаковом упрочнении, на основании которой составлена программа расчета на ЭВМ распределения температуры в покрытии и основном металле. На основе анализа зависимости технологических параметров процесса от температуры жидкого металла установлены рациональные режимы упрочнения: напряжение - 30 В, сила тока - 450...500 А, глубина шлаковой ванны - 30...35 мм, расстояние от торца неплавящегося электрода до поверхности металлической ванны - 9...11 мм, средняя скорость наплавки - 1,4 м/ч.

3. Показано, что при использовании в качестве порошкового присадочного материала карбида хрома ФХ-800 заэвтектическая зона, составляющая 70...80% общей толщины слоя, состоит из первичных карбидов хрома (тригональный карбид хрома $C_{27}C_3$ и орторомбический $C_{23}C_2$) в ледебуритной эвтектике и небольшого количества аустенита. Введение в слой 0,5...7,0% бора вызывает появление в этой зоне добавочной фазы - бориды хрома C_2B_3 . При этом износостойкость покрытия повышается на 20...40%.

4. Определено, что износостойкость покрытия при использовании в качестве порошковых присадочных материалов карбида хрома ФХ-800 и бориды хрома C_2B_2 с гранулометрическим составом 0,10...0,63 мм максимальна при концентрации хрома 33%, бора

3%, и в 4,6...4,7 раза больше, чем у закаленной стали 45.

Получены регрессионные уравнения, описывающие изменение износостойкости в зависимости от концентрации хрома и бора.

5. Износостойкость покрытий, полученных электрошлаковым упрочнением, в 1,3...2,1 раза выше, чем при наплавке теми же материалами на аналогичных режимах методом вертикальной электрошлаковой наплавки неплавящимся трубной-электродом с введением порошкового присадочного материала в шлаковую ванну через электрод и вертикальной электрошлаковой наплавкой неплавящимся электродом с введением порошка в периферийные зоны шлаковой ванны, при которых источник нагрева непосредственно воздействует на присадочный материал.

6. Установлены режимы и технологические приемы, обеспечивающие получение качественных покрытий с изменяющимися параметрами (шириной, высотой и длиной слоя), при использовании горизонтальной электрошлаковой наплавки с обжатием металлической ванны струей защитного газа (а.с. № 1181217) и с применением специального шибера устройства (а.с. № 1167835).

7. Разработаны рекомендации по механической обработке покрытий. Установлено, что использование лезвийного инструмента из бейбор-Р и гексанита-Р обеспечивает шероховатость обработанной поверхности в пределах R_z 2...40 мкм.

8. Разработана технология нанесения износостойких покрытий на замки буровых труб ЗУК-155, на быстроизнашивающиеся детали дымососов Дх2 и мельничных вентиляторов ВВСМ-у, а также на ножи самоходных скреперов МоАЗ-546П-Д357П. Годовой экономический эффект от внедрения разработок составил 26193,7 рублей.

ЛИТЕРАТУРА

✓ 1. Материалы Пленума Центрального Комитета КПСС. 23 апреля 1985 г. - М.: Политиздат, 1985. - 31 с.

✓ 2. Основные направления экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 года. - Труд, 1986, 9 марта.

3. Lubrication (tribology) education and research (Jost Report) -- Department of Importance of Tribology. -- Gesellschaft für Tribologie, FRG, 1975.

4. Джост Л., Шофилд Дж. Экономия энергии с помощью трибологии: Техничко-экономическое исследование. - Трение и износ, 1982, т.3, № 2, с. 353-366.

✓ 5. Крагельский И.В. Трибоника: достижения, проблемы, перспективы. - В кн.: Материалы Всесоюзной научно-технической конференции: Теория трения, износа и смазки. - Ташкент, 1976, с. 3-13.

✓ 6. Zuzn Herbert, Pfeiffer Ernst. Das Auftragschweißen ergänzt verändert und bestimmt die Funktion von Oberflächen. -- Maschinenmarkt, 1981, 8, 7, N 60. 5. 1209--1212.

7. Новожилов Б.А., Воробьев Г.А., Пешалов Ю.А. Повышение износостойкости колонны буровых и обсадных труб. Обзорная информация. Сер. "Бурение". - М.: ВНИМОЭНГ, 1980. - 80 с.

8. Зиненко В.П., Новожилов Б.А. Современные колонны буровых труб и анализ их работы. Обзорная информация. Сер. "Техника и технология геологоразведочных работ и организация производства". - М.: ВИЭМС, 1979. - 32 с.

9. Martsch T. Die Dynamik im Bohrstang. "Erdöl-Erdgas-Zeitschrift", 1968, Bd.84. S.297-299.

10. Лачинян Л.А., Угаров С.А. Конструирование, расчет и эксплуатация бурильных геологоразведочных труб и их соединений. - М.: Недра, 1975. - 232 с.

11. Bruse H.W. Downhole assemble design increases ROP, cuts costs, "World Oil", 1977, VI, v 184, No 7, pp. 59-65.

12. Сароян А.Е., Грузинов Я.А. Повышение работоспособности бурильных замков. - Машины и нефтяное оборудование, 1973, № 2, с. 6-8.

13. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Камбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. - М.: Машиностроение, 1977. - 526 с.

14. Костецкий Б.И. Сопротивление изнашиванию деталей машин. - М.: Машгиз, 1959. - 478 с.

15. Ткачев В.Н. Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин. - М.: Машиностроение, 1971. - 264 с.

16. Тененбаум М.М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. - М.: Машиностроение, 1966. - 33 с.

17. Wahl W. Auftragschweiben zum Verschleibschutz. "VDJ-Ber.", 1984, No 506, pp. 123-129.

18. Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Бершадский Л.И. и др. Надежность и долговечность машин. - Киев: Техника, 1975. - 405 с.

19. Лищинский С.П., Мардахаев А.А., Данильченко Б.В. и др. Повышение износостойкости замков бурильных труб. - Нефтяная и газовая промышленность, 1984, № 1, с. 28-30.

20. Протекторная защита труб при бурении глубоких скважин в США. Обзор зарубежной литературы. Сер. "Машины и оборудование нефтяной промышленности". - М.: ВНИИОЭНГ, 1972. - 92 с.

21. Голубец В.М., Зайонц О.Л., Козуб В.В. и др. О новом методе повышения ресурса работы замков геологоразведочных бу-

рильных труб. - Физико-химическая механика материалов, 1980, № 1, с. 16-18.

22. Акчурич Ю.А., Слюняев А.П., Трещанин В.С. Армирование бурильных замков. - В сб.: Нефтепромысловые трубы. - Кузбашев, 1976, с. 9-11.

23. Лесничий В.С. Применение сварки и наплавки для повышения надежности и износостойкости бурового оборудования и бурильного инструмента. Сер. "Бурение". - М.: ВНИИОЭНГ, 1981. - 45 с.

24. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением/Под общ. ред. Б.Е.Патона. - М.: Машиностроение, 1974. - 768 с.

25. Сварка в СССР. Т.2. Теоретические основы сварки, прочности и проектирования. Сварочное производство. - М.: Наука, 1981. - 493 с.

26. Сварка в машиностроении. Т.1 /Под ред. Н.А.Ольшанского.- М.: Машиностроение, 1978. - 501 с.

27. Дорожкин Н.Н. Упрочнение и восстановление деталей машин металлическими порошками. - Минск: Наука и техника, 1975. - 152 с.

28. Дудан А.В. Электрошлаковая наплавка износостойких покрытий. - В кн.: Молодежь, наука, производство. - Кишинев: Штиинца, 1984, с. 243-244.

29. Электрошлаковая сварка и наплавка /Под ред. Б.Е.Патона. - М.: Машиностроение, 1980. - 511 с.

30. Электрошлаковая сварка / Под ред. Б.Е.Патона. - Киев: Машгиз, 1959. - 404 с.

31. Сузук-Слюсаренко И.И. Электрошлаковая сварка и наплавка.-В кн.: Итоги науки и техники. Т.9.-М.:ВИНИТИ,1977. - 81 с.

32. Сварка в СССР. Т. I. Развитие сварочной техники и науки о сварке. Технологические процессы, сварочные материалы и оборудование. - М.: Наука, 1981. - 536 с.

33. Шехтер С.Я., Резницкий А.М. Наплавка металлов. - М.: Машиностроение, 1982. - 72 с.

34. Сидорук В.С., Дудко Д.А., Мисюренко М.А. и др. Выбор размеров плавящегося мундштука и скорости подачи электродной проволоки при электрошлаковой сварке. - Автоматическая сварка, 1977, № 10, с. 44-47.

35. Справочник сварщика /Под ред. В.В.Степанова. - М.: Машиностроение, 1983. - 560 с.

36. Дудко Д.А., Рублевский И.Н. Влияние рода тока и полярности на металлургические процессы при электрошлаковой сварке. - Автоматическая сварка, 1958, № 3, с. 69-78.

37. Сидорук В.С., Дудко Д.А., Галинич В.И. и др. Стабилизация начальной стадии процесса электрошлаковой сварки. - Автоматическая сварка, 1976, № 5, с. 45-47, 53.

38. Патон Б.Е., Лебедев В.К. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки. - М.: Машиностроение, 1966. - 359 с.

39. Чвертко А.И., Патон Б.Е., Бельфор М.Г. и др. Аппаратура для механизированной дуговой и электрошлаковой сварки и электрошлаковой наплавки. - Киев: Наукова думка, 1978. - 200 с.

40. Прох Л.Ц., Шпаков Б.М., Яворская Н.М. Справочник по сварочному оборудованию, 2-е изд., перераб. и доп. - Киев: Техника, 1982. - 307 с.

41. Суцук-Слюсаренко И.И., Лычко И.И. Техника выполнения электрошлаковой сварки. - Киев: Наукова думка, 1974. - 95 с.

42. Суцук-Слюсаренко И.И., Лычко И.И., Семенов В.М. Основные и сварочные материалы для электрошлаковой сварки. - Киев

Наукова думка, 1981. - 112 с.

43. Дорожкин Н.Н., Лудан А.В. Тонкослойное электрошлаковое упрочнение. - Минск: ИНДМАШ АН БССР, 1985. - 32 с.

44. Патент 2393646 (Франция), 1979.

45. Патент 2824691 (ФРГ), 1981.

46. Патент 19364 (Япония), 1965.

47. Суцук-Слюсаренко И.И., Мартынова Т.И., Мастаков Е.Н. Электрошлаковая сварка тонкой проволокой. - Автоматическая сварка, 1975, № 5, с. 71-72.

48. Патент 3352993 (США), 1966.

49. Шварцер А.Я., Морозов Ю.Д. Электрошлаковый процесс при свободном формировании наплавляемого металла. - Автоматическая сварка, 1964, № II, с. 22-27.

50. Патон Б.Е. Руководство по электрошлаковой сварке. - Киев: М., 1956. - 168 с.

51. Ивочкин И.И., Соседов А.Ф. Об эффективности применения порошкообразного присадочного материала при электрошлаковой сварке. - Сварочное производство, 1969, № II, с. 18-19.

52. Рошупкин Н.П., Ивочкин И.И., Смирнов Б.А. Закономерности кристаллизации металла шва при электрошлаковой сварке с порошкообразным присадочным материалом. - Сварочное производство, 1976, № 8, с. 4-7.

53. Ивочкин И.И., Рошупкин Н.П., Соседов А.Ф. Повышение производительности и улучшение свойств сварного соединения при электрошлаковой сварке. - В сб.: Пути интенсификации и повышение эффективности сварочного производства. - М.: 1977, с. 24-29.

54. Буркацкий А.А., Дуркин В.Е., Суцук-Слюсаренко И.И. Легирование шва редкоземельными элементами при электрошлаковой сварке. - Автоматическая сварка, 1982, № I, с. 42-43.

55. Ксендзык Г.В., Фруммин И.И., Кусков Ю.М. Электрошлаковая наплавка зернистым присадочным материалом. – В кн.: Теоретические и технологические основы наплавки. Новые процессы механизированной наплавки. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1977, с.89–95.

56. Ксендзык Г.В., Кусков Ю.М. Чугунная дробь – новый вид присадочного материала для электрошлаковой наплавки. – В кн.: Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавочные материалы. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1978, с. 80–84.

57. Быстров В.А., Веревкин В.И., Быстров А.В. Повышение износостойкости звездочек дробилок агломерата путем электрошлаковой наплавки композиционными материалами. – В кн.: Теоретические и технологические основы наплавки. Свойства и испытания наплавленного металла. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1979, с. 155–159.

58. Ивочкин И.И., Малышев Б.Д., Соседов А.Ф. и др. Использование порошкообразного присадочного материала – интенсивный метод интенсификации сварки плавлением. – Автоматическая сварка, 1975, № 10, с. 35–38.

59. Соколов Г.Н., Филошин А.А. Электрошлаковая наплавка торцевых объемов деталей штампов. – В кн.: Теоретические и технологические основы наплавки. Современные способы наплавки и их применение. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1982, с. 84–89.

60. Светлополянский В.И., Орешкин В.Д., Данькин А.А. и др. Электрошлаковая наплавка тугоплавких соединений на резцовые державки. – Автоматическая сварка, 1976, № 2, с. 55–56.

61. Ильевич А.П. Машины и оборудование для заводов по производству керамики и огнеупоров. – М.: Машиностроение, 1968. – 355 с.

62. Ракитин А.Н., Шефер В.Г., Нжулинский Г.А. и др. Опыт

электрошлаковой наплавки звездочек дробилок агломерата. - Сварочное производство, 1978, № 7, с. 15-16.

63. Шехтер С.Я., Резницкий А.М., Лазаренко Ю.Н. и др. Электрошлаковая наплавка малого конуса доменной печи композиционным сплавом. - Автоматическая сварка, 1978, № 8, с. 43-44, 47.

64. Разинский В.В., Лазаренко Ю.Н. Питатель для подачи порошкообразных материалов при ЭШН слоя композиционным материалом. - Автоматическая сварка, 1979, № 12, с. 63-64.

65. А.с. 318442 (СССР). Способ электрошлаковой сварки /И.И. Ивочкин, А.И. Алексеев, А.Ф. Соседов и др. - Оpubл. в Б.И., 1971, № 32.

66. Конторов Б.М., Попова Н.В. Износостойкая наплавка лежащим пластинчатым электродом. - Сварочное производство, 1959, № 9, с. 27-30.

67. Попов В.С. Износостойкая наплавка пресс-форм лежащим электродом. - Сварочное производство, 1962, № 10, с. 17-20.

68. А.с. 288958 (СССР). Способ горизонтальной наплавки /Э.Ю. Югансон, Р.О. Юносов. - Оpubл. в Б.И., 1971, № 1.

69. А.с. 179400 (СССР). Способ горизонтальной электрошлаковой наплавки /А.П. Сущенко, В.В. Меликов. - Оpubл. в Б.И., 1966, № 5.

70. Меликов В.В., Шейнман Е.Л., Бородянский М.О. и др. Степень однородности легирования при электрошлаковой наплавке горизонтальной поверхности. - Сварочное производство, 1972, № 8, с. 37-38.

71. Меликов В.В., Бородянский М.О., Шейнман Е.Л. и др. Широкослойная износостойкая наплавка зубьев ковшей экскаваторов ЭКТ-4, 6. - Сварочное производство, 1977, № 8, с. 45-46.

72. Кусков Ю.М., Ксендзык Г.В. Применение зернистого при

сачочного материала при электрошлаковой наплавке (обзор). - В кн.: Теоретические и технологические основы наплавки. Современные способы наплавки и их применение. - Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1982, с. 62-70.

73. Эрмантраут М.М., Малимонов В.И. Применение неплавящегося электрода при электрошлаковой наплавке. - Сварочное производство, 1978, № 7, с. 16-18.

74. Рабалка В.И., Маслов А.А., Сотник И.С. и др. Опыт изготовления двухслойных валков электрошлаковой наплавкой. - Сварочное производство, 1977, № 1, с. 41-42.

