М396881

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА

На правах рукоп си

ВЕЧЕР Александр Васильевич

ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ СТАЛЬНЫХ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ НАПЛАВКОЙ МЕДНЫМИ СПЛАВАМИ

Специальность 05.04.05
"Технология и машины сварочного производства"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1982

Работа выполнена в Могилевском машиностроительном и Гомельском политехническом институтах.

Научный руководитель - к.т.н., доцент Павлюк С.К.

Официальные оппоненты - д.т.н., профессор Сагалевич В.М.,
- к.т.н. Хаванов В.А.

Ведущая организация - Каунасский литейный завод "Центролит"

Защита диссертации состоится " " 1982 г. на заседании специализированного Совета Д 053.15.07 при Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ имени Н.Э. Баумана.

Ваш отзыв в I экз., заверенный печатью, просим высылать по указанному адресу.

Авторефе

Ученый секрет
рованного Со
д.т.н., профе дков

Л - 90679 . 105
ТУ

М396881

1396881
Вечер А.В.Повышение стойкс

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

№ 1396881

Актуальность проблемы. Одной из главных причин, сдерживающих дальнейшее развитие полунепрерывного литья чугунных труб, является низкая стойкость кристаллизаторов, приводящая к тому, что затраты на их изготовление и ремонт составляют значительную статью себестоимости производства труб. Стальные детали кристаллизатора, соприкасающиеся с жидким чугуном, быстро выходят из строя вследствие термической усталости и износа. Попытки решить проблему повышения их долговечности за счет изготовления из специальных сталей, меди, инвара положительных результатов не дали вследствие противоречивости требований к свойствам материала на разных участках детали. Поэтому задача повышения срока службы кристаллизаторов наплавкой материалами, наиболее полно соответствующими условиям работы, является актуальной. Различие свойств основного и наплавленного металла приводит к изменению условий работы, в первую очередь теплового и напряженного состояния. Результаты анализа влияния свойств наплавленного металла на изменение условий эксплуатации наплавленных деталей, оценки работоспособности наплавленного металла и зоны сплавления при теплосменах будут полезны при разработке общих теоретических предпосылок выбора состава наплавленного металла для упрочнения деталей, работающих в контакте с расплавленным и кристаллизующимся металлом (пресс-формы литья под давлением, кокили, изложницы центробежного литья и разливки стали, кристаллизаторы непрерывной разливки и рафинирующих переплавов). Таким образом, проблема повышения наплавкой стойкости деталей кристаллизаторов полунепрерывного литья чугунных труб имеет практический и научный интерес.

Цели и задачи исследования. Целью работы являлось повышение наплавкой срока службы кристаллизаторов полунепрерывного литья чугунных труб. Поставленная цель реализуется решением следующих задач: исследованием влияния свойств наплавленного металла на тепловые условия эксплуатации деталей и выбором на основании этого класса наплавочных материалов; анализом термонапряженного состояния зоны сплавления и всей детали, разработкой по результатам анализа конструкции наплавленных деталей; изучением свойств наплавленного металла и зоны сплавления при рабочих температурах, выбором состава наплавленного металла; разработкой практических рекомендаций и внедрением результатов исследований в производство.

Методы исследования. Основными методами экспериментальных исследований являлись: тензометрирование остаточных и термиче-

МВТУ
им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

ских напряжений; исследование микротвердости и прочности зоны сплавления на срез; фрактографическое изучение поверхности среза; измерение твердости наплавленного металла и определение износостойкости при повышенных температурах; исследование термостойкости собственно наплавленного металла и наплавки вместе с зоной сплавления; металлографическое изучение строения зоны сплавления. При теоретическом анализе температур и напряжений использовались результаты расчетов на ЭЦВМ. Обработка экспериментальных данных осуществлялась с использованием статистических методов и программируемой вычислительной техники.

Научная новизна. Выявлены некоторые закономерности влияния толщины и свойств наплавленного металла на тепловое и напряженное состояние деталей, работающих в контакте с расплавленным металлом. Установлено следующее:

– температура поверхности наплавленной формы в начале контакта с отливкой определяется теплоаккумулирующей способностью наплавленного металла; заметное влияние основного металла начинается с запаздыванием, пропорциональным отношению квадрата толщины наплавленного слоя к его теплопроводности, и при значениях критерия Фурье для наплавленного металла менее 0,4 влиянием свойств основного металла на температуру поверхности формы можно пренебречь, возникающая при этом погрешность не будет превышать 5% теплового напора от отливки к форме;

– наплавка втулок и оправок на глубину более 60% от толщины стенки сплавами с близкими к меди модулем упругости, коэффициентом линейного расширения и теплопроводностью обеспечивает такое поле остаточных напряжений, которое компенсирует в процессе нагрева действие термических рабочих напряжений в контакте между наплавленным сплавом и основным металлом и тем самым предотвращает развитие пластической деформации и накопление повреждений от термической усталости.

