

М 85812

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени государственный
технический университет имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ОВЕШНИКОВ Александр Васильевич

УДК 621.791.011

РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ
ОЦЕНКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛА
ШВА В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ

05.03.06 – Технология и машины сварочного
производства

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Веш

Москва - 1992

МТТУ

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана

Научный руководитель - д.т.н., профессор **ВИНОКУРОВ В.А.**

- к.т.н., с.н.с. **КУРКИН А.С.**

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор **РЫМКЕВИЧ А.И.**

к.т.н., с.н.с. **ПРОХОРЕНКО В.Д.**

Ведущее предприятие - **ВНИИМонтажспецстрой**

Защита состоится "14" мая 1992г. на заседании специализированного Совета К 053.15.03 в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете им.Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат в I экз., заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ

им. Н.Э.Баумана

1992г.


В.И.ГИРШ

M85812

л. Тираж 100 экз.
МГТУ им. Н.Э.Баумана

Актуальность проблемы. Повышение, в экономически оправданных пределах, единичных мощностей машин и оборудования связано с необходимостью увеличения абсолютных размеров сечений и длины многих тяжело нагруженных деталей и элементов конструкций. Массивные заготовки для таких деталей, как правило, получают с использованием электрошлаковой сварки (ЭШС). В настоящее время для обеспечения необходимых характеристик выпускаемого оборудования и уменьшения его металлоемкости требуется сваривать электрошлаковым способом легированные стали повышенной прочности с пределом текучести

$\sigma_T = 500 \dots 600$ МПа. Сварка таких сталей по технологиям, отработанным на низкоуглеродистых низколегированных сталях, нередко сопровождается образованием в металле шва либо околошовной зоны (ОШЗ) недопустимых дефектов типа горячих трещин. Аналогичные проблемы возникают и при выполнении электрошлаковым способом швов со сложным контуром поверхности сварочной ванны: 0-образных (сварка вложенных одна в другую осесимметричных деталей) и П-образных (сварка пазов при ремонте массивных отливок и поковок), на сталях, технология сварки которых считается освоенной. Чтобы избежать значительных материальных потерь от брака, в указанных случаях целесообразно перед сваркой изделия оценить возможность получения сварного соединения без горячих трещин в условиях использования штатной заводской технологии. Для проведения такой оценки необходима отвечающая современным требованиям методика.

Цель работы заключалась в создании расчетно-экспериментальной методики для оперативной оценки возможности выполнения электрошлаковых швов сложной конфигурации без образования горячих трещин.

Методы исследования. Определение температурных полей, деформаций и напряжений в процессе ЭШС проводилось с использованием теории нелинейной термоупруго-пластичности и численного метода конечных элементов. Расчеты производились на персональной ЭВМ типа IBM PC AT (333/387) с использованием программного обеспечения, написанного на языке Си. Механические свойства стали 25Л были определены при испытаниях трубчатых образцов на кручение в термомеханических условиях ЭШС на установке РП-3. Сопротивляемость металла образованию горячих трещин оценивалась при испытаниях на изгиб образцов, свариваемых электрошлаковым способом, на специаль-



но созданной установке при программированном нагружении.

Научная новизна работы связана с раскрытием закономерностей деформирования металла шва сложного контура в температурном интервале хрупкости (ТИХ) при электрошлаковой сварке сталей типа 25Л. Установлено, что:

особенностью круговых швов, соединяющих осесимметричные детали, по сравнению с аналогичными прямыми швами, являются существенно большие собственные поперечные деформации удлинения в ТИХ, повышающие опасность образования горячих трещин; снижение темпа деформаций металла шва в ТИХ в 1,5...4,5 раза и повышение стойкости против образования горячих трещин может быть достигнуто за счет смещения во времени интенсивных деформаций удлинения по отношению к прохождению ТИХ путем конструктивно-технологических воздействий.

характер распределения поперечных деформаций металла в процессе ЭШС П-образных ремонтных швов зависит от соотношения размеров завариваемого паза; деформации удлинения в ТИХ, опасные в отношении образования горячих трещин, возникают при глубине завариваемого паза, составляющей более 0,7 от ширины.

Практическая ценность работы

1. Создана установка для программированных испытаний металла сварного соединения на стойкость против образования горячих трещин в процессе ЭШС. Установка эксплуатируется в МТУ им. Н.Э.Баумана. Техническая документация на ее изготовление передана в ПО НКМЗ (г.Краматорск).