75. Шварцер А.Я., Стойко В.П., Самойленко Л.В. Электрошлаковая наплавка и отливка с постоянной шлаковой ванной. - Автоматическая сварка, 1970, № 6, с. 60-63.

76. Шварцер А.Я. Электрошлаковая наплавка. - Донецк: Донецкое книжное изд., 1963. - 51 с.

77. Быстров В.А., Быстров А.В., Дзодзиев Г.Т. и др. Исследование свойств композиционных сплавов на основе карбида титана. - В кн.: Теоретические и технологические основы наплавки. Способы испытания наплавленного металла. - Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1979, с. 131-134.

78. Быстров В.А., Быстров А.В. Исследование свойств композиционных сплавов, наплавленных электрошлаковой наплавкой. - В кн.: Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавочные материалы. - Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1978, с. 98-104.

79. Светлополянский В.И., Орешкин В.Д., Данышкин А.А. Электрошлаковая наплавка сплава, содержащего нитрид бора, на поверхность стального изделия. - Автоматическая сварка, 1978, № 4, с. 74-76.

80. Светлополянский В.И., Орешкин В.Д., Данышкин А.А.

Свойства наплавленных слоев, содержащих нитриды бора и кремния. - В кн.: Теоретические и технологические основы наплавки. Свойства и испытания наплавленного металла. - Киев: ИЭС им. Е.О.Патона, 1979, с. 135-138.

81. Светлополянский В.И., Орешкин В.Д., Луговая В.А. и др. Электрошлаковая наплавка износостойких сплавов. - Автоматическая сварка, 1982, № II, с. 71-72.

82. Ксендзык Г.В., Кусков Ю.М. Электрошлаковая наплавка слоя чугуна на внутренние цилиндрические поверхности изнашивающихся деталей. - В кн.: Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка в машиностроении и ремонте. - Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1981, с. 76-80.

83. Ксендзык Г.В., Кусков Ю.М. Чугунная дробь - новый вид присадочного материала для электрошлаковой наплавки. - В кн.: Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавочные материалы. - Киев: ИЭС им. О.Е. Патона, 1978, с. 80-84.

84. Ксендзык Г.В., Фруммин И.И., Кусков Ю.М. и др. Особенности электрошлаковой наплавки зернистым присадочным материалом. - В кн.: Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка деталей оборудования металлургии и энергетики. - Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1980, с. 3-8.

85. Кусков Ю.М., Фруммин И.И., Ксендзык Г.В. Электрошлаковая наплавка хромистого чугуна применительно к валкам горячей прокатки. - В кн.: Технология и организация производства, 1979, № 9, с. 46-48.

86. Шехтер С.Я., Шварцер А.Я. Наплавка деталей металлургического оборудования. Справочник. - М.: Металлургия, 1981. - 160 с.

87. Свойства порошков металлов, тугоплавких соединений и спеченных материалов. - Киев: Наукова думка, 1978. - 184 с.

88. Наплавочные материалы стран - членов СЭВ: Каталог. - Киев-Москва, 1975. - 619 с.
89. Исследование наплавочных сплавов на основе тугоплавких соединений /Под ред. А.М. Озерова. - Волгоград: ВПИ, 1970. - 88 с.
90. Петров Г.Л. Сварочные материалы. - Л.: Машиностроение, 1972. - 278 с.
91. Антонов В.А. Наплавка вырубных штампов холодной штамповки. - В кн.: Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка в машиностроении и ремонте. - Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1981, с. 38-41.
92. Исследование наплавочных сплавов на основе тугоплавких соединений /Под ред. А.М. Озерова. - Волгоград: ВПИ им. А.С.Се-рафимовича, 1970. - 88 с.
93. Сварка в машиностроении. Т.2. /Под ред. А.И. Акулова. - М.: Машиностроение, 1978. - 462 с.
94. Пащенко М.А., Фрумин Е.И., Жудра А.П. Опыт применения ленточного релита для наплавки долот. - Сварочное производ-ство, 1978, № 1, с. 21-24.
95. Подгаецкий В.В. Сварочные шлаки. - Киев: Наукова дум-ка, 1964. - 76 с.
96. Подгаецкий В.В. О флюсах для электрошлаковой сварки. - Автоматическая сварка, 1956, № 4, с. 30-49.
97. Подгаецкий В.В., Герасименко Л.А. Новые данные об электропроводности флюсов. - Автоматическая сварка, 1960, № 10, с. 93-95.
98. Герасименко Л.А. Вязкость флюсов для электрошлаковой сварки и переплава. - Автоматическая сварка, 1963, №5, с. 94.
99. Буга В.М. Разработка флюса и исследование свойств на-

плавленного металла применительно к однопроводной наплавке никельхромового сплава. - В кн.: Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавочные материалы. - Киев: ИЭС им. Е.О.Патона, 1978, с. 96-98.

100. Подгаецкий В.В., Галинич В.И. О строении жидких сварочных шлаков. - Автоматическая сварка, 1981, № 7, с. 36-45.

101. Колисник В.Н. Измерение электропроводности флюса в интервале температур 1300...2300°C. - Автоматическая сварка, 1964, № 4, с. 10-14.

102. Колисник В.Н. Удельная электропроводность некоторых флюсов для электрошлакового переплава. - Автоматическая сварка, 1965, № 7, с. 74-75.

103. Суцук-Слюсаренко И.И., Лычко И.И., Галинич В.И. и др. Новый флюс для электрошлаковой сварки низколегированных сталей повышенной прочности. - Автоматическая сварка, 1981, № 8, с. 65-67.

104. А.с. 228832 (СССР). Способ электрошлаковой наплавки / Д.А. Дудко, Г.З. Волошкевич, Н.Я. Щербина и др. - Оpubл. в Б.И., 1968, № 32.

105. А.с. № 1235082 (СССР). Способ горизонтальной электрошлаковой износостойкой наплавки / Н.Н. Дорожкин, А.В. Дудан, А.А. Радченко и др. (не публикуется).

106. А.с. 1167835 (СССР). Устройство для горизонтальной электрошлаковой наплавки / Н.Н. Дорожкин, И.И. Суцук-Слюсаренко, А.В. Дудан и др. (не публикуется).

107. Сварочное оборудование. Каталог-справочник, ч. 4. - Киев: Наукова думка, 1981. - 486 с.

108. Сварка в машиностроении. Т.4 / Под ред. Ю.Н. Зорина. - М.: Машиностроение, 1979. - 512 с.

109. Закс М.И. Сварочные выпрямители. - Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1983. - 96 с.
110. Семенченко В.К. Поверхностные явления в металлах и сплавах. - Гостехиздат, 1957. - 491 с.
111. Матеев Б.Р., Шварцер А.Я. Введение металлокерамических частиц в наплавленный материал при электрошлаковом процессе. - Автоматическая сварка, 1976, № 2, с. 57-59.
112. Арсенкин В.Т., Радченко В.Г., Лихошерстов Д.М. и др. Электрошлаковая наплавка штамповой стали на углеродистую. - Автоматическая сварка, 1976, № 3, с. 46-49.
113. Быстров В.А., Веревкин В.И., Быстров А.В. Исследование температурного поля шлаковой ванны. - Автоматическая сварка, 1981, № 12, с. 21-24.
114. Шварцер А.Я., Золотаревский Д.Б., Стойко В.П. и др. Изготовление зубьев ковшей экскаваторов. - Автоматическая сварка, 1968, № 1, с. 57-59.
115. Фильченков Д.И., Мошников С.В., Козулин М.Г. Исправление дефектов литья с помощью электрошлаковой сварки. - Сварочное производство, 1977, № 1, с. 48-49.
116. Kbnigsmark J. "Zvaranie", 1970, 19, N 9-10, с.265-269.
117. Дудко Д.А., Волошкевич Г.З., Сушук-Слюсаренко И.И. и др. Исследование электрошлакового процесса с помощью кино- и фотосъемки через прозрачную среду. - Автоматическая сварка, 1971, № 2, с. 15-17.
118. Рассошинский А.А. Металлография сварных швов. - М.: Машгиз, 1961. - 276 с.
119. Хорн Ф. Атлас структур сварных соединений. - М.: Металлургия, 1977. - 288 с.
120. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. - М.: Машгиз, 1951. - 296 с.

121. Походня И.К. Газы в сварных швах. - М.: Машиностроение, 1972. - 256 с.
122. Ерохин А.А. Температурное поле ванны жидкого металла при дуговом нагреве. - Сварочное производство, 1982, № 2, с. 16-17.
123. Походня И.К., Фрумин И.И. О температуре сварочной ванны. - Автоматическая сварка, 1955, № 5, с. 14-24.
124. Таблицы физических величин. Справочник /Под ред.акад. И.К. Кокина. - М.: Атомиздат, 1976. - 1006 с.
125. Попов М.М. Термометрия и калориметрия. - М.: МГУ, 1954. - 942 с.
126. Хрущов М.М., Бабичев М.А., Беркович Е.С. и др. Износостойкость и структура твердых наплавов. - М.: Машиностроение, 1971. - 96 с.
127. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. - М.: Академия наук, 1960. - 351 с.
128. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. - М.: Наука, 1970. - 252 с.
129. Русаков А.А. Рентгенография металлов. - М.: Атомиздат, 1977. - 479 с.
130. Щиголов П.В. Электролитические и химическое пассивирование металлов, 1959. - 187 с.
131. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица, И.Стигана. - М.: Наука, 1979. - 830 с.
132. Карташов Э.М. Аналитические методы в теплопроводности твердых тел. - М.: Высшая школа, 1979. - 415 с.
133. Лыков А.В. Теория теплопроводности. - М.: Высшая школа, 1967. - 600 с.
134. Мельков В.В. Осциллографические исследования активно-

го сопротивления шлаковой ванны при многоэлектродном электрошлаковом процессе. - Труды Ташкентского транспорта, 1974, вып. 77.

135. Митчел А. Электрохимические процессы при электрошлаковом переплаве. - В кн.: Специальная электрометаллургия. - Киев: Наукова думка, 1972, ч. 2.

136. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Наука, 1976.- 279 с.

137. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Наука, 1971.- 283 с.

138. Исследование наплавочных сплавов на основе тугоплавких соединений /Под ред. А.М.Озерова. - Волгоград: ВПИ им. А.С.Серафимовича, 1970. - 88 с.

139. Сварка. Экспресс-информация. - М.: ВИНТИ, 1985, № 6, с. 1-9.

140. Ткачев В.Н., Фиштейн Б.М., Казинцев Н.В. и др. Индукционная наплавка твердых сплавов. - М.: Машиностроение, 1970.- 184 с.

141. Дорожкин Н.Н., Дудан А.В. Стойкость против абразивного изнашивания легированных хромом и бором слоев, полученных электрошлаковой наплавкой. - Трение и износ, 1986, № 2, с. 256-260.

142. Лившиц Л.С., Гринберг Н.А., Куркумелли Э.Г. Основы легирования наплавленного металла. - М.: Машиностроение, 1969.- 187 с.

143. Гольцев В.П., Данилькевич М.И. Прочностные характеристики веществ и их связь с энергией решетки и износостойкостью.- Трение и износ, 1983. Т.4. №3, с. 415-419.

144. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. - М.: Мир, 1982. - 334 с.
145. Композиционные материалы, Т.2 /Под ред. Дж.Сендечки.- М.: Мир, 1978. - 564 с.
146. Абрамович Т.М., Меленевский И.П., Гарбузов А.Н. Некоторые вопросы упрочнения сварных швов малыми добавками поверхностно-активных добавок. - В кн.: Расширенные тезисы докладов Таганрогского городского научно-технического совещания "Наука - производству". Таганрог, 1970, с. 83-87.
147. Пустыльник Е.Н. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. - М.: Наука, 1969. - 288 с.
148. Степанов М.Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний. - М.: Машиностроение, 1972. - 232 с.
149. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. - М.: Металлургия, 1969. - 157 с.
150. Дудко Д.А., Щербина Н.Я., Суцук-Слюсаренко И.И. и др. Способ регулирования температуры ванны при электрошлаковой наплавке. - Автоматическая сварка, 1970, № 9, с. 45-48.
151. Герасимов В.Н., Меликов В.В., Сидиков А.М. К методике расчета режима при многоэлектродной горизонтальной электрошлаковой наплавке железохромомарганцевых сплавов. - В кн.: Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка деталей оборудования металлургии и энергетики. - Киев: ИЭС им. Е.О.Патона, 1980, с. 50-52.
152. Лычко И.И. Электрошлаковая наплавка меди и ее сплавов на сталь. - Киев:УкрНИИТИ, 1969. - 13 с.
153. Голубьев Г.Р., Новиков А.А. Трение, износ и защита бурильных колонн в глубоких скважинах. - М.: Недра, 1981. - 158 с.

154. Лачинян Л.А. Работа буровой колонны. - М.: Недра, 1979. - 287 с.
155. Пащенко М.А., Фрумин Е.И. Наплавка породоразрушающего бурового инструмента. - В кн.: Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка в машиностроении и ремонте. - Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1981, с. 65-76.
156. Дорожкин Н.Н., Дудан А.В. Замок стал надежнее. - Народное хозяйство Белоруссии, 1985, № 9, с. 29.
157. А.с. 1146913 (СССР). Устройство для наплавки / Н.Н.Дорожкин, А.П.Елистратов, А.В.Дудан и др. (не публикуется).
158. Тягодутьевые машины. Отраслевой каталог. - М.: НИИЭИИФОРМЭНЕРГОМАШ, 1984. - 284 с.
159. Тягодутьевые машины для энергетических установок. Каталог-справочник. - М.: НИИИИФОРМТЭМАШ, 1969. - 193 с.
160. Левин И.М., Боткачик И.А. Эксплуатация тягодутьевых машин тепловых электростанций. - М.: Энергия, 1977. - 272 с.
161. Установка универсальная термораспылительная. Информационный листок № 85-136. - Минск: БелНИИТИ, 1985. - 4 с..
162. Севров К.П., Лозовой Д.А., Кабалкин В.А. и др. Дорожно-строительные машины. - М.: Машиностроение, 1965. - 384 с.
163. Васильев А.А., Васильев И.А., Пруссак Б.Н. Дорожно-строительные машины. Справочник. Изд. Д 69 4-е, перераб. и доп.- М.: Машиностроение, 1977. - 392 с.
164. Крившин А.П., Мартынов Н.В., Розов Н.А. и др. Повышение производительности землеройно-транспортных машин. - М.: Транспорт, 1969. - 152 с.
165. Пиковский Я.М., Филиппов Б.И. Эксплуатация и испытания дорожных машин. - М.: Высшая школа, 1973. - 399 с.
166. Зеленков Г.И., Дехтеринский Л.В., Крившин А.П. Техно-

логия ремонта дорожных машин и основы проектирования ремонтных предприятий. - М.: Высшая школа, 1971. - 496 с.

167. А.с. ИИ81217 (СССР). Способ горизонтальной электрошлаковой наплавки / Н.Н.Дорожкин, А.В.Дудан, В.И. Харитонович и др. (не публикуется).

168. Боровский Г.В., Молодик С.У. Современные технологические процессы обработки деталей режущим инструментом из сверхтвердых материалов. Обзор. Сер. "Инструментальная и абразивно-алмазная промышленность". - М.: НИИмаш, 1984. - 87 с.

169. Ящерицын П.И., Попов С.А., Наерман М.С. Прогрессивная технология финишной обработки деталей. - Минск: Беларусь, 1978. - 176 с.

170. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / Под ред. А.Н. Резникова. - М.: Машиностроение, 1977. - 391 с.

171. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. - М.: Высшая школа, 1974. - 587 с.

172. Хомяк Б.С., Пономаренко А.И. Обработка твердосплавных изделий инструментом, армированным твердым сплавом. - М.: НИИИФОРМТЪМАШ, 1970. - 36 с.