Практическая ценность. Подход, основанный на последовательном анализе влияния свойств наплавленного металла на тепловое и напряженное состояние наплавленных деталей и экспериментальном определении уровня служебных свойств при рабочих температурах, позволил: определить рабочую температуру, по результатам анализа влияния свойств наплавленного металла на температурные условия эксплуатации обосновать применение различных классов наплавочных материалов для наплавки деталей кристаллизатора, работающих в различном тепловом состоянии; на основании анализа влияния свойств

наплавленного металла на напряженное состояние определить условия, при которых предотвращается термическая усталость зоны сплавления и отслоение неплавленного металла, разработать конструкцию наплавленных втулок и оправок; выбрать состав наплавленного металла и технологию наплавки.

Реализация результатов работы. Результаты исследований прошли опытно-промышленную проверку и внедрены на Могилевском металлургическом заводе им. А.Ф. Мясникова. Применение наплавленных втулок и оправок кристаллизаторов диаметром 200 мм позволило увеличить стойкость кристаллизаторов в 3 раза, повысить производительность литья и качество отливаемых труб.

Апробация работы и публикации. Основное содержание диссертационной работы докладывалось на Республиканских научно-технических конференциях по сварке (Могилев, 1975 и 1978 гг.), на Республиканском научно-теоретическом семинаре "Развитие сварочного производства в машиностроении" (Гомель, 1979 г.), на II заводской конференции сварщиков завода "Гомсельмаш" (Гомель, 1975 г.), на II Всесоюзной научно-технической конференции "Прогрессивные методы сварки в тяжелом машиностроении и наплавки в черной металлургии" (Жданов, 1977 г.), на V Всесоюзной конференции "Теплофизика технологических процессов" (Волгоград, 1980 г.), на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МВТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 1981 г.), на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Могилевского машиностроительного института в 1975-1977 гг. и Гомельского политехнического института в 1978-1982 гг. По материалам диссертации опубликовано 7 печатных работ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и общих выводов, содержит 127 страниц машинописного текста, 13 таблиц, 67 рисунков, список литературы из 114 наименований и приложение.

В о в в е д е н и и показана актуальность работы, приведены наиболее важные научные результаты, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В п е р в о й г л а в е рассмотрены условия работы, установлены причины выхода из строя и намечены пути повышения стойкости формообразующих деталей кристаллизаторов полунепрерывного литья, других деталей, работающих в контакте с расплавленным металлом. Проанализированы изменения, которые может вносить наплавка в термомеханические и физические процессы, происходящие при

эксплуатации, рассмотрены современные представления о природе термической усталости, о влиянии зоны сплавления на работоспособность изделия. Дан обзор известных методов исследования долговечности деталей, работающих в контакте с расплавленным металлом. Сформулированы цель работы и основные задачи исследований.

В о в т о р о й г л а в е проведен анализ тепловых условий эксплуатации наплавленных деталей, изложены результаты теоретического исследования влияния на них толщины и свойств наплавленного слоя, определены области применения наплавочных материалов различных классов. Показано, что втулки и оправки, с одной стороны, и поддоны - с другой, необходимо наплавлять различными наплавочными материалами, причем наплавка втулок и оправок может дать больший экономический эффект.

В т р е т ь е й г л а в е рассматривается термонапряженное состояние зоны сплавления металлов с различными коэффициентами линейного расширения и модулями упругости, с учетом остаточных напряжений анализируется термонапряженное состояние наплавленных втулок и оправок; на основании этого анализа разрабатывается конструкция наплавленных деталей.

Ч е т в е р т а я г л а в е посвящена определению перечня свойств, необходимых для выбора состава наплавленного металла, описанию методики получения сплавов и их наплавки, исследования структуры и прочности на срез зоны сплавления, твердости и износостойкости наплавленного металла при высоких температурах, термостойкости наплавленного металла и зоны сплавления, порядка подготовки экспериментов, их проведения и обработки экспериментальных данных.

В п я т о й г л а в е изложены результаты исследования структуры и прочности на срез наплавок I4 бронз, изучено влияние температуры на твердость и износостойкость, экспериментально исследована термостойкость наплавленного металла и поведение зоны сплавления при теплосменах. По результатам этих исследований осуществлен выбор оптимального состава наплавленного металла для упрочнения втулок и оправок кристаллизаторов полунепрерывного литья чугунных труб; предоставлены результаты использования наплавленных деталей в производстве.