2. На основании разработанной методики проведен анализ возможности использования электрошлакового процесса, соответствующего нормативной документации ПО НКМЗ, для заварки пазов шириной 600...1200 мм и глубиной 300...500 мм в шаботах из стали 25Л. Практические рекомендации переданы в ПО НКМЗ.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на Всесоюзной конференции "Прочность и диагностика сварных конструкций" в г.Твери и на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МТУ им. Н.Э.Баумана.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и результатов, приложения. Выполнена на 103 машинописных листах, содержит 63 рисунка, 7 таблиц и 92 наименования литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, содержатся краткие сведения о характерных случаях, требующих оценки высокотемпературной прочности в процессе ЭШС.

Первая глава посвящена анализу состояния вопроса. Образование горячих трещин в процессе ЭШС определяется двумя факторами:

свойствами металла сварного соединения и напряженно-деформированным состоянием (НДС) конструкции. При охлаждении металла от температур, близких к температуре равновесного солидуса, его прочность и пластичность остаются на весьма низком уровне в некотором интервале температур, получившем в литературе название температурного интервала хрупкости (ТИХ). На фоне низких механических свойств материала при высоких температурах происходит развитие собственных сварочных деформаций и напряжений, вызванное неравномерным нагревом металла и связанными с ним температурными и пластическими деформациями. Эти физические явления неизбежно сопровождают процесс сварки плавлением. Однако их совокупное негативное влияние может и не приводить к возникновению разрушений. Изучением способности сварных соединений выдерживать без разрушения различного рода воздействия, которые могут возникнуть в процессе сварки под влиянием сварочных деформаций и напряжений занимается один из разделов науки о сварке - технологическая прочность сварных соединений.

В соответствии с теорией технологической прочности, разработанной в МГТУ им. Н.Э.Баумана Н.Н.Прохоровым, сопротивляемость сварного соединения образованию горячих трещин определяется тремя основными факторами: пластичностью металла в ТИХ, величиной ТИХ и характером нарастания деформаций при охлаждении (темпом деформации сварного соединения). При этом значение каждого фактора и характер его изменения зависят от многих параметров:

пластичность и характер ее изменения в ТИХ определяются химическим составом сплава, схемой кристаллизации сварного шва, развитием химической и физической неоднородности и другими факторами, значение и степень влияния которых существенно зависят от методов, приемов сварки, применяемых режимов и т.д.

ширина ТИХ зависит от химического состава свариваемых материалов и применяемых присадочных проволок, флюсов, режима сварки, определяющего форму шва, схему кристаллизации и процессы структурообразования в шве и ОШЗ, размер зерна, характер и интенсивность

протекания ликвационных и сегрегационных процессов и т.д.

температура деформации зависит от скорости охлаждения, коэффициента линейного расширения сплава и свойств металла ОШЗ.

Такое количество факторов, влияющих на процесс трещинообразования, и сложность их всестороннего учета привели к разработке множества экспериментальных методов оценки сопротивляемости материалов образованию горячих трещин, основными из которых являются технологические пробы различной жесткости (технологические методы) и методы, основанные на принудительном деформировании металла при помощи специального оборудования (машинные методы).

Разработке технологических методов оценки высокотемпературной прочности при ЭШС посвящены работы А.М.Макара, Ю.Н.Готальского, И.В.Новикова, С.А.Островской. Эти методы не получили широкого распространения из-за высокой трудоемкости и невозможности оценить фактическую сопротивляемость металла образованию горячих трещин в случае, когда разрушения образцов проб не происходит. Машинные методы испытаний металла на стойкость против образования горячих трещин в условиях ЭШС разрабатывались Б.Ф.Якушиным, Л.Ф.Башевым, Г.З.Волошкевичем, И.И.Сушук-Слюсаренко, Д.А.Дудко, Л.П.Ерегиним, В.М.Семеновым, В.П.Гулида, А.И.Рымкевичем, А.С.Гельманом и другими. Принципиальная сущность этих методов заключается в деформировании испытуемого шва, находящегося в ТИХ, с заданным темпом деформации вплоть до разрушения. Все исследователи отмечают невозможность проведения испытаний на стойкость против образования горячих трещин в процессе ЭШС на натурных образцах и предлагают испытывать образцы уменьшенных размеров на изгиб или на растяжение. Анализ различных методов испытаний и экспериментального оборудования, эксплуатируемого в ИЭС им. Е.О.Патона, НИИПТИМаше (г.Краматорск), на заводе "Волгоцеммаш" (г.Тольятти) и др., показал, что методическая проработка вопросов, связанных с обеспечением соответствия между технологической прочностью лабораторного образца и стойкостью сварного соединения реальной детали против образования горячих трещин в процессе ЭШС, явно недостаточна. Указанное обстоятельство затрудняет использование известных способов испытаний для оценки фактической высокотемпературной прочности реальных сварных соединений массивных деталей.

