

Министерство образования и науки Российской Федерации

Тольяттинский государственный университет

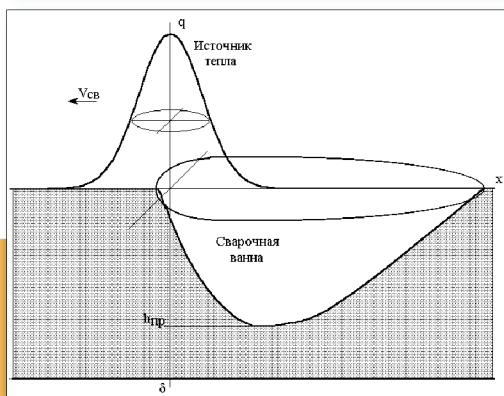
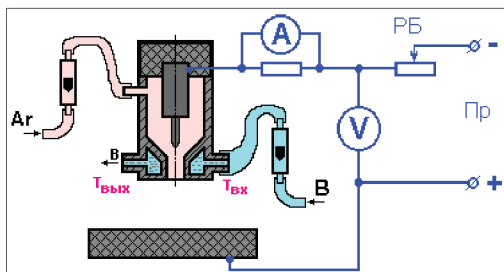
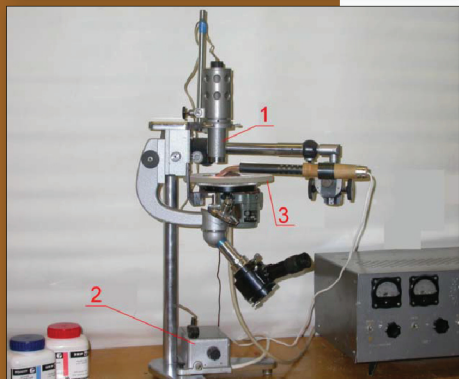
Институт машиностроения

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ

Лабораторный практикум

Под редакцией доктора технических наук,
профессора В.П. Сидорова
и кандидата технических наук,
доцента К.В. Моторина



© ФГБОУ ВО «Тольяттинский
государственный университет», 2017

ISBN 978-5-8259-1019-2

УДК 621.791.6(075.8)

ББК 30.61

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор Пензенского государственного университета,
зав. кафедрой «Сварочное производство и материаловедение» *А.Е. Розен*;
канд. техн. наук, доцент, технический директор Тольяттинского
представительства ООО «Самараконтрольсервис» *Д.И. Фильченков*;
д-р техн. наук, профессор Тольяттинского государственного
университета *Ю.В. Казаков*.

Авторы:

В.П. Сидоров (раздел 2), К.В. Моторин (разделы 3, 4, 5),
Г.М. Короткова (разделы 3, 4), Р.С. Лучкин (раздел 7),
В.В. Масаков (раздел 1), Р.А. Цепенев (раздел 5),
М.Г. Козулин (раздел 6), Д.А. Семистенов (разделы 1, 5),
Н.Н. Василенко (раздел 1), Н.Е. Машнин (раздел 6).

Технология и оборудование сварки плавлением : лабораторный практикум / В.П. Сидоров [и др.] ; под ред. В.П. Сидорова и К.В. Моторина. — Тольятти : Изд-во ТГУ, 2017. — 1 оптический диск.

В лабораторном практикуме приведены методические указания для выполнения лабораторных работ. Изложены цель работы, теоретические сведения, исходные данные, порядок выполнения работы, контрольные вопросы. Также дается описание принципа работы элементов, устройств, лабораторных и производственных установок, принципиальных электрических схем.

Предназначен для магистрантов и студентов направлений подготовки бакалавра «Машиностроение» и «Материаловедение и технологии материалов» очной и заочной форм обучения.

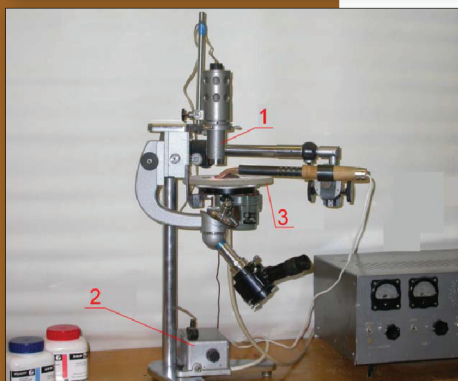
Деривативное текстовое электронное издание; в основе использовано печатное издание: Технология и оборудование сварки плавлением : лаб. практикум / В.П. Сидоров [и др.] ; под ред. В.П. Сидорова и К.В. Моторина. — 2-е изд. — Тольятти : ТГУ, 2008. — 364 с. — ISBN 978-5-8259-0389-7.

Рекомендовано к изданию методической комиссией автомеханического института Тольяттинского государственного университета.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый компьютер: Windows XP/Vista/7/8; ПИИ 500 МГц или эквивалент; 128 Мб ОЗУ; SVGA; CD-ROM; Adobe Acrobat Reader.

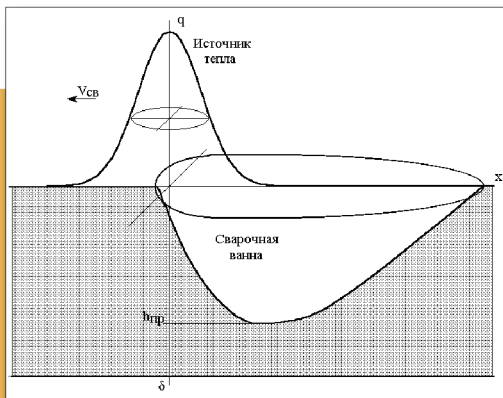
© ФГБОУ ВО «Тольяттинский
государственный университет», 2017

Редактор *Т.Д. Савенкова*
Технический редактор *Н.П. Крюкова*
Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*
Художественное оформление,
компьютерное проектирование: *И.И. Шишкина*



Дата подписания к использованию
15.02.2017.
Объем издания 13 Мб.
Комплектация издания:
компакт-диск, первичная упаковка.
Заказ № 1-86-15.

Издательство Тольяттинского
государственного университета
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,
тел. 8 (8482) 53-91-47, www.tltsu.ru



Содержание

ВВЕДЕНИЕ	8
Раздел I. ТЕОРИЯ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ	10
Лабораторная работа 1.1. Экспериментальные исследования процесса распределения тепла при сварке	10
Лабораторная работа 1.2. Исследование процессов легирования металла при сварке покрытым электродом и под слоем флюса	27
Лабораторная работа 1.3. Исследование процесса затвердевания сварочной ванны с использованием метода материального моделирования	37
Лабораторная работа 1.4. Исследование особенностей распространения тепла при сварке круговых швов на плоскости	54
Лабораторная работа 1.5. Температурное поле при сварке разнородных металлов с использованием метода электро моделирования	63
Лабораторная работа 1.6. Исследование распределения тепла свободных сварочных дуг	72
Лабораторная работа 1.7. Исследование параметров сварочной ванны при сварке металла толщиной 2...4 мм	75
Рекомендуемая литература	78
Раздел II. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ И ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ	79
Лабораторная работа 2.1. Определение эффективной мощности сварочных источников теплоты калориметрическим методом	79
Лабораторная работа 2.2. Влияние режимов сжатой дуги на ее тепловые характеристики	83
Лабораторная работа 2.3. Теплоотвод в сопло плазмотрона от столба сжатой дуги	87
Лабораторная работа 2.4. Изучение изолирующей прослойки между столбом сжатой дуги и стенкой сопла плазмотрона	91
Лабораторная работа 2.5. Исследование напряженности электрического поля в канале плазмотрона сжатой дуги	95
Лабораторная работа 2.6. Исследование выделения энергии в канале плазмотрона сжатой дуги	99
Лабораторная работа 2.7. Определение области безаварийных режимов работы плазмотрона	102
Лабораторная работа 2.8. Исследование газокинетического давления сжатой дуги	104

Лабораторная работа 2.9. Исследование размеров сварочной ванны при действии неподвижной дуги на поверхность пластины	107
Лабораторная работа 2.10. Исследование влияния параметров неподвижного источника тепла и теплофизических свойств металла на температуру сварочной ванны	109
Лабораторная работа 2.11. Исследование особенностей образования сварочной ванны от неподвижного источника тепла у края пластины	112
Лабораторная работа 2.12. Расчетно-экспериментальный метод определения режимов автоматической сварки под флюсом стыковых соединений без разделки кромок	115
Лабораторная работа 2.13. Расчет режимов автоматической сварки под флюсом стыковых соединений углеродистых сталей без разделки кромок	123
Лабораторная работа 2.14. Технология и оборудование для сварки алюминиевых сплавов сжатой трехфазной дугой	125
Лабораторная работа 2.15. Точечная плазменная сварка пластин из алюминиевых сплавов толщиной 0,5...1,5 мм трехфазной дугой	131
Лабораторная работа 2.16. Определение требуемой точности поддержания режима при точечной плазменной сварке	137
Рекомендуемая литература	140

Раздел III. ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ	141
Лабораторная работа 3.1. Полупроводниковый стабилизатор горения дуги	141
Лабораторная работа 3.2. Генератор высокой частоты (осциллятор)	146
Лабораторная работа 3.3. Изучение работы двигателя постоянного тока параллельного возбуждения в приводе подачи присадочной проволоки	153
Лабораторная работа 3.4. Изучение работы двигателя постоянного тока последовательного возбуждения в приводе подачи присадочной проволоки	156
Лабораторная работа 3.5. Блоки питания постоянного и переменного тока	159
Лабораторная работа 3.6. Блоки питания постоянного тока для электромагнитных и электромеханических элементов автоматики	164
Рекомендуемая литература	168

Раздел IV. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ СВАРОЧНОЙ ДУГИ	169
♦ СВАРОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ	169
Лабораторная работа 4.1. Исследование сварочного трансформатора ТС-100 с секционированными обмотками	169
Лабораторная работа 4.2. Изучение сварочного трансформатора с магнитным шунтом	177
♦ СВАРОЧНЫЕ УСТАНОВКИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	183
Лабораторная работа 4.3. Исследование источника питания переменного тока ТИР-300	189
Лабораторная работа 4.4. Исследование установки УДГТ-150У2 для точечной сварки трёхфазной сжатой дугой	195
♦ СВАРОЧНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ	201
Указания к выполнению лабораторных работ 4.5, 4.6, 4.7	205
Лабораторная работа 4.5. Исследование сварочного выпрямителя ВСП-160	207
Лабораторная работа 4.6. Исследование сварочного выпрямителя ВСВУ-400	209
Лабораторная работа 4.7. Исследование сварочного выпрямителя ВДУ-20У2	212
Рекомендуемая литература	214
Раздел V. АВТОМАТИЗАЦИЯ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ	215
Лабораторная работа 5.1. Способ программного изменения величины тока сварки	215
Лабораторная работа 5.2. Автоматический регулятор напряжения дуги	220
Лабораторная работа 5.3. Принципиальная электрическая схема установки ИПК-350	227
Лабораторная работа 5.4. Определение пределов стабилизации параметров режима сварки	231
Лабораторная работа 5.5. Приемы построения систем автоматического жесткого управления	238
Лабораторная работа 5.6. Автомат для аргонодуговой сварки АДСВ-5	247
Лабораторная работа 5.7. Влияние возмущений на параметры сварочной ванны	253
Рекомендуемая литература	258
Раздел VI. ПРОИЗВОДСТВО СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ	259
Лабораторная работа 6.1. Исследование деформаций при нагреве электрической дугой кромки пластины и способы их компенсаций	259
Лабораторная работа 6.2. Исследование деформаций при ручной дуговой сварке пластины по оси симметрии	264

Лабораторная работа 6.3. Определение деформации тавровой балки при сварке швов	271
Лабораторная работа 6.4. Выбор установочных баз, схем расположения прижимных устройств и усилий при проектировании сборочных и сварочных приспособлений	277
Рекомендуемая литература	287
Раздел VII. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ	288
Лабораторная работа 7.1. Распределение напряжений в сварных соединениях, выполненных сваркой плавлением	288
Лабораторная работа 7.2. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния металла сварных соединений с помощью метода сеток	298
Лабораторная работа 7.3. Определение остаточных сварочных напряжений магнитным методом	302
Лабораторная работа 7.4. Влияние собственных напряжений на прочность сварных соединений	311
Лабораторная работа 7.5. Определение поперечных деформаций при сварке встык свободных деталей	318
Лабораторная работа 7.6. Определение угловых деформаций при сварке листов встык	324
Лабораторная работа 7.7. Определение рабочих напряжений в сварных сосудах давления	328
Лабораторная работа 7.8. Оценка местной устойчивости тонких пластин элементов сварных конструкций	339
Лабораторная работа 7.9. Определение механической неоднородности сварных соединений	347
Лабораторная работа 7.10. Исследование коррозии сварных соединений алюминиевых сплавов	355
Лабораторная работа 7.11. Оценка коррозионной активности поверхности сварных соединений	365
Лабораторная работа 7.12. Определение влияния внешних растягивающих напряжений на коррозионную активность поверхности паяных соединений	371
Рекомендуемая литература	379
Приложение 1	381
Приложение 2	382
Приложение 3	384
Приложение 4	389

ВВЕДЕНИЕ

В процессе подготовки инженеров — бакалавров и магистров — по специальным дисциплинам важная роль отводится лабораторным практикумам. Они занимают значительную часть в общем объеме проводимых учебных занятий. Естественно, что первостепенное значение придается основополагающим работам, закладывающим фундамент знаний и умений по выбранной специальности. Такие работы были предложены в свое время в сборнике «Лабораторные работы по сварке» под редакцией профессора Г.А. Николаева, изданном в последний раз в 1971 году. Этот практикум был положен в основу создания лабораторных практикумов во многих вузах, в том числе и в Тольяттинском политехническом институте (ныне ТГУ — Тольяттинский государственный университет).

С тех пор произошло много изменений в учебных планах и подходах к подготовке инженеров. На выпускающих кафедрах сварки (их в России более 50) создается достаточно много новых и интересных лабораторных работ. Однако они в основном издаются малыми тиражами и потому малодоступны. Исключение составляет «Лабораторный практикум по курсу «Технологические основы сварки и пайки в авиастроении», изданный совместно кафедрами Воронежского ГТУ и МАТИ — РГТУ в 2004 году, однако его тираж в 250 экземпляров быстро разошелся.

На кафедре сварки и пайки ТГУ давно взят курс на увеличение числа лабораторных работ в отдельных дисциплинах, создание новых лабораторных работ, раскрывающих еще не освоенные аспекты этих дисциплин. При этом с целью повышения качества подготовки бакалавров — инженеров-сварщиков решались задачи интенсификации обучения, создания возможности индивидуальных траекторий обучения в соответствии с запросами обучаемого и работодателей.

Одним из путей решения этих задач является использование современной компьютерной техники. На кафедре с начала 1990-х годов разрабатываются и вводятся в учебный процесс виртуальные лабораторные работы, в основе которых — математические модели, разработанные для сварочных процессов. В комбинации с реальными работами на оборудовании это значительно повысило интерес

студентов к выполнению лабораторных работ, индивидуализировало обучение. Особенностью данного практикума является то, что в нем приведено много лабораторных работ, в основу которых положены результаты исследовательской работы авторов. Причем эти работы носят не узкоспециальный, а достаточно общий характер. Достоинством их является возможность более глубокой проработки актуального материала, чем при использовании заимствованных лабораторных работ.

Необходимо отметить, что в стремлении непрерывно расширять и совершенствовать лабораторный практикум преподаватели кафедры во многом обязаны Клаусу Артуровичу Витке, несколько лет преподававшему на кафедре, который во многом определил требования к лабораторным практикумам и создал оригинальные лабораторные работы по дисциплине «Теория сварочных процессов».

Авторы надеются, что практикум будет полезен для преподавателей и студентов вузов, колледжей, всех специалистов, занятых в сварочном производстве.

Раздел I. ТЕОРИЯ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

Лабораторная работа 1.1 Экспериментальные исследования процесса распределения тепла при сварке

Цель работы – приобретение опыта и навыков экспериментального определения температуры в ходе нагрева и охлаждения при сварке.

Указания для самостоятельной работы

Известны уравнения и формулы [4]¹, используемые для расчетов температурных полей, термических циклов сварки, скоростей охлаждения, размеров зон термического влияния и т. д. Однако в ряде случаев реальные процессы и явления протекают сложнее, чем это описывается формулами. Часто характер теплового воздействия при сварке, условия распространения теплоты и теплоотдачи от свариваемых деталей настолько сложны и неопределенны, что расчетное определение температур становится либо затрудненным, либо настолько неточным, что его использование оказывается неоправданным.

Экспериментальное определение температур при сварке имеет свои преимущества перед расчетным, хотя и уступает ему в возможности получения анализа общей закономерности, так как практически невозможно измерить температуру во всех точках нагреваемого тела одновременно (что можно сделать с помощью ЭВМ при расчетном методе). Оба метода дополняют друг друга, а решение об использовании того или иного метода зависит от характера поставленной задачи.

Методы измерения температуры нагретых тел. Существует много методов экспериментального определения температур [5; 6]. Следует учитывать, что никакой метод измерения температуры не дает ее истинного значения, а получаемая псевдотемпература отличается от истинной на величину ошибки, зависящей от метода измерения.

¹ В квадратных скобках в каждом разделе указаны литературные источники из списка рекомендуемой литературы соответствующего раздела.

Рассмотрим подробнее лишь те методы, которые используют при сварке. Один из простейших методов, так называемый «цветовой», заключается в использовании индикаторов температуры – термокрасок или термокарандашей. Одни термокраски меняют цвет непрерывно (400...700 К) и позволяют наблюдать положение изотермических линий. Другие резко меняют свой цвет при определенной температуре и сохраняют его в дальнейшем. Существуют термокраски с диапазоном 300...1800 К с одно-, двух-, трех- и четырехкратным изменением цвета при различных температурах.

Термокарандаши изготавливают для диапазона 300...950 К с градацией 50...80 К. Нанося различными карандашами риски, как мелом, можно быстро определить распределение температур по изменению цвета. С их помощью устанавливаются размеры зоны, нагретой до определенной температуры, и момент времени, при котором достигается заданная температура. Этот метод удобен для определения температуры перед сваркой [7]. Точность измерения составляет несколько кельвинов.

Температуру можно измерить с помощью чувствительных элементов и датчиков, преобразующих ее в некоторую другую физическую величину за счет изменения электрической проводимости вещества, возникновения контактной термоЭДС, теплового расширения или изменения давления.

Наиболее простыми датчиками температуры являются электроконтактные термометры с чувствительными ртутными элементами. В них изменение объема ртути, вызванное изменением контролируемой температуры, приводит к замыканию двух контактов, впаянных или погруженных в капиллярную трубку, закрепленных на определенном уровне. Зона нечувствительности их 1...3 °С. Точность электроконтактных термометров составляет 2...5 °С. Однако с их помощью можно контролировать температуру только до 300 °С. Их, как правило, используют в системах регулирования сварочных устройств.

Более широкое применение имеют термометры сопротивления, принцип действия которых основан на зависимости электрической проводимости металлов и полупроводников от их теплового состояния. Они позволяют контролировать температуру до 1250 °С. Точность проволочных термометров сопротивления составляет 0,5 %.

Чаще всего для измерения температур при сварке используют термоэлектрически чувствительные элементы – термопары, действие которых основано на возникновении ЭДС спая разнородных проводников. Свойства некоторых материалов, используемых для термопар, приведены в [4, с. 204].

Широкое применение получили термопары: хромель-алюмель, хромель-капель, платина-платинородий. Рабочие диапазоны их соответственно $-20\dots+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-500\dots+600\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-20\dots+1600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Величина термоЭДС, развиваемая термопарой, зависит лишь от материала термопары, температур «горячего» (T) и «холодного» (T_0) спаев:

$$e = \alpha_e(T - T_0),$$

где e – термоЭДС, мВ; α_e – коэффициент термоЭДС.

Внимание! Для того чтобы получить указанное значение термоЭДС, недостаточно иметь термопару и заданную температуру. Необходимо выполнить некоторые условия: так как термопара соединяется с измерительным устройством проводами из другого материала, нежели материал термопар, то в местах соединения этих проводов с проводниками термопары возникают паразитные и непостоянные термоЭДС. Если соединительные провода выполнены из того же материала, что и один из проводников термопары, то в схеме есть одна точка возникновения паразитной термоЭДС. Это место связи соединительного провода с другим проводником термопары. Такую точку называют «холодным» спаем, так как она, в отличие от «горячего» спая термопары, находящегося в контролируемой среде, располагается вне этой среды и в большинстве случаев при меньшей температуре. Поэтому необходимо обеспечить либо постоянство температуры «холодного» спая, либо компенсацию даваемой ею погрешности. Если при сварке измеряются температуры выше $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, то можно ограничиться тем, что поместить спай в среду с комнатной температурой, при этом величина ошибки не превысит 4 %. К числу недостатков термопар следует отнести их большую инерционность, малую чувствительность и недостаточно высокую механическую и тепловую стойкость.

Если необходимо измерить температуру сварочной ванны, то к термопаре предъявляются следующие дополнительные требования:

возможность выдержать высокую температуру; давать устойчивую и достаточно большую ЭДС; иметь линейную характеристику. Для этих целей можно использовать вольфрам-ренийевые термопары. Еще более подходит для этих целей вольфрам-молибден-алюминиевая термопара ЦНИИЧМ-1. В отличие от других термопар она не имеет точки инверсии и не нуждается в термокомпенсации. С помощью такой термопары можно измерить температуру сварочной ванны в разных ее точках в диапазоне 800...1800 °С методом погружения.

Повысить эффективность применения термопар можно путем последовательного и параллельного их включения. Две встречно включенные термопары при размещении их «холодных» спаев в одинаковых условиях дают разность измеряемых ими температур и не требуют термостатирования.

Внимание! При контроле температуры с целью исключения ошибок чувствительный элемент термопары необходимо защитить от прямого теплового излучения сварочного источника.

При сварке используют термопары в виде двух тонких проводников диаметром 0,1...0,4 мм, концы которых соединяют между собой, например, с помощью сварки. Так как термоЭДС изменяется при различных температурах среды, термопары тарируют. Шкалы показывающих приборов делают неравномерными, а если в качестве показывающего прибора используют гальванометр, температуру вычисляют по таблицам [5].

Внимание! Точность измерения зависит от плотности контакта спая термопары с металлом, так как именно плотность контакта обеспечивает одинаковую температуру и спая, и металла. При быстром изменении температуры свариваемого металла температура спая будет другой. Чтобы эта разница температур была минимальной, целесообразно применять тонкие проволоки для термопар. Спаи либо приваривают контактной сваркой к металлу, либо зачеканивают в небольшое отверстие диаметром 1...2 мм.

Термопара – наиболее надежное средство измерения температуры до 1900 К. При температурах выше 1900 К применяют пирометры.