173. Режимы резания труднообрабатываемых материалов. Справочник / Я.Л. Гуревич, М.В. Горохов, В.И. Захаров и др. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1986. - 240 с.

174. Хомяк Б.С. Обработка твердосплавных вставок штампов резцами из эльбора-Р и АСПК. - Станки и инструмент, 1975, № 9, с. 26-27.

175. Фельдштейн Е.Э. Исследование процесса тонкого точения спеченных хромистых сталей высокой твердости из эльбора-Р и гексонита-Р. Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд.техн.наук. - Минск: БПИ, 1981.

176. Куталадзе С.С. Основы теории теплообмена. - Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1970. - 659 с.

П Р И Л О Ж Е Н И Е

Приложение I

Химический состав наиболее распространенных наплавочных порошковых материалов

№ п/п	Марка	Содержание элементов, %									
		C	Cr	Si	Mn	Ni	B	W	Fe		
I.	ШС27	3,3-4,5	25-28	1,0-2,0	0,8-1,5	1,5-2,0	-	0,2-0,4	осн.		
2.	ШС1	2,5-3,3	27-31	2,8-4,2	0,4-1,5	3,0-5,0	-	-	осн.		
3.	ШАН1	2,0-2,8	26-32	1,5-2,5	0,5-1,5	-	-	-	осн.		
4.	Ш2ФБХ6-2	3,5-5,5	32-37	1,0-2,5	1,5-4,0	-	1,3-2,0	-	осн.		
5.	ШУС25	4,4-5,4	35-41	1,6-2,6	2,5	-	-	-	осн.		
6.	ФБХ6-2	3,5-5,5	28-37	1,0-2,5	2,5-5,5	-	1,3-2,2	-	осн.		
7.	КБХ	4,0-6,0	42-52	0,5-1,4	-	-	0,7-0,9	-	осн.		
8.	ФХ-650	6,5	65 *	1,5	-	-	-	-	осн.		
9.	ФХ-800	8,0	65	2,0	-	-	-	-	осн.		
10.	БХ	0,3-1,0	35-44	0,5-1,0	-	-	7,0-9,0	-	осн.		
II.	Релит-3	3,7-4,0	-	-	-	-	-	95,5-96,0	-		
12.	Борид хрома	0,5-1,0	68-69	-	-	-	27,5-28,5	-	0,6		

Приложение 2

Химические константы некоторых компонентов,
применяемых во флюсах

Вещество	Температура, °C	
	плавления	кипения
CaO	2572	2850
SiO	1710	2230
Al_2O_3	2050	3500
MgO	2800	3600
MnO	1650	-
FeO	1420	-
Fe_2O_3	1565	-
N_2O	Возгонка 1275	-
K_2O	490	-
TiO_2	1640	-
$N_2B_4O_7$	741	1575
$CaCl$	772	1600
$MgCl_2$	712	1412
$NaCl$	800	1413
KCl	770	1406
$LiCl$	614	1360
CaF_2	1403	2500
	-77	-65
SiF_4	Возгонка 1260	1291
AlF_3	1396	2239
MgF_2	856	-
MnF_2	990	1700
NaF	880	1500
KF	-	284
TiF_4	870	1676
LiF	1280	2267
BaF_2		

Анализ гранулометрического состава порошка ФХ-800

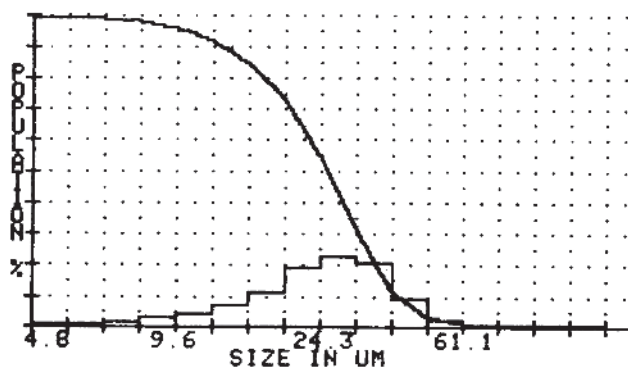
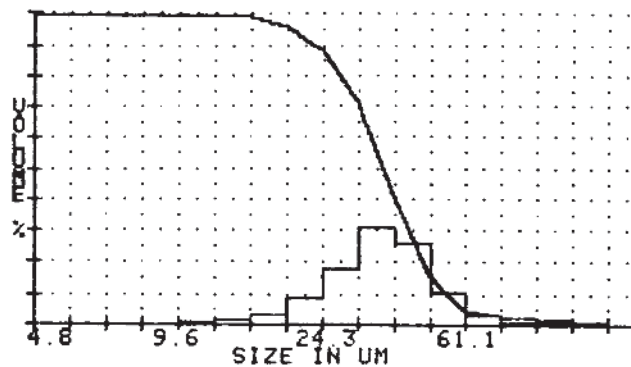
```
*****
CHANNEL #      SIZE      DIFF
                VOLUME %
*****
```

1	4.81	0
2	6.06	0
3	7.64	0
4	9.62	0
5	12.13	.2
6	15.28	.9
7	19.25	2.6
8	24.25	7.9
9	30.55	17.3
10	38.5	30.8
11	48.5	25.7
12	61.11	10.4
13	76.99	2.5
14	97	.7
15	122.22	.6
16	153.98	.4

```
*****
CHANNEL #      SIZE      DIFF
                POP
*****
```

1	4.81	115
2	6.06	179
3	7.64	309
4	9.62	605
5	12.13	1134
6	15.28	1953
7	19.25	3162
8	24.25	5272
9	30.55	6409
10	38.5	5690
11	48.5	2555
12	61.11	526
13	76.99	71
14	97	8
15	122.22	3
16	153.98	1

```
*****
```



VOLUME % STATISTICS

MEAN: 44.82 UM
 MEDIAN: 45.06 UM
 MODE: 45.53 UM
 STANDARD DEVIATION: 1.41 UM
 SKEWNESS: 1 NEGATIVE
 KURTOSIS: 1.06 PLATYKURTIC

POPULATION STATISTICS

MEAN: 29.97 UM
 MEDIAN: 31.98 UM
 MODE: 35.2 UM
 STANDARD DEVIATION: 1.58 UM
 SKEWNESS: .93 NEGATIVE
 KURTOSIS: 1.18 PLATYKURTIC

Химический состав холоднокатаных стальных лент

№ п/п	Марка стали	Содержание элементов, %						S	P
		C	Mn	Si	Cu	Ni	прочие		
Углеродистая конструкционная сталь (ГОСТ 2284-69)									
1.	40	0,37-0,45	0,50-0,80	0,17-0,37	0,25	0,25	-	0,040	0,040
2.	50	0,47-0,55	0,50-0,80	0,17-0,37	0,25	0,25	-	0,040	0,040
3.	65	0,62-0,70	0,50-0,80	0,17-0,37	0,25	0,25	-	0,040	0,040
Инструментальная и пружинная сталь (ГОСТ 2283-69)									
4.	50Г	0,48-0,56	0,70-1,00	0,17-0,37	0,25	0,25	-	0,040	0,040
5.	65Г	0,62-0,70	0,90-1,20	0,17-0,37	0,25	0,25	-	0,040	0,040
6.	50ХФА	0,46-0,54	0,50-0,80	0,17-0,37	0,80-1,10	0,40	0,1-0,2	0,030	0,035
Коррозионностойкая и хлоростойкая сталь (ГОСТ 4586-70)									
7.	12Х13	0,09-0,15	0,60	0,60	12,0-14,0	-	0,025	0,030	0,030
8.	20Х13	0,16-0,24	0,60	0,60	12,0-14,0	-	0,025	0,030	0,030
9.	30Х13	0,25-0,34	0,60	0,60	12,0-14,0	-	0,025	0,030	0,030
10.	08Х18Н10	0,08	1,0-2,0	0,80	17,0-19,0	9,0-11,0	-	0,020	0,035
11.	12Х18Н9Т	0,12	1,0-2,0	0,80	17,0-19,0	8,0-9,5	0,40	0,020	0,035
12.	20Х13Н419	0,15-0,30	8,0-10,0	0,80	12,0-14,0	3,7-4,7	-	0,025	0,050
13.	20Х23Н18	0,20	2,0	1,00	22,0-25,0	17,0-20,0	-	0,020	0,035
Сплавы высокого омического сопротивления (ГОСТ 12766,2-77)									
14.	Х15Н60	0,15	1,5	0,4-1,5	15,0-18,0	55,0-61,0	-	0,020	0,030
15.	Х20Н80	0,15	0,7	0,4-1,5	20,0-23,0	75,0-78,0	1,0	0,020	0,030

Приложение 5

Состав некоторых флюсов (%), применяемых для электрошлаковой
наплавки сплавов на основе железа

№ п/п	Марка флюса	Содержание элементов, %				
		SiO ₂	MnO	CaO	MgO	Al ₂ O ₃
I.	АН-348А	41,0-44,0	34,0-38,0	6,5	5,0-7,5	4,5
2.	ОСЦ-455	38,0-44,0	38,0-44,0	6,5	2,5	5,0
3.	АН-348АМ	41,0-44,0	34,0-38,0	6,5	5,0-7,5	4,5
4.	ОСЦ-45М	38,0-44,0	38,0-44,0	6,5	2,5	5,0
5.	48-0Ф-6	4,0	0,3	16,0-23,0	3,0	20,0-27,0
6.	АН-60	42,5-46,5	36,0-41,0	3,0-11,0	0,5-3,0	5,0
7.	АН-8	33,0-36,0	21,0-26,0	4,0-7,0	5,0-7,5	11,0-15,0
8.	АН-9	2,5	1,0	18,0-22,0	-	30,0-40,0
9.	АН-ГОСМ	19,0-24,0	0,5	3,0-9,0	9,0-13,0	27,0-33,0
10.	АН-22	18,0-21,5	7,0-9,0	12,0-15,0	11,5-15,0	19,0-23,0
11.	АН-26С	29,0-33,0	2,5-4,0	4,0-8,0	15,0-18,0	19,0-23,0
12.	ФЦ-9	38,0-41,0	36,0-41,0	6,5	2,5	10,0-13,0

Приложение 5 (продолжение)

№ п/п	Марка флюса	CaF ₂	K ₂ O, Na ₂ O	ZnO ₂	Fe ₂ O ₃	не более	
						T	S
I.	АН-348А	4,0-5,5	-	-	2,0	0,15	0,12
2.	ОСЦ-45	6,0-9,0	-	-	2,0	0,15	0,15
3.	АН-348АМ	3,5-4,5	-	-	2,0	0,15	0,12
4.	ОСЦ-45М	6,0-9,0	-	-	2,0	0,15	0,10
5.	48-02-6	45,0-60,0	-	-	1,5	0,05	0,04
6.	АН-60	5,0-8,0	-	-	1,5	0,15	0,15
7.	АН-8	13,0-19,0	-	-	3,5	0,15	0,15
8.	АН-9	20,0-30,0	-	16,0-20,0	2,0	0,05	0,04
9.	АН-ГОСМ	25,0-33,0	2,0-3,0	-	1,0	0,08	0,05
10.	АН-22	20,0-24,0	1,0-2,0	-	1,0	0,05	0,05
11.	АН-26С	20,0-24,0	-	-	1,5	0,10	0,10
12.	ФЦ-9	2,0-3,0	-	-	2,0	0,10	0,10

П Р И Л О Ж Е Н И Е 6

Расчет тепловых потоков при горизонтальном
электрошлаковом упрочнении по слою порошкового
присадочного материала с использованием
стальной ленты

На поверхность 1 прямоугольной детали 2 наносится покрытие, образующееся в основном от плавления порошкового присадочного материала 3 и стальной ленты 4, при движении кокиля-кристаллизатора 5 со скоростью наплавки V_H (рис. П.6.1). Внутри кокиля-кристаллизатора наведена шлаковая ванна с помощью графитового неплавящегося электрода 6, через который подводится электрическая энергия ($U = 30$ В, $I = 500$ А). Вторым электродом в электрической цепи служит сама деталь. Во избежание расплавления медного кокиля-кристаллизатора по каналам 7, выполненным в его стенках, постоянно циркулирует вода.

Требуется рассчитать тепловые потоки, идущие в деталь и из детали, зная геометрические размеры и теплофизические постоянные.

Сначала рассмотрим построенное на основе анализа экспериментальных данных (рис. 4.5, 4.6) распределение температуры на стенках кокиля-кристаллизатора, через которые поступает тепло из ванны и детали, отводящееся затем водой через упомянутые каналы (рис. П.6.2).

Определим количество теплоты, поступающей в единицу времени из ванны и детали в воду. Для этого разобьем тепловую задачу на три самостоятельные (рис. П.6.3, а; П.6.3, б и П.6.3, в), где T_{1cm} , T_{2cm} , T_{3cm} - средние температуры внешней стенки кокиля-кристаллизатора; T_{1b} , T_{2b} , T_{3b} - температуры воды в каналах кристаллизатора.

Исходные данные для расчета:

$$\begin{array}{lll}
 1) & S_1 = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}; & h_1 = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}; & d_1 = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \\
 & T_{1cm} = 310^\circ\text{C}; & T_{1b} = 70^\circ\text{C} & \\
 2) & S_2 = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}; & h_2 = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}; & d_2 = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \\
 & T_{2cm} = 700^\circ\text{C}; & T_{2b} = 60^\circ\text{C} & \\
 3) & S_3 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}; & h_3 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}; & d_3 = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \\
 & T_{3cm} = 500^\circ\text{C}; & T_{3b} = 60^\circ\text{C} &
 \end{array}$$

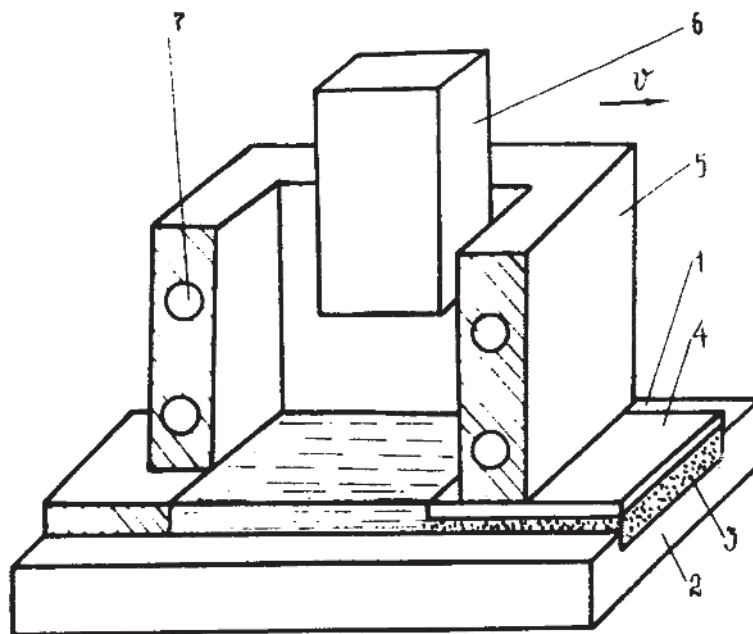


Рис. П.6.1. Схема горизонтального электрошлакового упрочнения по слою порошкового присадочного материала с использованием стальной ленты:

1 - упрочняемая поверхность; 2 - упрочняемая деталь;
 3 - порошковый присадочный материал; 4 - стальная лента;
 5 - кокиль-кристаллизатор; 6 - неплавящийся электрод;
 7 - водоохлаждаемый канал