В последние годы, благодаря комплексу работ, проведенных под руководством В.А.Винокурова В.Л.Шельниковым, А.А.Павловичем, В.В.Аладинским, А.С.Куркиным, А.С.Киселевым был разработан метод

определения напряженно-деформированного состояния при электрошлаковой сварке массивных деталей различной конфигурации, основанный на численном решении задач теплопроводности и неизо-термических упруго-пластических задач. А.А.Павлович показал возможность использования разработанного метода для определения темпа деформации металла шва в ТИХ. Появилась возможность судить об опасности образования горячих трещин, сопоставляя расчетные значения темпа деформации металла в ТИХ с критическими значениями, но реализация такой возможности требует создания методики, позволяющей путем сочетания расчетов термдеформационных процессов при ЭШС и испытаний экспериментальных образцов оценить возможность обеспечения высокотемпературной прочности в процессе сварки при конкретном сочетании конструктивно-технологических параметров. На основании вышеизложенного были сформулированы цель и следующие задачи исследования:

1. Создание экспериментальной установки для исследования процесса высокотемпературного разрушения.
2. Расчетное определение температурных полей и напряженно-деформированного состояния соединений ЭШС с целью сопоставления различных вариантов конструктивно-технологических решений и подготовки программ испытаний образцов.
3. Разработка методики проведения испытаний на высокотемпературную прочность.
4. Проведение испытаний в условиях программированного нагружения и оценка высокотемпературной прочности при сварке крупногабаритных деталей.

Во второй главе разрабатывается методика оценки возможности обеспечения высокотемпературной прочности в процессе ЭШС и конструкция испытательной установки. Основные положения расчетно-экспериментальной методики оценки стойкости сварного соединения против образования горячих трещин можно рассматривать как частный случай более общих положений расчетно-экспериментального метода оценки конструктивно-технологической трещиностойкости элементов сварных конструкций, основные идеи которого принадлежат В.А.Винокурову. Методика реализуется в следующей последовательности:

1. Производится расчет температурных полей и соответствующих им НДС в рассматриваемой детали при ЭШС.
2. На основании анализа НДС определяются зоны, наиболее опасные в отношении возникновения горячих трещин.

3. Расчетным или экспериментальным путем исследуются температурные поля и соответствующие им НДС при ЭШС образца из материала детали, испытываемого на специальной установке.

4. По результатам анализа температурных полей и НДС в реальной детали и в образце строится такая программа испытания образца, которая за счет регулирования параметров режима сварки, условий охлаждения и дополнительного деформирования образца обеспечивает максимальное соответствие между образцом и деталью по условиям возникновения горячих трещин.

5. Проводятся испытания образца на трещиностойкость в условиях программированного нагружения. Отсутствие высокотемпературных разрушений в образце должно послужить гарантией их отсутствия в реальной свариваемой электрошлаковым способом детали.

В данной методике важную роль играет процедура перехода от оценки стойкости против образования горячих трещин на лабораторных образцах к оценке этих же параметров в реальных деталях в условиях ЭШС. Сложность этой процедуры обусловлена следующими обстоятельствами:

1. Наличием сложного трехмерного НДС в зоне образования горячей трещины.

2. Одновременным протеканием термдеформационных и физико-химических процессов, оказывающих влияние на прочность и пластичность в высокотемпературной области.

3. Отсутствием данных об изменении механических свойств многих конструкционных материалов в диапазоне температур сварочного цикла, близких к ТИХ.