Пирометрами называют устройства, состоящие из оптической системы и приемника излучения, позволяющие измерить температуру тела по интенсивности и спектральному составу его теплового

излучения оптическим методом без прямого контакта с объектом. Различают пирометры полного излучения – радиационные; частичного излучения – монохроматического излучения – яркостного; спектрального – соотношения цветов.

У радиационных пирометров чувствительным элементом является термопара или сопротивление, у всех остальных – фотоэлементы. Отечественной промышленностью выпускается несколько типов радиационных пирометров, например, типа ТЕРа (диапазон 100...4000 °С), РАПИР (400...2500 °С, тепловая инерция его не превышает 1,8 с, погрешность составляет ± 12 °С).

При сварке с помощью фотоэлектрических пирометров (диапазон температур 30...3500 °С) можно контролировать температуру движущихся нагретых тел, регистрировать и регулировать процессы с большой скоростью изменения температуры. Они очень точны. Погрешность измерения температуры ± 1 %. Существенными недостатками их являются громоздкость и необходимость высокой квалификации оператора.

Для контроля проплавления, а также других параметров сварочных процессов лучше подходят цветовые пирометры. Они удобны как датчики обратной связи в случае непрерывного слежения за зоной сварки или ванной расплавленного металла. К их преимуществам можно отнести: высокую точность (± 1 %); малую чувствительность к появлению окисной пленки на поверхности разогретого металла; не так сильно, как яркостные пирометры, реагируют на повышение излучения при уменьшении температуры, связанное с появлением кристаллической структуры при затвердевании зеркала расплавленного металла. На работу таких цветовых пирометров мало влияют поглощающие свойства внешней среды. Это явление основано на том, что компоненты внешней среды – воздух, пары воды, частицы дыма, пыли – не обладают избирательным поглощением, то есть не ослабляют световое излучение определенной длины волны и действуют как нейтральные фильтры. При сварке стальных деталей используют менее точный, но простейший по исполнению метод измерения температуры по цветам побежалости.

Программа работы

1. Получить у лаборанта два образца – пластины из низкоуглеродистой стали для наплавки валиков; покрытые электроды типа МР-3, УОНИ 13/45; щиток, штангенциркуль, слесарные инструменты; термомпару или проволоку для ее изготовления, секундомер, милливольтметр или другой измерительный прибор типа Ш4500 (шкала прибора должна соответствовать используемой термомпаре) (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Принадлежности для работы

2. Ознакомиться со сварочным постом и оснасткой. Источники питания должны обеспечивать сварку как на постоянном, так и на переменном токе.

3. Заварить термомпару (рис. 1.2, 1.3, 1.4) и получить «горячий» спай (рис. 1.5). Проверить работоспособность (рис. 1.6), для чего присоединить «холодный» спай к измерительному прибору, а «горячий» спай нагреть с помощью горящей спички или зажигалки, при этом стрелка прибора должна отклониться в сторону увеличения температуры. Если этого не произойдет, поменять полюса термомпары или произвести сварку нового «горячего» спая (разд. II).



Рис. 1.2. Проволока для изготовления термопары



Рис. 1.3. Заварка термопары



Рис. 1.4. Получение термопары



Рис. 1.5. «Горячий» спай



Рис.1.6. Проверка работоспособности термопары

4. Установить сварочный ток в зависимости от диаметра предложенного электрода (приблизительно 50 А на каждый мм диаметра).

5. Подготовить свариваемые образцы – пластинки для эксперимента. Внешнюю поверхность образца зачистить до металлического блеска (рис. 1.7).

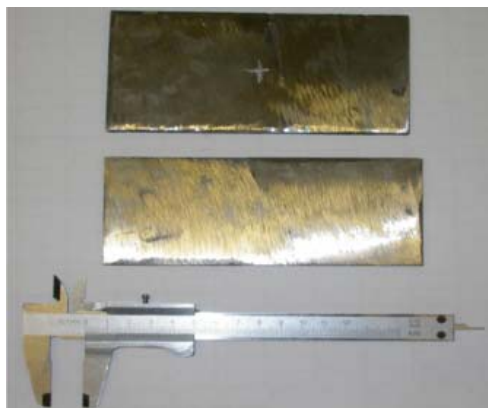


Рис. 1.7. Подготовка образцов

С помощью штангенциркуля провести метку в виде сплошной линии (царапины) по середине образца по всей его длине. Вторую метку, перпендикулярную первой, – тоже по середине образца. Аналогично разметить пластинку и с обратной стороны, причем на поперечной метке, отступив от середины образца около 25...30 мм, сделать отметку в виде риски (это место последующего закрепления термопары) (рис. 1.8).



Рис. 1.8. Отметка рисок

6. На обратной стороне пластины в точке, отмеченной рисккой, сделать рассверловку диаметром 1...2 мм для зачеканки термопары (отверстие должно быть глухим глубиной 0,5...0,75 толщины пластины) (рис. 1.9, 1.10).



Рис. 1.9. Рассверловка пластин



Рис.1.10. Получение отверстия

«Горячий» спай термопары после проверки ее работоспособности ввести в просверленное отверстие пластины и зачеканить

с помощью кернера (рис. 1.11), причем термопара во избежание ее выхода из строя проводится под крышкой сварочного стола и через продольную прорезь подкладки (рис. 1.12).



Рис. 1.11. Зачеканка термопары



Рис. 1.12. Получение зачеканки

7. Произвести наплавку валика электродом на постоянном токе прямой полярности, начиная от одного из краев пластины к центру до метки, где зачеканена термопара (рис. 1.13). При этом фиксировать температуру в точке закрепления термопары в процессе сварки и после ее окончания через определенные моменты времени (рис. 1.14). Показания прибора и секундомера занести в табл. 1.1.



Рис. 1.13. Наплавка валика

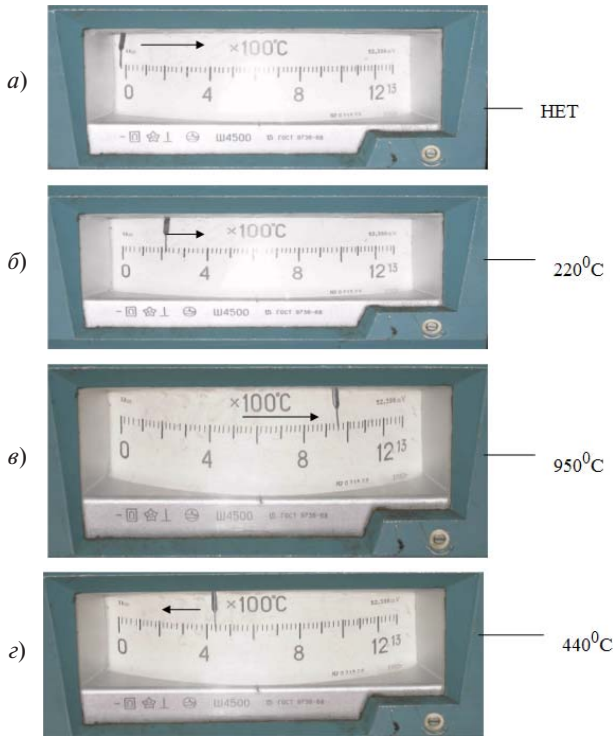


Рис. 1.14. Фиксирование температуры

8. Повторить наплавку либо электродом другой марки, либо этим же, но на постоянном токе другой полярности, отличной от первого опыта, повторив все предыдущие операции (п. 6–7).

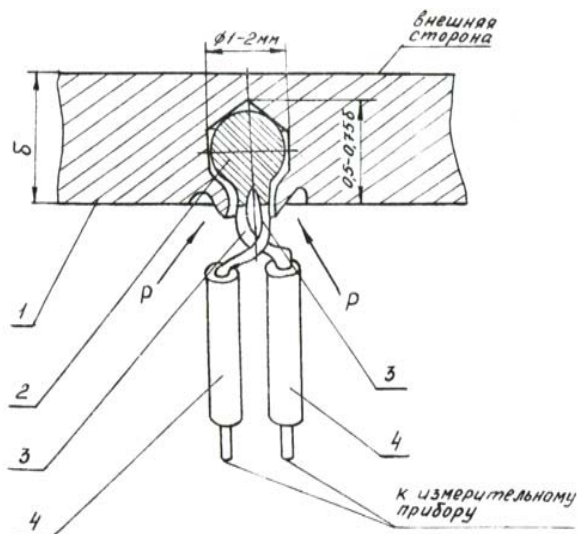


Рис. 1.15. Схема зачеканки термопары: 1 – свариваемый образец; 2 – «горячий» спай термопары; 3 – проводящие ТЭДС элементы; 4 – керамические изоляторы; P – усилие кернения; δ – толщина свариваемого образца

9. После остывания пластин с наплавками измерить по цветам побежалости с помощью штангенциркуля ширину областей, имеющих различные цвета побежалости (рис. 1.16), и занести в табл. 1.2.

10. Построить термический цикл для точки закрепления термопары по измеренным показаниям (табл. 1.1).

11. Определить распределение температуры в различных точках остывшего образца по цветам побежалости (рис. 1.16) и построить зависимость.

12. Сравнить результаты для различных марок электродов, рода сварочного тока и его полярности.

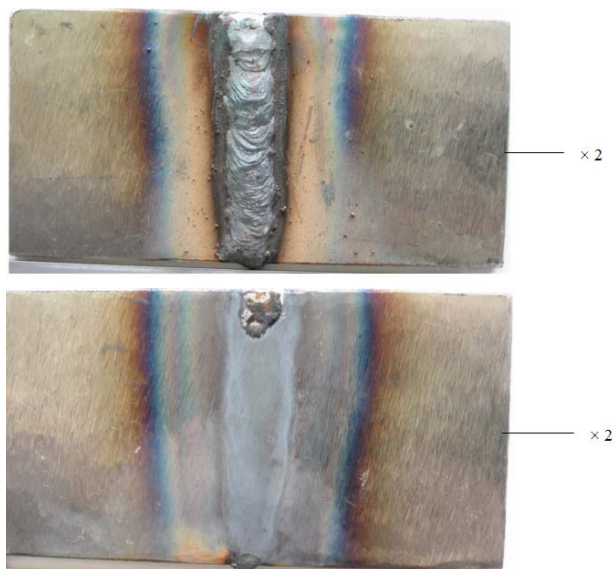


Рис. 1.16. Определение температуры по цветам побежалости

Описание лабораторной установки и перечень необходимых материалов

Сварочный пост позволяет осуществлять ручную дуговую сварку плавящимся покрытым электродом на переменном токе и постоянном токе прямой и обратной полярности, сварку в среде защитных инертных газов неплавящимся электродом, а также сварку «горячих» спаев термопар. Пост имеет рабочий стол со сменными подкладками.

Внимание! При работе обязательно включать местную вытяжную вентиляцию (кнопка «пуск» расположена справа от рабочего стола сварщика).

Сварочный пост включает два источника питания дуги, настенный щит с измерительными приборами и пультом управления. Имеются приборы: амперметры и вольтметры для контроля режима сварки, прибор для регистрирования показаний термопар, а также прибор для контроля режима сварки «горячих» спаев термопар.

Внимание! Для безопасности работающих сварочный пост огражден черными шторами. Во время проведения эксперимента на рабочем месте должно находиться не более трех человек.

Материалы

1. Пластины из малоуглеродистой стали размером не менее $250 \times 100 \times 4$ мм – 2 шт.

2. Электроды диаметром 2...3 мм для сварки на переменном токе МР-3 или АНО-4, для сварки на постоянном токе – УОНИ 13/45 или 6010 производства США.

3. Термопары типа «хромель-алюмель» или «хромель-капель» диаметром 0,1...0,2 мм и фарфоровые или керамические трубки для их защиты.

4. Компенсационные провода, выполненные из какого-либо одного материала из тех, что входят в состав термопары. Рабочая часть термопары должна быть не меньше 200 мм. Длина компенсационного провода выбирается по месту.

5. Тигель, наполненный порошкообразным графитом или углем.

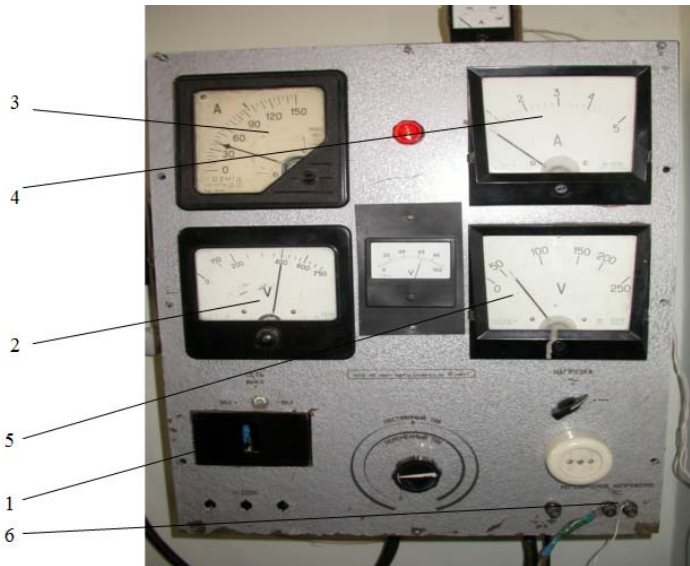


Рис. 1.17. Настенный щит с измерительными приборами: 1 – включение источника питания сварочной дуги; 2 – вольтметр, показывающий напряжение питающей сети; 3 – амперметр, показывающий силу сварочного тока; 4 – амперметр, показывающий силу тока при изготовлении термопары; 5 – вольтметр, показывающий напряжение при изготовлении термопары; 6 – место подключения заготовки термопары

Указания к выполнению работы

1. Выявив неработоспособность термопары, ее необходимо заменить новой. Для этого взять два куска проволоки, например, из «хромель-алюмеля», пропустить их через керамические изоляционные трубки, оставив за срезом трубок свободные концы длиной 10 мм; с помощью пассатижей скрутить их между собой и произвести сварку «горячего» спая. Для этого используют тигель с порошкообразным графитом или углем. Сварка спая производится следующим образом. К тиглю подводится изолированный электропровод, имеющий на одном конце пружинный зажим (типа «крокодильчика»), второй электропровод подводится к пассатижам, имеющим изолированные ручки. Зажав скрутку будущей термопары пассатижами, ее помещают в угольный или графитовый порошок. К концам электрических проводов, один из которых подключен к тиглю, а другой к термопаре, подается переменный (постоянный) ток напряжением 60...120 В (рис. 1.3, 1.17). Время выдержки спая в тигле определяется размером получаемого на конце термопары шарика, диаметр которого должен быть приблизительно не менее 1 и не более 2 мм (рис. 1.4). При этом время выдержки ориентировочно составит 2...3 секунды.

2. При нагреве стали на воздухе ее поверхность окрашивается в различные цвета, называемые цветами побежалости. Каждый цвет побежалости соответствует определенной температуре и может служить указателем для определения степени нагрева околошовной зоны при сварке стали. В данной работе по цветам побежалости определяется распределение температуры в поперечном сечении образца (табл. 1.2). Так как этот диапазон температур достаточно «узок», температуру ниже 200 °С и выше 325 °С можно построить путем экстраполяции.

Внимание! Во избежание тепловых ожогов необходимо все работы производить в спецодежде (включая рукавицы). Перед началом сварки предупредить находящихся в лаборатории лиц о работе сварочных источников питания. Во избежание поражения электрическим током, особенно при изготовлении термопар, работу производить в резиновых перчатках.

3. После наплавки валиков дать пластинам остыть на воздухе вместе со сварочным приспособлением до температуры 20...30 °С, не нарушая при этом налет на поверхности свариваемого образца-пластины.

Содержание отчета

1. Цель работы и задание.
2. Программа работы.
3. Результаты исследований в виде таблиц опытных данных и графиков.
4. Выводы по работе с их логическим обоснованием.
5. При описании результатов исследований необходимо представить поясняющие рисунки и схемы.

Таблица 1.1

Изменение температуры в точке крепления термопар во времени

Время, с	Температура, град.	Время, с	Температура, град.	Время, с	Температура, град.	Время, с	Температура, град.

Таблица 1.2

Цвета побежалости в зависимости от температуры

Цвет побежалости	Температура, °С	Ширина области, мм
Серый	325	
Светло-синий	310	
Ярко-синий	295	
Фиолетовый	285	
Пурпурно-красный	275	
Красно-коричневый (кирпичный, бурый)	265	
Коричнево-желтый	255	
Темно-желтый	240	
Светло-желтый	225	
Светло-соломенный	200	

Вопросы для самоконтроля

1. Для чего необходим контроль температуры при сварке?
2. Назовите методы измерения температуры твердых тел.
3. На чем основано действие термоэлектрических чувствительных элементов?
4. Каковы преимущества и недостатки измерения температуры с помощью термопары?
5. Как можно измерить температуру сварочной ванны?
6. Что такое «горячий» и «холодный» спаи термопары?
7. Как связать температуру и контроль проплавления изделия при сварке?
8. Что понимается под терминами «термический цикл», «скорость охлаждения», «выносливость термопары»?
9. Как определить размеры зоны термического влияния при сварке?
10. Как влияют род и полярность тока на температурное поле при сварке?
11. Опишите (устно) методику изготовления термопары.
12. Влияет ли излучение сварочной дуги на температуру изделия?
13. Как проявляется влияние кристаллической структуры при затвердевании на точность измерения температуры тел?

Лабораторная работа 1.2

Исследование процессов легирования металла при сварке покрытым электродом и под слоем флюса

Цель работы – приобретение навыков: экспериментального исследования процессов легирования на примере легирования стали марганцем; качественной оценки результатов спектрального анализа.

Указания для самостоятельной работы

Для того чтобы быть подготовленным к выполнению лабораторной работы и понимать ее результаты, необходимо изучить раздел 3 [4], раздел 4 [2] и раздел «Особенности протекания химических реакций при сварке» [8].

1. Эмиссионный спектральный анализ

Эмиссионный спектральный анализ – это физический метод определения химического состава вещества по его спектру, испускаемому атомами и молекулами. Атомы и молекулы могут возбуждаться пламенем горелки, электрической дугой, искрой, лазером или несколькими источниками нагрева одновременно.

Излучение, получаемое таким образом, разлагается в спектр с помощью дисперсионной призмы или дифракционной решеткой спектрального прибора и регистрируется фотографической пластинкой.

Наиболее известны три типа эмиссионных спектров: линейчатые, полосатые и непрерывные.

Линейчатые спектры испускаются атомами и молекулами раскаленных газов и паров. *Полосатые* спектры возникают при излучении света раскаленными парами молекул. *Непрерывные* спектры испускаются раскаленными жидкими и твердыми телами.

Спектр – упорядоченное по длинам волновое излучение. Длина волн спектральных линий в данной работе будет выражена в ангстремах: $1\text{Å} = 10^{-7}$ мм или 10^{-10} м; 1 нм (нанометр) = 10^{-9} м; например: 5800, $1\text{Å} = 580,1$ нм.

Положительные качества эмиссионного спектрального анализа: высокая чувствительность определения ряда элементов, скорость, объективность и универсальность.

К числу недостатков можно отнести: влияние структуры и химической неоднородности анализируемого материала на результаты определения, а также трудность эталонирования.

Следует учитывать, что интенсивность свечений пропорциональна концентрации определяемого элемента при прочих равных условиях. Однако наличие посторонних элементов сильно влияет на возбуждение атомов и интенсивность их линий в спектре.

2. Качественный спектральный анализ

Для определения состава анализируемой пробы по характерным линиям применяют качественный спектральный анализ. Для анализа достаточно поместить между электродами небольшую долю анализируемого материала, возбудить ее источником нагрева, например дугой, и сфотографировать спектр. Полученный спектр может быть очень сложным. Для установления наличия элемента

(например, марганца) в исследуемой пробе в спектре необходимо обнаружить несколько линий.

Важным преимуществом такого анализа является возможность по спектру одной пробы, выполненной, например, различными сварочными материалами, установить присутствие и приблизительное содержание искомых элементов.

Для качественного спектрального анализа используются самые чувствительные линии с малыми потенциалами ионизации, так называемые последние линии: они при уменьшении содержания определяемого элемента в пробе исчезают в последнюю очередь.

Для расшифровки спектров применяют таблицы спектральных линий и атласы. Атлас содержит комплект планшетов, на которых имеются изображения спектра железа рядом со шкалой длин волн в ангстремах, указано положение наиболее характерных линий элементов периодической системы, длины их волн и интенсивность.

Обычно спектрограф, например ИСП-30, снабжен миллиметровой шкалой [8]. Эта шкала регистрируется на фотопластинке рядом с получаемым спектром, для того чтобы было легче ориентироваться в нем. Так как шкала не в ангстремах, а в миллиметрах, предварительно необходимо построить дисперсионную кривую спектрографа, с помощью которой переводится значение миллиметровой шкалы в ангстремы.

Так как в данной лабораторной работе исследуется спектр линий марганца, дисперсионная кривая построена по спектру именно этого элемента (рис. 1.18). Эта дисперсионная кривая была получена следующим образом. На фотопластинке были засняты шкала и спектр марганца, а затем с помощью спектропроектора и атласа были установлены длины волн спектральных линий и деления шкалы, которым они соответствуют. По оси абсцисс отложены деления шкалы в миллиметрах, а по оси ординат — соответствующие длины волн в ангстремах.

Внимание! Такая кривая действительна только для данного прибора.

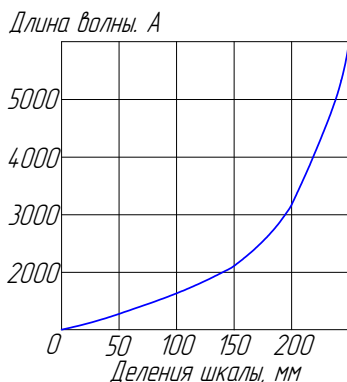


Рис. 1.18. Дисперсионная кривая спектрографа ИСП-30

3. Некоторые схемы процессов легирования и раскисления при сварке плавлением под слоем флюса

При сварке под слоем флюса эти процессы происходят только путем обменных реакций между металлом и шлаком, так как флюсы представляют собой систему сложных силикатов и других окислов и не содержат свободных металлов как раскислителей (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Состав сварочных флюсов

Марка флюса. Компонент	SiO ₂ , %	MnO, %	CaO, %	CaF ₂ , %	Al ₂ O ₃ , %
АН-348А	41,0...43,5	34,5...37,5	до 5,5	4,0...5,5	до 4,5
АН-20	21,0...23,0	не более 0,5	3,0...7,0	25,0...33,0	до 32,0

Флюс АН-348А обладает более кислыми свойствами. Увеличение содержания в наплавленном металле Mn или Si происходит за счет шлакообменных реакций. Разновесная концентрация:

$$[\% \text{Mn}] = K_{\text{Mn}} \times \frac{(\% \text{MnO})}{(\% \text{FeO})}.$$

Содержание Mn в металле будет увеличиваться с повышением температуры, увеличением в шлаке концентрации MnO и уменьшением концентрации FeO.