В п р и л о ж е н и и приведены акт и расчет экономической эффективности внедрения, программы для расчетов температуры массивных наплавленных деталей в контакте с теплоносителем, термонапряженного состояния наплавленных цилиндрических деталей при ра-

диальном градиенте температур, программа обработки опытных данных в эксперименте по определению зависимости твердости от температуры.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Большинство исследователей, занимающихся проблемами повышения стойкости металлических форм, в том числе Н.П. Дубинин, А.М. Петриченко, А.И. Вейник, М.А. Тылкин, И.М. Горюнов, отмечают особенно быстрый их выход из строя при литье сплавов с высокой температурой плавления (сплавы на основе меди, железа, никеля), причем в качестве основной причины называется термическая усталость. В кристаллизаторе полунепрерывного литья чугунных труб периодически соприкасаются с расплавленным чугуном оправка I, втулка 2, песчано-глинистый стержень 3, раструбный кокиль 4 и поддон 5 (рис. I). Малый срок службы кристаллизатора определяется втулками и оправками, выдерживающими от 4 до I0 смен непрерывной работы, и поддонами, выдерживающими I5-20 смен. Основными причинами их выхода из строя по заводским и литературным данным являются: термическая усталость, возникающая вследствие чередующихся нагревов и охлаждений; изменение геометрии рабочих поверхностей вследствие износа и повреждений, возникающих при ликвидации местных схватываний, размывания струей расплавленного металла и т.д.

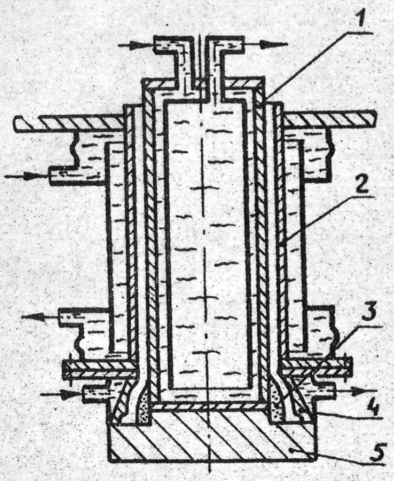


Рис. I. Схема кристаллизатора полунепрерывного литья чугунных труб

Наплавка поддонов аустенитной сталью позволила повысить их стойкость в 4 раза, а для втулок и оправок диаметром I00 мм хороший эффект был достигнут при наплавке не всю толщину стенки медью в районе мениска расплавленного чугуна. В этом случае к наплавленному металлу и зоне сплавления предъявляются жесткие требования по сплошности, так как попадание охлаждающей воды в расплавленный чу-

гун недопустимо по соображениям техники безопасности. Кроме того, увеличивается расход наплавочных материалов, а низкая твердость меди приводит к быстрому изменению геометрии наплавленных поверхностей. Поэтому для распространения данного способа упрочнения на втулки и оправки других типоразмеров, работающих в более жестких условиях, необходимо устранить отмеченные недостатки. Дополнительно возникает вопрос о возможности применения для упрочнения поддонов одинаковых наплавочных материалов и одинаковой технологии наплавки.

Наплавленные детали имеют химическую, физическую, структурную и механическую неоднородность. Влияние механической неоднородности на прочность при нормальных и повышенных температурах рассмотрено в работах О.А. Бакши, Р.З. Шрона, описание напряженного состояния сварных соединений разнородных сталей имеется в работах В.А. Винокурова, Е.И. Махненко, С.Н. Киселева; закономерности образования разнородных соединений и процессы, происходящие в зоне сплавления при эксплуатации, изучены в работах Г.Л. Петрова, В.Н. Земзина, Н.Ф. Казакова, М.Х. Шоршорова, В.М. Сагалевича, Б.И. Медовара, Б.А. Мовчана, зарубежных ученых А.Шеффлера, Р.Кристофера и многих других. Но в литературе недостаточно освещен вопрос влияния свойств наплавленного металла на термонапряженное состояние деталей, работающих в контакте с расплавленным и кристаллизирующимся металлом, ограничены сведения о свойствах наплавленного металла при повышенных температурах и теплосменах.

Для оценки возможного влияния свойств наплавленного металла на тепловые условия эксплуатации наплавленных деталей были проведены расчеты возможных значений критериев Био и Фурье. Согласно расчетам, для всех деталей, работающих в контакте с расплавленным металлом, после наплавки возможно изменение критерия Био в широких пределах, поэтому необходим анализ изменения температурных условий после наплавки; втулки и оправки на этапе нагрева работают при больших значениях критерия Фурье и могут рассматриваться в стационарном тепловом состоянии; для поддонов характерна работа при малых значениях критерия Фурье, и их можно рассматривать как полубесконечные тела; результаты, полученные при анализе втулок, оправок и поддонов, будут полезны для других деталей, контактирующих с расплавленным металлом.