В этих обстоятельствах единственным надежным средством моделирования условий прохождения ТИХ является максимально близкое воспроизведение в образце всех параметров температурного состояния и НДС, возникающих при ЭШС реальной детали. В соответствии с теорией технологической прочности, равная опасность образования горячих трещин в образце и в реальной детали обеспечивается, если одинаковы соответствующие: пластичность металла в ТИХ, границы ТИХ и темп деформации сварного соединения при охлаждении. Этого можно добиться за счет изготовления образцов из материала изделия, применения аналогичных сварочных материалов, штатной заводской технологии ЭШС и программированного нагружения образца в специальной установке. Поскольку обеспечить программированное изменение всех компонент деформированного состояния в образце практически невоз-

можно, в основу методики заложено общепризнанное допущение об образовании высокотемпературного разрушения по схеме нормального отрыва и о возможности использования компоненты деформации, нормальной к плоскости образования горячей трещины, в качестве параметра, полностью определяющего этот процесс. Второе допущение разработанной методики заключается в предположении, что схема деформированного состояния металла шва сварного соединения в ТИХ изменяется незначительно при уменьшении толщины свариваемого ЭНС металла. В основе данного допущения лежат следующие соображения. Область шва, находящаяся в ТИХ при сварке металла небольшой толщины, окружена слоями более холодного и прочного материала со стороны свариваемых деталей и со стороны формирующих устройств, поэтому по мере усадки "подтягивание" металла возможно только сверху со стороны сварочной ванны. Это справедливо и для больших толщин, так как одинаковые условия в соседних сечениях исключают перемещение металла в направлении толщины.

Далее в работе приводится краткая характеристика математических моделей, лежащих в основе разработанного в МТУ им. Н.Э.Баумана программного комплекса "Сварка" для расчета температурных полей и НДС при ЭНС. Задача определения температурных полей решается с использованием метода элементарных балансов и явной схемы интегрирования уравнения теплопроводности по времени. Неизотермическая упруго-пластическая задача определения НДС в процессе ЭНС решается по теории течения с применением метода конечных элементов. В настоящее время программный комплекс "Сварка" включает все компоненты, необходимые для численного моделирования термомеханических процессов при ЭНС. В соответствии с разработанной методикой, судить о фактической сопротивляемости металла шва образованию горячих трещин в процессе ЭНС можно лишь на основании сочетания расчетов деформационных процессов и испытаний экспериментальных образцов в условиях программированного нагружения. Готовой установки для проведения таких испытаний не существовало, и она была создана.

При создании экспериментальной установки были поставлены следующие основные требования:

1. Обеспечение совмещения сварочных процессов и процессов принудительной деформации исследуемой зоны образца.
2. Обеспечение возможности регистрации деформаций и термического цикла сварки при испытаниях.

3. Возможность изменения скорости принудительной деформации по заданной программе.

4. Компактность, простота и удобство обслуживания.

Конструкцию разработанной установки поясняет рис. 1. Образец 3 нагружается при помощи специальных рычагов 6, нижняя часть которых шарнирно соединена с ходовыми гайками механизма нагружения 4. Каждый рычаг имеет в верхней части захват и упор, причем положение упора может регулироваться. В зависимости от этого положения в образце можно имитировать условия как образования поперечных горячих трещин в ОШЗ, так и условия образования продольных трещин в шве. Технические данные разработанной установки приведены в таблице 1.

Таблица 1

Технические данные установки для испытаний на
сопротивляемость образованию горячих трещин в процессе ЭШС

Диапазон регулирования скоростей	0,001...0,417 мм/с
Регулирование скорости перемещения	плавное
Максимальная величина испытываемого сечения образца	16 000 мм ²
Габаритные размеры установки:	
длина	1250 мм
ширина	800 мм
высота	2400 мм

Аппаратура для программирования и регистрации деформационного цикла в процессе испытаний состоит из программирующего прибора РУ5-ОИМ, регистрирующего прибора КСП-4, измерительной электронной системы модели 2И7. Закон изменения относительных перемещений концов фиксированной базы измерения, охватывающей сварной шов, задается в определенном масштабе на бумажной диаграммной ленте прибора РУ5-ОИМ в виде кривой.