Однако переход Mn в металл несколько задерживается в кислых шлаках, если те содержат избыток SiO_2 , так как в этом случае MnO образует с SiO_2 прочные соли.

Кислые шлаки связывают также и FeO, поэтому являются по отношению к металлу раскислителями. Коэффициент распределения для закиси железа в кислых шлаках меньше, чем в основных.

Константа распределения:

$$L_{\text{FeO}} = \frac{(\text{FeO})}{[\text{FeO}]} = f(T) = \text{const.}$$

Поэтому составляющие флюса АН-348А создают благоприятные условия для перехода Mn и шлака в металл.

Процесс легирования кремнием существенно не отличается от процесса легирования марганцем. Равновесное состояние определяется следующей константой равновесия:

$$[\% \text{Si}] = K_{\text{Mn}} \times \frac{(\% \text{SiO})}{(\% \text{FeO})}.$$

Как изменяется содержание Si в металле с увеличением температуры, концентрация в шлаке окислов Si и Fe, проанализируйте сами.

Кремний лучше переходит в металл из кислых шлаков, так как увеличение содержания CaO или MgO в основных шлаках приводит к образованию устойчивых силикатов, снижающих активность SiO_2 .

Раскисление металла сварочного шва облегчается тем, что в зоне сварки температура резко изменяется, а поэтому равновесие обратимых реакций смещается в нужном направлении.

Процесс идет примерно в следующей последовательности: при нагреве и расплавлении Mn и Si переходят в металл из окислов, а закись FeO частично переходит в шлак. Такой процесс идет при образовании капли на конце электрода, в самих каплях, падающих в жидкую ванну, и продолжается в передней части сварочной ванны. При охлаждении идет обратный процесс: Mn и Si окисляются, а Fe из окислов переходит в металл.

Эти процессы идут в хвостовой части ванны при температурах, близких к кристаллизации. При этом MnO и SiO_2 всплывают на поверхность и уже в шлаке застывают или дают сложные шлаковые включения в металле. Именно благодаря кислым шлакам часть закиси FeO связывается в шлаке, а Mn и Si не только раскисляют металл, но и частично его легируют.

Описание лабораторной установки

1. Сварочный пост позволяет осуществить ручную дуговую сварку покрытым электродом и под слоем флюса на постоянном токе прямой и обратной полярности. Состоит из источника питания, рабочего стола.

2. Для спектрального анализа используется спектрограф ИСП-30. Это кварцевый спектрограф средней дисперсии, предназначенный для работы в ультрафиолетовой части спектра. Для пространственного разделения излучений волн различной длины применяют дисперсионные призмы. Разделение излучений в дисперсионной призме является результатом зависимости угла отклонения дельта-луча, проходящего через призму (рис. 1.19), от показателя преломления n , различного для лучей волн разной длины.

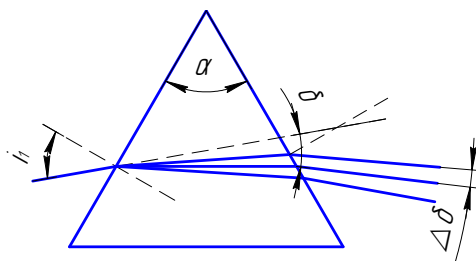


Рис. 1.19. Принцип действия простой дисперсионной призмы:
 i_1 – отклонение от нормали (угол падения); α – угол преломляющий;
 δ – угол отклонения луча; $\Delta\delta$ – угол, на который разделяются излучения волн различной длины

В зависимости от исследуемой области спектра применяют дисперсионные призмы, изготовленные из различных материалов: флинта (спецстекла) – для видимой области; кристаллического кварца – для ультрафиолетовой области; каменной соли – для инфракрасной области.

Все оптические детали расположены на литом основании прибора и закрыты металлическим кожухом. Спектрограф устанавливается на рельсе, на котором также установлены конденсор и обжиговая камера со специальным штативом. Все элементы в совокупности составляют так называемую оптическую скамью.

Анализируемый образец укрепляется на штативе специальными зажимами. Штатив снабжен механизмом перемещения электродов и дополнительным осветителем, которые позволяют точно устанавливать электрод и образец по оптической оси.

При этом изображения электродов проецируются конденсором на диаграмму промежуточного конденсора или на крышку щели прибора (рис. 1.20).

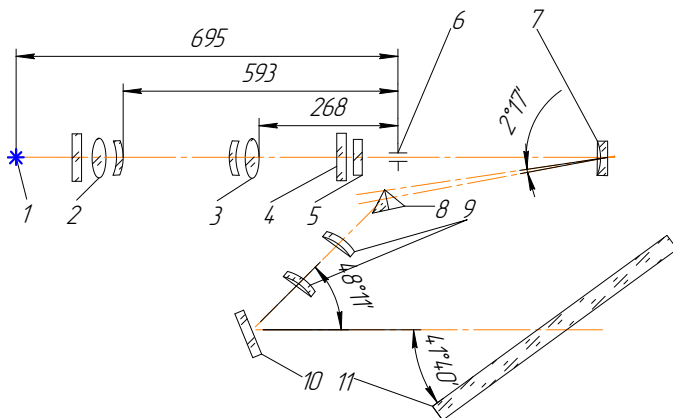


Рис. 1.20. Оптическая схема спектрографа ИСП-30 [4]:

1 – источник света; 2, 3, 4 – конденсоры; 5 – ступенчатый ослабитель;

6 – щель; 7 – зеркальный объектив; 8 – призма; 9 – объектив;

10 – зеркало; 11 – фотопластинка или фотопленка

Для безопасности работающих, а также для того, чтобы не допускать радиопомех, обжиговая камера имеет герметичные металлические дверцы, при открытии которых срабатывают конечные выключатели. Во избежание ожогов и перегрева деталей штатива предусмотрена система их водяного охлаждения.

Щель спектрографа регулируется. Зазор регулируется микрометрическим винтом с барабаном, цена деления которого составляет 0,001 мм. Щель спектрографа – наиболее ответственная часть прибора, поэтому студентам категорически запрещается производить очистку и настройку щели самостоятельно.

Под щелью спектрографа находится ноль-пункт. Это приспособление для перемещения механизма управления щелью вдоль оптической оси, что необходимо при юстировке прибора.

Перед щелью устанавливают ступенчатый ослабитель или диафрагму, перемещением которой относительно щели можно ограничить ее высоту и освещать различные ее участки. За щелью расположен затвор, перекрывающий оптическую часть спектрографа во время предварительного обжига или после экспозиции.

Перемещение кассеты с фотопластинкой осуществляется с помощью специального маховика, на котором имеются деления, позволяющие вести учет фотографируемых спектров. В кассетной части предусмотрены приспособления для впечатывания миллиметровой шкалы на фотопластинку. Для этого необходимо повернуть до отказа ручку шкалы. При этом зажигаются лампочка осветителя шкалы и сигнальная лампочка. После экспонирования ручку поворачивают в обратном направлении, шкала убирается, лампочка гаснет.

3. В качестве источника света при эмиссионном спектральном анализе используют дуговые и искровые генераторы. В данной лабораторной работе используется универсальный генератор производства Германии типа ZG2, позволяющий поддерживать горение дуги как переменного, так и постоянного тока, как прямой, так и обратной полярности, искровой разряд или несколько источников света одновременно. Для анализа электропроводящих материалов рекомендуют использовать искру, а для анализа материалов с малой электропроводностью – различные виды дугового разряда.

4. Спектропроектор типа ПС-18 предназначен для увеличения изображений спектрограмм. Состоит из осветителя, сложной оптической системы, предметного столика, механизм управления которого позволяет перемещать его во взаимно перпендикулярных направлениях.

5. Необходимые материалы:

- 1) пластина малоуглеродистой стали размером не менее 50×50×3 мм;
- 2) электрод диаметром 2...4 мм;
- 3) флюсы АН-348А, АН-20;
- 4) фотопластинки спектральные чувствительностью 0,5...2 ед. ГОСТ (АSА) или 8...22 ед. АSА;
- 5) электрод угольный диаметром 6...8 мм, заточенный на конус;
- 6) проявитель: метол – 1,0 г; сульфит натрия безводный – 26 г; гидрохинон – 5 г; сода безводная – 22 г; бромистый калий – 2 г; вода – до 1 л.

Указания к выполнению работы

1. Получить у лаборанта пластину для наплавки валиков, флюсы АН-348А и АН-20, покрытый электрод, кернер для нумерации наплавов, слесарный инструмент, кассету для спектрографа и фотопластинку.

2. Закрепить пластину на сварочном столе.

3. Наплавить валик покрытым электродом, начиная с одного из углов пластины к ее центру, длиной 5...10 мм. Поставить метку около наплавки. Отбить обмазку с электрода. Отрезать кусок сварочной проволоки с застывшей каплей на конце длиной 30...50 мм, поставив на нем метку.

4. На другом конце пластины провести наплавку валика голой проволокой. Отрезать кусок сварочной проволоки с застывшей каплей. Поставить метки.

5. С третьего угла провести наплавку валика под флюсом АН-348А.

6. На свободном конце пластины произвести четвертую наплавку под флюсом АН-20 и повторить все перечисленные выше операции.

7. После остывания пластины с наплавками все наплавленные валики очистить от шлака и выровнять их поверхности напильником. Всем отрезанным кускам сварочной проволоки с застывшими каплями придать форму, удобную для помещения их на предметный столик спектрографа, обточив одну из поверхностей.

8. Исследовать с помощью спектрографа легирование сталей Mn в процессе сварки под слоем флюса:

а) зарядить кассету, вскрывая пачку с фотопластинкой в фотокомнате при неактивном красном свете. Эмульсионная сторона пластинки должна быть расположена к выдвижной шторке кассеты. Вставить кассету в спектрограф, зафиксировать ее и открыть шторку кассеты. Затем осуществить съемку миллиметровой шкалы спектрографа;

б) установить пластину с наплавками на столик обжиговой камеры спектрографа и снять спектр с основного металла пластины, используя в качестве второго электрода графит;

в) перевернув пластину с наплавками, снять спектры с наплавов под флюсом АН-348А, АН-20;

г) убрать со штатива пластину с наплавкой и поставить кусок электродной проволоки. Снять спектр с наплавленной части электрода (капли), где уже начался процесс легирования. Повернув электродную проволоку другим концом, снять спектр электродного металла. Таким образом исследуется состав металла в следующих точках: основной металл, наплавленный металл, торец электрода, электродный металл, т. е. на пластине будет одновременно получено 10 спектров, характеризующих изменение состава металла при сварке под слоем флюса;

д) закрыть кассету и проявить фотопластинку в фотокомнате при неактивном красном свете. Отметить на фотопластинке дату проведения опытов, номер подгруппы или инициалы студента, проводившего опыт. Высушить фотопластинку.

9. Расшифровать спектрограммы: просмотреть высушенную пластинку на спектропроекторе. Найти линию Mn с длиной волны 2933 Å⁰ или 2802 Å⁰, используя для этого табл. 13, 14 атласа. По интенсивности этих линий на различных спектрах сделать качественное заключение о концентрации Mn в стали для каждого случая.

Содержание отчета

1. Цель лабораторной работы.
2. Программа работы.
3. Краткое описание опытной установки, оборудования, стендов.
4. Методика и результаты исследований.
5. Выводы о работе с их теоретическим обоснованием.

При описании методик и результатов исследований необходимо представлять поясняющие рисунки и таблицы опытных или расчетных данных.

Вопросы для самоконтроля

1. Укажите направления перехода Mn при дуговой сварке различными способами.
2. Может ли быть содержание Mn в наплавке больше, чем в основном металле?
3. Можно ли неограниченно повышать содержание Mn в наплавленном металле за счет изменения состава флюса или покрытия электрода?

4. Как изменяется состав электродного металла в процессе плавления?
5. Как зависит содержание Mn в наплавке от содержания его во флюсе?
6. На чем основан эмиссионный спектральный анализ?
7. Какие источники света используются при спектральном анализе?
8. Какие условия съемки спектров должны быть обеспечены?
9. Почему после проявления на пластинке отсутствуют изображения спектра?
10. Как настроить спектрограф для работы?

Лабораторная работа 1.3 Исследование процесса затвердевания сварочной ванны с использованием метода материального моделирования²

Цель работы – освоение методики материального моделирования с целью более глубокого понимания физических процессов, лежащих в основе затвердевания сварочной ванны.

Особенности перехода жидкого металла в твердый при сварке плавлением. Затвердевание расплавов

Затвердевание расплавов (в том числе жидкой сварочной ванны) состоит из следующих элементарных стадий:

- а) переохладение расплава;
- б) образование центра кристаллизации в расплаве;
- в) рост центров кристаллизации, приводящий к образованию первичных кристаллитов.

Можно выделить три типа затвердевания расплавов: нормальное, направленное и зонное (табл. 1.4).

В данной лабораторной работе рассматривается сварка плавлением. При этом способе сварной шов затвердевает по зонному типу, по изделию перемещается зона расплавленного металла сварочной

² Основы работы предложены доктором технических наук, профессором К.А. Витке (Германия).

ванны, характеризующаяся постоянством объема. Температурное поле – квазистационарное [4]. Зонное затвердевание характеризуется тем, что величина переохлаждения на фронте затвердевания $-\Delta T_{\phi}$, необходимая для роста кристаллитов, зависит от скорости затвердевания.

Таблица 1.4

Типы затвердевания

Тип затвердевания	Теплота перегрева	Объем жидкой фазы	Состав жидкой и твердой фаз	Примеры
Нормальное	0	0	Однородный Разнородный	Кратер, сварная точка при контактной и дуговой сварке Пайка паяльником
Направленное		0	Однородный Разнородный	Диффузионная пайка
Зонное			Однородный Разнородный	Сварка плавлением Сварка-пайка, пайка-сварка

При сварке плавлением эта величина зависит от скорости сварки:

$$-\Delta T_{\phi} = f = (V_{св}). \quad (1.1)$$

Скорость затвердевания в любой точке фронта затвердевания также связана со скоростью сварки (рис. 1.21):

$$V_z = V_{св} \times \cos \alpha_0, \quad (1.2)$$

где α_0 – угол между ортогональным направлением кристаллита и продольной осью сварного шва.

Суммарное переохлаждение $\Sigma \Delta T_{\phi}$ на фронте затвердевания складывается: из термического переохлаждения $-\Delta T_l(n)$, возникающего из-за теплоотвода в холодные слои металла в ходе перемещения источника тепла при сварке, внутреннего термического нагрева $+\Delta T_L(n)$ около фронта затвердевания и концентрационного нагрева $+\Delta T_c(n)$. Показатель $+\Delta T_L(n)$ обусловлен выделением скрытой теплоты кристаллизации в процессе затвердевания расплава (точка 4 рис. 1.21). Показатель $+\Delta T_c(n)$ возникает за счет резкого изменения концентрации легирующего элемента в жидкой и твердой фазах на фронте затвердевания и соответствующего понижения температуры

ликвидуса (рис. 1.22). Это изменение вызвано тем, что при температуре затвердевания концентрация легирующего элемента в образующей твердой фазе ниже, чем в расплаве на фронте затвердевания. Это приводит к образованию слоя с повышенным содержанием легирующего элемента и снижает температуру ликвидуса.

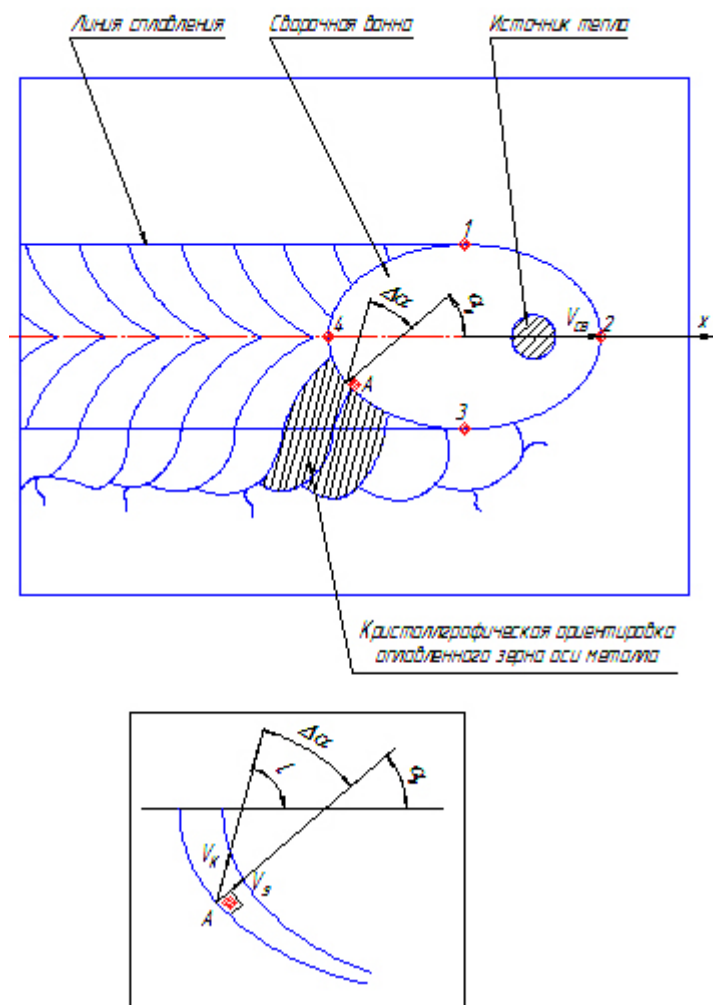


Рис. 1.21. Схема расчета скорости затвердевания и скорости кристаллизации: 1–2–3 – фронт плавления; 3–4–1 – фронт затвердевания

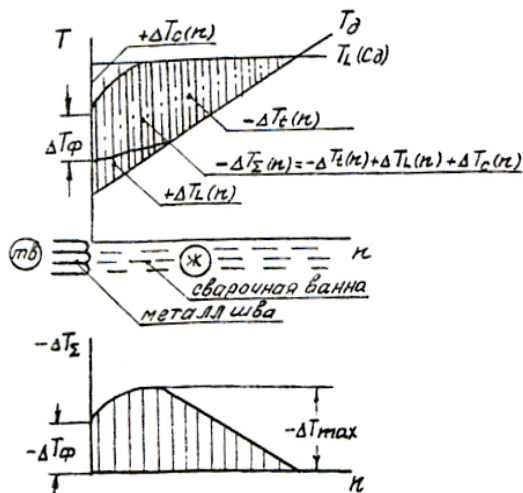


Рис. 1.22. Схема распределения температур вблизи фронта затвердевания сварочной ванны

Таким образом,

$$\Sigma \Delta T_{\phi} = -\Delta T_I(n) + \Delta T_L(n) + \Delta T_C(n). \quad (1.3)$$

Скорость затвердевания V_3 — это скорость перемещения точек межфазной поверхности (фронта затвердевания) в ортогональном направлении, она увеличивается от нуля по линии сплавления по скорости сварки на оси шва. Этим объясняется возрастание переохлаждения на фронте затвердевания $\gamma - \Delta T_{\phi}$ от линии сплавления к оси шва.

Различают три типа процесса кристаллизации в расплавах: а) гомогенный; б) гетерогенный; в) затравочный (частный случай гетерогенного).

В гомогенном образовании центра кристаллизации при сварке маловероятно, так как применяемые в промышленности материалы не являются однородной средой из-за наличия всевозможных примесей в них.

Характерной особенностью процесса затвердевания при сварке плавлением является наличие поликристаллических затравок в виде оплавленных зерен основного металла на линии сплавления (рис. 1.21). Они являются центрами кристаллизации, готовыми к росту, так как их размер больше некоторого критического.

Если результирующее переохлаждение $\Sigma \Delta T_{\text{фmax}}$ создается на некотором расстоянии от фронта затвердевания и его величина становится больше некоторого критического значения, необходимого для гетерогенного образования центра кристаллизации, то в сварочной ванне возникают гетерогенные зародыши (рис. 1.23).

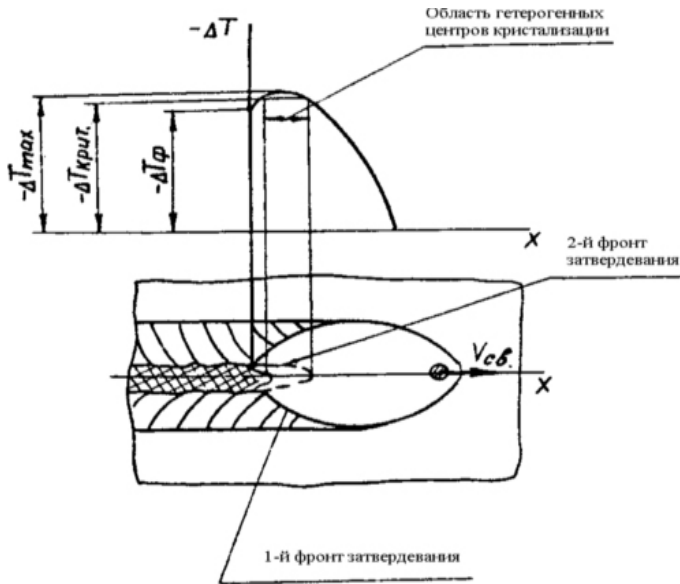


Рис. 1.23. Схема образования второго фронта затвердевания с автономно растущими кристаллитами

Кристаллиты, растущие в направленных зернах основного металла, образуют в сварочных ваннах так называемый 1-й фронт затвердевания. Эти кристаллиты унаследуют кристаллографическую ориентировку зерен затравки (рис. 1.22). Такой рост называется эпитаксиальным, а сами растущие кристаллиты – эпитаксиальными. Скорость роста кристаллитов первого фронта называют скоростью кристаллизации:

$$V_k = \frac{V_3}{\cos \Delta\alpha} = \frac{V_{\text{св}} \cdot \cos \alpha_0}{\cos \Delta\alpha}, \quad (1.4)$$

где $\Delta\alpha$ – угол отклонения направления роста от ортогонального, если рассмотреть пересечение условной линии первого фронта затвердевания и продольной оси растущего кристаллита (точка А на рис. 1.21).

Первичные кристаллиты, возникающие в результате гетерогенного образования центра кристаллизации и их дальнейшего роста, имеют произвольные кристаллографические ориентировки. Эти кристаллиты образуют второй фронт затвердевания (рис. 1.23), их рост называется автономным.