Для определения максимальной температуры поверхности наплавленных поддонов и других массивных форм принята расчетная схема трех соприкасающихся тел: полубесконечная отливка-теплоноситель,

неограниченная пластина-наплавка, полубесконечный основной металл. Решение дифференциальных уравнений теплопроводности при принятых допущениях об идеальном контакте между телами и независимости теплофизических свойств от температуры получено с использованием интегрального преобразования Лапласа. Для поверхности наплавки оно имеет вид:

$$T_n(t) = T_2 + \frac{(T_1 - T_2)K_1}{(1+K_1)(1+K_2)} \sum_{n}^{\infty} (-K)^{n-1} \left[(1+K_2) \times \right.$$

$$\left. \times \operatorname{erfc} \frac{\delta(n-1)}{\sqrt{a_2 t}} - (1-K_2) \operatorname{erfc} \frac{\delta n}{\sqrt{a_2 t}} \right], \quad (1.)$$

где T_1, T_2 – температура теплоносителя и детали до соприкосновения;

$$K_1 = \sqrt{\frac{\rho_1 c_1 \lambda_1}{\rho_2 c_2 \lambda_2}}; \quad K_2 = \sqrt{\frac{\rho_2 c_2 \lambda_2}{\rho_3 c_3 \lambda_3}}; \quad K = \frac{(1-K_1)(1-K_2)}{(1+K_1)(1+K_2)};$$

ρ, c, λ, a – плотность, теплоемкость, коэффициенты теплопроводности и температуропроводности; индекс 1 относится к теплоносителю, 2 – наплавленному, 3 – основному металлу; δ – толщина наплавленного слоя.

Анализ зависимости (1.) показывает, что первоначально на поверхности наплавки устанавливается температура $T_{нач}$, зависящая только от теплофизических свойств и начальных температур наплавленного металла и теплоносителя, по истечении времени, равного $0{,}4\,\delta^2/a_2$, она начинает изменяться и устанавливается температура $T_{уст}$, зависящая только от теплофизических свойств и начальной температуры теплоносителя и основного металла. Результаты расчетов для представляющих практический интерес случаев нагрева жидким чугуном и бронзой массивных деталей из углеродистой стали с наплавками из аустенитной стали, инструментальной стали типа 3Х2В8Ф и меди представлены на рис. 2. Начальная и установившаяся температуры определяют диапазон возможных значений максимальной температуры эксплуатации наплавленных форм. Его сравнение с температурами разупрочнения различных наплавочных материалов позволяет сделать вывод о том, что массивные формы для литья бронз можно наплавлять аустенитными жаропрочными сталями, для литья чугуна – аустенитными жаропрочными и инструментальными теплостойкими сталями, наплавка медными сплавами в этих случаях нецелесообр-

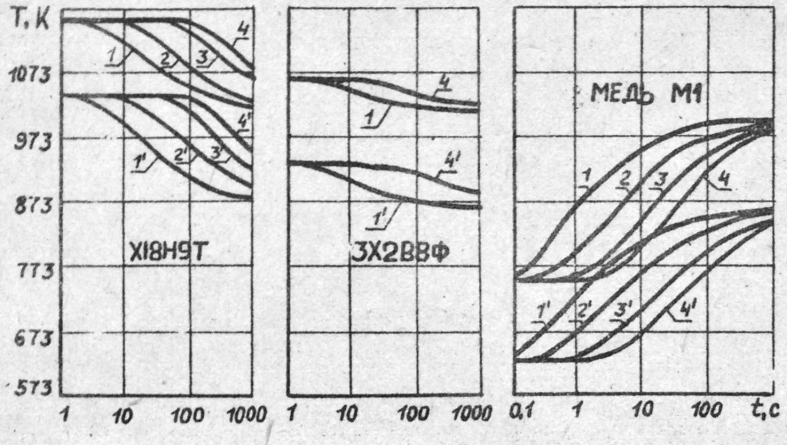


Рис. 2. Температура поверхности наплавленной различными материалами массивной детали, контактирующей с расплавленным чугуном (цифры с индексами) и бронзой (цифры без индексов): 1,2,3,4 – толщина наплавки 5,10,20,30 мм соответственно

разно, т.к. при эксплуатации они будут разогреваться до недопустимых температур за время, меньшее, чем время контакта с теплоносителем.