Установка работает по следующему принципу: программирующее устройство выдает сигнал о требуемом в данный момент времени относительном перемещении базовых точек, который сравнивается с сигналом, поступающим через измерительную систему модели 2И7 от специально разработанного датчика перемещений, характеризующим дей-

ствительное значение программируемого параметра. В случае несовпадения этих сигналов включается привод механизма нагружения образца, устраняющий имеющееся рассогласование. Измерение температуры в шве осуществляется при помощи стандартной вольфрам-рениевой термопары, защищенной кварцевым наконечником, с записью термического цикла на диаграммную ленту прибора КСП-4. Запуск программы принудительного деформирования осуществляется в тот момент, когда температура шва на стадии охлаждения достигнет верхней границы ТИХ.

Новизна методических разработок и технических решений, описанных во второй главе, подтверждена двумя положительными решениями по заявкам на выдачу авторских свидетельств: № 4796817/27 (025333) от 01.03.90 и № 4805698/27 (032783) от 22.03.90г.

В третьей главе исследуются высокотемпературные деформации металла шва соединений ЭШС для оценки его стойкости против образования горячих трещин. Рассмотрен ряд случаев использования ЭШС для выполнения круговых и П-образных швов, в практике выполнения которых отмечено появление продольных горячих трещин. Исследование проводилось с использованием программного комплекса "Сварка", разработанного в МГТУ им.Н.Э.Баумана. Теплофизические свойства стали 25Л были взяты из литературных данных. В качестве источника сварочного нагрева использовалась модель П-образного источника, состоящая из одного "металлического" и двух "шлаковых". Механические свойства стали 25Л определяли путем испытания трубчатых образцов на кручение в термомеханических условиях ЭШС по методике, разработанной А.А.Павловичем под руководством В.А.Винокурова.

Случай сварки круговых швов обладает важной особенностью, связанной с наличием осевой симметрии, что позволяет использовать для расчета деформационных процессов двумерные конечные элементы. Было рассмотрено четыре варианта сварки осесимметричных деталей из стали 25Л, отличающихся различным сочетанием конструктивно-технологических параметров. Расчет деформационных процессов в круговом шве при ЭШС оси диаметром 780 мм с обечайкой толщиной 210 мм по первому варианту, соответствующему базовой технологии ПО НКМЗ, показал, что собственные поперечные деформации удлинения металла шва на стадии охлаждения в ТИХ достигают 0,45%. Величину ТИХ в условиях ЭШС (1450°C - 1250°C) принимали в соответствии с литературными данными. Экспериментальная сварка натурного образца по этой технологии в ПО НКМЗ сопровождалась образованием горячей трещины. Разрушение располагалось по оси сварного шва и охватывало около половины длины его окружности.

Второй вариант расчета деформационных процессов в осесимметричных деталях отличался от первого наличием технологического подогрева наружной обечайки до 200°C . Это привело к снижению уровня собственных поперечных деформаций металла сварного шва в ТИХ до 0,3%. В расчете по третьему варианту толщина нагретой до 200°C обечайки была уменьшена вдвое и равнялась 105 мм. Это обеспечило дальнейшее снижение уровня собственных поперечных деформаций металла сварного шва в ТИХ до 0,1%. Четвертый вариант расчета термомеханических процессов в осесимметричных деталях отличался от третьего тем, что в качестве механических свойств материала свариваемых заготовок были использованы свойства более прочной стали 55Х2МФЕ. Для четвертого варианта исходных данных был получен самый низкий уровень собственных поперечных деформаций удлинения металла шва в ТИХ, а, следовательно, и минимальная опасность образования горячих трещин. В целом, расчеты показали возможность осуществления ЭНС круговых швов без образования горячих трещин.

Далее в работе проанализированы термомеханические процессы, протекающие при ремонте типовых шаботов из стали 25Л. Ремонт таких шаботов заключается в заварке электродуговой способом пазов шириной 600...1200 мм и глубиной 300...500 мм, образовавшихся в результате удаления дефектных участков металла (трещин, рыхлот, раковин и др.). В каждом конкретном случае ремонта параметры режима ЭНС и процессы, зависящие от этих параметров, определяются конкретными размерами подлежащего заварке паза. Анализировались три характерных случая: вварка широкой ремонтной вставки сечением 1200 мм x 300 мм, вварка вставки средних размеров (900 мм x 400 мм) и вварка узкой вставки (600 мм x 500 мм). При этом параметры режима ЭНС принимались в соответствии с нормативной документацией, действующей на ПО НКМЗ. В результате конечноэлементного анализа термомеханических процессов в области высоких температур по указанным вариантам было установлено:

- 1) опасной зоной, в которой возможно образование горячих трещин, является середина бокового участка П-образного шва;
- 2) характер деформационных процессов в опасной зоне сварного соединения зависит от сочетания размеров завариваемого паза;
- 3) в случае вварки широкой или средней ремонтной вставки собственные поперечные деформации в ТИХ в опасной зоне сварного соединения являются отрицательными, то есть шов сокращается, и опасности образования горячих трещин нет;

4) в случае сварки узкой ремонтной вставки в середине бокового участка П-образного шва имеют место собственные поперечные деформации удлинения в ТИХ, достигающие 0,1%;

5) смена знака собственных поперечных деформаций металла шва в ТИХ в опасной зоне сварного соединения с "плюса" на "минус" происходит при увеличении коэффициента формы завариваемого паза, равного отношению ширины паза к его глубине, до 1,5. Случаи сварки узких ремонтных вставок, с коэффициентом формы паза меньшим 1,5, сопровождаются накоплением в шве поперечных деформаций удлинения в ТИХ и требуют экспериментальной проверки возможности обеспечения высокотемпературной прочности в процессе ЭШС.

Помимо перечисленных вариантов, был рассчитан еще один случай ЭШС, при котором моделировались условия сварки узкой ремонтной вставки в деталь меньших, чем типовой шабот, размеров. Было установлено, что при уменьшении размеров ремонтируемой детали проявляется тенденция к увеличению опасности образования горячих трещин.

В четвертой главе описываются испытания металла шва на стойкость против образования горячих трещин в условиях моделирования различных вариантов ремонтных соединений. Всего на экспериментальной установке (рис. 1) было сварено четыре образца из стали 25Л размером 300 мм x 300 мм x 100 мм. Все образцы были изготовлены из одной отливки массой 60 тонн. Сварочные материалы и параметры режима ЭШС назначали на основании технологических данных реального процесса, представленных ПО НКМЗ, таким образом, чтобы обеспечить в образце механические свойства наплавленного металла и скорости охлаждения в области высоких температур близкие к реальным. Использовали электрошлаковую сварку плавящимся мундштуком из стали 10ХСНД с подачей двух электродных проволок Св.10Г2 диаметром 3 мм. Применяли сварочный флюс марки АН-343А. Возможность обеспечения требуемой глубины проплавления (10...20 мм) при принятых параметрах режима ЭШС предварительно оценивали по результатам численных экспериментов с использованием программного комплекса "Сварка". Параметры режима ЭШС экспериментальных образцов были приняты следующими: суммарный сварочный ток $I_{св} = 630$ А; напряжение сварки $U_{св} = 40$ В; скорость сварки $v_{св} = 0,014$ см/с; высота шлаковой ванны $h_{шв} = 60$ мм.

Эти параметры были одинаковыми для всех испытанных образцов. Первый образец был сварен в экспериментальной установке при выключенном механизме нагружения. В процессе ЭШС в средней части образца № I регистрировали на одном уровне термический цикл шва и пере-

мещения свариваемых кромок на базе 100 мм. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показало, что на стадии охлаждения до температуры 900°C различие соответствующих значений температуры в реальной детали и в образце не превышает 5%. Такой уровень точности моделирования температуры был признан достаточным.

Несоответствие между наблюдаемыми перемещениями в процессах ЭИЭС образца и реального шабота в разработанной методике устраняется за счет программированного нагружения. Если база для измерения перемещений в образце и в детали одинакова, то, при условии равенства свободных температурных деформаций для моделирования деформационных процессов в образце необходимо воспроизвести такой же закон изменения наблюдаемых перемещений $\Delta(t)$, какой имеет место в детали. В данной работе размер базы для измерения перемещений равнялся 100 мм. Точки базы располагались по середине образца симметрично относительно продольной оси шва.

Программа нагружения образца № 2 строилась на основании результатов расчета перемещений на базе 100 мм в опасной зоне П-образного ремонтного шва, происходящих при сварке узкой вставки сечением 600 мм х 500 мм в типовой шабот. Как было установлено, этот случай является самым неблагоприятным. Программу изменения перемещений кромок образца на базе 100 мм наносили на диаграммную ленту программирующего прибора РУБ-ОИМ в виде кривой. Запуск программы нагружения на выполнение осуществляли в тот момент, когда показания прибора КСП-4, регистрирующего температуру в шве на одном уровне с осями для навески датчика перемещений, достигали верхней границы ТИХ. После испытания сварной шов подвергали ультразвуковому контролю и проводили исследование макрошлифа шва. Отсутствие разрушений в металле шва позволило сделать вывод о том, что высокотемпературная прочность в процессе ЭИЭС обеспечивается, и технология, используемая в ПО НКМЗ, может быть применена для заварки узких пазов.