Второй фронт затвердевания состоит из полиэдрических кристаллитов и очень редко из пластинчатых (рис. 1.24). Кристаллиты же первого фронта затвердевания являются столбчатыми (рис. 1.24). Скорость их роста по одному из пространственных направлений значительно больше, чем по двум другим направлениям. В отличие от столбчатых полиэдрические кристаллиты имеют почти одинаковые скорости роста по всем пространственным направлениям.

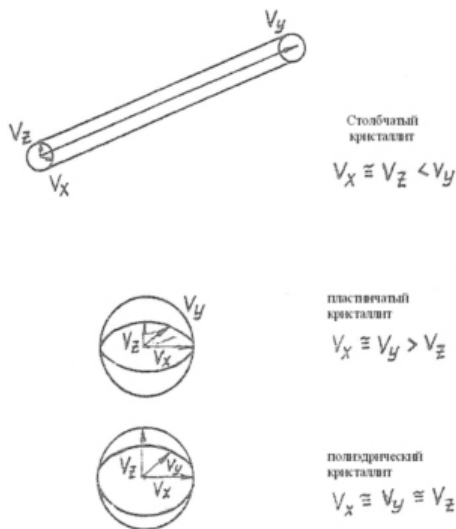


Рис. 1.24. Возможные внешние формы первичных кристаллитов металла шва

Независимо от внешней формы первичные кристаллиты могут расти по одному из следующих механизмов роста: а) *гладкому*, б) *ячеистому*, в) *дендритному*. Первый механизм роста характеризуется сравнительно ровным, без выступов, фронтом затвердевания и небольшим количеством межкристаллитных границ и субграниц. При ячеистом росте гладкий фронт разрушается, межфазная поверхность

приобретает неровную форму с периодическими выступами и впадинами. Первичные кристаллиты состоят из параллельно растущих ячеек, большого количества субграниц, границы между группами ячеек имеют разную направленность их продольных осей (рис. 1.25).

Дендритный рост отличается от ячеистого тем, что фронт затвердевания не обладает регулярной формой, а первичные кристаллиты образуются за счет роста твердой фазы по оси 1-го, 2-го и т. д. порядков, т. е. одна из параллельно растущих до этого ячеек на фронте затвердевания образует выступ, вершина которого будет находиться в области большего переохлаждения по сравнению с соседними ячейками. Этот образующийся выступ будет стремиться продвинуться дальше и расти в глубь расплава. Выделяющаяся при этом скрытая теплота плавления уменьшает переохлаждение на фронте в окрестностях выступа: по мере развития этого процесса выступ превращается в пик, в то время как скорость перемещения соседних ячеек несколько уменьшается.

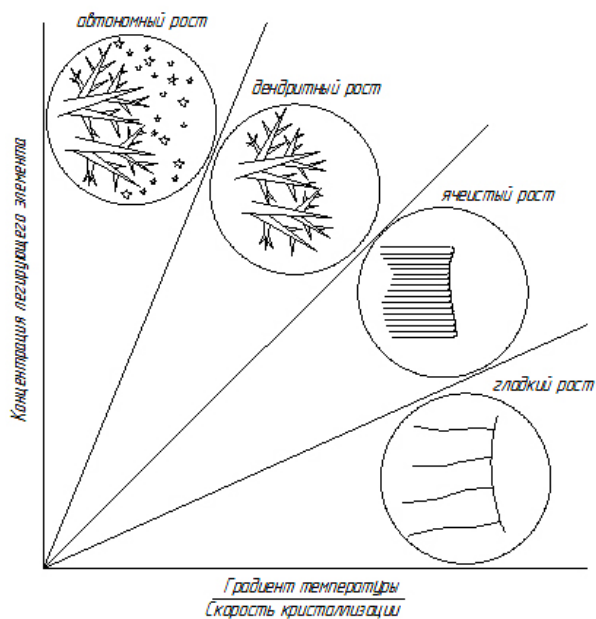


Рис. 1.25. Схема влияния концентрации легирующего элемента, градиента температуры и скорости кристаллизации на механизм роста первичных кристаллитов металла шва

Аналогичным образом на нем образуются ветви, а эти ветви, в свою очередь, служат основой для следующих ветвей. Возникающая в результате этого структура называется дендритной, «древовидной» (от греческого слова «дендрон» — дерево). Весь дендрит представляет собой, по существу, монокристалл [9].

На рост центров кристаллизации влияют три основных фактора: концентрация легирующих элементов (C_o); градиент температуры (C_p); скорость кристаллизации (V_k) (рис. 1.25). Эти факторы влияют на процесс первичной кристаллизации через градиент результирующего переохлаждения. Если максимальное переохлаждение смещается в глубину жидкой фазы (т. е. градиент переохлаждения больше нуля), то гладкий фронт разрушается и затвердевание происходит по ячеистому или дендритному механизму. В ряде случаев при этом образуются и гетерогенные зародыши с возникновением дезориентированной структуры в центре шва (рис. 1.23).

Метод материального моделирования

Так как металл шва при обычных методах исследования непрозрачен, а сварочная ванна и воздействующая на нее дуга имеют высокую температуру и другие негативные свойства, изучение процессов кристаллизации затрудняется.

В данной лабораторной работе свариваемый материал заменяется химическими соединениями с энтропией затвердевания меньше четырех, в качестве источника тепла вместо электрической дуги используется обычный электрод-паяльник.

В результате нагрева выбранное химическое соединение (например, соль или смесь солей) расплавляется под наконечником паяльника и образует прозрачную модель сварочной ванны. Для изучения процесса расплавления и кристаллизации используются оптические приборы, позволяющие вести наблюдение на просвете, например, биологический микроскоп, металлографический микроскоп типа МБС2.

Для моделирования процесса сварки предметный столик из кварцевого стекла оборудован электродвигателем постоянного тока, позволяющим регулировать скорость вращения предметного столика (рис. 1.27). Задавая различные скорости сварки, через окуляр

микроскопа можно непосредственно наблюдать процессы структурообразования сварочной ванны, изучать механизмы роста кристаллитов. За счет частичного поглощения и преломления световых лучей отчетливо видны фронт затвердевания, растущие кристаллиты, границы между ними, трещины, включения и т. д. Установка позволяет вести фото- и киносъемку, а также демонстрировать идущие процессы непосредственно на мониторе. С этой целью разработана специальная приставка, состоящая из видеокамеры, переходных устройств и передвижной стойки.

Программа работы

1. Получить у лаборанта набор солей (рис. 1.26).
2. Включить привод предметного столика. Подвести стержень паяльника к предметному столику, чтобы нижняя плоскость стержня касалась предметного столика, но не мешала его движению. Прогреть предметный столик в течение 10–15 мин.
3. Настроить установку для визуального наблюдения в следующем порядке:
 - а) отрегулировать освещение с помощью соответствующих центровочных ручек и винтов установки, при этом световое пятно должно освещать часть предметного столика и внешний срез торца паяльника (рис. 1.28);
 - б) настроить оптическую систему установки. Управляя ручками (рис. 1.29), установить их в таком положении, чтобы отчетливо была видна кромка жала паяльника. Включить вращение столика и нанести на его поверхность слой соли шириной на 3–5 мм больше, чем рабочий диаметр стержня паяльника, толщиной 1–2 мм по всему периметру предметного столика;
 - в) смоделировать все механизмы роста первичных кристаллитов на выбранной соли, фиксируя для каждого механизма роста значение скорости затвердевания;
 - г) смоделировать механизмы роста кристаллитов, используя смеси солей. Сравнить скорости затвердевания чистой расплава соли и расплава смеси солей при одинаковых механизмах роста;
 - д) смоделировать процесс затвердевания сварочного кратера. Зафиксировать поведение расплава соли, когда источник тепла

прекращает свое действие. Резко вывести паяльник из контакта с предметным столиком;

е) зарисовать часть шва (расплавленная соль). Указать следы фронта затвердевания первичной границы роста кристаллитов. Для этого либо получить фотографию наблюдаемой картины, либо с помощью телевизионной установки изучить наблюдаемую картинку на экране монитора компьютера.



Рис. 1.26. Набор солей

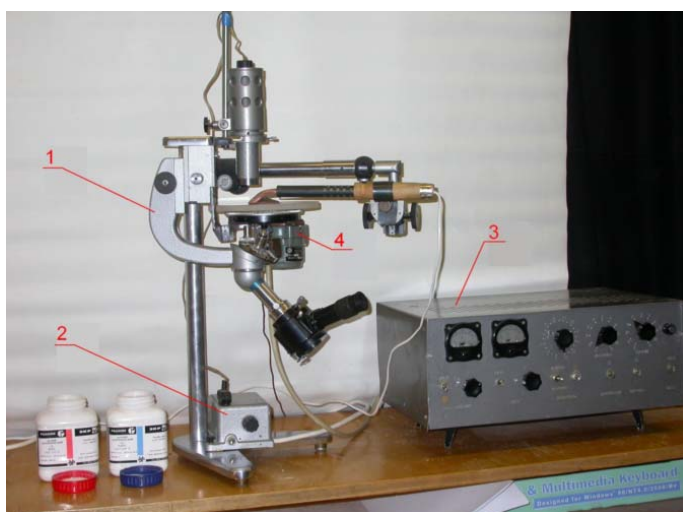


Рис. 1.27. Общий вид установки: 1 – система материального моделирования; 2 – блок питания лампы освещения; 3 – блок управления скоростью сварки; 4 – двигатель



Рис. 1.28. Регулировка освещения

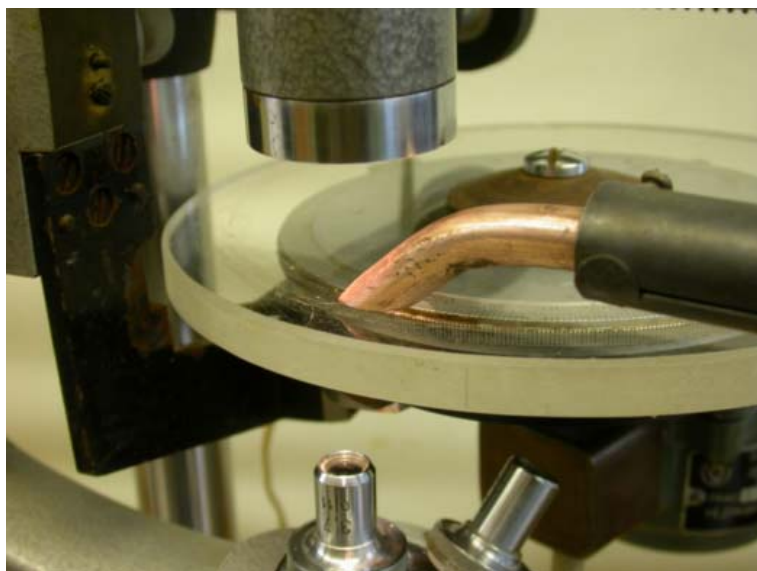


Рис. 1.29. Настройка оптической системы

Описание лабораторной установки, приспособлений и материалов

1. Исследовательская установка создана на базе микроскопа типа МБС2, предназначенного для наблюдения прозрачных препаратов в проходящем свете, в светлом поле. Набор объективов и окуляров обеспечивает увеличение микроскопической части установки в 24,5...600 раз. Для наблюдения за процессом кристаллизации рекомендован объектив 3,7×10.

Прибор состоит из следующих основных частей:

- осветителя, установленного над предметным столиком (рис. 1.30) на несущей стойке, имеющего автономный источник питания;
- предметного столика, состоящего из термостойкого стекла с электроприводом вращения. Управление приводом осуществляется с помощью блока управления скоростью сварки (рис. 1.31);
- оптической части, включающей револьвер, имеющий четыре отверстия с резьбой для ввинчивания объектива, насадки, которые с помощью байонетного соединения и фиксирующего винта соединены с револьвером. Насадка позволяет использовать сменные окуляры, а также имеет узел с фотозатвором. Для настройки оптической части служит механизм микрометрической фокусировки. Для этого имеются две ручки: черная – грубая настройка; светлая – точная настройка;
- источника тепла – используются стандартные паяльники со сменными стежнями. Для настройки паяльника относительно предметного столика имеются механизм продольного и поперечного перемещения, а также механизм подъема и фиксирования паяльника. Паяльник может работать от общей сети и от автономного источника питания.

2. Телевизионная установка предназначена для проецирования изображения, полученного с помощью микроскопа, на экран монитора. Состоит из видеокамеры; механизма крепления и перемещения видеокамеры; переходных устройств, позволяющих совмещать оптическую ось микроскопа и видеокамеры; автономного источника питания видеокамеры, монитора и соединительных проводов; передвижной стойки.

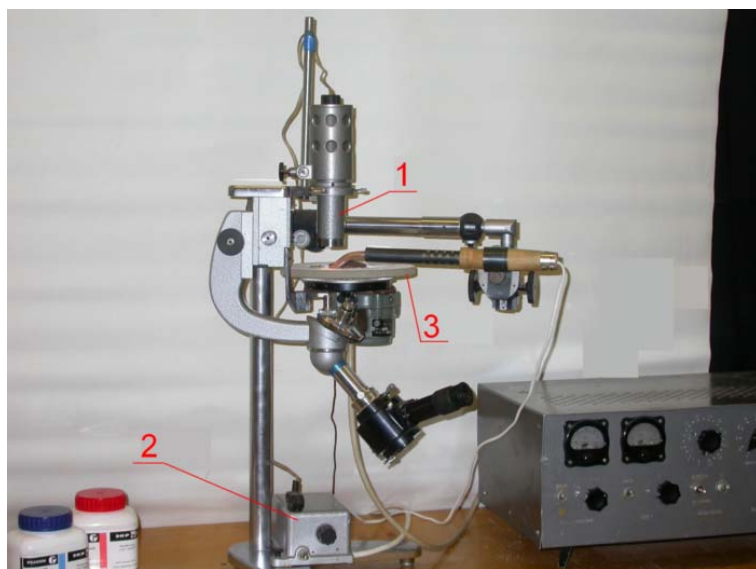


Рис. 1.30. Схема освещения: 1 – лампа; 2 – источник питания; 3 – предметный столик



Рис. 1.31. Блок управления скоростью сварки

Указания к выполнению работы

1. Условия для визуального наблюдения и исследования процессов кристаллизации в сварочной ванне:

- поверхность термостойкого стекла должна быть специально очищена от остатков соли и обезжирена перед работой;
- соль необходимо насыпать тонким слоем с помощью деревянной или пластмассовой ложечки после того, как столик разогреется до температуры 25...35 °С.

Внимание! При включенном паяльнике не касаться его металлических частей во избежание ожогов.

Перед изучением механизмов роста кристаллитов рекомендуется переплавить соль по всему периметру моделируемого сварного шва или наплавки.

После моделирования роста кристаллитов на чистой соли выключить питание паяльника и тщательно очистить стекло предметного столика от переплавленной соли; протереть его и обезжирить, после этого провести моделирование на смеси солей.

2. Обработка результатов

Для определения скорости сварки необходимо пользоваться переводной таблицей (табл. 1.5).

Таблица 1.5

Перевод показаний тумблера в скорость сварки

Положение тумблера	$V_{св}$, мм/с		Положение тумблера	$V_{св}$, мм/с	
	Диапазон			Диапазон	
	1	2		1	2
1	0,02973	0,56	12	0,104	2,128
2	0,0376	1,154	13	0,1308	2,128
3	0,554	–	14	0,1362	2,128
4	0,0654	1,696	15	0,1815	2,128
5	0,0758	1,795	16	0,2104	2,128
6	0,0931	1,91	17	0,251	2,128
7	0,109	1,95	18	0,284	2,128
8	0,109	1,99	19	0,297	2,128
9	0,109	2,034	20	0,319	2,128
10	0,115	2,034	21	0,327	2,128
11	0,111	2,08	22	0,451	2,128

3. Работа с телевизионной установкой

Внимание! Прежде чем включить телеаппаратуру, убедитесь в заземлении всех ее частей.

Установка видеокамеры:

- присоединить видеокамеру к механизму перемещения на стойке;
- отвести камеру с помощью механизма перемещения в нижнее положение;
- присоединить переходник байонет к объектам видеокамеры;
- снять оптическую насадку с установки для моделирования, отвернув байонетное соединение;
- подсоединить видеокамеру с помощью байонета к установке для исследования кристаллизации.

Изучение процесса кристаллизации:

- включить видеокамеру, монитор в сеть;
- установить необходимую резкость изображения с помощью объектива видеокамеры и пульта управления монитором;
- зарисовать изображение, полученное на экране монитора, в тетрадь, измерив с помощью линейки и транспортира линейные размеры кристаллитов, их положение относительно фронта затвердевания (рис. 1.21).

Использование проекционного аппарата

Получить у преподавателя фотографию с изображением того или иного механизма роста кристаллитов в сварочной ванне: с помощью эпидиаскопа спроектировать изображение на экран. Измерить размеры кристаллитов, положение относительно фронта затвердевания (рис. 1.21).

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Программа работы.
3. Сущность метода материального моделирования, краткое описание работы опытных установок.
4. Результаты исследований (табл. 1.6) с их теоретическим обоснованием.

При описании методики, установок и результатов исследований необходимо представлять поясняющие рисунки, таблицы опытных или расчетных данных. При использовании телевизионной аппаратуры или проекционного аппарата должна быть приведена схема части шва (ванны) с указанием фронта затвердевания первичных границ и направления роста затвердевания. В отчете должны содержаться сведения об особенностях затвердевания сварочных кратеров.



Рис. 1.32. Блок управления скоростью сварки

Пример:

Выключателем 1 устанавливаем направление вращения предметного столика – влево или вправо.

Выключателем 2 устанавливаем диапазон скорости вращения предметного столика: 1 (вниз) или 2 (вверх).

Регулятором 3 устанавливаем скорость вращения предметного столика.

На рис. 1.32 регулятор 3 установлен в положение 17, диапазон 1, что по табл. 1.5 соответствует скорости сварки 0,251 мм/с.

Результаты экспериментов

Механизмы роста кристаллитов	Скорость затвердевания соли
Автономный	
Дендритный	
Ячеистый	
Гладкий	

Вопросы для самоконтроля

1. В чем разница между скоростью затвердевания и скоростью кристаллизации при сварке плавлением?
2. Охарактеризуйте элементарные стадии затвердевания жидкого металла.
3. От чего зависит величина переохлаждения на фронте затвердевания?
4. Как возрастает скорость перемещения точек межфазной поверхности от линии сплавления к оси шва?
5. Назовите типы процессов образования центров кристаллизации в расплавах и их характерные особенности.
6. Когда в сварочной ванне при сварке плавлением возникают гетерогенные зародыши?
7. Что такое второй фронт затвердевания?
8. Как влияют концентрации легирующего элемента на градиент температуры, скорость кристаллизации и механизм роста первичных кристаллитов?
9. Как влияет внешняя форма первичного кристаллита на механизм его роста?
10. Чем отличается диффузионный рост кристаллитов от ячеистого?
11. В чем сущность метода материального моделирования?
12. Каким образом используются микроскопы для наблюдения за процессами кристаллизации металла сварочной ванны?
13. В чем разница моделирования процессов затвердевания сварочной ванны при движущемся источнике тепла и неподвижном?

Лабораторная работа 1.4

Исследование особенностей распространения тепла при сварке круговых швов на плоскости

Цель работы – углубление и закрепление теоретических знаний о процессе распространения тепла при сварке, приобретение опыта по анализу влияния характера движения источника тепла на температурное поле.

Указания для самостоятельной работы

Для готовности к выполнению работы и понимания ее результатов необходимо изучить главу 6 «Тепловые процессы при нагреве» и главу 7 «Нагрев и плавление металла при сварке» в [4].

При производстве ряда ответственных сварных конструкций, аппаратов, узлов и деталей необходимо осуществить сварку при движении источника тепла по сложной криволинейной траектории, например вварка заглушек, крышек, люков, горловин и т. д.

Результатом такой сварочной операции являются существенные искажения размеров и формы изделий, их причина – сварочные напряжения и деформации, которые имеют в этом случае очень сложный характер. Для расчета и управления этими сварочными напряжениями и деформациями необходимо экспериментальным или расчетным путем определить величину изменения температуры в конструкции в ходе сварочного нагрева и охлаждения после сварки.

Методы для расчета температур при равномерно прямолинейных движениях источника тепла хорошо известны [4; 12]. Так, линейный непрерывный сосредоточенный источник тепла в бесконечной пластине создает температурное поле, определяемое выражением:

$$T_{(x,y^1,x^1)} = \frac{1}{4\pi \cdot a \cdot s \cdot c \cdot \gamma} \cdot \int_0^t \frac{Q(t^1) \cdot \exp \left\{ -\frac{R^2}{4a(t-t^1)} - b(t-t^1) \right\}}{(t-t^1)} \cdot dt^1 \quad (1.5)$$

(здесь предполагается, что имеет место теплообмен с окружающей средой $0 < t' < t$), где x', y' – координаты точки, в которой определяется температура, м (см); x, y – координаты точки, в которой находится источник, м (см); $R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}$ – расстояние от исследуемой точки до источника м (см); s – толщина свариваемой

пластины, м (см); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м · град (кал/см с · град); $c\gamma$ – объемная теплоемкость, Дж/м · град (кал/см с · град); $a = \lambda/c\gamma$ – коэффициент температуропроводности, м/с (см/с); $b = 2a/c\gamma \cdot \delta$ – коэффициент теплоотдачи I/с; α – коэффициент поверхностной теплоотдачи Вт/м · град (кал/см с · град); $Q = \eta \cdot I_{\text{св}} \cdot U_{\text{д}}$ – эффективная тепловая мощность дуги, Вт (кал/с · 0,14); η – эффективный КПД дуги (табл. 1.7); $I_{\text{св}}$ – сила сварочного тока, А; $U_{\text{д}}$ – напряжение дуги, В.

Для подвижного источника координаты переменные и зависят от времени. Следовательно, $R = R(t')$, а поэтому температурное поле в пластине от действия подвижного источника тепла можно описать следующим уравнением:

$$T_{(x,y,t)} = \frac{1}{4\pi \cdot a \cdot \delta \cdot c\gamma} \cdot \int_0^t \frac{Q(t') \cdot \exp\left\{-\frac{R^2(t')}{4a(t-t')} - b(t-t')\right\}}{(t-t')} \cdot dt'. \quad (1.6)$$

Для равномерно-прямолинейного движения источника со скоростью V вдоль оси OX имеет место $x' = V \cdot t'$; $y' = 0$; поэтому:

$$R(t') = \sqrt{(x - V \cdot t')^2 + y^2}. \quad (1.7)$$

Подстановка уравнения (1.7) в уравнение (1.6) дает известную формулу (6.25) в [2].