Для расчета тепловых полей в глубине массивной наплавленной детали получены выражения, определяющие температуру в основном и наплавленном металле при периодическом изменении температуры поверхности. Термический цикл наплавленной поверхности при этом можно аппроксимировать неравнобокой трапецией с высотой, определенной по зависимости (I.). Из расчетов следует, что степень затухания колебаний температуры в глубине детали возрастает при снижении теплофизических свойств наплавленного металла, поэтому теплостойкие и жаропрочные стали, имеющие худшие теплофизические свойства, будут защищать зону сплавления и основной металл от колебаний температуры более эффективно, чем медные сплавы.

Благодаря продольным колебаниям кристаллизатора в процессе литья осевой градиент температур в его верхней, наиболее нагруженной половине незначителен, поэтому наплавленные втулки и оправки представлены как неограниченные двухслойные цилиндры, контактирующие с одной стороны через слой защитной смазки с чугуном, а с другой – с охлаждающей водой. Расчеты говорят о том, что для всех рассмотренных материалов возможна работа при температурах

меньших, чем температура разупрочнения. С ростом теплопроводности наплавленного слоя снижается термическое сопротивление, это приводит к уменьшению температуры поверхности наплавки, градиента температур по толщине стенки и росту теплопередачи. Наплавка медными сплавами может увеличить теплопередачу в 1,5 раза, что позволит наряду с увеличением стойкости втулок и оправок увеличить теплообмен в кристаллизаторе, т.е. производительность литья. Наплавка металлами менее теплопроводными, чем основной, приведет к неизбежному снижению производительности и не гарантирует увеличения стойкости, так как рост градиента температур неблагоприятно скажется на термонапряженном состоянии.

Следовательно, для массивных поддонов и тонких водоохлаждаемых втулок и оправок перспективны наплавочные материалы различных классов. При наплавке втулок и оправок медными сплавами следует ожидать увеличения не только стойкости кристаллизаторов, но и производительности литья, а при наплавке поддонов возможно лишь увеличение стойкости, поэтому дальнейшая работа была сконцентрирована на наплавке втулок и оправок.

От сталей медные сплавы отличаются коэффициентами линейного расширения и модулями упругости. Выражения, описывающие в этом случае скачок температурных напряжений на зоне сплавления, получены нами из условий непрерывности и равновесия элементарного объема, расположенного по обе стороны от зоны сплавления, и имеют вид:

$$\Delta\sigma_{xx} = \frac{E_1 - E_2}{1-\mu^2}(\varepsilon_{xx} + \mu\varepsilon_{yy}) - \frac{1}{1-\mu}(\alpha_1 E_1 - \alpha_2 E_2)\Delta T; \quad (2.)$$

$$\Delta\sigma_{yy} = \frac{E_1 - E_2}{1-\mu^2}(\varepsilon_{yy} + \mu\varepsilon_{xx}) - \frac{1}{1-\mu}(\alpha_1 E_1 - \alpha_2 E_2)\Delta T; \quad (3.)$$

$$\Delta\sigma_{xy} = \frac{E_1 - E_2}{1+\mu}\varepsilon_{xy}, \quad (4.)$$

где E_1, E_2 - модули упругости основного и наплавленного металла; α_1, α_2 - коэффициенты линейного расширения; ΔT - величина изменения температуры. Первая буква в индексе деформаций и напряжений обозначает нормаль к поверхности, на которой они действуют, вторая - ось. Оси OX и OY прямоугольной системы

координат расположены на плоскости, касательной к поверхности сплавления, ось OZ - перпендикулярно к ней. Используя (2.-4.) как граничные условия на зоне сплавления, из известных формул для однослойного цилиндра получены формулы, описывающие термонапряженное состояние двухслойного цилиндра при радиальном градиенте температур, справедливые для средней части наплавленного участка втулок и оправок.

Помимо рабочих напряжений в наплавленных деталях существуют остаточные напряжения, зависящие от технологии наплавки. В данной работе за основу принят простой и надежный способ наплавки жидким присадочным металлом в контролируемой атмосфере, обеспечивающий минимальный переход железа в наплавленный металл, высокую производительность при наплавке больших толщин и не требующий специального оборудования. При охлаждении, начиная с момента, когда пределы текучести основного и наплавленного металла становятся отличными от нуля, в заготовке возникают напряжения. Градиент температур по толщине стенки при этом незначителен, и образующиеся остаточные напряжения постоянны по толщине, что подтверждается экспериментальными измерениями в наплавленных деталях.