Испытание образца № 2 не дало ответа на вопрос о фактическом запасе пластических свойств материала в условиях ЭИЭС. Программа нагружения образца № 3 была построена таким образом, чтобы увеличить величину собственной деформации металла шва в области ТИХ в 3 раза по сравнению с нагружением образца № 2. Результаты испытаний показали, что и в этом случае исчерпания пластических свойств металла не происходит, горячие трещины не образуются. Можно обоснованно утверждать, что применительно к ремонту типовых шаботов

штатная заводская технология ЭИЭС обеспечивает не менее чем трехкратный запас технологической прочности. Образец № 4 был испытан по программе, соответствующей случаю сварки узкой ремонтной вставки в деталь уменьшенных размеров. Данная программа обеспечила увеличение уровня поперечных деформаций металла на базе 100 мм в 5,5 раз по сравнению с программой нагружения образца № 2. Испытания показали, что в этом случае имеет место исчерпание пластических свойств металла, и происходит нарушение его сплошности. Технология ремонта, используемая на ПО НКМЗ, в данном случае не обеспечивает получения качественного сварного соединения без образования горячей трещины. Для обеспечения высокотемпературной прочности в процессе ЭИЭС необходимо использование дополнительных технологических мероприятий по борьбе с горячими трещинами.

Основные выводы и результаты

1. Анализ существующих методик испытаний на сопротивляемость металла образованию горячих трещин показал, что они не обеспечивают оценки опасности образования высокотемпературных разрушений при ЭИЭС деталей со сложной конфигурацией шва вследствие недостаточного учета влияния конструкционного фактора. Воздействие этого фактора на НДС может быть установлено путем численного моделирования термдеформационных процессов на ЭВМ и воспроизведено при постановке испытаний путем программированного нагружения образцов в процессе сварки.

2. Численное моделирование термдеформационных процессов, протекающих при ЭИЭС осесимметричных деталей, позволило установить закономерности изменения относительных перемещений свариваемых кромок в период пребывания металла шва в ТИХ и связь этих перемещений с возможностью образования горячих трещин в круговом шве.

Установлено, что:

основной причиной развития собственных поперечных деформаций удлинения металла шва является увеличение внутреннего радиуса охватываемой детали при ее нагреве сварочным источником теплоты;

высокотемпературные разрушения при ЭИЭС возникают при совпадении во времени значительных собственных поперечных деформаций удлинения с неблагоприятным температурно-структурным состоянием металла в процессе охлаждения, вызывающим снижение пластичности (ТИХ);

уменьшение опасности образования высокотемпературных разрушений возможно за счет регулирования уровня и кинетики собственных поперечных деформаций удлинения металла шва в ТИХ путем конструктивно-технологических воздействий (подогрев, изменение толщины охватывающей обечайки) с целью смещения во времени интенсивных деформаций удлинения по отношению к прохождению ТИХ.

3. Конечноеlementный анализ термдеформационных процессов позволяет производить сравнительную оценку вариантов конструкций деталей и технологии ЭИС по опасности высокотемпературных разрушений.

Применительно к случаю заварки прямоугольных пазов в массивных деталях (ремонт шаботов из стали 25Л) установлено, что:

характер распределения собственных поперечных деформаций металла П-образного шва в ТИХ зависит от соотношения размеров завариваемого паза;

деформации удлинения в ТИХ, опасные в отношении образования горячих трещин, возникают в середине бокового участка П-образного шва при глубине завариваемого паза, составляющей более 0,7 от ширины.

4. Разработана расчетно-экспериментальная методика оценки высокотемпературной прочности металла шва при ЭИС, базирующаяся на методе оценки конструктивно-технологической трещиностойкости при сварке В.А.Винокурова. Методика основана на сочетании расчета термдеформационных процессов в сварном соединении реальной детали и испытаний специальных образцов, программа нагружения которых строится по результатам проведенных расчетов. Критерием подобия деформационных процессов в детали и в образце является равенство перемещений берегов шва в ТИХ в процессе ЭИС.