Формулу (1.6) можно применить и при любой траектории движения источника. Действительно, если считать, что источник движется вдоль некоторой окружности с радиусом ρ и постоянной угловой скоростью ω , то координаты точки, в которой находится источник (рис. 1.33), можно определить так:

$$(x')(t') = \rho \cdot \cos \omega t'; \quad y'(t') = \rho \cdot \sin \omega t'. \quad (1.8)$$

Значения x и y выразим в полярных координатах (рис. 1.33):

$$x = r \cdot \cos \gamma; \quad y = r \cdot \sin \gamma. \quad (1.9)$$

Подставив (1.8) и (1.9) в формулу (1.7), после преобразования получим:

$$R^2(t') = r^2 + \rho^2 - 2r \cdot \rho \cdot \cos(\gamma - \omega t'). \quad (1.10)$$

Постоянная угловая скорость ω зависит от скорости сварки V :

$$\omega = V/\rho. \quad (1.11)$$

3. Введите исходные данные в компьютер, пользуясь клавиатурой и внимательно сверяя свои данные с информацией, представляемой на экране дисплея. Особое внимание обращайтесь на выбор коэффициента теплоотдачи α , соответствующего выбранным вами условиям теплоотвода (табл. 1.9).

4. После выбора исходных данных и ввода их в компьютер необходимо оценить их правильность. Критерием оценки может служить размер сварочной ванны: длина расплавленного участка по направлению движения источника и ширина — размер зоны расплавления, взятый вдоль радиуса шва. Выберите луч, задав его углом λ , определяющим координаты исследуемой точки, и с помощью компьютера получите кривые распределения температуры в радиальном направлении (вдоль выбранного луча).

Длину зоны, нагретой выше температуры плавления вашего сплава, можно определить, зная характер и величину изменения температуры в различных сечениях ($r = \text{var}$) в зависимости от времени t .

5. Найдя эти размеры, условно будем считать, что режимы и условия сварки выбраны правильно, если длина зоны расплавления по оси шва не будет превышать 3...5 толщин свариваемых листов, а ширина — 1,5...2,5 толщины листа.

Если это условие не соблюдается, то необходимо откорректировать режимы сварки ($Q, V_{\text{св}}$) или выбрать другой способ сварки (η, λ).

6. Определите характер изменения температуры для различных зон сварного соединения — зоны сплавления, околошовной зоны и зоны термического влияния.

7. Выявите величину изменения температуры для различных участков кругового сварного шва в различные моменты времени. Рассчитайте время пребывания заданной преподавателем температуры.

8. Определите, как изменяется температура точек, расположенных в зоне, ограниченной сварным швом, и точек, расположенных на таком же расстоянии от оси шва, но с его внешней стороны.

9. Оцените особенности охлаждения участков металла в сечениях, через которые уже прошел источник тепла.

10. Обобщите полученные результаты в виде аксонометрического изображения изменений температур в нескольких сечениях шва

(различные углы λ и радиусы r для одного момента времени t – фиксированного положения источника тепла).

Указания к выполнению работы

1. Для предварительного расчета эффективной тепловой мощности $Q = \eta \cdot I_{\text{св}} \cdot U_{\text{д}}$ коэффициент η выберите из табл. 1.7 [2].

Таблица 1.7

Экспериментальные значения η для различных видов дуговой сварки

Вид сварки	КПД, η
Под флюсом	0,80...0,95
Ручная дуговая плавящимся электродом	0,65...0,85
Угольным электродом	0,50...0,70
Вольфрамовым электродом в среде аргона	0,45...0,48
Вольфрамовым электродом в среде гелия	0,48...0,52
Плавящимся электродом в среде аргона	0,68...0,74
Плавящимся электродом в среде CO_2	0,80...0,84

Таблица 1.8

Теплофизические свойства металлов и сплавов

Тип сплава	λ , Вт/см · град	a , см ² /с	$c\gamma$, Дж/см ³ · град
Сталь 3	0,397	0,080	4,770
АМгб	1,520	0,530	2,860
ОТ4, ВТ20	0,083	0,040	3,500
Бериллий	1,780	0,410	4,500
Сталь типа 18-9	0,200	0,360	4,500
Медь	3,720	0,940	3,780
Сталь типа 30ХГСА	0,358	0,086	4,140
Сталь типа 20Х13	0,200	0,360	4,140
Сталь типа 12МХ	0,397	0,400	4,500
Техн. А1	2,520	0,880	2,860
На основе Ni	0,630	0,130	4,800

2. После выбора исходных данных на дисплее должен появиться транспарант 1 (рис. 1.34). Передвигая курсор, выбираете одно из предложенных действий:

Ввод исходных данных Выдача результата Выход в начало задачи Выход из задачи

Рис. 1.34. Содержание транспаранта 1

Если вы установили курсор на надпись «Ввод исходных данных», то программа возвратит к табл. 1.8.

Если установили курсор на надпись «Выдача результата», то на экране монитора загорится транспарант 2 (рис. 1.35).

Таблица 1.9

Коэффициенты теплоотдачи при различных условиях теплоотвода

Величины, характеризующие эффективность теплоотвода	Теплоотводящие режимы			Теплоотводящая стальная неохлаждаемая плита, отдача		Отдача в воздух
	медные	алюминиевые	стальные	С 1 стор.	С 2-х стор.	
	Поверхность травленая Z = 10 мм	Z = 30 Z = 10 Z = 10 (мм)	Поверхности обезжирены Z = 30 Z = 10 (мм)			
$\alpha \cdot E^{-3}$ Вт/см ² · град	460...545	356... 335... 293... 420 420 420	186... 29,3... 210 41,9	8,36... 16,76	8,38... 16,76	1,25... 2,5

Ввод исходных данных Выдача результата

Кривые распределения температуры для $t = \text{var}$ Кривые распределения температуры для $Fi = \text{var}$ Кривые распределения температуры для $r = \text{var}$ Картина температурного поля Выход из меню
--

Рис. 1.35. Содержание транспаранта 2

3. Поставив курсор на надпись «Кривые распределения температуры для $t\text{-var}$ » (рис. 1.35), можно получить кривые распределения температуры в радиальном направлении вдоль луча λ , который определяет координаты исследуемой точки (неподвижна относительно центра пластины). Так как источник тепла движется, то температура в исследуемой точке будет зависеть от времени действия источника тепла.

Полезно знать все время сварки, которое можно определить, зная длину шва $L_{\text{ш}} = 2\pi \cdot R$ и скорость сварки V см/с. Каждому лучу (с координатой λ) будет соответствовать свой момент времени, в котором источник тепла пересечет этот луч. Программа позволяет построить от 1 до 10 графиков одновременно для 1 и 10 моментов времени соответственно, как это показано на примере (рис. 1.36).

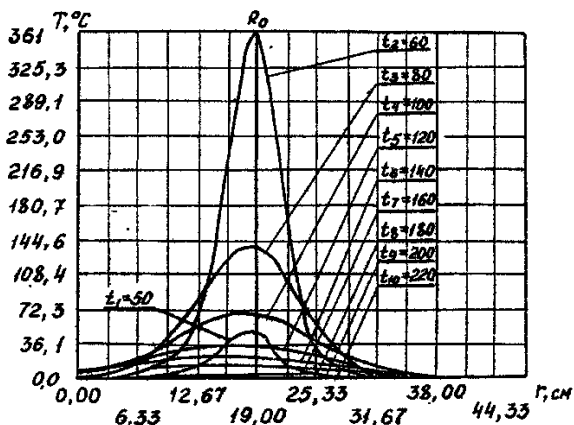


Рис. 1.36. Распределение температуры в радиальном направлении вдоль луча $\lambda = 90^\circ$ в различные моменты времени, с

4. Для оценки ширины шва (или зоны расплавления по направлению луча $\lambda = \text{const}$) определяют участок по графику $T = f(r)$ при $\lambda = \text{const}$ (рис. 1.37).

Если ширина шва не соответствует критериям (п. 3, 5), то необходимо откорректировать режимы сварки, вернувшись в начало программы после установки курсора на надпись «Выход из меню» (рис. 1.35) и, внося коррективы, вновь приступить к решению поставленной задачи, повторив вышеуказанные действия (см. п. 2 и далее).

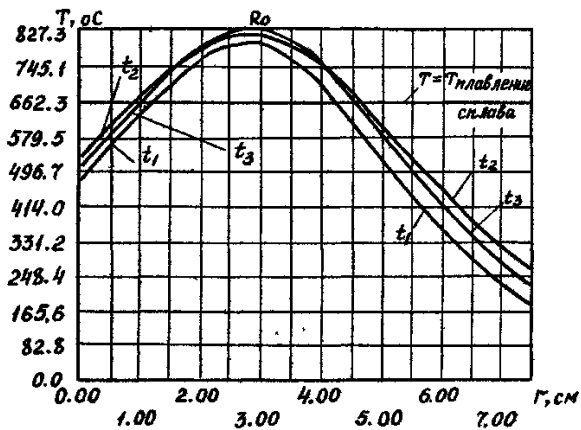


Рис. 1.37. Изменение температуры в сечении $\lambda = 90^\circ$ при различных значениях: сплав АМгб; толщина – 0,2 см; радиус шва $R_0 = 3$ см; скорость сварки $V = 5$ м/ч; $Q_n = 295$ кал/с; $t_1 = 31$ с; $t_2 = 35$ с; $t_3 = 40$ с

5. Если требуется исследовать, как будет изменяться температура в определенный момент времени для различных сечений шва, например, с целью определения скорости нагрева и охлаждения, то необходимо установить курсор на надпись «Кривые распределения температуры для $Fi = var$ » (рис. 1.35). При этом можно получить от 1 до 10 кривых на одном графике одновременно (рис. 1.38).

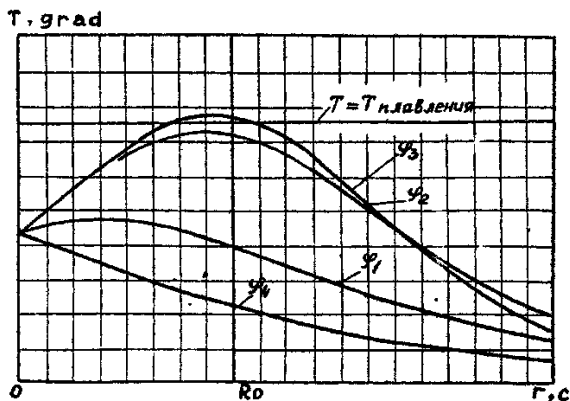


Рис. 1.38. Изменение температуры в данный момент времени для различных сечений шва: сплав АМгб; толщина – 0,2 см; радиус шва $R_0 = 3$ см; скорость сварки $V = 5$ м/ч; $Q_n = 295$ кал/с; $t = 31$ с; $\gamma_1 = 0^\circ$; $\gamma_2 = 45^\circ$; $\gamma_3 = 90^\circ$; $\gamma_4 = 135^\circ$; шаг по оси $0r = 0,375$ см

6. Для приближенной оценки длины сварочной ванны или зоны, разогретой до заданной температуры вдоль оси шва, необходимо поставить курсор на надпись «Кривая распределения температуры для $r = \text{var}$ » (рис. 1.35). Получим кривые, показывающие изменение температуры в зависимости от времени в различных сечениях свариваемой пластины, т. е. термические циклы (рис. 1.39).

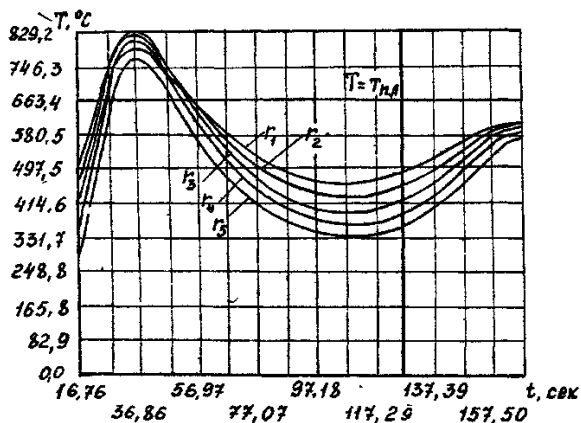


Рис. 1.39. Изменение температуры в сечении $\gamma = 90^\circ$ в зависимости от температуры для различных радиусов: сплав АМгб: толщина — 0,2 см; радиус шва $R_0 = 3$ см; скорость сварки $V = 5$ м/ч; $Q_n = 295$ кал/с; $r_1 = 3,0$; $r_2 = 2,5$; $r_3 = 2,0$; $r_4 = 3,5$; $r_5 = 4,0$

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Исходные данные и программа работы.
3. Краткое изложение методики исследования особенностей распространения тепла при сварке круговых швов на плоскости.
4. Результаты исследований и полученных расчетных данных либо в виде расшифрованных распечаток с принтера, либо в виде рисунков, скопированных с экрана монитора.
5. Выводы по работе в форме анализа полученных результатов.

Вопросы для самоконтроля

1. В чем отличие расчетных формул для определения температуры при сварке источниками тепла, движущимися прямолинейно и по криволинейной траектории?
2. Как определить размеры зоны, нагретой до заданной температуры?
3. Каким образом управлять размерами зон, нагретых до определенных температур?
4. Почему при сварке по замкнутому контуру наблюдается вторичный подогрев металла шва? Как регулировать величину подогрева?
5. Объясните практическое значение расчетов температурных полей при сварке.
6. Как будет влиять ограниченность размеров свариваемой конструкции, например по ширине и длине, на характер распределения температуры в сварном изделии?
7. Какие технологические (и технические) приемы следует применять при сварке угловых швов на плоскости?

Лабораторная работа 1.5

Температурное поле при сварке разнородных металлов с использованием метода электромоделирования

Цель работы – понять физический механизм, лежащий в основе особенностей распространения тепла при сварке разнородных металлов, изучив влияние коэффициента теплопроводности и расположения центра пятна нагрева источника тепла на температурное поле.

Указания для самостоятельной работы

Для подготовки к лабораторной работе и анализу ее результатов следует изучить: [4]; [15, гл. XVI, с. 377–394; гл. XVIII, с. 455–462]; [16, гл. XI, XIII]; [2, гл. IV].

Особенности сварки разнородных металлов и сплавов

Условия эксплуатации ряда сварных конструкций требуют применения в них в качестве конструкционных материалов биметаллов.

Сварка биметаллов, например стали с медью, затруднена вследствие существенной разницы их теплофизических свойств, таких как температура плавления, теплопроводность, теплоемкость. Кро-

ме того, в ходе получения сварного соединения медь растворяется в стали. Все это приводит к возникновению трудноустраняемых дефектов в сварных швах, трещин, непроваров, несплавлений, снижает эксплуатационную надежность соединения.

Чтобы получить качественное сварное соединение, необходимо знать характер распределения температуры в зоне сварки (например, конфигурацию температурного поля) и, проанализировав параметры температурного поля, предложить технологический путь снижения тепловых искажений в зоне сварки. Одним из таких технологических путей является смещение источника тепла, например сварочной дуги, в сторону материала с более высоким коэффициентом теплопроводности.

Тепловые процессы можно изучать с использованием различных методов:

- 1) физического эксперимента (лабораторная работа 1.4);
- 2) аналитического расчета (ЛР 1.1, 1.3) или электромоделирования.

Электро моделирование тепловых процессов

Применительно к рассмотрению физических процессов при сварке [16] важны такие процессы, как перенос вещества путем диффузии (например, меди в сталь при расплавлении), перенос тепла путем теплопроводности и перенос количества движения при вязком движении. Закономерности протекания всех этих процессов были установлены экспериментально и получили названия соответствующих законов. Известен ряд законов, описываемых однотипными уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} q &= -\lambda \cdot \text{grad}T = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \\ i &= -\sigma \cdot \text{grad}\varphi = -\sigma \cdot \text{grad} \frac{\partial \varphi}{\partial n} \\ j &= -D \cdot \text{grad}C \\ \rho &= -\eta \cdot \text{grad}V \end{aligned} \right\} \quad (1.13)$$

где q – удельный тепловой поток, т. е. количество тепла, протекающего через единицу поверхности в единицу времени; i – плотность тока, т. е. сила тока, отнесенная к единице площади; j – поток вещества; ρ – сила внутреннего трения; λ , σ , D , η – коэффициенты теплопроводности, электропроводности, диффузии и вязкости

соответственно; T , φ , c , v — температура, концентрация вещества, электрический потенциал и скорость относительного перемещения слоев вещества соответственно.

Первое соотношение называют законом Фурье, второе — законом Ома; третье — законом Фика; четвертое — законом Ньютона.

Однотипность уравнений, связывающих различные параметры системы в необратимых процессах, указывает на существование единого закона, характеризующего перенос массы и свойств в результате теплового движения системы.

Анализ уравнений [16] показал, что, во-первых, коэффициенты диффузии, температуропроводности и кинематической вязкости имеют одну и ту же размерность, во-вторых, что физически различные процессы описываются единым дифференциальным уравнением, а соответствующий подбор коэффициентов позволяет описать едиными выражениями развитие этих процессов во времени.

Отсюда возникает вывод, что можно моделировать один процесс с помощью другого. При этом появляется возможность создания расчетных средств, основанных на регистрации параметров необратимого процесса одного вида и дальнейшего распространения этих сведений на подобные процессы другого вида.

В настоящей лабораторной работе задачи о распространении тепла решаются устройством, в котором термодинамическое движение осуществляется потоками электричества, так как при этом любое дифференциальное уравнение является математической моделью определенного класса явлений, как это видно из уравнений. При этом интегрирование любого из уравнений приводит к бесчисленному множеству решений, удовлетворяющих этому уравнению. Для получения любого частного решения уравнения в данной лабораторной работе необходимо задать конкретные значения коэффициентам, входящим в уравнение, размеры системы, а также граничные и начальные условия процесса. Будем называть совокупность этих дополнительных условий, определяющих частное решение уравнения, условиями *однозначности*.

Из теории подобия явлений, разработанной Н.Н. Прохоровым [16], известно: «два явления подобны, если они описываются одной и той же системой дифференциальных уравнений и имеют подобные

условия однозначности». Эта теория и положена в основу определения конфигурации температурного поля с помощью электромоделирования. При этом использованы следующие условия однозначности (рис. 1.40):

- производится сварка продольного стыка пластин;
- пластины закрепляются по своим длинным сторонам АД и ВГ жестко в кондукторе, причем кондуктор имеет температуру окружающей среды $T = T_0$;
- пластина нагревается равномерно по толщине, т. е. влияние толщины не учитывается (температурное поле плоское, двумерное);
- на границах пластин АМ, МК, КН, НВ, ВГ, ГД и ДА соблюдается значение аддиабатности $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$, т. е. теплообмен с окружающей средой отсутствует. За источником тепла БО и в зоне источника тепла ОКЛ пластины сварены и имеется физический контакт;
- в качестве источника тепла принят равномерно распределенный неподвижный источник;
- коэффициенты температуропроводности считаются независимыми от температуры;
- считается, что коэффициент температуропроводности λ и коэффициент электропроводности σ подобраны так, что они равны друг другу, и градиент T равен градиенту φ . Тогда i и q будут численно равны;
- моделирование осуществляется при условии равенства безразмерных потенциалов модели и температур излучаемого объекта в каждой точке пространства в любой момент времени:

$$U(X_3, Y_3, T_3) = \Theta(X, Y, T). \quad (1.14)$$

Индекс ε относится к величинам, характеризующим электрический процесс, т. е. имеется аналогия математического описания процесса распространения тепла в твердом теле и протекания электрического тока в электропроводящей среде.

Равенство (1.14) выполняется при геометрическом, физическом и динамическом условиях подобия [16]. Задача сводится к получению на электрической модели безразмерного эквипотенциального поля $\chi(X, Y, T)$, которое тождественно безразмерному температурному полю $\theta(X, Y, T)$.

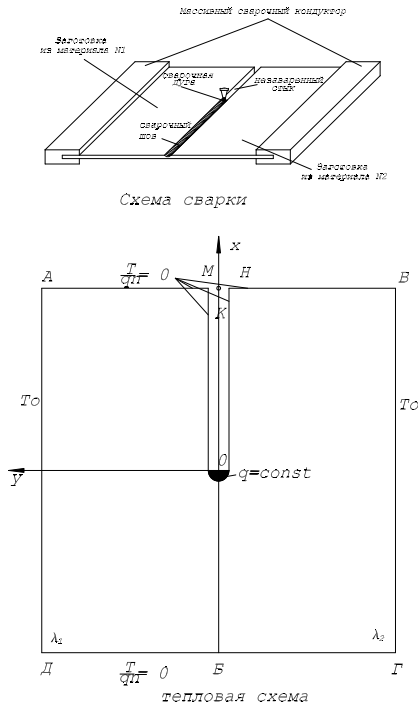


Рис. 1.40. Схема сварки и тепловая схема

Построив эквипотенциальные линии, можно получить влияние коэффициентов теплопроводности на распределение температуры при сварке разнородных материалов (биметаллических изделий).

Для перехода от безразмерных температур к действительным, имеющим место при сварке, необходимо выполнить расчеты по формулам:

$$\Theta = \Theta_{\max} + \Theta_0; \quad (1.15)$$

$$\Theta_{\max} = -\frac{qlr}{\lambda L}, \quad (1.16)$$

где q – удельный тепловой поток, Вт (задается преподавателем); $lr = 0,5$ см – радиус пятна источника нагрева; $\lambda_{\text{cu}} = 3,720$ Вт/см · град (0,95 кал/см · с · град) – коэффициент теплопроводности меди; $\lambda_{\text{ст}} = 0,2$ Вт/см · град (0,06 кал/см · с · град) – коэффициент теплопроводности нержавеющей стали; L – величина, характеризующая параметры модели:

$$L = \left(\frac{1 - \bar{\Delta}u}{\Delta u} \right) \frac{1}{\gamma R_{yi} \Delta F_i}, \quad (1.17)$$

где $\gamma_{cu} = 1/1000$ [1/Ом] – удельная проводимость меди; $\gamma_{ст} = 1/15000$ [1/Ом] – удельная проводимость стали; $R_{yi} = 2000000$ Ом – сопротивление штока; ΔF_i – приведенная площадь элементарного участка поверхности нагрева, обслуживаемого сопротивлением. Исходя из этих данных, имеем:

– для меди

$$L_{cu} = \frac{1 - \bar{\Delta}u}{\Delta u} \cdot 0,0125;$$

– для стали

$$L_{ст} = \frac{1 - \bar{\Delta}u}{\Delta u} \cdot 0,1625.$$

Описание лабораторной установки

Работа выполняется на электроинтеграторе, который позволяет изучать процессы распределения тепла при сварке пластин из разнородных металлов. Прибор представляет собой электрическую модель теплопроводной среды. Состоит из панельного блока, источника питания и прибора для измерений (вольтметра). Коммутационные провода со штекерами выдаются преподавателем, кроме того, студентам выдаются бланки для записи результатов измерений и построения поля изотерм.