Нагрев при эксплуатации вначале приведет к уменьшению напряжений, а затем, после перемены знака, - к возрастанию. Температура T^* перехода напряжений через ноль при равномерном нагреве принята в качестве базовой. Работа втулок и оправок рассматривалась как попеременное нагружение напряжениями от температурного поля $T_j(z) - T^*$ - это рабочие напряжения и от температурного поля $T_0 - T^*$ - это остаточные напряжения ($T_j(z)$, T_0 - распределение температуры в наплавленных деталях во время литья и пауз соответственно). Деталь будет работать в упругой области, если интенсивность рабочих напряжений в основном и наплавленном металле не превысит соответствующих пределов текучести. В этом случае охлаждение во время пауз будет приводить лишь к касанию, а не дальнейшему движению по поверхности пластичности, образовавшейся при наплавке.

Результаты расчетов говорят о том, что по степени влияния на напряженное состояние наиболее важны толщина наплавленного металла, его теплопроводность, коэффициент линейного расширения и в несколько меньшей мере модуль упругости; выбором толщины и свойств наплавленного слоя не удается обеспечить работу втулок и оправок целиком в упругой области и тем самым избежать термической усталости, но благодаря уменьшению таким путем напряжений

остаточными можно избежать пластической деформации зоны сплавления. Для этого необходимо наплавлять внутреннюю поверхность на глубину свыше 60% от толщины стенки, свойства наплавленного металла должны максимально приближаться к свойствам меди при возможно большем пределе текучести. Широкий диапазон толщин наплавленного металла позволяет изготовлять кристаллизаторы с требуемым теплообменом, что создает дополнительную возможность регулирования структуры отливаемых труб.

Исследование теплового и напряженного состояния наплавленных деталей позволило разработать их конструкцию, определить рабочую температуру, обосновать класс наплавочных материалов, выяснить влияние на термонапряженное состояние свойств наплавленного металла, показало необходимость изучения его термостойкости. Для выбора оптимального состава наплавленного металла дополнительно необходимо знать уровень его механических свойств и износостойкость в рабочем диапазоне температур, строение и свойства зоны сплавления. Эти требования были взяты за основу при разработке комплекса методик экспериментального исследования.

Наплавка образцов для исследований производилась жидким присадочным металлом в контролируемой атмосфере. Сплавы для наплавки получали путем электрошлакового переплава комбинированного электрода, состоящего из прутков меди и медной трубки с порошкообразными легирующими веществами. О прочности и, предварительно, о износостойкости наплавленного металла при повышенных температурах судили по твердости, которая измерялась на модернизированном приборе ТК-2. Для обработки результатов измерения твердости была разработана специальная программа для "Минск-32". Износостойкость наплавленного металла определялась по потере веса образцов при сухом трении скольжения о чугунное контртело. О свойствах зоны сплавления судили по прочности на срез и фрактографии изломов. Изучение структуры было направлено преимущественно на выявление прослоек в зоне сплавления, так как литературные данные и сравнительные испытания образцов, проведенные нами, свидетельствуют о том, что термостойкость наплавленных деталей с выраженными прослойками резко снижается.

Термостойкость наплавленного металла определялась по методике Коффина, размеры образца были выбраны на основании расчета времени его нагрева при приемлемых значениях величины нагревающего тока, а также исходя из условия обеспечения одноосного напряженного состояния рабочей части образца. Определение термо-

стойкости зоны сплавления сталь – медный сплав проводилось на специальной установке, обеспечивающей нагрев образцов электрическим током и охлаждение потоком воздуха.

Полученные в экспериментах данные подвергались статистической обработке, заключавшейся в анализе и выбраковке резко отклоняющихся значений, определении средних значений, точности эксперимента, в случае необходимости – подборе по методу наименьших квадратов аппроксимирующих зависимостей. Все эксперименты проводились по рандомизированным планам.

Предварительный выбор перспективных для наплавки медных сплавов проводился на основании определенных теоретическим анализом требований к свойствам наплавочных материалов и их сопоставления со свойствами конкретных материалов. При этом учитывалось выявленное в результате теоретических исследований требование к соотношению теплопроводности и уровня механических свойств: материалы с пониженной теплопроводностью в процессе работы разогреваются до более высоких температур и должны иметь повышенный уровень механических свойств, а материалы с высокой теплопроводностью могут иметь умеренные прочностные свойства.

Всего для наплавки и последующего исследования было отобрано 15 составов медных сплавов. Условно они были разбиты на 3 группы: первая группа – бронзы с высокой степенью легирования – Бр. АЖН 10-4-4, Бр. КН 0,5-2, Бр. КМц 3-1, медно-никелевый сплав куниаль Б(МНА 6-1,5), сплав "Инкомент-800"; вторая группа – бронзы, легированные одним элементом – Бр. Мц 5, Бр. Мц 1,2, Бр. Кд 1, и медь; в третью группу входили бронзы Бр. Х 0,7, Бр. Цр 0,4, Бр. Б 2, Бр. НХТ 0,7-0,2-0,1, Бр. НЦр 0,5-0,06, сплав МХЦВ.