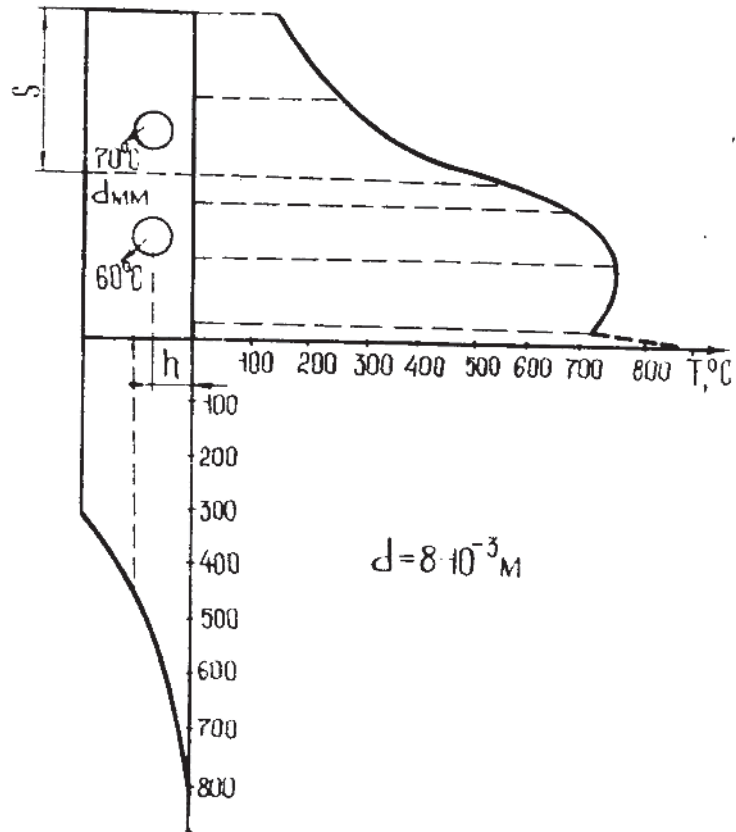


Рис. П.6.2. Распределение температур на поверхности кокиля-кристаллизатора при горизонтальном электрошлаковом упрочнении

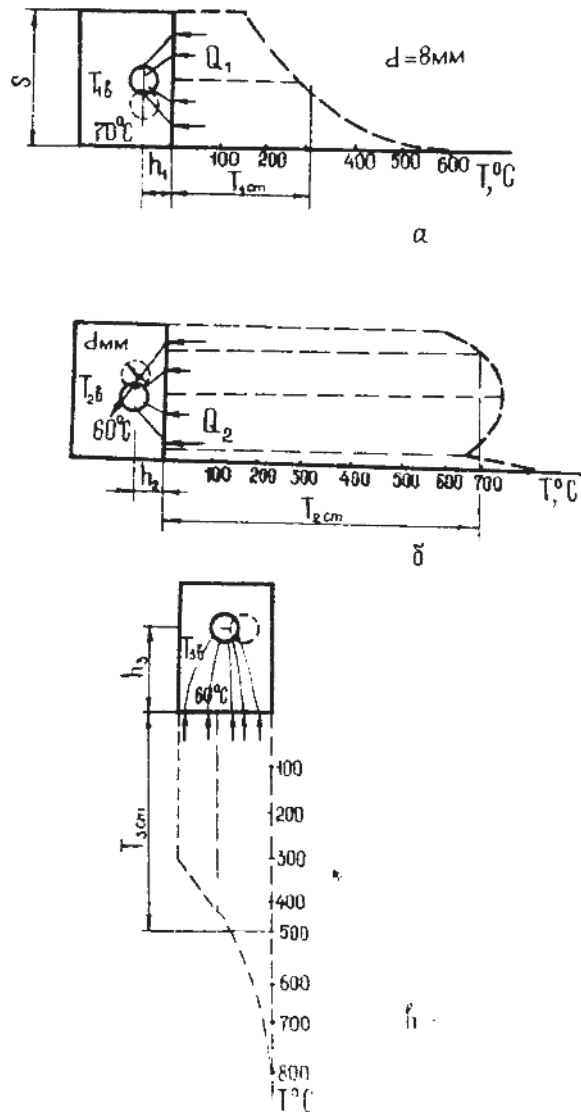


Рис. П.6.3. К расчету количества теплоты, отводимой
кокилем-кристаллизатором от шлаковой
ванны:

а) верхним каналом от шлаковой ванны; б) — нижним
каналом от шлаковой ванны; в) нижним каналом от
детали

Воспользуемся расчетными формулами термического сопротивления для задач 1), 2), 3) /176/:

$$R_{\Sigma i}^* = \frac{T_{icm} - T_2 b}{Q_i} \quad (\text{П.6.1})$$

где $i = 1, 2, 3$.

Условимся, что грань, противоположная грани, через которую идет поток тепла Q_i , находится на бесконечности. Поэтому, полученные решения для Q_i получ. из /176/ будут занижены по своим значениям, по сравнению со значениями $Q_{i\text{пл}}$ в задачах (1, 2, 3).

При равенстве температур стенок кокиля-кристаллизатора теплота, отбираемая от ванны, одна и та же $Q' = Q''$, но $Q_{\text{пл}} > Q_{\text{получ}}$ за счет тепловой изоляции пластины ($Q = Q_{\text{пл}}$) (рис. П.6.4, а; П.6.4, б). При этом часть тепла Q'' , не попадая в отверстие, уходит в полупространство. Эту заниженность можно оценить, решив задачу, изображенную на рис. П.6.4, а, при условии тепловой изоляции трех граней, а на четвертой грани задана температура $T_{\text{ст}}$. При этом на поверхности канала осуществляется теплообмен в среде (в воду) с температурой $T_{\text{в}}$. Однако в /176/ имеется такая задача лишь для квадратного массива с отверстием (рис. П.6.5, а).

Согласно /176/, термическое сопротивление имеет вид:

$$R_{\Sigma}^{* \text{пл}} = \frac{1}{2\pi L} \left(\frac{1}{\alpha_1 R} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{1,085}{2R} \right) \quad (\text{П.6.2})$$

где R - радиус отверстия охлаждающего канала;

L - длина охлаждающего канала (в данном случае $L = 280 \cdot 10^{-3}$ м, см. рис. П.6.6);

λ - коэффициент теплопроводности (для меди при $300 \dots 700^\circ\text{C}$ равный 370 Вт/м · град);

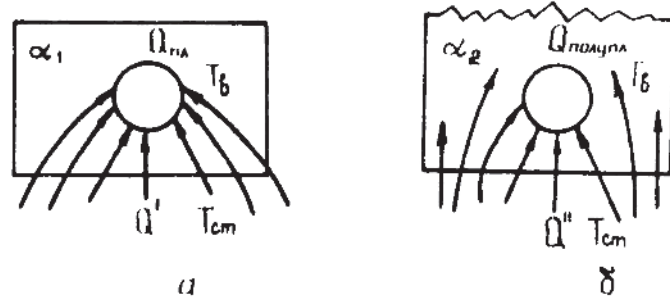


Рис. П.6.4. К расчету теплопередачи в стенке прямоугольного сечения с отверстием :

а) - пластина; б) - полупластина

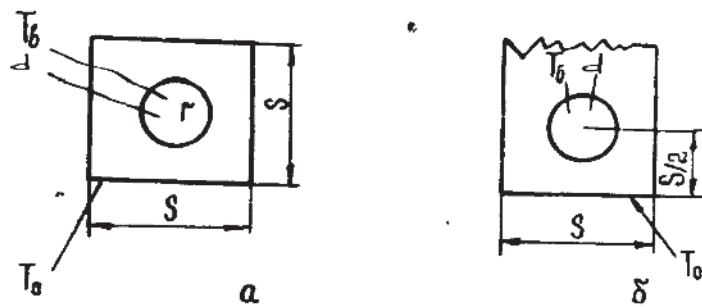


Рис. П.6.5. К расчету теплопередачи в стенке квадратного сечения с отверстием :

а) - пластина; б) - полупластина

α_1 - коэффициент теплообмена.

Здесь считаем, что теплообмен в отверстие идет с коэффициентом α_1 , а на поверхности задана температура $T_{ст}$, т.е.

$$\alpha_2 \rightarrow \infty$$

Согласно [176] для полупространства (рис. П.6.5,6) с теми же самыми условиями термическое сопротивление имеет вид:

$$R_{\Sigma}^{*полуп} = \frac{1}{2\pi L} \left(\frac{1}{\alpha_1 R} + \frac{1}{\lambda} \ln \left[\frac{S}{\pi R} \sin 2\pi \frac{S/2}{S} \right] \right) \quad (\text{П.6.3})$$

Взяв отношение термических сопротивлений (П.6.2) и (П.6.3), получим:

$$\frac{R_{\Sigma}^{*полуп}}{R_{\Sigma}^{*пл}} = \frac{\frac{1}{\alpha_1 R} + \frac{1}{\lambda} \ln \left[\frac{S}{\pi R} \sin \pi \right]}{\frac{1}{\alpha_1 R} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{1,085}{2R}} = \frac{\frac{\lambda}{\alpha_1 R} + \ln 3,67 \frac{S}{R}}{\frac{\lambda}{\alpha_1 R} + \ln 0,54 \frac{S}{R}} \quad (\text{П.6.4})$$

Из (П.6.4) видно, что если вторые слагаемые значительно меньше первых, то $\frac{R_{\Sigma}^{*полуп}}{R_{\Sigma}^{*пл}} \approx 1$ и $R_{\Sigma}^{*полуп} \approx R_{\Sigma}^{*пл}$. Это соотношение зависит от геометрических размеров и тепловых постоянных.

$$\frac{\lambda}{\alpha_1 R} \gg \ln 3,67 \frac{S}{R} \quad \text{или} \quad \frac{\lambda}{e \alpha_1 R} \gg 3,67 \frac{S}{R}$$

При выполнении этого условия квадратную пластину с отверстием можно считать полупространством с отверстием.

Учитывая, что $\lambda = 370$ Вт/м·град, $R = 4 \cdot 10^{-3}$ м,

$\alpha_1 \approx 1200$ Вт/м²·град (как увидим позже), имеем

$$3,67 \frac{S}{R} \ll e^{\frac{370}{4,8}} \quad \text{или} \quad \frac{S}{R} \ll \frac{e^{77}}{3,67}$$

то есть S должно быть весьма большим числом, чтобы нельзя было считать пластину с отверстием полупространством с отверстием.

Поэтому в дальнейшем расчет термических сопротивлений и ко-

личество теплоты, идущих в воду, будем считать, исходя из модели полупространства.

Рассчитаем теперь коэффициент теплообмена α_1 .

Поскольку эта величина очень сложная и зависит от многих параметров (температуры воды, скорости ее движения в отверстии, вязкости воды, размеров отверстия и т.д.), то для определения α_1 воспользуемся экспериментальными данными.

Учитывая, согласно рис. П.6.2, что температура воды в верхней половине кокиля-кристаллизатора повышается с 60°C до 70°C (на 10°C), а расход ее $V_B = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$, имеем:

$$Q_1 = \rho c v \Delta T = 10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 0,24 \cdot 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с} \cdot 10 \text{ град} = 2000 \text{ Вт}$$

Согласно задаче I) для полупространства с отверстием, сравним выражения, вычисленные по (П.6.1) и (П.6.3).

$$\frac{1}{2\pi L} \left(\frac{1}{\alpha_{1R}} + \frac{1}{\lambda} \ln \left[\frac{S_1}{\pi R} \sin 2\pi \frac{h_1}{S_1} \right] \right) = \frac{T_{1cm} - T_{1b}}{Q_1} \quad (\text{П.6.5})$$

Подставляя в (П.6.5) численные значения геометрических размеров, температур, теплофизических характеристик и теплового потока, определяем коэффициент теплообмена $\alpha_1 = 1210 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{град}$.

Аналогичным образом находим Q_2 — количество теплоты, которое отводится водой от шлаковой ванны в нижней половине кокиля-кристаллизатора и Q_3 — количество теплоты, отводимое от детали через нижний торец кокиля-кристаллизатора.

Q_2 определяем из уравнения:

$$\frac{1}{2\pi L} \left(\frac{1}{\alpha_{2R}} + \frac{1}{\lambda} \ln \left[\frac{S_2}{\pi R} \sin 2\pi \frac{h_2}{S_2} \right] \right) = \frac{T_{2cm} - T_{2b}}{Q_2} \quad (\text{П.6.6})$$

$$Q_2 = 5330 \text{ Вт}$$

Q_3 определяем из уравнения:

$$\frac{1}{2\pi L} \left(\frac{1}{\alpha_1 R} + \frac{1}{\lambda} \ln \left[\frac{S_3}{\pi R} \sin 2\pi \frac{h_3}{S_3} \right] \right) = \frac{T_{3cm} - T_{3b}}{Q_3} \quad (\text{П.6.7})$$

$$Q_3 = 3468 \text{ Вт}$$

Тогда теплота, отбираемая водой, равна

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 10800 \text{ Вт} \quad (\text{П.6.8})$$

С другой стороны, учитывая, что температура воды на воздухе $T_B = 20^\circ\text{C}$, имеем:

$$Q = \rho c V \delta (T_{IV} - 20^\circ\text{C}) = 10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 10^3 \frac{\text{л}}{0,24} \text{ Дж/кг}\cdot\text{град} \cdot \\ \cdot 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с} \cdot 50 \text{ град} = 10416 \text{ Вт}$$

Мощность, потребляемая из электрической цепи сварочного выпрямителя,

$$P = U \cdot I = 15000 \text{ Вт} \quad (\text{П.6.9})$$

Графитовый электрод в верхней своей части охлаждается водой, при этом расход ее $V'_B = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{мин}$, а температура повышалась от 20°C до 30°C . Поэтому, $Q_4 = \rho c V'_B \Delta T = 350 \text{ Вт}$ - количество теплоты, идущее на охлаждение электрода.

Учитывая, что из шлаковой ванны в кокиль-кристаллизатор непосредственно отбиралось тепло $Q_1 + Q_2$, можно рассчитать количество теплоты, поступающей из шлаковой ванны в деталь с покрытием:

$$Q_5 = P - Q_1 - Q_2 - Q_4 = 7320 \text{ Вт}$$

Подсчитаем далее количество теплоты Q_6 , идущее на расплавление порошка и стальной ленты.

Используем для расчетов теплофизические данные (для порошка

и стальной ленты /I24/.

Материал ленты - сталь 65Г, $\rho_{\Lambda} = 7900 \text{ кг/м}^3$,

$C_{\Lambda} = 627,8 \text{ Дж/кг}\cdot\text{град}$.

Материал порошкового слоя - феррохром ФХ-800, $\rho_{\Pi} = 7450 \text{ кг/м}^3$,

$C_{\Pi} = 582,6 \text{ Дж/кг}\cdot\text{град}$.

Теплота Q_6 , расходуемая на нагрев порошка и ленты до температуры плавления и нагрев расплава до температуры $T_I = 1800 \dots 1900^\circ\text{C}$, равна :

$$Q_6 = a d_{\Lambda} V_H \int_{T_0}^{T_I} \rho_{\Lambda}(T) C_{\Lambda}(T) dT + V_H a d_{\Pi} \int_{T_0}^{T_I} \rho_{\Pi}(T) C_{\Pi}(T) dT + \lambda_{\Lambda} \rho'_{\Lambda} a d_{\Lambda} V_H + \lambda_{\Pi} \rho'_{\Pi} a d_{\Pi} V_H, \quad (\text{П.6.10})$$

где a - ширина порошкового слоя и ленты;

d_{Λ}, d_{Π} - соответственно толщина ленты и порошкового слоя;

$\rho'_{\Lambda}, \rho'_{\Pi}$ - удельная плотность ленты и порошка при температурах плавления;

$\lambda_{\Lambda}, \lambda_{\Pi}$ - скрытые теплоты плавления ленты и порошка;

V_H - скорость наплавки.