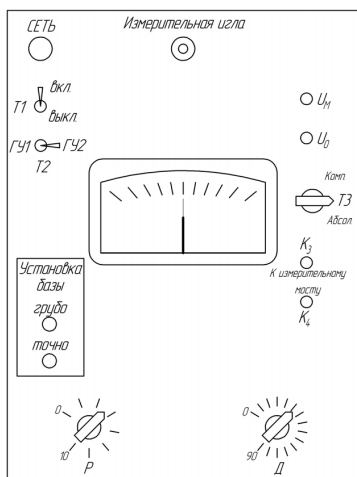


Рис. 1.41. Внешний вид электроинтегратора

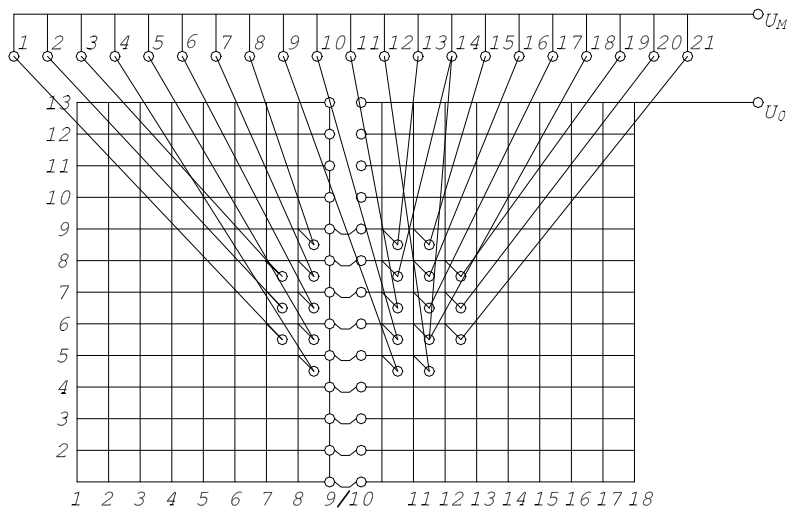


Рис. 1.42. Схема коммутации пятна нагрева симметричного стыка

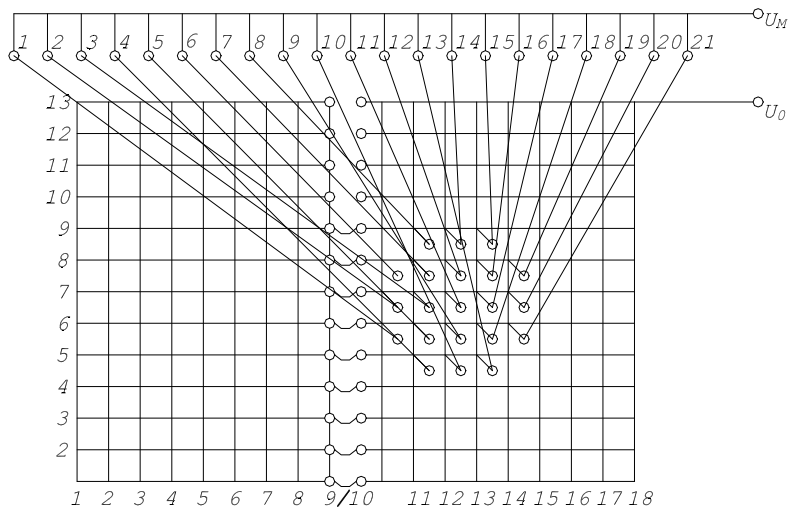


Рис. 1.43. Схема коммутации пятна нагрева со смещением относительно стыка

Программа работы

1. Записать значения заданного преподавателем удельного теплового потока и получить у него сетку для записи показаний прибора и построения эквипотенциального поля.
2. Ознакомившись со схемой коммутации пятна нагрева при сварке симметричного стыка, произвести коммутацию наборного поля (рис. 1.42).
3. Подключить клеммы U_m и U_o наборного поля к соответствующим клеммам блока питания и вольтметра, причем синий провод U_m поместить в нижнюю клемму вольтметра (рис. 1.41), а иглу (белый провод) поместить в верхнюю клемму вольтметра (рис. 1.41).
4. Проверить схему коммутации и показать ее преподавателю или лаборанту и включить питание интегратора тумблером (рис. 1.41).
5. Замерить измерительной иглой интегратора потенциалы во всех точках модели.
6. Повторить измерения для всех точек модели.
7. Выключить питание интегратора и произвести повторную коммутацию поля по схеме (рис. 1.43).
8. Повторить предыдущие операции и результаты измерения занести в сетку под полочкой.

Указания к выполнению работы

1. После получения результатов измерения и записи их в бланк (сетку) производится их обработка либо с помощью графического интерполирования (рис. 1.44), либо путем расчета (см. пример).
2. Для построения линии равного потенциала каждому студенту преподаватель задает несколько значений χ .
3. Интерполированием соответствующих результатов измерений (рис. 1.44) получаются точки с заданным потенциалом.
4. Найденные точки с заданным потенциалом соединить в линию.
5. Повторить определение линии равного потенциала для остальных заданных значений χ .

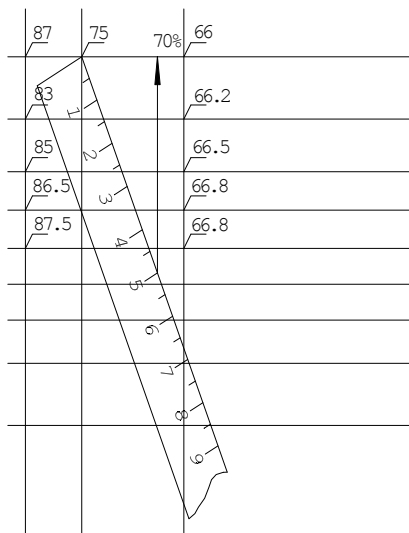


Рис. 1.44. Схема графического интерполирования

Содержание отчета

1. Цель лабораторной работы.
2. Программа работы.
3. Краткое логическое описание опытной установки, оборудования стендов.
4. Методика и результаты исследований.
5. Выводы по работе с их теоретическим обоснованием.

При описании методик и результатов исследований необходимо представлять поясняющие рисунки опытных или расчетных данных.

Вопросы для самоконтроля

1. Объясните физический смысл понятий «изотерма», «тепловой поток», «градиент температуры».
2. Как влияет коэффициент теплопроводности на температурное поле?
3. В чём заключаются трудности сварки разнородных металлов, в частности стали с медью?
4. Как влияет теплоемкость на характер температурного поля?

5. Как влияют размеры образцов на характер распределения тепла?
6. Какие следует применить технические приемы для получения качественного сварного соединения из разнородных металлов?
7. В чем заключается сущность метода электро моделирования?
8. Какие условия необходимо выдержать для построения электрической модели?
9. Из каких соображений моделирование выполняется в критериальном виде?

Лабораторная работа 1.6

Исследование распределения тепла свободных сварочных дуг

Цель работы — освоение методики моделирования сварочных источников, изучение влияния сочетаний параметров сосредоточенности и мощности на форму источников тепла, ознакомление с программой Mathcad.

Область применения

Моделирование находит широкое применение во всех областях производства. Это связано с возможностями эффективного и быстрого решения практических задач, тогда как путь экспериментального моделирования связан со значительными производственными и временными затратами. В связи с этим создаются программы и модули программ решения инженерных и исследовательских задач.

Вашему вниманию представлена работа исследования характеристик свободных сварочных дуг, распространение энергии которых описывается нормальным законом распределения.

Программа работы

1. Ознакомиться с методическим указанием к выполнению работы.
2. Сравнить источники тепла одинаковой мощности для газовой и электросварки.
3. Определить влияние гипотезы постоянства осевого теплового потока.
4. Оформить отчет и подготовиться к устной защите.

Описание методики моделирования

Большинство свободных сварочных дуг описываются нормально-круговым законом распределения тепла:

$$q(r) = q \cdot e^{-k \cdot r^2}, \quad (1.18)$$

где q – эффективная мощность, Вт; k – коэффициент сосредоточенности, см^{-2} ; r – расстояние от оси источника тепла, см.

При этом эффективную мощность можно определить, Вт:

$$q = U_{\text{д}} \cdot I_{\text{д}} \cdot \eta_{\text{и}}, \quad (1.19)$$

где $U_{\text{д}}$ – напряжение дуги, В; $I_{\text{д}}$ – ток дуги, А; $\eta_{\text{и}}$ – эффективный КПД дуги.

Коэффициент сосредоточенности связан с диаметром пятна нагрева соотношением:

$$k = \frac{3,46}{\sqrt{D_{\text{Н}}}}. \quad (1.20)$$

Для обеспечения высокой точности описания сварочных источников тепла используют гипотезу постоянства осевого (среднего) теплового потока:

$$q_0 = q \frac{k}{\pi} = \text{const}. \quad (1.21)$$

Из выражения (1.21) следует, что изменение эффективной мощности источника тепла приведет к изменению коэффициента сосредоточенности дуги, см^{-2} :

$$k = \frac{\pi \cdot q_0}{q}. \quad (1.22)$$

Базовая величина плотности среднего теплового потока в расчетах принималась $q_0 = 3000 \text{ Вт/см}^2$, что соответствует многим сварочным режимам.

Таблица 1.10

Теплофизические свойства металлов и сплавов

Материал	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(см К)	Коэффициент температуропроводности a , $\text{см}^2/\text{с}$	Объемная теплоемкость c_p , Дж/(см^3 К)	Температура плавления, К
Низкоуглеродистые стали	0,38...0,42	0,075...0,09	4,9	1770
Cr-Ni стали	0,25...0,33	0,053...0,07	4,7...4,8	1730

Материал	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(см К)	Коэффициент температуропроводности a , см ² /с	Объемная теплоемкость c_p , Дж/(см ³ К)	Температура плавления, К
Медь	3,7...3,8	0,95...0,96	3,85...4,0	1357
Алюминий	2,7	1,0	2,7	930
Технический титан	0,17	0,06	2,8	1940

Значения эффективного КПД $\eta_{и}$ для различных способов сварки приведены в табл. 1.7.

Указания к выполнению работы

Для выполнения работы необходимо следовать указаниям программы (прил. 2) и руководителя лабораторных работ.

Программа содержит стандартные знаки:

«:=» – присвоение значения,

«=>» – отображение рассчитанного или присвоенного значения.

Для задания значения изменяемому параметру режима необходимо выбрать выражение со знаком присвоения.

Для расчета графиков процессов необходимо:

- 1) задать границы исследования функций, при этом первое значение отражает левую границу, второе – следующую за ней точку, при этом разница этих двух значений отражает шаг изменения координат функции, третье – отражает правую границу исследований;
- 2) курсором отметить поле графика, после чего нажать кнопку F9;
- 3) ожидать расчета и построения функции.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Программа работы.
3. Решение задач на определение распределения тепла двух различных источников и влияния гипотезы постоянства осевого теплового потока (прил. 2).
4. Выводы по работе.

Вопросы для самоконтроля

1. Для каких видов сварки можно описать дугу законом нормального распределения?
2. Объяснить закон постоянства плотности осевого теплового потока.
3. Какими величинами характеризуется свободная сварочная дуга?

Лабораторная работа 1.7 **Исследование параметров сварочной ванны** **при сварке металла толщиной 2...4 мм**

Цель работы – научиться определять путем моделирования параметры сварной ванны (длина, ширина, глубина проплавления) и время их достижения.

Область применения

Моделирование воздействия сварочной дуги на поверхность листа металла позволяет определять размеры сварочной ванны (сварного шва). Эти размеры зависят от многих параметров дуги (мощность, сосредоточенность) и металла (толщина, объемная теплоемкость, температуропроводность и т. д.). При этом процесс начала сварки связан с изменением размеров, формы ванны и характеризуется либо длиной, либо временем сварки нестационарного участка.

Программа работы

1. Ознакомиться с методическим указанием к выполнению работы и получить задание у руководителя работ.
2. Моделировать продольные и поперечные сечения сварочной ванны от действия двух различных источников тепла.
3. Сравнить размеры сварочной ванны для разных моментов времени.
4. Сравнить размеры сварочной ванны стали и алюминия.
5. Определить время нарастания глубины проплавления и постоянную времени.
6. Оформить отчет и подготовиться к устной защите.

Описание методики моделирования

Для сварки тонколистового металла целесообразно ведение расчета процесса распространения тепла по схеме нормально распределенного сварочного источника тепла на поверхности плоского слоя, испытывающего ограничивающее влияние нижней плоскости листа (рис. 1.45).

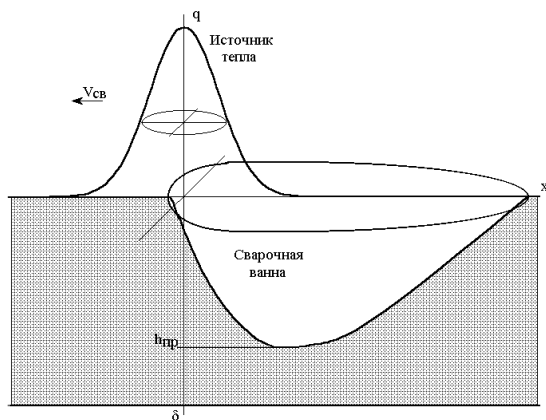


Рис. 1.45. Схема процесса дуговой сварки

Уравнение температуры в плоском слое от нормально распределенного поверхностного источника тепла, движущегося с постоянной скоростью, имеет вид

$$\Theta := \frac{2q}{c\gamma(4\pi a)^{1,5}} \cdot \sum_{n=-10}^{10} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t(t_0+t)}} \cdot e^{-\left[\frac{(z-2\cdot n\cdot s)^2}{4at} + \frac{[x-v(t_0+t)]^2 + y^2}{4a(t_0+t)} \right]} dt, \quad (1.23)$$

где x, y, z — координаты точки относительно подвижной системы координат источника теплоты, см; t — время процесса сварки, с; $c\gamma$ — объемная теплоемкость, Дж/град · см³; q — эффективная мощность дуги, Вт; s — толщина металла, см; a — температуропроводность, см²/с; $t_0 = 1/4ak$ — постоянная времени, характеризующая сосредоточенность теплового потока от дуги к изделию, с; v — скорость движения источника тепла, см/с.

Процесс проплавления металла носит экспоненциальный характер, и постоянная времени проплавления определяется при достижении 0,632 величины провара в установившемся состоянии,

при этом экспоненциальная зависимость проплавления определяется выражением (1.24):

$$h(t) = k \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right), \quad (1.24)$$

где k – величина установившегося значения.

Постоянная времени сварочной ванны – одна из основных динамических характеристик переходных процессов. Она характеризует скорость реагирования ванны на возмущение в сварочной цепи и учитывается при проектировании систем автоматического управления.

Указания к выполнению работы

Программный модуль (прил. 3) позволяет путем расчета температуры в точках и сравнения ее с температурой плавления определять границы сварочной ванны.

При задании параметров сварочного процесса необходимо помнить о том, что параметры принимают значения, находящиеся ниже по содержанию (так, если указаны сначала теплофизические данные алюминия, а ниже стали, в дальнейших расчетах принимают участие теплофизические данные стали).

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Программа работы.
3. Решение задач (прил. 3).
4. Выводы по работе.

Вопросы для самоконтроля

1. Как изменяется сварочная ванна во времени?
2. Каково соотношение размеров сварочной ванны стали и алюминия?
3. Как влияют параметры теплового источника на сварочную ванну?

Рекомендуемая литература

1. Львов, Н.С. Автоматизация контроля регулирования сварочных процессов / Н.С. Львов. – М. : Metallurgia, 1973. – 123 с.
2. Багрянский, К.В. Теория сварочных процессов / К.В. Багрянский, З.А. Добротина, К.К. Хренов. – Киев : Вища школа, 1976. – 424 с.
3. Сварка и свариваемые материалы. В 3 т. Т. 1. Свариваемость материалов : справ. / под ред. Э.Л. Макарова. – М. : Metallurgia, 1991. – 528 с.
4. Теория сварочных процессов : учеб. пособие / В.В. Фролов [и др.] ; под ред. В.В. Фролова. – М. : Высшая школа, 1988. – 559 с.
5. Линевес, Ф. Измерение температур в технике : справочник / Ф. Линевес. – М. : Metallurgia, 1980. – 544 с.
6. Гаевский, О.К. Авиамоделирование / О.К. Гаевский. – М. : Патриот, 1990. – 408 с.
7. Абрамова, Б.Г. Цветные индикаторы температуры / Б.Г. Абрамова, В.Ф. Картавцева. – М. : Энергия, 1978. – 216 с.
8. Орешникова, Е.Г. Спектральный анализ / Е.Г. Орешникова. – М. : Высшая школа, 1982.
9. Вайнгард, Е.Х. Введение в физику кристаллизации металлов : [пер. с англ.] / Е.Х. Вайнгард. – М. : Мир, 1977. – 350 с.
10. Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. – М. : МИР, 1972. – 376 с.
11. Сварка и резка материалов : учеб. пособие / М.Д. Банов [и др.] ; под ред. Ю.В. Казакова. – М. : Академия, 2000. – 400 с.
12. Рыкалин, Н.И. Тепловые основы сварки / Н.И. Рыкалин. – М. : Издательство АН СССР, 1947. – 240 с.
13. Дьяконов, В.П. Справочник по расчётам на микрокалькуляторах / В.П. Дьяконов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1989. – 464 с.
14. Масаков, В.В. Теория сварочных процессов. Разд. 4. Химические процессы при сварке : курс лекций / В.В. Масаков. – Тольятти : ТГУ, 2002. – 280 с.
15. Теоретические основы сварки : учеб. пособие / В.В. Фролов [и др.] ; под ред. В.В. Фролова. – М. : Высшая школа, 1970. – 559 с.
16. Прохоров, Н.Н. Физические процессы в металлах при сварке. Т. 1. Элементы физики металлов и процесс кристаллизации. – М. : Metallurgia, 1970. – 600 с.
17. Дьяконов, В.В. MathCAD 2000 : учебн. курс / В.В. Дьяконов. – СПб. : Питер, 2000. – 592 с.

Раздел II. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ И ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ

Лабораторная работа 2.1 Определение эффективной мощности сварочных источников теплоты калориметрическим методом

Цель работы — освоение понятия эффективной мощности $q_{\text{и}}$ сварочных источников теплоты и калориметрического метода для исследования эффективности различных источников теплоты экспериментально или с помощью имитации процесса компьютерной программой.

Программа работы

1. Изучить теоретические сведения.
2. Получить индивидуальное задание параметра режима сварки для определения эффективной мощности дуги. Подготовить сварочный пост. Настроить параметры сварки.
3. Провести измерение начальной массы пластины и температуры T_0 воды в калориметре. Провести наплавку на пластину аргонодуговой сваркой без присадки (переплав). Опустить пластину в калориметр. Измерить конечную массу пластины и температуру $T_{\text{к}}$ воды в калориметре. Записать показания в таблицу.
4. Рассчитать эффективную тепловую мощность дуги, используя уравнение теплового баланса.
5. Повторить опыты для нескольких значений тока дуги или длины дуги.
6. Построить зависимости эффективной мощности и КПД для заданных параметров режима и сравнить их значения с литературными данными.

Уравнение теплового баланса

Только некоторая часть энергии, выделенной дугой при сварке, вводится в металл. Количество теплоты, введенное в металл в единицу времени, называется эффективной тепловой мощностью сварочного источника теплоты (дуги, электронного или светового

луча и т. д.). Отношение эффективной мощности ко всей мощности, выделяемой сварочным источником теплоты, называется эффективным КПД $\eta_{\text{и}}$ источника теплоты [1]. Для большинства сварочных источников тепла эффективный КПД сравнительно мало изменяется при изменении режимных параметров процесса. Именно этот факт позволяет при известной полной мощности источника определять с помощью КПД эффективную мощность.

Эффективная мощность $q_{\text{и}}$ сварочных источников теплоты определяется calorиметрическим методом. Выражение для подсчетов $q_{\text{и}}$ получим из уравнения теплового баланса:

$$Q = q_{\text{и}} \cdot t_{\text{г}} = Q_{\text{к}} + Q_{\Delta} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{т}}, \text{ Дж},$$

где $t_{\text{г}}$ – время действия источника тепла, с; Q – теплота, введенная в образец, Дж; $Q_{\text{к}}$ – теплота, поглощенная calorиметром, Дж; Q_{Δ} – теплота, определяющая приращение тепловой энергии внутреннего состояния образца до и после опыта (энтальпия), Дж; $Q_{\text{п}}$ – теплота, теряемая на парообразование при погружении образца в calorиметр, Дж; $Q_{\text{т}}$ – теплота, теряемая в окружающую среду при нагреве и переносе образца вследствие конвекции и радиации, Дж.

В свою очередь:

$$Q_{\text{к}} = G_{\text{в}} c_{\text{в}} (T_{\text{к}} - T_0) + (G_{\text{кк}} c_{\text{кк}} + 2G_{\text{м}} c_{\text{м}}/3)(T_{\text{к}} - T_0) = A(T_{\text{к}} - T_0),$$

где $G_{\text{в}}$, $G_{\text{кк}}$, $G_{\text{м}}$ – соответственно масса воды в calorиметре, calorиметрического сосуда и мешалки, г; $c_{\text{в}}$, $c_{\text{кк}}$, $c_{\text{м}}$ – удельные теплоемкости воды, материалов calorиметрического сосуда и мешалки (Дж/г · град); $c_{\text{кк}} = c_{\text{м}} = 0,385$ Дж/г · град (для латуни); T_0 и $T_{\text{к}}$ – температура воды до и после опыта, град; A – водяной эквивалент calorиметра, Дж/град. Водяной эквивалент calorиметра определен до проведения опытов.

$$Q_{\Delta} = G_{\text{об}} \cdot c_{\text{об}} (T_{\text{к}} - T_{\text{в}}),$$

где $G_{\text{об}}$ – масса образца после наплавки, г; $c_{\text{об}}$ – удельная теплоемкость образца, Дж/г · град; $T_{\text{в}}$ – температура образца до опыта, равная температуре окружающего воздуха, град.

Поскольку опыты проводятся без подачи присадочной проволоки, масса образца до и после опыта принимается постоянной:

$$Q_{\text{п}} = 2608G_{\text{п}},$$

где $G_{\text{п}}$ – масса испарившейся воды, г; 2608 – удельная теплота парообразования, Дж/г; значения $Q_{\text{п}}$ в зависимости от тока сварочной дуги приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Влияние сварочного тока на потери теплоты при парообразовании

I, A	100	200	400
$Q_{\text{п}}, \text{Дж}$	1670	2510	3340

Для определения $Q_{\text{п}}$ в конкретных опытах производят интерполяцию с помощью таблицы.