Металлографическое исследование зоны сплавления позволило выявить наличие прослоек интерметаллидного характера у наплавок первой и третьей группы, причем у бронз Бр. АЖН 10-4-4, Бр. Б 2, Бр. КН 0,5-2 и сплава "Инкомент-800" в зоне сплавления обнаружены несплошности типа трещин. Результаты испытаний на срез показали их весьма низкую прочность, у остальных наплавок прочность удовлетворительная. При изучении изломов обнаружено, что у наплавок первой группы разрушение по зоне сплавления носит хрупкий характер, лишь сплав куниаль Б дает крупнозернистый излом со следами пластической деформации. У наплавок второй группы разрушение происходит по медному слою с заметными следами пластической деформации и вязким характером излома. Материалы третьей группы, несмотря на имеющиеся в зоне сплавления прослойки, дают

мелкозернистый излом со следами пластической деформации, исключение составляет наплавка Бр. Б 2, полностью отслаивавшаяся от основного металла еще в процессе вырезки образцов.

Дисперсионно твердеющие бронзы после наплавки наряду с образованием прослоек теряют способность упрочняться под действием термообработки, что вызвано переходом в наплавленный металл железа и образованием с элементами упрочняющей фазы соединений с независящей от температуры растворимостью. По полученным зависимостям твердости от температуры определялась твердость исследуемых наплавок при рабочих температурах. Эти сведения, а также результаты изучения строения и свойств зоны сплавления позволили ограничить число исследуемых в дальнейшем сплавов до трех: куниали Б, Бр. Кд 1, Бр. НЦр 0,5-0,06. При температурах эксплуатации их твердость превосходит твердость наплавленной меди в 1,5-2 раза, прочность на срез зоны сплавления у них выше на 30-40%, характер излома вязкий или со следами пластической деформации, при наплавке они не требуют специальных мер для предотвращения образования непластичных структурных составляющих.

Исследование износостойкости отобранных материалов при высоких температурах показало, что более твердые наплавки более износостойки, но эта зависимость нелинейна и носит характер лишь общей тенденции. При рабочих температурах износостойкость исследуемых материалов в 2-3 раза выше износостойкости меди. Результаты исследования термостойкости наплавленного металла показывают, что при максимальных температурах цикла свыше 628К наплавки сплавов более прочных, чем медь, более термостойки за счет меньшей величины, возникающей в них накопленной за цикл пластической деформации. При температурах ниже 600К наплавленная медь не уступает этим материалам в термостойкости благодаря большему запасу пластичности. При прогнозировании термостойкости деталей, наплавленных различными материалами, учитывалась возможность термической усталости не только наплавленного металла, но и зоны сплавления, установленная при термоциклировании наплавленных образцов.

Сравнение рассматриваемых материалов по результатам всего комплекса теоретических и экспериментальных исследований показало, что ни один из сплавов не имеет преимуществ перед другими по всем показателям. Для окончательного выбора состава наплавленного металла была использована обобщенная функция желательности. По результатам расчетов выбраны никельциркониевая и как ее заменитель кадмиевая бронза.

Производственные испытания наплавленных втулок и оправок показали их высокую эффективность. Стойкость кристаллизаторов возросла более чем в 3 раза, снижение термического сопротивления наплавленных участков интенсифицировало теплообмен в кристаллизаторе, за счет этого производительность литья возросла на 10%. Снижение в результате наплавки температуры поверхностей, контактирующих с расплавленным чугуном, уменьшило опасность его местных схватываний со стенками кристаллизатора, что привело к снижению толщины труб и потерь от брака. Годовой экономический эффект внедрения наплавленных втулок и оправок кристаллизаторов полунепрерывного литья чугунных труб диаметром 200 мм на Могилевском металлургическом заводе составил свыше 90 тыс. руб.

Выводы

1. Наплавка на деталь слоя металла, отличающегося по теплофизическим свойствам от основного металла, изменяет тепловые условия эксплуатации детали в контакте с теплоносителем. Выбором толщины и свойств наплавленного металла можно регулировать тепловое состояние наплавленного слоя и детали в целом.

2. При контакте с теплоносителем слоя, наплавленного на полубесконечное тело, свойства основного металла заметно сказываются на температуре поверхности наплавки с запаздыванием, пропорциональным отношению квадрата толщины наплавленного слоя к его теплопроводности. При значениях критерия Фурье для наплавленного металла менее 0,4 влиянием свойств основного металла можно пренебречь, возникающая при этом погрешность не будет превышать 5% от теплового напора.