5. Для проведения испытаний разработана и изготовлена установка, позволяющая воспроизводить тепловые и деформационные условия, возникающие в зоне кристаллизации при ЭИС, за счет осуществления электрошлаковой сварки образца и его нагружения изгибающим моментом. Новизна разработанной методики и конструкции испытательной установки подтверждены положительными решениями по заявкам на выдачу авторских свидетельств № 4805698/27 (032783) от 22.03.90г. и № 4796817/27 (025338) от 01.03.90г.

6. По результатам проведенных исследований разработаны практические рекомендации по возможности использования штатной заводской технологии ЭИС ПО НКМЗ для ремонта шаботов из стали 25Л. Эти рекомендации и рабочая документация на изготовление испытательной установки переданы для использования в ПО НКМЗ.

Основные положения работы изложены в следующих печатных трудах:

1. Овешников А.В. Расчетно экспериментальная методика оценки высокотемпературной прочности металла шва в процессе электрошлаковой сварки //Прочность и диагностики сварных конструкций. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. - М., 1991. - С.28.

2. Куркин А.С., Крутов В.А., Овешников А.В. Испытания металла на конструкционно-технологическую трещиностойкость (КТТ) при электрошлаковой сварке //Деп.рук. ВИНТИ. - 1991. - № 4. - С.74-75.

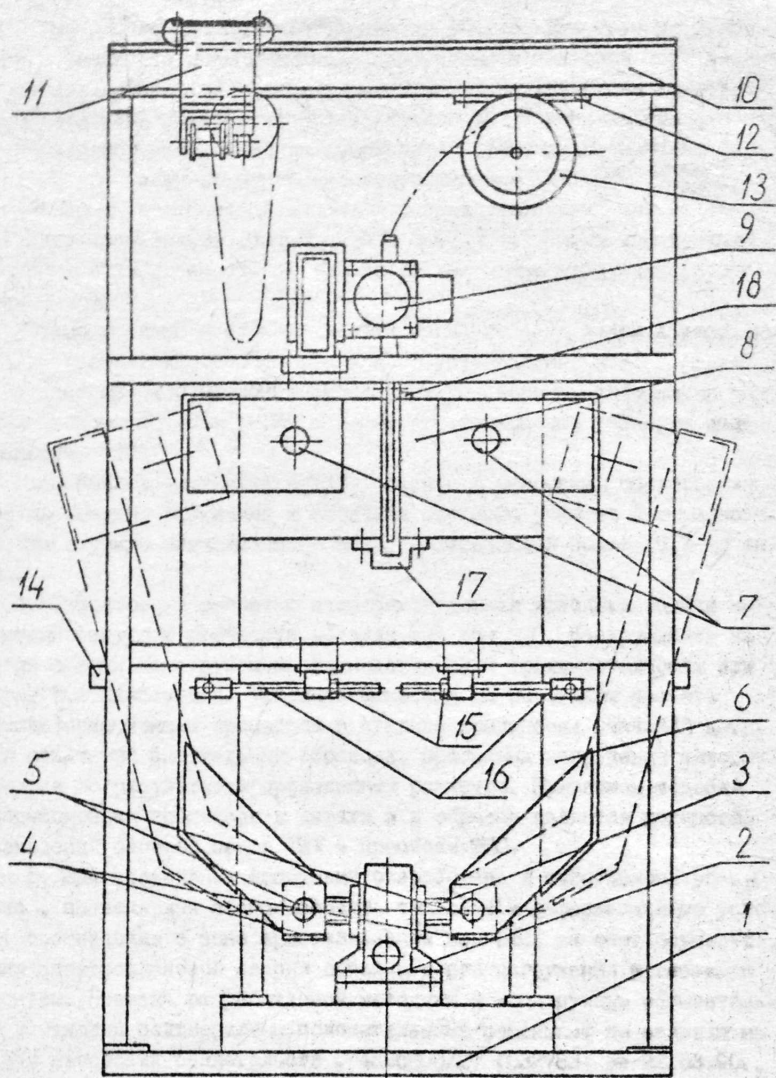


Рис. I Экспериментальная установка для испытаний на сопротивление образованию горячих трещин в процессе ЭШС