Потери теплоты на теплоотдачу в окружающую среду определяются как функция удельной энтальпии образца, которая за время горения дуги $t_{\text{г}}$ считается возрастающей пропорционально величине $t_{\text{г}}$, а за время переноса образца в калориметр $t_{\text{п}}$ для простоты подсчетов принимается постоянной:

$$Q_{\text{т}} = \alpha \cdot q_{\text{н}} \frac{t_{\text{г}}^2 + 2t_{\text{г}} \cdot t_{\text{п}}}{c\rho\delta},$$

где α – коэффициент поверхностной теплоотдачи образца; $\alpha = 4,18 \cdot 10^{-3}$ Вт/см² · град; $c\rho$ – объемная теплоемкость металла образца. Для малоуглеродистой стали $c\rho = 5,43$ Дж/см³ · град; s – толщина образца, см.

Подставим значение потерь $Q_{\text{т}}$ в уравнение теплового баланса:

$$Q = q_{\text{н}} t_{\text{г}} = Q_{\text{к}} + Q_{\Delta} + Q_{\text{п}} + \frac{\alpha q_{\text{н}} (t_{\text{г}}^2 + 2t_{\text{г}} t_{\text{п}})}{c\rho s}.$$

Тогда эффективная тепловая мощность дуги:

$$q_{\text{н}} = \frac{Q_{\text{к}} + Q_{\Delta} + Q_{\text{п}}}{t_{\text{г}} - \frac{\alpha (t_{\text{г}}^2 + 2t_{\text{г}} t_{\text{п}})}{c\rho s}}.$$

Особенностью выполнения работы является то, что процесс калориметрирования моделируется с помощью компьютерной программы.

Указания к выполнению работы

В качестве источника тепла исследуется свободная дуга в аргоне с неплавящимся вольфрамовым электродом. Исследование проводят на образцах из малоуглеродистой стали. Число опытов — 3 для каждого из исследуемых режимов нагрева. После проведения опыта взвешиванием определяют массу образца. Калориметрируемый образец укладывают вблизи калориметра на подставку, оклеенную теплоизолирующим материалом. Наплавку ведут по центру образца.

Перед началом работы студент берет у преподавателя задание — получить зависимость эффективной мощности дуги от каких-либо параметров дуги: тока, длины дуги, расхода защитного газа и т. д. После выполнения опытов, заполнения таблицы опытных данных ведутся заданные расчеты с помощью калькулятора.

Для обеспечения постоянства условий и точности опытов при наплавке образцов необходимо:

- предварительно установить режим;
- измерить и записать для каждого опыта значение тока, напряжение на дуге и время горения дуги;
- соблюдать постоянство времени переноса образца в калориметр после наплавки в пределах 1,5...2,5 с, измеряя его секундомером;
- периодически менять воду в калориметре;
- применять чувствительный термометр для определения температуры воды в калориметре с абсолютной погрешностью не более 0,1 градуса. Приращение температуры воды в калориметре должно составлять не менее 5 градусов.

Таблица 2.2

Форма данных опытов и расчетов

№	I , А	U_d , В	t_r , с	t_n , с	T_k	T_n	T_0	Q_k , Дж	$G_{об1}$, г	Q_{Δ} , Дж	$G_{об2}$, г	Q_p , Дж	q_n , Вт	η_n %
					град									

Содержание отчета

1. Схема экспериментальной установки.
2. Основные расчетные формулы.
3. Таблица опытных и расчетных данных.
4. Графики зависимостей эффективной мощности и КПД от режимов дуги.
5. Сравнение опытных данных с приводимыми в литературе (см. табл. 1.7) значениями эффективного КПД.
6. Анализ полученных зависимостей.

Вопросы для самоконтроля

1. Что называют эффективной тепловой мощностью сварочной дуги?
2. Что такое полная мощность источника тепла?
3. Что такое эффективный КПД источника теплоты $\eta_{\text{и}}$?
4. Как определяется эффективная мощность $q_{\text{и}}$ сварочных источников теплоты?
5. В чем сущность калориметрического метода?

Лабораторная работа 2.2 Влияние режимов сжатой дуги на ее тепловые характеристики

Цель работы — изучение характера влияния режимов сжатой сварочной дуги на ее основные тепловые характеристики.

Программа работы

1. Изучить теоретические сведения.
2. Провести опыты на экспериментальной установке по определению эффективной мощности сжатой дуги.
3. Произвести расчет эффективного КПД, значений вольтова эквивалента, коэффициента сосредоточенности теплового потока.
4. Построить и проанализировать полученные зависимости.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из источника питания для сварки сжатой дугой переменного тока, плазмотрона, баллона с плазмообразующим аргоном, измерительных приборов: амперметра, вольтметра, ротаметра. Диаметр и длина формирующего столб дуги сопла плазмотрона могут изменяться с помощью сменных вставок. Калориметрирование образца после действия дуги выполняется с помощью водяного калориметра, использованного в лабораторной работе 2.1 (ЛР 2.1). Поскольку методика калориметрирования освоена ранее, то промежуточные расчеты не выполняются, после погружения образца в калориметр на дисплей выдается опытное значение эффективной мощности из опыта. Исследование проводят на круглых образцах из алюминиевого сплава. Число опытов – 3 для каждого из исследуемых режимов нагрева. Калориметрируемый образец укладывают вблизи калориметра на подставку, оклеенную теплоизолирующим материалом. Наплавку ведут по центру образца.

Для обеспечения постоянства условий и точности опытов при наплавке образцов необходимо:

- периодически менять воду в калориметре;
- измерить и записать размер образца;
- записать параметры сопла плазмотрона;
- записать начальные и конечные показания условий калориметрирования;
- предварительно установить режим – ток и расход плазмообразующего аргона;
- измерить и записать для каждого опыта действительное значение тока, расхода газа, напряжение на дуге и время горения дуги;
- соблюдать постоянство времени переноса образца в калориметр после наплавки в пределах 1,5...2,5 с, измеряя его секундомером;
- записать окончательный результат – эффективную мощность дуги.

К основным тепловым характеристикам источника тепла относятся эффективная мощность, эффективный КПД, вольты эквивалент эффективной мощности, диаметр пятна нагрева, средний тепловой поток в пятне нагрева, осевой тепловой поток, коэффициент сосредоточенности теплового потока.

Тепловые характеристики сварочных источников тепла

Вольтов эквивалент эффективной мощности $U_э = q_и / I_д$ измеряется в Вт/А или в вольтах. Он показывает величину эффективной мощности дуги на 1 А ее тока и может использоваться для оценки тепловой эффективности различных видов сварочных дуг при одинаковых токах или одного вида дуги на различных режимах. Исследования показывают, что для свободной дуги вольтов эквивалент значительно более стабилен (меньше зависит от режимов), чем эффективный КПД. Поэтому он может быть использован для более точного определения эффективной мощности по известной полной мощности или току дуги.

При ведении тепловых расчетов в сварочной технике в большинстве случаев принимается, что *эффективная мощность* вводится в изделие в пятне нагрева по закону нормального распределения:

$$q(r) = q_о \exp(-kr^2), \quad (2.1)$$

где $q_о$ – максимальный (осевой) тепловой поток, Вт/см²; k – коэффициент сосредоточенности теплового потока, см⁻²; r – расстояние от оси источника тепла, см.

В результате интегрирования выражения (2.1) по площади пятна нагрева получается выражение:

$$q_и = \frac{q_о}{k\pi}. \quad (2.2)$$

Из перечисленных выше 4-х характеристик сосредоточенности теплового потока достаточно знать одну, чтобы с помощью значения эффективной мощности определить любую другую. Однако экспериментальное исследование каждой из 4-х характеристик связано с существенными трудностями. Поэтому сведения о значениях параметров сосредоточенности сварочных дуг зачастую противоречивы.

В данной работе на основании исследования эффективной мощности сжатой дуги, с помощью освоенной ранее (ЛР 2.1) методики калориметрирования параметры распределения рассчитываются на основании гипотезы о слабой зависимости осевого теплового потока сжатой дуги от параметров ее режима.

В основу компьютерного варианта лабораторной работы положены физическая и математическая модели сжатой дуги, горящей в аргоне, представленные в работах [2; 3].

Указания к выполнению работы

1. Провести эксперименты по заданию преподавателя, построить полученные экспериментальные зависимости $q_{\text{н}}$ от тока, расхода аргона и диаметра сопла или его длины в зависимости от полученного задания.
2. Рассчитать значения эффективного КПД и построить аналогичные графики.
3. Рассчитать значения вольтова эквивалента и построить аналогичные графики.
4. Рассчитать диаметр пятна нагрева с помощью гипотезы о постоянстве среднего теплового потока, равного 1000 Вт/см^2 .
5. Рассчитать коэффициент сосредоточенности теплового потока по формуле

$$D = \frac{3,46}{\sqrt{k}},$$

где D – диаметр пятна нагрева, см.

6. Построить зависимости коэффициента сосредоточенности от тока, расхода аргона и диаметра сопла. Проанализировать каждую из полученных графических зависимостей.
7. Сравнить тепловые характеристики сжатой и свободной дуг (из ЛР 2.1).

Таблица 2.3

Ток _____ Расход _____ Диаметр сопла _____ Длина сопла _____
Экспериментальные и расчетные данные

Параметр	$q_{\text{н}}$, Вт	$U_{\text{с}}$, В	D , см	k , см^{-2}

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Эскиз экспериментальной установки.
3. Таблица с результатами экспериментов.
4. Формулы, используемые для расчета.
5. Графические зависимости эффективной мощности $q_{\text{н}}$ от заданных параметров режима.
6. Анализ полученных зависимостей и выводы по работе.

Вопросы для самоконтроля

1. Что определяет вольтов эквивалент эффективной мощности?
2. Какие основные характеристики используются для характеристики сосредоточенности теплового потока?
3. Что такое эффективная тепловая мощность и от чего она зависит?
4. Как можно определить коэффициент сосредоточенности теплового потока?
5. Эффективная мощность какой дуги выше — свободной или сжатой?

Лабораторная работа 2.3

Теплоотвод в сопло плазмотрона от столба сжатой дуги

Цель работы — изучение влияния параметров режима сжатой дуги на теплоотвод в сопло плазмотрона прямого действия.

Программа работы

1. Изучить теоретические сведения.
2. Определить экспериментальные зависимости тепловой мощности, отводимой в сопло плазмотрона, от параметров дуги.
3. Представить полученные зависимости в виде графиков.
4. Объяснить полученные экспериментальные зависимости.

Описание экспериментальной установки

При конструировании сварочных плазмотронов необходимо знать тепловую мощность, отводимую в него за счет различных источников тепла. Тепло выделяется за счет протекания тока по электроду и токоподводящим элементам, теплопередачи от участка столба дуги, расположенного внутри плазмотрона, и за счет передачи тепла от нагретого плазмообразующего газа, отражающегося от свариваемых деталей. Наибольший вклад в нагрев плазмотрона вносит столб дуги на закрытом участке. Эта составляющая тепловой мощности в значительной степени определяет работоспособность плазмотрона. Выделяемую в плазмотрон мощность необходимо отводить за счет какой-либо системы охлаждения.

В данной работе экспериментально, за счет калориметрирования протекающей через сопло плазмотрона охлаждающей воды ис-

следуются зависимости тепловой мощности, отводимой в сопло, от параметров сжатой дуги. Помимо практического значения результаты подобных исследований имеют и теоретическое значение, поскольку позволяют сравнивать интегральные расчетные характеристики сжатой дуги с опытными значениями.

В основу компьютерного варианта данной лабораторной работы положены физическая и математическая модели сжатой дуги, горячей в аргоне, представленные в работах [2; 3], на основании которых была разработана методика расчета тепловой мощности, отводимой в сопло плазмотрона [4].

Работа выполняется на экспериментальной установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 2.1. Установка состоит из источника питания сжатой дуги, измерительных приборов (вольтметра и амперметра), цепи питания дежурной дуги, баллона плазмообразующего аргона, плазмотрона, работающего на прямой полярности. Расход плазмообразующего аргона регулируется с помощью манометра на баллоне и измеряется специальным расходомером. Расстояние от сопла плазмотрона до детали в процессе опытов остается постоянным и составляет $\ell_0 = 3$ мм.

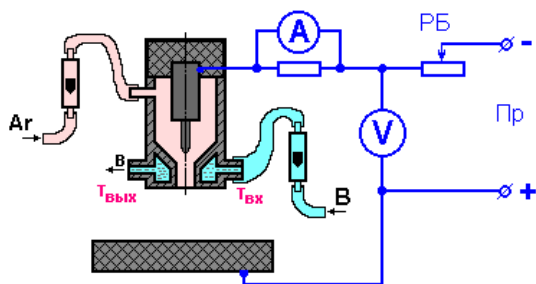


Рис. 2.1. Принципиальная схема установки

В плазмотроне возможно изменять геометрические размеры сопла, формирующего сжатый участок столба дуги (рис. 2.2), за счет установки в сопло сменных вставок различной длины ℓ_c и диаметра канала d_c .

Тепловая мощность, отводимая в сопло, измеряется методом точного калориметрирования сопла плазмотрона. Для этого измеряется температура воды на входе в сопло и на выходе из него. Расход охлаждающей воды измеряется с помощью водяного ротаметра.

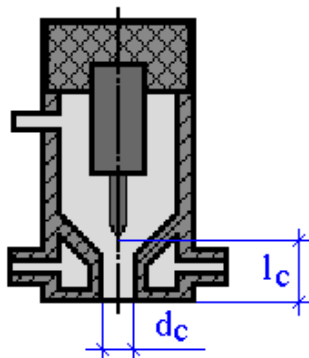


Рис. 2.2. Схема плазмотрона

Указания к выполнению работы

1. После зажигания сжатой дуги необходимо обеспечить установившийся режим работы плазмотрона, когда тепловые мощности, выделяемые дугой и отводимые охладителем, сравняются. О таком состоянии можно судить по прекращению изменения температуры воды на выходе из сопла плазмотрона. Это занимает около 10 секунд. После этого следует произвести замеры (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Результаты измерений

№ опыта	d_c , мм	l_c , мм	I_d , А	G_n , г/с	G_b , г/с	$T_{вх}$, °С	$T_{вых}$, °С

2. Расчет мощности, отводимой в сопло плазмотрона, следует производить по формуле

$$Q_c = G_b (T_{вых} - T_{вх}) c_b,$$

где c_b – удельная теплоемкость воды; $c_b = 4,18$ Дж/(г · °С).

Кроме тепловой мощности Q_c следует рассчитать средний тепловой потенциал аргона в канале, характеризующий среднюю температуру газа и вольтов эквивалент напряжения, соответствующий мощности Q_c , а также среднюю плотность теплового потока в стенку сопла.

$$S_c = \frac{Q_c}{8\pi l_c}; U_q = \frac{Q_c}{I_d}; q_c = \frac{Q_c}{\pi d_c l_c}.$$

Таблица 2.5

Расчетные данные

№ опыта	Q_c , Вт	S_c , Вт/см	U_q , В	q_c , Вт/см ²

Содержание отчета

1. Схема экспериментальной установки.
2. Таблица экспериментальных и расчетных данных.
3. Графики полученных зависимостей.
4. Объяснение вида полученных зависимостей.

Вопросы для самоконтроля

1. От каких факторов зависит мощность, отводимая в сопло плазмотрона?
2. Какая часть плазмотрона подвергается наибольшему нагреву?
3. В чем сущность метода проточного калориметрирования?
4. Что такое установившийся режим работы плазмотрона?
5. Через какое время наступает установившийся режим работы плазмотрона?

Лабораторная работа 2.4

Изучение изолирующей прослойки между столбом сжатой дуги и стенкой сопла плазмотрона

Цель работы – изучение влияния параметров режима сжатой дуги на толщину прослойки, изолирующей столб дуги от стенок сопла плазмотрона прямого действия.

Программа работы

1. Определить расчетные зависимости для распределения теплового потенциала и толщины прослойки по длине канала для одного из режимов дуги (формулы (2.5) и (2.7)).
2. Представить полученные зависимости в виде графиков.
3. По полученной зависимости толщины прослойки по длине канала получить расчетное значение средней толщины прослойки $\Delta_{\text{ср}}$.
4. Провести эксперимент на заданном режиме и определить опытное значение Q_c .
5. Рассчитать значение средней толщины прослойки по данным опыта (формулы (2.8) и (2.9)).
6. Сравнить значения средних величин прослоек, полученных по двум методам.

Сущность работы

С учетом некоторых допущений дифференциальное уравнение баланса энергии столба сжатой дуги имеет вид:

$$\sigma E_z^2 - \rho V_z C_p \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{1}{r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \lambda r \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) - U_{\text{л}} = 0, \quad (2.3)$$

где T – температура газа; σ – электропроводность; E_z – напряженность электрического поля; ρ – плотность; V_z – осевая скорость; C_p – теплоемкость; z и r – осевая и радиальная координаты; λ – теплопроводность; $U_{\text{л}}$ – удельная энергия излучения.

Первое значение уравнения (2.3) представляет собой электрическую энергию, выделяемую в элементарном объеме столба. Второе значение показывает энергию, поглощаемую плазмообразующим газом, а третье – энергию, отводимую в поперечном направлении

теплопроводностью. Четвертое значение представляет потери столбом энергии за счет излучения.

После введения функции теплового потенциала S , учета зависимости теплофизических коэффициентов плазмы аргона от температуры и усреднения параметров плазмы по сечению столба уравнение для среднего потенциала принимает вид:

$$d \frac{\bar{S}}{dz} - \frac{3I_d^2 \bar{S}^{5/4}}{\pi \vartheta B R_c^2 (2\bar{S} - S_{II})^{3/2}} + \frac{8\pi \bar{S}^{5/4}}{\vartheta G_{II}} = 0, \quad (2.4)$$

где G_{II} – расход плазмообразующего аргона, г/с; S_{II} – тепловой потенциал, при котором аргон становится электропроводным, Вт/см; I_d – ток дуги, А; R_c – радиус сопла, см; ϑ и B – коэффициенты аппроксимации зависимостей теплофизических характеристик от теплового потенциала S ; $B = 7,5$ 1/Ом×Вт×см.

$$S = \int_0^T \lambda(T) dT.$$

При некоторых упрощениях уравнение (2.4) имеет аналитическое решение:

$$S(z) = 1,47 \cdot 10^{-2} \left(\frac{I_d}{R_c} \right)^{4/3} \left[1 - \exp\left(-\frac{z}{10G_{II}} \right) \right]^{2/3}. \quad (2.5)$$

В свою очередь, распределение теплового потенциала в поперечном сечении канала является параболическим (рис. 2.1):

$$S = 2\bar{S} \left(1 - \frac{r^2}{R_c^2} \right). \quad (2.6)$$

Из формулы (2.5) следует, что на оси столба ($r = 0$) тепловой потенциал в 2 раза выше среднего по сечению. Приравняв в формуле (2.6) правую часть значению потенциала S_{II} , при котором аргон становится электропроводным, получим выражение для толщины изолирующей прослойки Δ :

$$\Delta(z) = 2R_c \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{S_{II}}{2\bar{S}} \right)} \right]. \quad (2.7)$$

Используя зависимость толщины прослойки по длине канала сопла, можно определить среднюю толщину изолирующей прослойки Δ_{cp} .

С другой стороны, из теории теплопроводности [5] известно, что тепловой поток q_c через цилиндрический слой толщиной Δ определяется по формуле

$$q_c = \frac{S_{\Pi}}{R_c \ln\left(\frac{R_c}{r_{\Pi}}\right)}, \quad (2.8)$$

где r_{Π} — радиус, при котором газ становится неэлектропроводным (граница прослойки со стороны столба).

Преобразовав формулу (2.7), получаем значение Δ в виде:

$$\Delta = R_c \left[1 - \exp\left(\frac{-S_{\Pi}}{q_c R_c}\right) \right]. \quad (2.9)$$

Значение S_{Π} для аргона составляет 5,6 Вт/см. Среднее экспериментальное значение теплового потока в канале сопла плазмотрона \bar{q}_c можно определить по формуле

$$\bar{q}_c = \frac{Q_c}{2\pi R_c \ell_c}, \quad (2.10)$$

где Q_c — полная мощность, отводимая в сопло плазмотрона, Вт; ℓ_c — длина канала сопла, см.

Используя в формуле (2.8) среднее значение \bar{q}_c , можно рассчитать среднее значение толщины прослойки Δ_{cp} и сопоставить его с толщиной прослойки, даваемой изложенной выше математической моделью процессов, происходящих в столбе сжатой дуги. Совпадение результатов будет свидетельствовать об адекватности математической модели процессам в столбе дуги и позволит проводить теоретическое исследование ее основных характеристик.

Изучение толщины изолирующей прослойки между столбом дуги и стенкой сопла плазмотрона имеет важное значение, поскольку прослойка определяет устойчивость дуги против аварийного режима, а также позволяет оценить роль плазмообразующего газа в повышении мощности дуги.

Работа выполняется на экспериментальной установке, описанной в лабораторной работе 2.3.

Указания к выполнению работы

1. После зажигания сжатой дуги необходимо выйти на установившийся режим работы плазмотрона, когда тепловые мощности,

выделяемые дугой и отводимые охладителем, сравниваются. О таком состоянии можно судить по прекращению изменения температуры воды на выходе из сопла плазмотрона. Это занимает около 10 секунд. После этого следует произвести замеры и заполнить табл. 2.6.

Таблица 2.6

Результаты измерений

№ опыта	d_c , мм	l_c , мм	I_d , А	G_p , г/с	G_b , г/с	$T_{вх}$, °С	$T_{вых}$, °С

2. Расчет мощности, отводимой в сопло плазмотрона, необходимо производить по формуле:

$$Q_c = G_b (T_{вых} - T_{вх}) c_b,$$

где c_b – удельная теплоемкость воды; $c_b = 4,18$ Дж/(г · °С).

3. Таблица расчетов

Значение коэффициентов в формуле (2.5) _____

Таблица 2.7

Результаты расчетов

z , см	$-z/10G$	$\exp(-z/10G)$	$1 - \exp(-z/10G)$	$(4)^{2/3}$	S , Вт/см	Δ , см
1	2	3	4	5	6	7

Значение Δ_{cp} расчетное _____ Значение Δ_{cp} из опыта _____

Содержание отчета

1. Схема экспериментальной установки.
2. Таблица экспериментальных данных.
3. Таблица расчетных данных.
4. Графики полученных зависимостей.
5. Объяснение вида полученных зависимостей и сравнение расчетных и опытных данных.

Вопросы для самоконтроля

1. Как можно определить значение средней толщины прослойки?
2. Из чего состоит уравнение баланса энергии столба сжатой дуги?
3. Как распределяется тепловой потенциал в поперечном сечении канала?
4. Как определяется тепловая мощность, отводимая в сопло?

Лабораторная работа 2.5 **Исследование напряженности электрического поля** **в канале плазмотрона сжатой дуги**

Цель работы – освоение методики определения падения напряжения в канале сопла с помощью зондирования столба и изучение влияния параметров режима сжатой дуги на падение напряжения в столбе дуги на закрытом участке.