3. У массивных стальных форм, наплавленных медными сплавами, температура поверхности в начале контакта с отливкой ниже, чем у неналлавленных, но из-за высокой температуропроводности наплавленного металла она быстро растет и превышает температуру разупрочнения, поэтому массивные формы необходимо наплавлять теплостойкими инструментальными и аустенитными жаропрочными сталями, для которых рабочие температуры оказываются ниже температур разупрочнения.

4. Детали кристаллизаторов, работающие в стационарном тепловом состоянии, необходимо наплавлять материалами более теплопроводными, чем основной металл, это позволяет за счет уменьшения термического сопротивления снизить рабочую температуру и интен-

сифицировать теплообмен; для втулок и оправок перспективна наплавка медными сплавами.

5. В зоне сплавления медных сплавов со сталью вследствие больших различий модулей упругости величина скачка температурных напряжений зависит не только от разности коэффициентов линейного расширения, но и от деформации зоны сплавления.

6. Выбором толщины и свойств наплавленного металла не удается обеспечить работу втулок и оправок в упругой области, но за счет уменьшения рабочих напряжений остаточными можно избежать термической усталости зоны сплавления. Для этого необходимо наплавлять их внутреннюю поверхность на глубину более 60% от толщины стенки, наплавленный металл должен максимально приближаться к свойствам меди и иметь возможно больший предел текучести.

7. Широкий диапазон возможных толщин наплавки позволяет изготавливать кристаллизаторы с требуемым законом изменения теплообмена по высоте, тем самым создается возможность регулирования структуры отливаемых труб.

8. После наплавки дисперсионно твердеющие бронзы теряют способность упрочняться под действием термообработки вследствие образования элементами упрочняющей фазы и перешедших в наплавленный металл железом соединений с не зависящей от температуры растворимостью.

9. При термоциклировании выше 623К у более прочных, чем медь, наплавок куниали, никельциркониевой и кадмиевой бронз за цикл накапливается меньшая пластическая деформация и их термостойкость выше термостойкости меди, ниже 600К медные наплавки не уступают им в термостойкости за счет большего запаса пластичности. При наличии в зоне сплавления малопластичных прослоек ее термостойкость резко падает.

10. По сочетанию теплопроводности, твердости, износо- и термостойкости, прочности зоны сплавления, модуля упругости и коэффициента линейного расширения наиболее перспективными материалами являются никельциркониевая и кадмиевая бронзы. Наплавка ими втулок и оправок в 3 раза увеличивает срок службы кристаллизаторов, за счет увеличения его теплообмена повышает производительность и облегчает процесс литья, в свою очередь это позволяет снизить потери от брака и толщину отливаемых труб.

Основное содержание диссертации отражено в следующих опубликованных работах:

I. Свойства соединений медь-сталь, полученных наплавкой кад-

ким присадочным металлом /С.К. Павлюк, А.Ф. Кислов, С.В. Галагаев, А.В. Вечер. - Механизация и автоматизация сварочного производства: Тез. докл. респ. н-т. конф. по сварке. Могилев, 1975, с.59-61.

2. Наплавленные втулки кристаллизаторов установок для полунепрерывной отливки чугунных труб /С.К. Павлюк, А.Ф. Кислов, И.М. Кузменко, А.В. Вечер. - Литейное производство, 1975, № 9, с.33.

3. Павлюк С.К., Кислов А.Ф., Вечер А.В. Наплавка деталей кристаллизаторов установки для отливки чугунных труб. - Автоматическая сварка, 1977, № 1, с.50-52.

4. Вечер А.В., Павлюк С.К., Ротач А.П. Температурное состояние массивных наплавленных деталей, работающих в периодическом контакте с расплавленным металлом. - Прогрессивные методы сварки в тяжелом машиностроении и наплавки в черной металлургии: Тез. докл. II Всесоюз. н-т. конф. Жданов, 1977, с.138-140.

5. Павлюк С.К., Вечер А.В. Тепловое состояние слоя, наплавленного на массивную деталь и контактирующего с теплоносителем.- Автоматическая сварка, 1978, № 12, с.27-30.

6. Павлюк С.К., Вечер А.В. Температурные напряжения у зоны сплавления соединения материалов с различными модулями упругости и коэффициентами линейного расширения. - Пути повышения эффективности сварочного производства и улучшения качества сварных конструкций: Тез. докл. респ. н-т. конф. Минск, 1978, с.57.

7. Вечер А.В. Исследование структуры и свойств зоны сплавления соединений медный сплав - малоуглеродистая сталь. - Пути повышения эффективности сварочного производства и улучшения качества сварных конструкций: Тез. докл. респ. н-т. конф. Минск, 1978, с.61-62.

Соискатель А.В. ВЕЧЕР.