Возьмем средние по температуре $(T_0 - T_I) \sim 1000^\circ\text{C}$

$\rho_{\Lambda}(T), C_{\Lambda}(T), \rho_{\Pi}(T), C_{\Pi}(T)$

Тогда имеем:

$$Q_6 = a d_{\Lambda} V_H [\rho_{\Lambda} C_{\Lambda} (T_I - T_0) + \lambda_{\Lambda} \rho_{\Lambda}] + a d_{\Pi} V_H [\rho_{\Pi} C_{\Pi} (T_I - T_0) + \lambda_{\Pi} \rho_{\Pi}] = 566 \text{ Вт}$$

Определим теперь количество тепла Q' , поступающего в деталь в единицу времени:

$$Q' = Q_5 - Q_6 = 6760 \text{ Вт}$$

Рассмотрим теперь тепловые потоки, т.е. количество тепла, поступающего через единицу поверхности: входящее в основу через шлаковую ванну и выходящее из детали в кокиль-кристаллизатор че-

рез его нижнюю торцовую поверхность (рис. П.6.7).

Пусть Q' - входит через прямоугольник ab , $Q'' = Q_3$ выходит через площадь, ограниченную двумя прямоугольниками cd и ab .

Тогда:

$q'_1 = -\frac{Q'}{ab}$ - входящий реальный тепловой поток через прямоугольник ab ;

$q''_2 = \frac{Q''}{cd-ab}$ - выходящий реальный тепловой поток через единицу поверхности, ограниченную двумя прямоугольниками cd и ab ;

$q_2 = q''_2 = \frac{Q''}{cd-ab}$ - выходящий тепловой поток через единицу площади прямоугольника cd , используемый в тепловой задаче (раздел 4.1);

$q_1 = q'_1 - q_2$ - входящий тепловой поток через прямоугольник ab , используемый в тепловой задаче (раздел 4.1).

Таким образом,

$$q_1 = -\left(\frac{Q'}{ab} + \frac{Q''}{cd-ab}\right); \quad q_2 = \frac{Q''}{cd-ab}$$

Тогда, принимая: $a = 60$ мм; $b = 50$ мм; $d = 100$ мм; $c = 90$ мм, определим численные значения q_1 и q_2 :

$$q_1 = -\left(\frac{6760}{3 \cdot 10^{-3}} + \frac{3470}{6 \cdot 10^{-3}}\right) = -28,3 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_2 = \frac{3470}{6 \cdot 10^{-3}} = 5,8 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2.$$

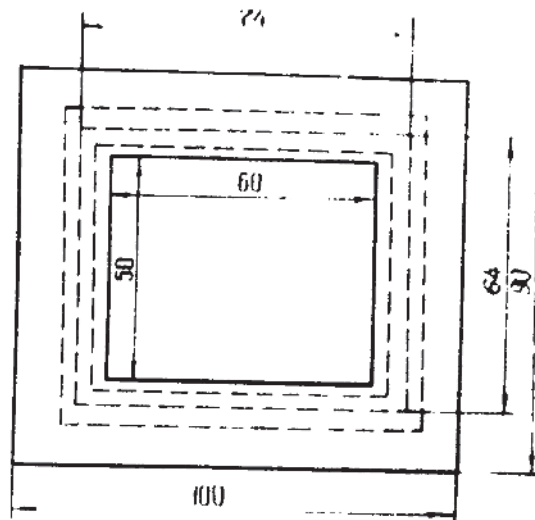


Рис. П.6.6. Схема кокиля-кристаллизатора с охлаждающими каналами

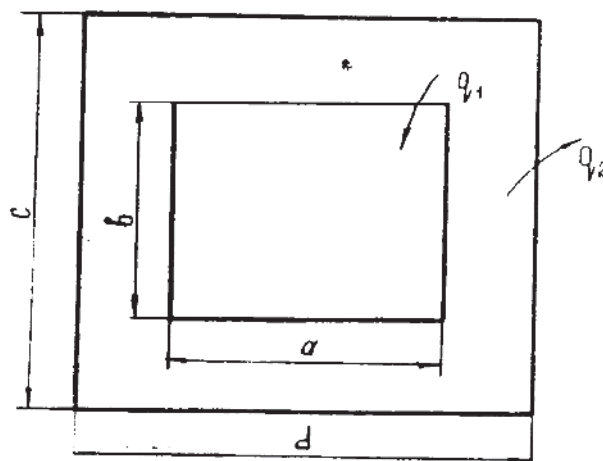


Рис. П.6.7. Схема действия тепловых потоков на границе деталь - кокиль-кристаллизатор

FTN4--RELEASE 24170C--JUNE, 1971

Приложение 7

FTN4, L

PROGRAM DUDAN

```

C*****
C
C      П Р О Г Р А М М А   Р А С Ч Е Т А
C      ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ПЛОСКОЙ ДЕТАЛИ ПРИ
C      ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКЕ.
C
C*****
      DIMENSION AL3(5),AQ2(5),AXO(10),AYO(10),AZO(10),
      +AFO(30),AVO(3),AT(5),IP(5)
      DATA AXO/0.028,0.028,0.028,0.028,0.069,0.028,0.083,
      +0.042,0.,0.028/
      DATA AYO/0.139,0.278,0.417,0.556,0.5,0.5,0.639,
      +0.639,0.639,0.889/
      DATA AZO/0.028,0.028,0.028,0.028,0.028,0.028,0.006,
      +0.006,0.006,0.028/
      DATA AFO/68E-4,136E-4,204E-4,272E-4,340E-4,408E-4,
      +476E-4,544E-4,612E-4,734E-4,47E-4,95E-4,143E-4,
      +190E-4,238E-4,286E-4,333E-4,381E-4,428E-4,524E-4,
      +41E-4,82E-4,122E-4,163E-4,204E-4,245E-4,285E-4,
      +326E-4,367E-4,408E-4/
      DATA AVO/11.4,15.95,20.5/
      DATA AL3/0.022,0.028,0.033,0.042,0.069/
      DATA AQ2/4.76E+6,5.4E+6,5.8E+6,6.52E+6/

C
      CALL RMPAR(IP)
      QL1=0.17
      QL2=0.36
      QB1=0.069
      QB2=0.167
      QD1=0.125
      QD2=0.278
      QLA=39.8
      QQ1=1.4E+6

C
      PI=3.1415926

C
      DO 100 II=IP(2),3
      IF=10*(II-1)
      VO=AVO(II)
      DO 100 I=IP(3),5
      DO 100 J=IP(4),4
      QL3=AL3(I)
      QQ2=AQ2(J)
      WRITE(6,90)VO,QL3,QQ2
      WRITE(6,92)
      DO 101 IA=1,10
      XO=AXO(IA)
      YO=AYO(IA)
      ZO=AZO(IA)
      WRITE(6,91)XO,YO,ZO
      IB=IF
      DO 101 JN=1,2
      WRITE(6,70)(AFO(IR),IR=(IB+1),(IB+5))
      DO 102 JF=1,5

```

Приложение 7
(продолжение)

```

C      FO=AFO(IB+JF)
      S=0.
      S1=0.
      DO 10 K=1,50
      FGK=K*PI/QL3
      S=COS(FGK*ZO)
      S=S*(1.-EXP((-1.)*FGK*FGK*FO))
      S=S/(FGK*FGK)
      IF(MOD((2*K+1),2).NE.0)S=-S
      S1=S1+S
10    CONTINUE
      S1=2.*S1
      S1=FO+S1
      S=(QQ2*QB1*QB2-QQ1*QD1*QD2)/QLA
      S1=S1*S
C
      S=0.
      SS=0.
      S2=0.
      DO 11 M=1,50
      FBM=M*PI
      SI=FBM*FBM
      S=QLA*FBM
      CALL SUB(FBM,VO,FO,SI,FA,FB,FC,FD,FK,FN,FSIN)
      S2=(FA*FN+FB*FSIN)*2.*QQ2*QB1
      S2=S2*FK*SIN(FBM*QB2/2.)/S
      S=(FD*FSIN-FC*FN)*FK*QQ1*QD1/S
      S2=(S2-S)*COS(FBM*YO)
      SS=SS+S2
11    CONTINUE
      S2=2.*S2
      S1=S1+S2
C
      S=0.
      S2=0.
      SS=0.
      DO 12 M=1,50
      DO 12 K=1,50
      FBM=M*PI
      FGK=K*PI/QL3
      SI=FBM*FXM+FGK*FGK
      CALL SUB(FBM,VO,FO,SI,FA,FB,FC,FD,FK,FN,FSIN)
      S2=FD*FSIN-FC*FN
      S2=S2*QQ1*QD1
      S=FA*FN+FB*FSIN
      S=S*2.*QQ2*QB1*SIN(FBM*QB2/2.)
      S=S-S2
      S=S*COS(FBM*YO)*COS(FGK*ZO)*FK/(QLA*FBM)
      IF(MOD((2*K+1),2).NE.0) S=-S
      SS=SS+S
12    CONTINUE
      SS=4.*SS
      S1=S1+SS
C
      S=0.

```

```

SS=0.
DO 13 N=1,50
  FLN=PI*N/QL2
  S=QQ2*QB2*SIN(FLN*QB1)-QQ1*QB2*SIN(FLN*QB1)
  S=S*COS(FLN*X0)
  S=S*(1.-EXP((-1.)*FLN*FLN*FC))
  S=S/(QLA*FLN*FLN*FLN)
  SS=SS+S
13 CONTINUE
S=2.*SS
S1=S1+S
C
S=0.
S2=0.
SS=0.
DO 14 N=1,50
  DC 14 M=1,50
  FBM=M*PI
  FLN=PI*N/QL2
  SI=FBM*FBM+FLN*FLN
  CALL SUB(FBM,VO,FO,SI,FA,FB,FC,FD,FK,FN,FSIN)
  S2=FD*FSIN-FC*FN
  S2=S2*QQ1*SIN(FLN*QD1)
  S=FA*FN+FB*FSIN
  S=S*2.*QQ2*SIN(FLN*QB1)*SIN(FBM*QB2/2.)
  S=S-S2
  S=S*COS(FLN*X0)*COS(FBM*Y0)*FK
  S=S/(QLA*FBM*FLN)
  SS=SS+S
14 CONTINUE
S=4.*SS
S1=S1+S
C
S=0.
SS=0.
S2=0.
DO 15 N=1,50
  DO 15 M=1,50
  DO 15 K=1,50
    FBM=M*PI
    FLN=N*PI/QL2
    FGK=K*PI/QL3
    SI=FBM*FBM+FLN*FLN+FGK*FGK
    CALL SUB(FBM,VO,FO,SI,FA,FB,FC,FD,FK,FN,FSIN)
    S2=FD*FSIN-FC*FN
    S2=S2*QQ1*SIN(FLN*QD1)
    S=FA*FN+FB*FSIN
    S=S*2.*QQ2*SIN(FLN*QB1)*SIN(FBM*QB2/2.)
    S=S-S2
    S=S*COS(FLN*X0)*COS(FBM*Y0)*COS(FGK*Z0)
    S=S*FK/(QLA*FLN*FBM)
    IF(MOD((2*K+1),2).NE.0) S=-S
    SS=SS+S
15 CONTINUE
SS=8.*SS
S1=S1+SS

```

```

C
  S=0.
  SS=0.
  DO 16 N=1,50
  DO 16 K=1,50
  FLN=PI*N/QLA
  FGK=K*PI/QL3
  SI=FLN*FLN+FGK*FGK
  S=COS(FLN*XO)*COS(FGK*ZO)/(FLN*SI)
  IF(MOD((2*K+1),2).NE.0)S=-S
  S=S*(1.-EXP((-1.)*SI*FO))
  S=S*(QQ2*QB2*SIN(FLN*QB1)-QQ1*QD2*SIN(FLN*QD1))
  SS=SS+S
16  CONTINUE
  SS=4.*SS
  S1=S1+SS
C
  T=S1*QL2/(QL1*QL3)
  AT(JF)=T
102 CONTINUE
  WRITE(6,71)(AT(JF),JF=1,5)
C
  IB=IF+5
101 CONTINUE
  WRITE(6,92)
100 CONTINUE
CCCCCCCCCCCC
  92  FORMAT(60(1H-))
  90  FORMAT("//"VO = ",F5.2," L3 = ",F6.3,,
+      " Q2 = ",E8.3)
  70  FORMAT("FO :",5(1X,E8.3,2H:))
  71  FORMAT(" T :",5(3X,F4.0,3X,1H:))
  91  FORMAT(5X,"XO =",F5.3," YO =",F5.3," ZO =",F5.3)
  END
**  NO ERRORS*

```

Приложение 7
(продолжение)

```
CCCCCCCCCCC
SUBROUTINE SUB(FBM,VO,FO,SI,FA,FB,FC,FD,FK,FN,FSIN)
A=FBM*0.278
R=FBM*VO
FA=SI*COS(A/2.)+R*SIN(A/2.)
FB=R*COS(A/2.)-SI*SIN(A/2.)
FC=R*(COS(A)-1.)-SI*SIN(A)
FD=SI*(COS(A)-1.)+R*SIN(A)
FK=1./(SI*SI+R*R)
FN=COS(R*FO)
FN=FN-EXP((-1.)*SI*FO)
FSIN=SIN(R*FO)
RETURN
END
** NO ERRORS*
```

П Р И Л О Ж Е Н И Е 8

Примеры расчета термического цикла при
горизонтальном электрошлаковом упрочнении

VO = 15.95 L3 = .033 Q2 = .476E+07						
XO = .028 YO = .139 ZO = .028						
FO	: .470E-02	: .950E-02	: .143E-01	: .190E-01	: .238E-01	:
T	: 741.	: 1438	: 1653	: 1559	: 1444	:
FO	: .286E-01	: .333E-01	: .381E-01	: .428E-01	: .524E-01	:
T	: 1323	: 1234	: 1159	: 1120	: 1061	:
XO = .028 YO = .278 ZO = .028						
FO	: .470E-02	: .950E-02	: .143E-01	: .190E-01	: .238E-01	:
T	: 182.	: 465.	: 1026	: 1561	: 1644	:
FO	: .286E-01	: .333E-01	: .381E-01	: .428E-01	: .524E-01	:
T	: 1498	: 1337	: 1256	: 1194	: 1100	:
XO = .028 YO = .417 ZO = .028						
FO	: .470E-02	: .950E-02	: .143E-01	: .190E-01	: .238E-01	:
T	: 86.	: 175.	: 339.	: 721.	: 1197	:
FO	: .286E-01	: .333E-01	: .381E-01	: .428E-01	: .524E-01	:
T	: 1621	: 1646	: 1472	: 1349	: 1163	:
XO = .028 YO = .556 ZO = .028						
FO	: .470E-02	: .950E-02	: .143E-01	: .190E-01	: .238E-01	:
T	: 62.	: 78.	: 107.	: 228.	: 486.	:
FO	: .286E-01	: .333E-01	: .381E-01	: .428E-01	: .524E-01	:
T	: 911.	: 1449	: 1703	: 1552	: 1251	:
XO = .069 YO = .500 ZO = .028						
FO	: .470E-02	: .950E-02	: .143E-01	: .190E-01	: .238E-01	:
T	: 63.	: 111.	: 224.	: 372.	: 789.	:
FO	: .286E-01	: .333E-01	: .381E-01	: .428E-01	: .524E-01	:
T	: 1278	: 1603	: 1528	: 1411	: 1202	:
XO = .028 YO = .500 ZO = .028						
FO	: .470E-02	: .950E-02	: .143E-01	: .190E-01	: .238E-01	:
T	: 71.	: 125.	: 257.	: 442.	: 821.	:
FO	: .286E-01	: .333E-01	: .381E-01	: .428E-01	: .524E-01	:
T	: 1356	: 1694	: 1543	: 1428	: 1208	:
XO = .083 YO = .639 ZO = .006						
FO	: .470E-02	: .950E-02	: .143E-01	: .190E-01	: .238E-01	:
T	: 48.	: 61.	: 78.	: 94.	: 205.	:
FO	: .286E-01	: .333E-01	: .381E-01	: .428E-01	: .524E-01	:
T	: 348.	: 544.	: 699.	: 824.	: 804.	:
XO = .042 YO = .639 ZO = .006						
FO	: .470E-02	: .950E-02	: .143E-01	: .190E-01	: .238E-01	:
T	: 51.	: 63.	: 81.	: 101.	: 209.	:
FO	: .286E-01	: .333E-01	: .381E-01	: .428E-01	: .524E-01	:
T	: 363.	: 561.	: 724.	: 862.	: 817.	:
XO = .000 YO = .639 ZO = .006						
FO	: .470E-02	: .950E-02	: .143E-01	: .190E-01	: .238E-01	:
T	: 54.	: 66.	: 87.	: 102.	: 213.	:
FO	: .286E-01	: .333E-01	: .381E-01	: .428E-01	: .524E-01	:
T	: 372.	: 568.	: 747.	: 935.	: 825.	:
XO = .028 YO = .889 ZO = .028						
FO	: .470E-02	: .950E-02	: .143E-01	: .190E-01	: .238E-01	:
T	: 41.	: 64.	: 87.	: 112.	: 134.	:
FO	: .286E-01	: .333E-01	: .381E-01	: .428E-01	: .524E-01	:
T	: 147.	: 193.	: 258.	: 457.	: 1151	:

Приложение 8
(продолжение)

VO = 11.40 L3 = .033 Q2 = .476E+07					
X0 = .028 Y0 = .139 Z0 = .028					
FO	: .680E-02	: .136E-01	: .204E-01	: .272E-01	: .340E-01
T	: 769.	: 1483	: 1681	: 1582	: 1471
FO	: .408E-01	: .476E-01	: .544E-01	: .612E-01	: .734E-01
T	: 1354	: 1291	: 1187	: 1139	: 1075
X0 = .028 Y0 = .278 Z0 = .028					
FO	: .680E-02	: .136E-01	: .204E-01	: .272E-01	: .340E-01
T	: 194.	: 487.	: 1058	: 1605	: 1693
FO	: .408E-01	: .476E-01	: .544E-01	: .612E-01	: .734E-01
T	: 1542	: 1369	: 1276	: 1211	: 1114
X0 = .028 Y0 = .417 Z0 = .028					
FO	: .680E-02	: .136E-01	: .204E-01	: .272E-01	: .340E-01
T	: 97.	: 189.	: 352.	: 743.	: 1235
FO	: .408E-01	: .476E-01	: .544E-01	: .612E-01	: .734E-01
T	: 1657	: 1697	: 1531	: 1384	: 1189
X0 = .028 Y0 = .556 Z0 = .028					
FO	: .680E-02	: .136E-01	: .204E-01	: .272E-01	: .340E-01
T	: 69.	: 88.	: 126.	: 241.	: 513.
FO	: .408E-01	: .476E-01	: .544E-01	: .612E-01	: .734E-01
T	: 945.	: 1496	: 1759	: 1597	: 1282
X0 = .069 Y0 = .500 Z0 = .028					
FO	: .680E-02	: .136E-01	: .204E-01	: .272E-01	: .340E-01
T	: 67.	: 124.	: 237.	: 389.	: 802.
FO	: .408E-01	: .476E-01	: .544E-01	: .612E-01	: .734E-01
T	: 1294	: 1647	: 1569	: 1437	: 1228
X0 = .028 Y0 = .500 Z0 = .028					
FO	: .680E-02	: .136E-01	: .204E-01	: .272E-01	: .340E-01
T	: 79.	: 138.	: 272.	: 458.	: 836.
FO	: .408E-01	: .476E-01	: .544E-01	: .612E-01	: .734E-01
T	: 1377	: 1741	: 1582	: 1459	: 1234
X0 = .083 Y0 = .639 Z0 = .006					
FO	: .680E-02	: .136E-01	: .204E-01	: .272E-01	: .340E-01
T	: 54.	: 67.	: 86.	: 109.	: 219.
FO	: .408E-01	: .476E-01	: .544E-01	: .612E-01	: .734E-01
T	: 363.	: 559.	: 716.	: 841.	: 823.
X0 = .042 Y0 = .639 Z0 = .006					
FO	: .680E-02	: .136E-01	: .204E-01	: .272E-01	: .340E-01
T	: 56.	: 72.	: 89.	: 111.	: 224.
FO	: .408E-01	: .476E-01	: .544E-01	: .612E-01	: .734E-01
T	: 379.	: 583.	: 749.	: 891.	: 837.
X0 = .000 Y0 = .639 Z0 = .006					
FO	: .680E-02	: .136E-01	: .204E-01	: .272E-01	: .340E-01
T	: 61.	: 74.	: 96.	: 113.	: 225.
FO	: .408E-01	: .476E-01	: .544E-01	: .612E-01	: .734E-01
T	: 387.	: 587.	: 774.	: 962.	: 843.
X0 = .028 Y0 = .889 Z0 = .028					
FO	: .680E-02	: .136E-01	: .204E-01	: .272E-01	: .340E-01
T	: 45.	: 69.	: 95.	: 121.	: 148.
FO	: .408E-01	: .476E-01	: .544E-01	: .612E-01	: .734E-01
T	: 154.	: 211.	: 279.	: 483.	: 1187

VC = 20.50 L3 = .033 Q2 = .476E+07

	XO = .028	YO = .139	ZO = .028			
FO	.410E-02	.820E-02	.122E-01	.163E-01	.204E-01	
T	738.	1426	1639	1544	1432	
FO	.245E-01	.285E-01	.326E-01	.367E-01	.408E-01	
T	1311	1226	1160	1113	1054	
	XO = .028	YO = .278	ZO = .028			
FO	.410E-02	.820E-02	.122E-01	.163E-01	.204E-01	
T	171.	452.	1011	1537	1617	
FO	.245E-01	.285E-01	.326E-01	.367E-01	.408E-01	
T	1475	1316	1239	1191	1087	
	XO = .028	YO = .417	ZO = .028			
FO	.410E-02	.820E-02	.122E-01	.163E-01	.204E-01	
T	79.	164.	336.	703.	1173	
FO	.245E-01	.285E-01	.326E-01	.367E-01	.408E-01	
T	1591	1611	1434	1326	1147	
	XO = .028	YO = .556	ZO = .028			
FO	.410E-02	.820E-02	.122E-01	.163E-01	.204E-01	
T	57.	71.	96.	205.	471.	
FO	.245E-01	.285E-01	.326E-01	.367E-01	.408E-01	
T	897.	1409	1658	1524	1231	
	XO = .069	YO = .500	ZO = .028			
FO	.410E-02	.820E-02	.122E-01	.163E-01	.204E-01	
T	56.	101.	209.	361.	764.	
FO	.245E-01	.285E-01	.326E-01	.367E-01	.408E-01	
T	1249	1567	1497	1391	1189	
	XO = .028	YO = .500	ZO = .028			
FO	.410E-02	.820E-02	.122E-01	.163E-01	.204E-01	
T	62.	114.	241.	421.	792.	
FO	.245E-01	.285E-01	.326E-01	.367E-01	.408E-01	
T	1316	1651	1509	1404	1183	
	XO = .083	YO = .639	ZO = .006			
FO	.410E-02	.820E-02	.122E-01	.163E-01	.204E-01	
T	44.	54.	68.	83.	186.	
FO	.245E-01	.285E-01	.326E-01	.367E-01	.408E-01	
T	329.	517.	667.	799.	771.	
	XO = .042	YO = .639	ZO = .006			
FO	.410E-02	.820E-02	.122E-01	.163E-01	.204E-01	
T	48.	59.	75.	90.	195.	
FO	.245E-01	.285E-01	.326E-01	.367E-01	.408E-01	
T	342.	533.	694.	825.	786.	
	XO = .000	YO = .639	ZO = .006			
FO	.410E-02	.820E-02	.122E-01	.163E-01	.204E-01	
T	46.	58.	75.	93.	197.	
FO	.245E-01	.285E-01	.326E-01	.367E-01	.408E-01	
T	351.	542.	717.	897.	791.	
	XO = .028	YO = .889	ZO = .028			
FO	.410E-02	.820E-02	.122E-01	.163E-01	.204E-01	
T	40.	61.	81.	104.	124.	
FO	.245E-01	.285E-01	.326E-01	.367E-01	.408E-01	
T	136.	181.	245.	1423	1138	

П Р И Л О Ж Е Н И Е 9

Анализ зависимости коэффициента сплавления
и глубины проплавления основного металла от
технологических параметров процесса упрочнения

Анализ проводился по методике /136/.

Расчеты проводились с использованием полного факторного эксперимента типа 2^2 с эффектом взаимодействия факторов между собой. Матрица планирования такого эксперимента представлена в таблице П.9.1.

Таблица П.9.1

Матрица планирования эксперимента 2^2 с
эффектом взаимодействия

Номер опыта	X_0	X_1	X_2	$X_1 X_2$	y
1.	+ I	- I	- I	+ I	y_1
2.	+ I	+ I	- I	- I	y_2
3.	+ I	+ I	+ I	+ I	y_3
4.	+ I	- I	+ I	- I	y_4
5.	+ I	0	0	0	y_5
6.	+ I	0	0	0	y_6

Предложенный эксперимент 2^2 с учетом взаимодействия факторов описывается математической моделью:

$$y = b_0 X_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 \quad (\text{П.9.1})$$

Столбцы X_1 и X_2 задают планирование — по ним непосредственно определяются условия опытов, а столбцы X_0 и $X_1 X_2$ служат только для расчета.

Вычисление оценок коэффициентов производят по формулам /137/:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ji} y_i}{N} \quad (\text{П.9.2})$$

где N — число опытов;

$j = 0, 1, 2, \dots, K$ — номер фактора;

y_i — параметр оптимизации, выраженный в логарифмическом масштабе.

$$\begin{cases} b_0 = \frac{1}{6} (y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6) \\ b_1 = \frac{1}{4} (-y_1 + y_2 + y_3 - y_4) \\ b_2 = \frac{1}{4} (-y_1 - y_2 + y_3 + y_4) \\ b_{12} = \frac{1}{4} (y_1 - y_2 + y_3 - y_4) \end{cases} \quad (\text{П.9.3})$$

Подстановка значений b_0, b_1, b_2, b_{12} (П.9.3), а также $X_0, X_1, X_2, X_1 X_2$ (табл. П.9.1) в уравнение (П.9.1) позволяет определить значение функции $\tilde{y} = f(x_1, x_2)$ в искомой точке, выраженное в логарифмическом масштабе.

Проверка адекватности используемой модели (П.9.1) осуществлялась при помощи критерия Фишера /136/:

$$F = \frac{\int_{\text{ад}}^2}{\int^2(y)} \quad (\text{П.9.4})$$

где $\int_{\text{ад}}^2$ - дисперсия адекватности;
 $\int^2(y)$ - дисперсия воспроизводимости.

$$\int_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta \tilde{y}_i^2}{f} \quad (\text{П.9.5})$$

где f - число степеней свободы.

$$f = N - (K + 1) = 6 - (4 + 1) = 1$$

$$\int^2(y) = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \quad (\text{П.9.6})$$

где y_i - результат отдельного опыта;
 \bar{y} - среднее арифметическое значение параметра оптимизации;
 $(n-1)$ - число степеней свободы.

Критерий Фишера F , вычисленный по (П.9.4), сравнивается с табличным значением. Если его значение не превышает табличного, то с соответствующей доверительной вероятностью модель можно считать адекватной.

Таблица П.9.2

Зависимость коэффициента сплавления от
мощности источника тепла и глубины
проплавления основного металла

Номер опыта	Коэффици- ент сплав- ления K''	Мощность N	Глубина проплав- ления D	X_0	X_1	X_2	$X_1 X_2$
1.	0,870	11	0,5	+ I	-I	-I	+I
2.	0,953	16	0,5	+ I	+I	-I	-I
3.	1,000	16	1,5	+ I	+I	+I	+I
4.	0,990	11	1,5	+ I	-I	+I	-I
5.	0,976	13,3	0,87	+ I	0	0	0
6.	0,970	13,3	0,87	+ I	0	0	0

Интервалы величин: $N_{\min} = 11$ кВт; $N_0 = 13,3$ кВт;
 $N_{\max} = 16$ кВт; $D_{\min} = 0,5$ мм; $D_0 = 0,87$ мм; $D_{\max} = 1,5$ мм.

Таблица П.9.3

Номер опыта	K''	$y = \ln(100K'')$	\tilde{y}_i	$\Delta \tilde{y}$	$\Delta \tilde{y}^2$
1.	0,870	4,4659	4,4731	-0,0072	0,0000518
2.	0,953	4,5570	4,5643	-0,0073	0,0000532
3.	1,000	4,6052	4,6125	-0,0073	0,0000532
4.	0,990	4,5951	4,6025	-0,0074	0,0000547
5.	0,976	4,5809	4,5631	0,0178	0,0003168
6.	0,970	4,5747	4,5631	0,0116	0,0001345

Значение коэффициентов:

$$b_0 = 4,5631; \quad b_1 = 0,0353; \quad b_2 = 0,0444;$$

$$b_{12} = -0,0203.$$

Математическая модель:

$$\tilde{y} = 4,5631 + 0,0253X_1 + 0,444X_2 - 0,0203X_1X_2$$

Дисперсионный анализ:

$$\begin{aligned} \int \sigma^2 &= 0,000642; & \int^2(y) &= 0,0000192 \\ F &= 34,59; & &= F_{таб} = 161; \quad F < F_{таб}. \end{aligned}$$

Модель вполне адекватна.

Наглядное представление о зависимости коэффициента сплавления от мощности источника тепла и глубины проплавления основного металла показано на рис. П.9.1. Параметр K'' возрастает от точки $(-1, -1)$ к точке $(1, 1)$, где его значения будут максимальны. Вдоль каждой из кривых $K'' = const$ можно выбрать оптимальные значения электрической мощности N и глубины проплавления основного металла D .

Зависимость коэффициента сплавления от концентрации бора в покрытии и температуры в зоне сплавления

Таблица П.9.4

Номер опыта	Коэффициент сплавления K''	Концентрация бора C	Температура ϑ	X_0	X_1	X_2	X_1X_2
1	0,913	0,0033	1,873	+1	-1	-1	+1
2	0,900	0,03	1,873	+1	+1	-1	-1
3	0,929	0,03	1,966	+1	+1	+1	+1
4	0,998	0,0033	1,966	+1	-1	+1	-1
5	0,912	0,01	1,918	+1	0	0	0
6	0,932	0,01	1,918	+1	0	0	0

Интервал величин: $C_{min} = 0,0033$; $C_0 = 0,01$; $C_{max} = 0,03$

$$\vartheta = \frac{273^\circ + T^\circ}{1000^\circ}; \quad \vartheta_{min} = 1,873; \quad \vartheta_0 = 1,918; \quad \vartheta_{max} = 1,966.$$

Таблица П.9.5

Номер опыта	K''	$y = \lg(100K'')$	\tilde{y}	$\Delta \tilde{y}$	$\Delta \tilde{y}^2$
1	0,913	4,5142	4,5038	0,0044	0,0000193
2	0,900	4,4998	4,4954	0,0044	0,0000193
3	0,929	4,5315	4,5272	0,0043	0,0000184
4	0,998	4,6032	4,5988	0,0044	0,0000193
5	0,912	4,5131	4,5328	-0,0197	0,000388
6	0,832	4,5347	4,5328	0,0019	0,000004

Значение коэффициентов:

$$b_0 = 4,5328; \quad b_1 = -0,0215;$$

$$b_2 = 0,0302; \quad b_{12} = -0,0143$$

Математическая модель:

$$\tilde{y} = 4,5328 - 0,0215X_1 + 0,0302X_2 - 0,0143X_1X_2$$

Дисперсионный анализ:

$$\int_{\sigma\sigma}^2 = 0,0004683; \quad \int^2(y) = 0,000233;$$

$$F = 2,0099; \quad = F_{\tau\sigma\sigma} - 161; \quad F \ll F_{\text{таб.}}$$

Модель адекватна.

На рис. П.9.2 приведены кривые постоянного K'' , причем нарастание этой величины происходит от точки (1, -1) к точке (-1, 1). Вдоль каждой из кривых, представленных на рисунке, содержание бора в присадочном материале и температура в зоне сплавления изменяются так, чтобы сохранялось значение коэффициента сплавления K'' .

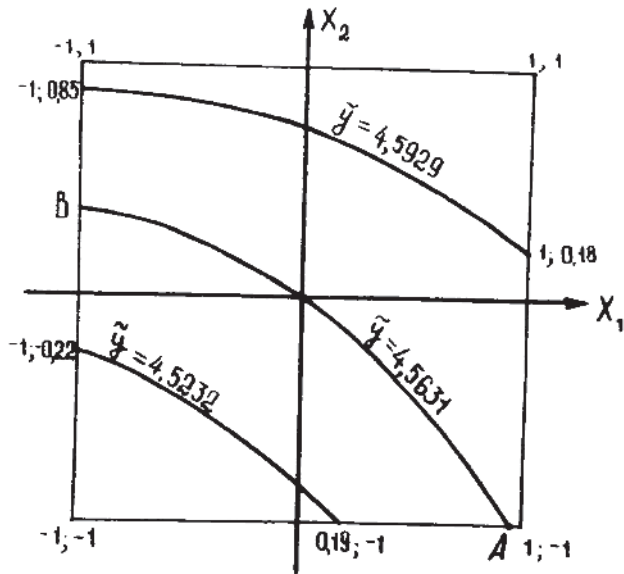


Рис.П.9.1. Кривые постоянного коэффициента сплавления K'' в зависимости от мощности источника тепла N (X_1) и глубины проплавления основного металла D (X_2)

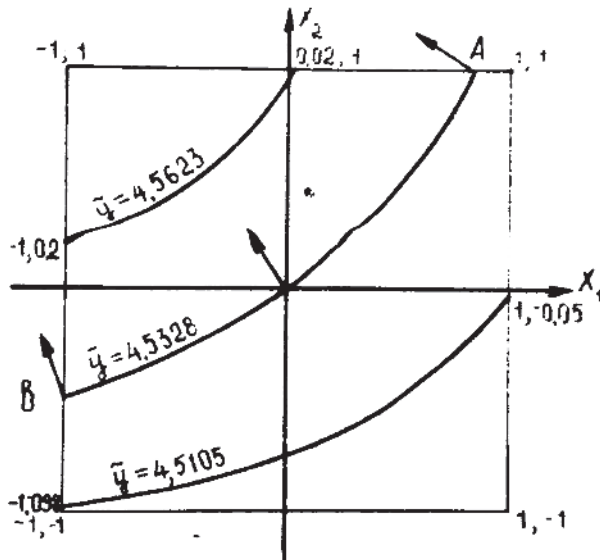


Рис.П.9.2. Кривые постоянного коэффициента сплавления K'' в зависимости от концентрации бора C (X_1) в покрытии и температуры θ (X_2) в зоне сплавления

Зависимость глубины проплавления основного металла от концентрации бора в покрытии и температуры в зоне сплавления

Таблица П.9.6

Номер опыта	Глубина проплавления D	Концентрация бора C	Температура ϑ	X_0	X_I	X_2	$X_I X_2$
1	0,80	0,0033	1,873	+I	-I	-I	+I
2	0,63	0,03	1,873	+I	+I	-I	-I
3	1,04	0,03	1,993	+I	+I	+I	+I
4	1,89	0,0033	1,993	+I	-I	+I	-I
5	0,79	0,01	1,932	+I	0	0	0
6	0,94	0,01	1,932	+I	0	0	0

Интервал величин: $C_{min}=0,0033$; $C_0=0,01$; $C_{max}=0,03$;
 $\vartheta = \frac{273^{\circ} + T^{\circ}}{1000^{\circ}}$; $\vartheta_{min}=1,873$; $\vartheta_0=1,932$; $\vartheta_{max}=1,993$.

Таблица П.9.7

Номер опыта	D	$y = \rho_n(100D)$	\tilde{y}	$\Delta \tilde{y}$	$\Delta \tilde{y}^2$
1	0,80	4,3820	4,3315	0,0505	0,00255
2	0,63	4,1431	4,0925	0,0506	0,00256
3	1,04	4,6444	4,5939	0,0505	0,00255
4	1,89	4,2417	5,1913	0,0504	0,00254
5	0,79	4,3694	4,5523	-0,1829	0,03345
6	0,94	4,5433	4,5523	-0,0090	0,00008

Значение коэффициентов:

$$\begin{aligned} b_0 &= 4,5523; & b_1 &= -0,2091; \\ b_2 &= 0,3403; & b_{12} &= -0,0896 \end{aligned}$$

Математическая модель:

$$\bar{y} = 4,5523 - 0,2091X_1 + 0,3403X_2 - 0,0896X_1X_2$$

Дисперсионный анализ:

$$\begin{aligned} S_{\text{ад}}^2 &= 0,043731; & S^2(y) &= 0,0151; \\ F &= 2,8961; & F_{\text{таб}} &= 161; & F < F_{\text{таб}}. \end{aligned}$$

Модель адекватна.

На рис. П.9.3 показаны кривые равной глубины проплавления, причем, как это видно из рисунка, нарастание параметра D происходит от точки $(1, -1)$ к точке $(-1, 1)$, для которой его значение равно 1,5 мм.

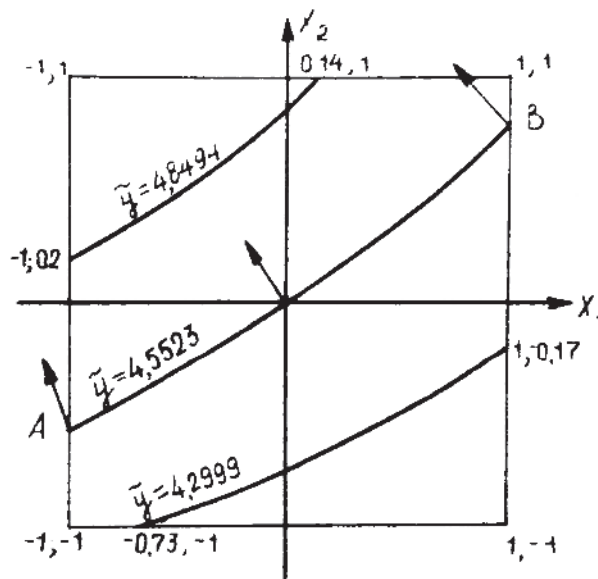


Рис. II.9.3. Кривые постоянной глубины проплавления основного металла D в зависимости от концентрации бора $C(X_I)$ в покрытии и температуры $T(K_2)$ в I зоне сплавления

П Р И Л О Ж Е Н И Е 10

Анализ зависимости относительной износостойкости покрытий от концентраций легирующих элементов

Таблица П.Ю.1

Матрица планирования эксперимента в области I

Наименование	Свободный член		Концентрация хрома (C_1)		Концентрация бора (C_2)		Корреляционный член	Износостойкость		
	X_0	X_1	X_1	X_2	X_1	X_2		ε	ε_{cp}	$Y = \varepsilon_1 \varepsilon_{cp}$
Верхний уровень (+)	-	0,33	0,03							
Основной уровень	-	0,27	0,17							
Нижний уровень (-)	-	0,22	0,01							
Кодовое обозначение	X_0	X_1	X_2			$X_1 X_2$				
Номер опыта I	+	-	-			+		2,7 2,5 2,0	2,4	0,87554
2	+	+	-			-		4,4 3,8 4,1	4,1	1,41098
3	+	-	+			-		2,7 3,0 3,6	3,1	1,13140
4	+	+	+			+		4,9 4,1 4,8	4,6	1,52606
5	+	0	0			0		3,3 3,5 2,8	3,2	1,16315
6	+	0	0			0		3,3 3,0 3,6	3,3	1,19392

Таблица П.10.2

№ опыта	y	\hat{y}	$y - \hat{y}$	$(y - \hat{y})^2$	\bar{y}_0	$y_{i0} - \bar{y}_0$	$(y_{i0} - \bar{y}_0)^2$
1	0,87547	0,85678	0,01869	0,00035			
2	1,41099	1,39228	0,01871	0,00035			
3	1,13140	1,11300	0,01840	0,00034			
4	1,52606	1,50735	0,01871	0,00035			
5	1,16315	1,21728	-0,05413	0,00293	1,17853	-0,01538	0,00024
6	1,19392	1,21728	-0,02336	0,00055	1,17853	0,01538	0,00024

Таблица П.10.3

Переменные			$\bar{\varepsilon}_{cp}$	$\hat{\varepsilon}$	$\tilde{\varepsilon}$
x_1	x_2				
-	-		2,4	2,36	2,44
+	-		4,1	4,02	3,89
-	+		3,1	3,04	2,93
+	+		4,6	4,51	4,54
0	0		3,2	3,38	3,38
0	0		3,3	3,38	3,38

Таблица П.Г.У.4

Матрица планирования эксперимента в области 2

Наименование	Свободный член	Концентрация хрома (C_1)	Концентрация бора (C_2)	Корреляционный член	Износостойкость	
					ε	$\mu = \eta \varepsilon \varphi$
Верхний уровень (+)	-	0,39	0,03	-	-	-
Основной уровень	-	0,36	0,17	-	-	-
Нижний уровень (-)	-	0,33	0,31	-	-	-
Кодовое обозначение	X_0	X_1	X_2	$X_1 X_2$	-	-
Номер опыта I	+	-	-	+	4,1	I,4I099
2	+	+	-	-	3,2	I,163I5
3	+	-	+	-	4,6	I,52606
4	+	+	+	+	4,4	I,48I60
5	+	0	0	0	4,2	I,43508
6	+	0	0	0	4,1	I,4I099
					3,7	
					4,6	
					4,0	
					3,6	
					3,0	
					3,0	
					4,3	
					4,2	
					5,3	
					4,4	
					4,2	
					4,6	
					4,7	
					4,0	
					3,9	
					4,4	
					4,3	
					3,6	

Таблица П.10.5

№ опы- та	y	\hat{y}	$y - \hat{y}$	$(y - \hat{y})^2$	\bar{y}_0	$y_{i0} - \bar{y}_0$	$(y_{i0} - \bar{y}_0)^2$
1	1,41099	1,43017	-0,00918	0,00008			
2	1,16315	1,17335	-0,01020	0,00026			
3	1,52606	1,52805	-0,00199				
4	1,48160	1,49097	-0,00937	0,00009			
5	1,43508	1,40464	0,03044	0,00093	1,42303	0,01205	0,00015
6	1,41099	1,40464	0,00635	0,00004	1,42303	0,01205	0,00015

Таблица П.10.6

Переменные		$\bar{\varepsilon}_{cp}$	$\hat{\varepsilon}$	$\tilde{\varepsilon}$
X_1	X_2			
-	-	4,1	4,13	3,93
+	-	3,2	3,25	3,39
-	+	4,6	4,61	4,88
+	+	4,4	4,44	4,22
0	0	4,2	4,07	4,07
0	0	4,1	4,07	4,07

Таблица П.10.7

Матрица планирования эксперимента в области 3

Наименование	Свободный член	Концентрация хрома (C_1)	Концентрация бора (C_2)	Корреляционный член	ξ	Износостойкость	
						$\xi\varphi$	$y = \eta\epsilon\varphi$
Верхний уровень (+)	-	0,39	0,04	-	-	-	-
Основной уровень	-	0,36	0,035	-	-	-	-
Нижний уровень (-)	-	0,33	0,03	-	-	-	-
Кодовое обозначение	X_0	X_1	X_2	$X_1 X_2$	-	-	-
Номер ошгта I	+	-	-	+	4,3 4,5 5,0	4,6	I, 52606
2	+	+	-	-	4,7 4,5 4,0	4,4	I, 48160
3	+	-	+	-	3,4 3,3 4,1	3,8	I, 33500
4	+	+	+	+	3,5 3,8 3,2	3,5	I, 25276
5	+	0	0	0	4,5 4,4 3,7	4,2	I, 43508
6	+	0	0	0	4,1 4,3 4,5	4,3	I, 45861

Таблица П.10.8

№ ОПЫ- та	y	\hat{y}	$y - \hat{y}$	$(y - \hat{y})^2$	\bar{y}_0	$y_{i0} - \bar{y}_0$	$(y_{i0} - \bar{y}_0)^2$
1	1,52606	-0,01599	1,54205	0,00025			
2	1,48160	0,00289	1,47871	0,00001			
3	1,33500	-0,01599	1,35098	0,00025			
4	1,25276	-0,01601	1,26877	0,00026			
5	1,43508	0,02023	1,41485	0,00041	1,44684	0,01176	0,00014
6	1,45861	0,04378	1,41483	0,00192	1,44684	-0,01176	0,00014

Таблица П.10.9

Переменные		ε_{cp}	$\hat{\varepsilon}$	$\tilde{\varepsilon}$
x_1	x_2			
-	-	4,6	4,67	4,71
+	-	4,4	4,47	4,43
-	+	3,8	3,86	3,83
+	+	3,5	3,56	3,60
0	0	4,2	4,12	4,12
0	0	4,3	4,12	4,12



СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ

АВТОРСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО

№ 1146913

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР, Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий выдал настоящее авторское свидетельство на изобретение:
"Устройство для наплавки"

Автор (авторы): **Дорожкин Нил Николаевич, Елистратов Алексей Петрович, Дудан Александр Витальевич, Радченко Александр Адамович и Петюшев Николай Николаевич**

Заявитель: **ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ
МАШИН АН БССР**

Заявка № 3684655

Приоритет изобретения 4 января 1984г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР

22 ноября 1984г.

Действие авторского свидетельства распространяется на всю территорию Союза ССР.

Председатель Комитета

Начальник отдела



СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ

АВТОРСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО

№ 1167835

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР, Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий

выдал настоящее авторское свидетельство на изобретение:
"Устройство для горизонтальной электрошлаковой
наплавки"

Автор (авторы): Дорожкин Нил Николаевич, Сушук-Слюсаренко Игорь Иванович, Дудан Александр Витальевич, Елистратов Алексей Петрович и Радченко Александр Адамович

Заявитель: ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ
МАШИН АН БССР

Заявка № 3726867 Приоритет изобретения 21 апреля 1984г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР

8 марта 1985г.

Действие авторского свидетельства распространяется на всю территорию Союза ССР.

Председатель Комитета

Начальник отдела



СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ

АВТОРСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО

№ 1181217

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР, Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий выдал настоящее авторское свидетельство на изобретение:
"Способ горизонтальной электрошлаковой наплавки"

Автор (авторы): Дорожкин Нил Николаевич, Дудан Александр Витальевич, Харитонович Вячеслав Иванович и Маджуга Виталий Владимирович

Заявитель:

Заявка № 3728197

Приоритет изобретения 19 апреля 1984г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР

22 мая 1985г.

Действие авторского свидетельства распространяется на всю территорию Союза ССР.

Председатель Комитета

Начальник отдела



СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ

АВТОРСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО

№ 1235082

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР, Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий выдал настоящее авторское свидетельство на изобретение:
"Способ горизонтальной электрошлаковой износостойкой наплавки"

Автор (авторы): Дорожкин Нил Николаевич, Дудан Александр Витальевич, Радченко Александр Адамович и Абрамович Торий Мейерович

Заявитель: ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ
МАШИН АН БССР

Заявка № 3838589

Приоритет изобретения 7 января 1985г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР

1 февраля 1986г.
Действие авторского свидетельства распространяется на всю территорию Союза ССР.

Председатель Комитета

Начальник отдела

УТЪР. ДАМ
 ГЛАВНЫЙ ЦЕНТР НАДВОРНИКОГО
 УПРАВЛЕНИЯ БУРОВЫХ РАБОТ

А. И. ПРОЦЬК
 " 27 " 1985 г.

А К Т

Опытно-промышленных испытаний бурильных замков ЗУК-155 упрочненных электрошлаковым методом по технологии ИНДАШ АН БССР

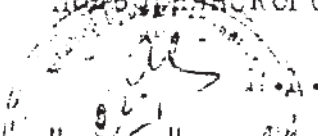
Комиссия в составе начальника ЦТО НУБР ПИТЛЯР Г.Г., начальника буровой ПРИШЛЯК И.Г., ст.инженера ПРЦТИТ АНДРЕЙЧУК А.П., ст.инженера ИЮ ВНИИТнефть ПАРЫПА Л.Р., м.н.с. ИНДАШ АН БССР ДУДАНА А.В. составили настоящий акт об опытно-промышленных испытаниях буровых замков ЗУК-155 на буровой № 19-Быстрица Надворнянского УБР объединения Укрнефть.

На основании договора о научно-техническом сотрудничестве между ИЮ ВНИИТнефть и ИНДАШ АН БССР и плана работ на отработку комплекта замков в Надворнянском УБР контрольный комплект прошел эксплуатационные испытания.

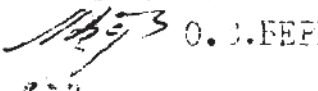
Комиссия отмечает, что в результате испытаний износ упрочненных замков за 1589 часов работы на буровой составил 2,9мм. Износ серийных замков за такой же период работы составил 4,9мм. В отличие от серийных замков, на упрочненных замках односторонний износ отсутствует. Таким образом, срок службы упрочненных замков бурильных труб в 1,6... 1,7 раза выше, чем серийных.

Начальник ЦТО НУБР.	<i>[Signature]</i>	Г.Г.ПИТЛЯР
Ст.инженер ПРЦТИТ	<i>[Signature]</i>	А.П.АНДРЕЙЧУК
Начальник буровой № 19-Б	<i>[Signature]</i>	И.Г.ПРИШЛЯК
Ст.инженер ИЮ ВНИИТнефть	<i>[Signature]</i>	Л.Р.ПАРЫПА
М.н.с. ИНДАШ АН БССР	<i>[Signature]</i>	А.В.ДУДАН

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер
Надворнянского УЭР

 Н. Д. ПРОСКИНА
 " 21 " 09 1985г.

УТВЕРЖДАЮ

директор Института проблем
надежности и долговечности
машин АН БССР

 О. И. БЕРЕСТИВ
 " 20 " 09 1985г.

А К Т

внедрения технологии горизонтального электро-
шлакового упрочнения замков буровых труб

Представитель Надворнянского го УЭР начальник производственно-технического отдела т. Пятляр Г. Г., главный экономист т. Зульчин И. П. с одной стороны, и представители ИИДМАШ АН БССР зав. лабораторией д. т. н., проф. т. Дорожкин Н. Н., и. н. с. т. Дудан А. В. с другой стороны, составили настоящий акт в том, что в Надворнянском УЭР осуществлено внедрение технологии горизонтального электрошлакового упрочнения быстролегированных замков буровых труб.

Работа проводилась в соответствии с договором о научно-техническом сотрудничестве между Ивано-Франковским отделом ВНИИТнефть и ИИДМАШ АН БССР от 22.02.85 года.

Основные ее результаты:

- разработана технология горизонтального электрошлакового упрочнения по слою порошкового дисаодочного материала с использованием стальной ленты;
- определены режимы наплавки;
- разработан технологический процесс упрочнения замков буровых труб, позволяющий увеличить срок их службы в 1,6 - 1,7 раза.

Экономический эффект от внедрения технологии горизонтального электрошлакового упрочнения замков буровых труб составил 12603 рубля (расчет прилагается).

Представители Надворнянского УЭР

Начальник ЦТО

Г. Г. ПЯТЛЯР

Главный экономист

И. П. ЗУЛЬЧИН

Представители ИИДМАШ АН БССР

Заведующий лабораторией

Н. Н. ДОРОЖКИН

Младший научный сотрудник

А. В. ДУДАН

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер
Надворнянского УБР

И. Д. ПРОЦЮК

" 27 " 09 1985 г.

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института проблем
надежности и долговечности
машин АН БССР

О. В. БЕРЕСТНЕЕ

" 20 " 08 1985 г.

РАСЧЕТ

экономической эффективности внедрения
технологического процесса упрочнения быстро-
изнашивающихся замков бурильных труб элект-
рошлаковым методом

Расчет выполнялся в соответствии с методикой определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений, утвержденной Постановлением ГК СМ СССР по науке и технике, Госпланом СССР, АН СССР, ГК по делам изобретений и открытий СМ СССР, 14 февраля 1977 г. № 48ИИ6/13/3-38/141.

Годовой экономический эффект рассчитывался по формуле

$$\mathcal{E} = (Z_1 \cdot \frac{P_1 + E_H}{P_2 + E_H} - Z_2) A$$

где Z_1 - стоимость замка;

Z_2 - стоимость упрочнения замка;

$P_1 = \frac{I}{T_1}$; T_1 - срок службы замка без наплавки;

$P_2 = \frac{I}{T_2}$; T_2 - срок службы упрочненного замка;

A - количество замков, подлежащих упрочнению за год;

E_H - нормативный коэффициент эффективности ($E_H = 0,15$).

Стоимость упрочнения замка определялась по формуле:

$$Z_2 = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + H,$$

где C_1 - стоимость материалов и затраты на электроэнергию;

C_2 - зарплата с начислением; C_3 - накладные расходы от основной зарплате; C_4 - амортизационные отчисления; C_5 - затраты по текущему ремонту и обслуживанию; H - накопления ($H = 16\%$).

Затраты на материалы и электроэнергию представлены в таблице 1, в таблице 2 - расчет затрат труда и заработной платы, а в таблице 3 - расчет затрат на эксплуатацию оборудования.

Таблица 1

Расчет стоимости материалов и электроэнергии, расходуемых на упрочнение одного замка

№№ п/п	Наименование материалов	Цена за единицу Р/кг; Р/ квт. ч	Количество во, (кг; квт. ч)	Сумма, руб.
1.	Порошковая присадка ФХ-800	0,289	0,21	0,061
2.	Флюс АН-8	0,26	0,006	0,002
	АН-9	1	0,006	0,006
3.	Графитовый электрод	0,12	0,04	0,005
4.	Электроэнергия	0,035	4,5	0,158
5.	Сумма затрат на материа- лы и электроэнергию			0,232

Таблица 2

Расчет труда и зарплаты при упрочнении одного замка

№№ пп	Выполняемые работы	Часовая та- рифная ста- вка, коп.	Время, ч	Зарплата, руб.
1	2	3	4	5
1.	Рабочий-сварщик-автоматчик 4-го разряда	67,0		
2.	Время наплавки замка		0,375	
			0,017	
3.	Основная зарплата			0,263
4.	Дополнительная зарплата (I 4 %)			0,037
5.	Очисления на социальное стра- хование (7,9 %)			0,024
6.	Всего заработная плата свар- щика-автоматчика			0,324

1	2	3	4	5
7.	Накладные расходы от основной заработной платы (15 %)			0,039

Таблица 3

Расчет затрат по эксплуатации оборудования при упрочнении одного замка

№/п/п	Показатели	Сумма, руб.
1.	Балансовая стоимость оборудования	2125
2.	Амортизационные отчисления (34,2 % от стоимости оборудования)	0,242
3.	Текущий ремонт (20 % от стоимости оборудования)	0,142

В таблице 4 представлена калькуляция стоимости упрочнения замка.

Таблица 4

Калькуляция стоимости упрочнения замка

№/п/п	Статьи затрат	Сумма, руб.
1	2	3
1.	C ₁	0,232
2.	C ₂	0,324
3.	C ₃	0,039
4.	C ₄	0,242
5.	C ₅	0,142
6.	Себестоимость	0,979
7.	Н	0,157
8.	Полная стоимость	1,136

В таблице 5 представлены исходные данные для расчета экономического эффекта от внедрения технологического процесса упрочнения замков бурильных труб на предприятиях Надворнянского УБР электрошлаковым методом.

Таблица 5
Исходные данные для расчета экономического эффекта

№№ п/п	Показатели	Значения показателей
1.	Z_1	45 руб.
2.	Z_2	1,136 руб.
3.	T_1	0,5 г
4.	T_2	0,85 г
5.	P_1	2
6.	P_2	1,18
7.	E_H	0,15
8.	A	176 шт.

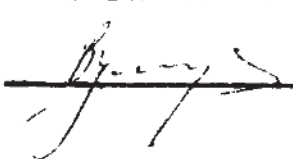
Годовой экономический эффект от внедрения данного технологического процесса составляет:

$$E = \left(45 \cdot \frac{2 + 0,15}{1,18 + 0,15} - 1,136 \right) \cdot 176 = 12603 \text{ руб.}$$

От Надворнянского УБР
Начальник технического отдела

 Г.Г. ПЫТЛЯР

Главный экономист

 И.П. ВУЛЬЧИН


От ИИТМАШ АН БССР
Заведующий лабораторией

 Н.Н. ДОРОЖКИН

Младший научный сотрудник

 А.В. ДУДАН

Зав. отделом внедрения

 Г.П. КАРНИЦКИЙ

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института проблем
надежности и долговечности
машин АН БССР

О.А. Барестнев

" 11 " _____ 1984 г.

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер специали-
зированной производствен-
ного предприятия "Северо-
энергоремонт"

В.А. Югай

" 12 " _____ 1984 г.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

Мы, нижеподписавшиеся, представители Института проблем надеж-
ности и долговечности машин АН БССР: зав. лабораторией износостойких
покрытий, д.т.н., проф. Дорожкин Н.Н., ведущий инженер Сахнович В.Т.,
аспирант Дудан А.В., старший инженер Полупан Ю.В., с одной стороны,
и представители специализированного производственного предприятия
"Североэнергоремонт": начальник тех. бюро Кирьянов В.А., старший
инженер Горчакова Л.В., с другой стороны, составили настоящий
акт о внедрении законченной научно-исследовательской разработки,
выполняемой согласно хоздоговора № 53-82 от 29.10.82 г.

Основные результаты работы: изготовлено и передано оборудование
и соответствующая техническая документация для газотермического на-
пыления с последующим электрошлаковым оплавлением защитных покрытий
из хромоникелевых самофлюсующихся порошков на детали и узлы энерге-
тического оборудования, осуществлены отработка технологических ре-
жимов, наладка, шеф-монтаж и запуск в эксплуатацию.

В конструкции установки использованы авторские свидетельства
№ 751445, № 753480.

Результаты работы внедрены на специализированном производствен-
ном предприятии "Североэнергоремонт" г. Магадан с годовым экономи-
ческим эффектом сто пятьдесят тысяч рублей.

Расчет экономического эффекта прилагается.

Доля участия ИНДМАШ АН БССР в данной работе - 100%.

Представители ИНДМАШ АН БССР

Н.Н. Дорожкин

В.Т. Сахнович

А.В. Дудан

Ю.В. Полупан

Представители СПП
"Североэнергоремонт"

В.А. Кирьянов

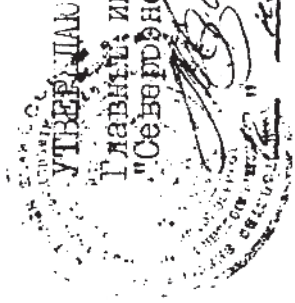
Л.В. Горчакова

СОГЛАСОВАНО

Директор Института проблем
надежности и долговечности
МАШИН АН БССР

В. В. Берестнев
В. В. Берестнев

1984 г.



УТВЕРЖДАЮ
Главный инженер предприятия
"Северэнергоремонт"

В. А. Край
В. А. Край

1984 г.

РАСЧЕТ

экономической эффективности упрочнения восстановления
деталей газопламенным напылением установкой УПТР-1-78М
по предприятию "Северэнергоремонт"

№ п/п	Наименование деталей	Номер позиции по прейскуранту	Годовая потребность, шт. A_2	Стоимость I детали при базовом процессе C_1	Стоимость восстановления детали C_2	E_H	K_2	Экономический эффект от внедрения восстановления $E = C_1 + E_H \cdot K_2 \cdot A_2$	
I	2	3	4	5	6	7	8	9	244
I.	<u>Котельное оборудование</u>								
I.1.	Змеевики с дистанциями хомутами	2-0037	200	249,16	109,28	0,15	17,88	$249,16 - (109,28 + 0,15 \cdot 17,88) \cdot 200 = 27440,0$	
I.2.	Змеевики с дистанциями хомутами	2-0038	200	324,14	109,28		17,88	$324,14 - (109,28 + 0,15 \cdot 17,88) \cdot 200 = 42436,0$	
I.3.	Дымососы								
I.3.1.	Лопатки	5-0147	250	74,97	33,0		0,93	$74,97 - (33,0 + 0,93) \cdot 250 = 10457,5$	
I.3.2.	Броня	5-0267	10	738,67	475,33		13,5	$738,67 - (475,33 + 0,15 \cdot 13,5) \cdot 10 = 2616,7$	
I.3.3.	Валы	5-0241	15	275,62	9,85		1,64	$275,62 - (9,85 + 0,15 \cdot 1,64) \cdot 15 = 3982,9$	

2.4.	Валики масляных насосов 3-0429	100	12,56	6,0	2,02	12,56 - (6,0 + 0,15 * 2,02) * 100 = 601
2.5.	Вал-шестерня 3-0421	20	132,3	8,32	2,88	132,3 - (8,32 + 0,15 * 2,88) * 20 = 2471

Итого:

31002,2

3. Дизельное оборудование

3.1.	Втулка цилиндра 01-03000-2	30	269	74,75	20,79	269 - (74,75 + 0,15 * 20,79) * 30 = 5734,2
3.2.	Цапфа 01-030503-2	60	23,59	5,98	2,02	23,59 - (5,98 + 0,15 * 2,02) * 60 = 1038,6
3.3.	Толкатель 01-130007	60	24,25	3,99	1,63	24,25 - (3,99 + 0,15 * 1,63) * 60 = 1200,0

Итого:

7972,8

Итого по предприятию "Северэнергоремонт"

150052,6

Начальник ТО *М.А. Максимов* М.А. Максимов
 Начальник ППО *С.С. Костомарова* С.С. Костомарова

СОГЛАСОВАНО:

Зав. лабораторией износоустойчивых покрытий/деталей машин
 ИЦМАЛ АН БССР

Н.И. Дорожкин



УТВЕРЖДАЮ

Директор Института пробле
надежности и долговечност
машин АН БССР

С.В. Берестнев С.В. Берестнев

" 21 " *ноября* 1984

А К Т

распределения экономического эффекта

Мы, нижеподписавшиеся, зав.лабораторией № 3.1 Дорожкин Н.Н., ст.научн.сотр. лаб.№ 3.1 Жорник В.И., ст.научн.сотр. лаб.№ 3.1 Верецагин В.А. составили настоящий акт в том, что доля участия в проведении научно-исследовательских работ, выполненных согласно хоздоговору № 53-82 от 29.10.82 г. между ИНДМАШ АН БССР и СПИ "Североэнергоремонт", следующая:

Сахнович В.Т. - 60% (90,03 тыс.руб.)

Дудан А.В. - 9% (13,59 тыс.руб.)

Полупан Ю.В. - 31% (46,43 тыс.руб.)

Зав.лабораторией № 3.1

Н.Н. Дорожкин
Н.Н. Дорожкин

Ст.научн.сотр.лаб.№ 3.1

В.И. Жорник
В.И. Жорник

Ст.научн.сотр.лаб.№ 3.1

В.А. Верецагин
В.А. Верецагин