Программа работы

1. Определить экспериментальные зависимости для падения напряжения в канале сопла плазмотрона от параметров дуги.
2. Рассчитать среднюю напряженность электрического поля по длине канала сопла.
3. Представить полученные зависимости в виде графиков.
4. Объяснить полученные экспериментальные зависимости.

Описание экспериментальной установки **и методика эксперимента**

Распределение напряженности электрического поля в столбе сжатой дуги имеет важное значение, так как оно определяет величину падения напряжения на одном из основных участков столба дуги. Определение падений напряжения на каждом из участков позволит определить напряжение на дуге в целом, то есть ее статические характеристики. Форма же статических характеристик дуги определяет требования к источнику питания. Кроме того, падение напряжения на закрытом участке столба дуги играет важную роль в процессе возникновения аварийного режима работы плазмотрона.

Работа выполняется на экспериментальной установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 2.1. Установка состоит из источника питания сжатой дуги, измерительных приборов (вольтметра и амперметра), цепи питания дежурной дуги, баллона плазмообразующего аргона, плазмотрона, работающего на прямой полярности. Расход плазмообразующего аргона регулируется с помощью манометра на баллоне и измеряется специальным расходомером. Расстояние от сопла плазмотрона до детали в процессе опытов остается постоянным и составляет $\ell_0 = 3$ мм.

В плазмотроне возможно изменять геометрические размеры его сопла, формирующего сжатый участок столба дуги (рис. 2.2), за счет установки в сопло сменных вставок различной длины ℓ_c и диаметра канала d_c .

Измерение падения напряжения в канале сопла производится путем измерения с помощью зонда его потенциала относительно электрода-катода (рис. 2.1). Зонд представляет собой тонкую проволоку из вольфрама ($d_{\text{пр}} = 0,3$ мм). Проволока помещается в трубку из тепло- и электроизоляционного материала (кварцевое стекло). Конец проволоки, пересекающий столб дуги ($\ell = 5$ мм), остается неизолированным, а к другому концу припаивается гибкий проводник, подсоединяемый к измерительному прибору. Ко второму входу измерительного прибора подключается электрод-катод плазмотрона. В качестве измерительного прибора может служить вольтметр с высоким входным сопротивлением (например, электронно-лучевой осциллограф). В процессе замеров сварочный плазмотрон с горячей дугой перемещается с определенной скоростью через зонд. При этом зонд нагревается вследствие высокой температуры дуги и показывает приближенное падение напряжения между сечением сопла, в котором он находится, и электродом.

Вследствие того что температура поверхности зонда в процессе опыта остается намного ниже температуры столба дуги, возникает дополнительная погрешность измерений. Из-за значительно большей подвижности электронов плазмы по сравнению с ионами между зондом и плазмой столба дуги возникает так называемый «контактный потенциал», величину которого можно оценить по формуле

$$e_f = \frac{\frac{kT_e}{e}}{0,5 \ln \frac{\pi m}{2M}},$$

где k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T_e – электронная температура, К; e – заряд электрона; m – масса электрона; M – масса атома газа.

Для аргона $M = 1,67 \cdot 32 \cdot 10^{-27}$ кг.

Если принять $T_e = 1 \cdot 10^4$ К, то расчет дает $e_f = 4,5$ В.

Таким образом, зонд заряжается отрицательно относительно плазмы на величину контактного потенциала e_f . Следовательно, из величины разности потенциалов, полученной в результате замера с помощью зонда, следует вычесть расчетное значение e_f .

Кроме того, измерение с помощью зонда не может производиться непосредственно у среза сопла, а только на расстоянии не менее 1 мм от него. Поэтому из результатов замера необходимо вычесть падение напряжения на участке столба от среза сопла до сечения, в котором располагается зонд. Эту поправку можно определить расчетным путем. С этой целью для конечного сечения сопла рассчитывается средний тепловой потенциал S_k по формуле (2.5) и напряженность E_k по формуле (2.15). Затем в предположении, что это значение напряженности соответствует напряженности на участке «сопло – зонд», определяется поправка ΔU_c :

$$\Delta U_c = E_k \ell_3,$$

где E_k – расчетная напряженность в конечном сечении сопла, В/см; ℓ_3 – расстояние от среза сопла до зонда, см.

Из полученной величины вычитается приэлектродное (катодное) падение напряжения для вольфрама и падение напряжения в вылете вольфрамового электрода. Суммарное значение данной поправки можно принять $U_k = 6$ В.

Таким образом, падение напряжения в столбе дуги в канале сопла определится по формуле

$$U_c = U_3 - e_f - \Delta U_c - U_k.$$

В компьютерной программе, обеспечивающей выполнение работы, для получения значений напряжения в канале сопла используется математическая модель дуги, изложенная в работах [3; 4].

Указания к выполнению работы

1. Ознакомиться с теоретическими сведениями и порядком проведения работы.

2. Измерить исходные данные (геометрические размеры плазмотрона) и настроить параметры режима и измеряемые приборы.

3. Зажечь дугу и провести измерения для заполнения табл. 2.8.

Таблица 2.8

Результаты измерений

№ опыта	d_c , мм	ℓ_c , мм	I_d , А	G_n , г/с	ℓ_s , мм	U_s , В
1	2	3	4	5	6	7

4. Провести расчеты среднего теплового потенциала S_k и расчетной напряженности E_k в конечном сечении сопла для табл. 2.9.

Таблица 2.9

Результаты расчетов

z , см	$-z/10G$	$\exp(-z/10G)$	$1 - \exp(-z/10G)$	$(4)^{2/3}$	S_k , Вт/см	E_k , В/см
1	2	3	4	5	6	7

5. Определить среднюю напряженность электрического поля в канале сопла.

Содержание отчета

1. Схема экспериментальной установки.
2. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
3. Графики полученных зависимостей.
4. Анализ полученных зависимостей.

Вопросы для самоконтроля

1. Для чего необходимо знать напряженность электрического поля в столбе сжатой дуги?
2. Каким образом измеряется падение напряжения в канале сопла?
3. Какие факторы влияют на напряженность столба дуги в канале сопла?
4. Почему сопло заряжается отрицательно относительно столба дуги?
5. Чему примерно равен потенциал сопла относительно столба дуги?

Лабораторная работа 2.6

Исследование выделения энергии в канале плазмотрона сжатой дуги

Цель работы — изучение влияния параметров режима сжатой дуги на зависимости выделения и поглощения энергии в канале сопла плазмотрона.

Программа работы

1. Определить экспериментальные зависимости для мощности, поглощаемой плазмообразующим газом, и электрической мощности, выделяемой в канале сопла плазмотрона, от параметров дуги.
2. Рассчитать и построить зависимости для КПД нагрева струи газа в канале плазмотрона и вольтова эквивалента нагрева струи.
3. Представить полученные зависимости в виде графиков.
4. Объяснить полученные экспериментальные зависимости.
5. Дать рекомендации по выбору режимов работы плазмотрона.

Описание экспериментальной установки

Тепловая мощность, отводимая теплопроводностью в сопло плазмотрона, определяется интегралом:

$$Q_C = 8\pi \int_0^{l_c} S(z) dz. \quad (2.11)$$

Электрическая энергия, выделяемая на участке столба в канале сопла плазмотрона, определяется интегралом:

$$P_c = I_D \int_0^{l_c} E(z) dz, \quad (2.12)$$

где E — напряженность электрического поля в канале в сечении, отстоящем на расстояние z от начального сечения канала.

Разность между мощностью, отводимой в сопло плазмотрона Q_c , и электрической мощностью P_c дает мощность, поглощаемую плазмообразующим аргонем P_r :

$$P_r = P_c - Q_c. \quad (2.13)$$

Зная P_r , можно рассчитать среднее теплосодержание плазмообразующего аргона H_r :

$$H_r = P_r / G_n. \quad (2.14)$$

По известным из физики зависимостям плотности газа от его температуры (теплосодержания) $\rho = f(H)$ определяем значение плотности ρ . При этом следует сделать допущение о величине статического давления газа в потоке. Исходя из особенностей процесса плазменной сварки, для которого характерны небольшие значения расхода (до $1 \text{ г/см}^2\text{с}$), можно принять давление, равным атмосферному.

Величина напряженности электрического поля в формуле (2.12) определяется в результате численного решения уравнения (2.4) в ЛР 2.4 для теплового потенциала и последующего расчета E по формуле

$$E(z) = \frac{3I_{\text{д}}S_{\text{с}}}{\pi R_{\text{с}}^2 B(2S_{\text{с}} - S_{\text{п}})^2} \cdot \quad (2.15)$$

Таким образом, поглощение энергии струей газа определяется видом зависимости среднего теплового потенциала \bar{S} (температуры) от параметров режима дуги. По виду зависимостей для $Q_{\text{с}}$ можно судить о влиянии параметров дуги на тепловой потенциал (температуру) плазмообразующего аргона. Решение выражений (2.12–2.15) реализуется численным методом с помощью компьютерной программы на одном из языков программирования.

Работа выполняется на экспериментальной установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 2.1. Установка состоит из источника питания сжатой дуги, измерительных приборов (вольтметра и амперметра), цепи питания дежурной дуги, баллона плазмообразующего аргона, плазмотрона, работающего на прямой полярности. Расход плазмообразующего аргона регулируется с помощью манометра на баллоне и измеряется специальным расходомером. Расстояние от сопла плазмотрона до детали в процессе опытов остается постоянным и составляет $\ell_{\circ} = 3 \text{ мм}$.

В плазмотроне возможно изменять геометрические размеры его сопла, формирующего сжатый участок столба дуги (рис. 2.2), за счет установки в сопло сменных вставок различной длины $\ell_{\text{с}}$ и диаметра канала $d_{\text{с}}$.

Измерение падения напряжения в канале сопла производится путем измерения потенциала сопла относительно электрода-катода. Из полученной величины вычитается приэлектродное (катодное)

падение напряжения для вольфрама, составляющее 5 В. Измерение теплоотода в сопло производится с помощью методики проточного калориметрирования сопла плазмотрона (см. ЛР 2.3).

Указания к выполнению работы

1. После зажигания сжатой дуги необходимо выйти на установившийся режим работы плазмотрона, когда тепловые мощности, выделяемые дугой и отводимые охладителем, сравниваются. О таком состоянии можно судить по прекращению изменения температуры воды на выходе из сопла плазмотрона. Это занимает около 10...15 секунд. После этого следует произвести замеры и записать в табл. 2.10.

Таблица 2.10

Результаты измерений

№ опыта	d_c , мм	ℓ_c , мм	I_d , А	G_n , г/с	U_c , В	Q_c , Вт
1	2	3	4	5	6	7

2. Провести расчеты мощности, поглощаемой плазмообразующим аргоном P_p , среднего теплосодержания плазмообразующего аргона H_p , электрической мощности P_c и записать в табл. 2.11.

Таблица 2.11

Результаты расчетов

№ опыта	P_p , Вт	H_p , Дж/г	T_p , °С	U_p , В	P_p/P_c , %
1	2	3	4	5	6

3. Построить графические зависимости.
4. Дать рекомендации по выбору режимов работы плазмотрона.

Содержание отчета

1. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
2. Графики полученных зависимостей (P_c , Q_c , P_p и т. д.) от параметров режима, заданных преподавателем (d_c , ℓ_c , I_d , и т. д.).
3. Объяснение вида полученных зависимостей.
4. Рекомендации по выбору режимов работы плазмотрона.

Вопросы для самоконтроля

1. Как можно определить энергию в канале плазмотрона сжатой дуги?
2. Как определить мощность, поглощаемую струей плазмообразующего аргона P_r ?
3. Что необходимо знать для определения тепловой мощности, отводимой теплопроводностью в сопло плазмотрона?
4. Как определить электрическую энергию, выделяемую на участке столба в канале сопла плазмотрона?

Лабораторная работа 2.7 **Определение области безаварийных режимов** **работы плазмотрона**

Цель работы – изучение влияния параметров режима сжатой дуги на возможность возникновения аварийного режима двойного дугообразования в плазмотроне прямого действия.

Программа работы

1. Для заданных геометрических характеристик сопла плазмотрона и установленного расхода плазмообразующего аргона определить критический ток, при котором возникает аварийный режим.
2. Повторить аналогичные эксперименты, изменяя расход плазмообразующего аргона.
3. Построить график, показывающий границу между областями аварийных и безаварийных режимов.
4. Повторить аналогичные эксперименты, изменив геометрические характеристики сопла плазмотрона.
5. Проанализировать полученные зависимости.

Описание экспериментальной установки

Работа выполняется на экспериментальной установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 2.1. Установка состоит из источника питания сжатой дуги, измерительных приборов (вольтметра и амперметра), цепи питания дежурной дуги, баллона плазмообразующего аргона, плазмотрона, работающего на прямой полярности. Расход плазмообразующего аргона регулируется с по-

мощью манометра на баллоне и измеряется специальным расходомером. Расстояние от сопла плазмотрона до детали в процессе опытов остается постоянным и составляет $\ell_0 = 5$ мм.

В плазмотроне возможно изменять геометрические размеры его сопла, формирующего сжатый участок столба дуги (рис. 2.2), за счет установки в сопло сменных вставок различной длины ℓ_c и диаметра d_c канала.

Появление аварийного режима фиксируется по падению напряжения между электродом и соплом плазмотрона, которое составляет 1–2 В, и визуально при наблюдении за дугой через светофильтр.

Указания к выполнению работы

Аварийный режим следует фиксировать, постепенно увеличивая ток дуги путем изменения сопротивления в источнике питания. Сразу после фиксации аварийного режима следует отключить дугу. Записать показания в табл. 2.12.

Таблица 2.12

Результаты измерений

№ опыта	d_c , мм	ℓ_c , мм	G_n , г/с	$I_{кр}$, А
1	2	3	4	5

Содержание отчета

1. Схема экспериментальной установки.
2. Таблица экспериментальных данных.
3. Графики полученных зависимостей.
4. Объяснение вида полученных зависимостей.

Вопросы для самоконтроля

1. Чем вызвано появление аварийного режима работы?
2. При каких геометрических характеристиках сопла плазмотрона возможен аварийный режим?
3. Может ли расход плазмообразующего аргона вызвать аварийный режим?
4. Как можно зафиксировать аварийный режим?

Лабораторная работа 2.8

Исследование газокинетического давления сжатой дуги

Цель работы — изучение влияния параметров режима сжатой дуги на величину среднего газокинетического давления плазменной струи.

Программа работы

1. Определить экспериментальные зависимости среднего давления плазменной струи плазмотрона от параметров дуги.
2. Представить полученные зависимости в виде графиков.
3. Объяснить полученные экспериментальные зависимости.

Описание экспериментальной установки

Давление, оказываемое сварочной дугой на жидкую ванну, является одним из важнейших факторов формирования сварного шва. Преимуществом сжатой дуги перед свободной дугой является то, что давление дуги можно регулировать в значительно большем диапазоне. За счет увеличения давления осуществляется процесс плазменной резки. При сварке повышенное давление дуги позволяет погрузить активное пятно в металл и увеличить глубину проплавления, скорость сварки, уменьшить ширину шва и зоны термического влияния. В ряде случаев за счет повышенного давления дуги сварку ведут так называемой «проникающей» дугой.

Однако главным преимуществом сжатой дуги является не само по себе повышение её давления, а повышение так называемой гибкости технологического процесса. На давление сжатой дуги существенно влияют пять параметров процесса: ток дуги, расход плазмообразующего аргона, диаметр сопла, длина канала сопла, расстояние от сопла до изделия. Варьирование этих режимов позволяет найти оптимальные режимы сварки с позиций как теплового, так и силового воздействия дуги.

Расчетную оценку среднего газокинетического давления сжатой дуги можно произвести следующим образом. Разность между электрической мощностью P_c и мощностью, отводимой в сопло плазмотрона Q_c , и дает мощность, поглощаемую плазмообразующим аргоном P_1 :

$$P_r = P_c - Q_c. \quad (2.16)$$

Зная P_r , можно рассчитать среднее теплосодержание плазмообразующего аргона H_r :

$$H_r = P_r / G_{п}. \quad (2.17)$$

По известным из физики зависимостям плотности газа от его температуры (теплосодержания) $\rho = f(H)$ определим значение плотности ρ . При этом следует сделать допущение о величине статического давления газа в потоке. Исходя из особенностей процесса плазменной сварки, для которого характерны небольшие значения расхода (до 1 г/см²с), можно принять статическое давление равным атмосферному.

В соответствии с соотношениями (2.16) и (2.17) среднее давление будет зависеть от характера влияния режимов на выделение энергии в канале и теплоотвод в сопло.

В работе проводится опытное исследование среднего давления плазменной струи на срезе сопла плазмотрона. Для имитации процесса измерений используется приведенная ранее математическая модель дуги [5].

Работа выполняется на экспериментальной установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 2.1. Установка состоит из источника питания сжатой дуги, измерительных приборов (вольтметра и амперметра), цепи питания дежурной дуги, баллона плазмообразующего аргона, плазмотрона, работающего на прямой полярности. Расход плазмообразующего аргона регулируется с помощью манометра на баллоне и измеряется специальным расходомером. Расстояние от сопла плазмотрона до детали в процессе опытов остается постоянным и составляет $\ell_0 = 5$ мм.

В плазмотроне возможно изменять геометрические размеры его сопла, формирующего сжатый участок столба дуги (рис. 2.2), за счет установки в сопло сменных вставок различной длины ℓ_c и диаметра канала d_c .

Газокинетическое давление плазменной струи измеряется методом стробирующего отверстия [6]. Давление струи через узкое отверстие в охлаждаемом аноде воспринимается чувствительным элементом, усиливается с помощью специальной электронной схемы и

передается на записывающий потенциометр. При этом анод может медленно перемещаться относительно неподвижного плазмотрона. Это позволяет измерить распределение давления на изделии. Измерительное устройство интегрирует замеренные значения давления, определяет диаметр пятна давления и выдает значения среднего газокINETического давления струи.

Указания к выполнению работы

После зажигания дуги в течение нескольких секунд необходимо определить значение максимального осевого давления струи p_0 по показанию цифрового прибора.

Изменить параметры режима дуги (ток, длину канала, диаметр сопла и т. д.) по указанию преподавателя. Записать показания (табл. 2.13) и построить зависимости.

Таблица 2.13

Результаты измерений

№ опыта	d_c , мм	l_c , мм	I_d , А	G_n , г/с	g , г/см ² с	P_c , Па	ρ , г/см ³

Содержание отчета

1. Схема экспериментальной установки.
2. Таблица экспериментальных и расчетных данных.
3. Графики полученных зависимостей.
4. Объяснение вида полученных зависимостей.

Вопросы для самоконтроля

1. Как определить мощность, поглощаемую струей плазмообразующего аргона P_r ?
2. Как определить среднее газокINETическое давление сжатой дуги?
3. Как экспериментальным путем можно определить давление сжатой дуги?

Лабораторная работа 2.9

Исследование размеров сварочной ванны при действии неподвижной дуги на поверхность пластины

Цель работы — изучение влияния параметров режима сжатой дуги на размеры сварочной ванны.

Программа работы

1. Изучить зависимости глубины проплавления точки и ее диаметра на ближней к дуге плоскости от заданного параметра режима.
2. На заданном режиме получить зависимости глубины проплавления и диаметра ванны от времени горения дуги.
3. Получить зависимость равного влияния на диаметр точки параметра режима (например, тока дуги) и времени горения дуги.
4. Получить зависимость диаметра ванны в средней плоскости пластины от времени сварки.

Описание экспериментальной установки

Неподвижные сварочные источники тепла встречаются при точечной сварке. Температурное поле и размеры сварочной ванны получаются осесимметричными. Исследование размеров ванны при неподвижном источнике более просто, чем при движущемся, однако позволяет выявить основные закономерности проплавления металла при сварке. В качестве детали рассматривается сплошная пластина.

Экспериментальная установка состоит из сварочной горелки, подключенной к источнику питания, измерительных приборов (вольтметра, амперметра, ротаметра). Время горения дуги на деталь регистрируется секундомером. Расстояние от электрода до детали или от сопла плазмотрона до детали ℓ_0 измеряется с помощью индикатора часового типа. Измерение диаметра сварной точки производится после окончания опыта с помощью штангенциркуля. Глубина проплавления H сварной точки определяется путем изготовления макрошлифа.

Указания к выполнению работы

После возбуждения дуги и горения в течение нескольких секунд необходимо записать параметры процесса. После изменения параметров процесса (материал и толщина образца, ток дуги I_d , время горения t_p , длина сопла ℓ_c , расстояние от сопла до детали ℓ_o , диаметр сопла d_c , расход газа G_n и т. д.) по указанию преподавателя продолжить запись показаний в табл. 2.14.

После остывания образцов по изготовленным макрошлифам измерить штангенциркулем диаметр точки пятна нагрева на поверхности изделия D_1 и в корне точки D_2 . Определить глубину проплавления H .

Построить зависимости от заданных параметров.

Таблица 2.14

Результаты измерений

$I_d, \text{ А}$	$U_d, \text{ В}$	$t_p, \text{ с}$	$d_c, \text{ мм}$	$\ell_c, \text{ мм}$	$\ell_o, \text{ мм}$	$S, \text{ мм}$
$G_n, \text{ г/с}$	$D_1, \text{ мм}$	$D_2, \text{ мм}$	$H, \text{ мм}$			

Содержание отчета

1. Схема экспериментальной установки.
2. Таблица с результатами.
3. Графики полученных зависимостей.
4. Анализ полученных результатов.

Вопросы для самоконтроля

1. Как может производиться начальное возбуждение дуги?
2. Какой параметр процесса оказывает наибольшее влияние на глубину проплавления?
3. Какой параметр процесса наиболее экономичный для регулирования?
4. Какой параметр наиболее прост и имеет наименьшую трудоемкость при регулировании?

Лабораторная работа 2.10

Исследование влияния параметров неподвижного источника тепла и теплофизических свойств металла на температуру сварочной ванны

Цель работы – изучение влияния основных параметров источника тепла и теплофизических свойств металла на характер изменения температуры в сварочной ванне.

Содержание работы

Неподвижные сварочные источники тепла встречаются при точечной сварке (сварке электродзаклепками). Температурное поле и размеры сварочной ванны получаются осесимметричными. Исследование размеров ванны при неподвижном источнике более просто, чем при движущемся, однако позволяет выявить основные закономерности проплавления металла при сварке. В качестве детали рассматривается сплошная пластина.

Температуру жидкого металла в сварочной ванне необходимо знать для решения ряда задач – оценки испарения металла с поверхности ванны, определения физических свойств жидкого металла, скорости химических реакций, склонности к выгоранию химических элементов и др.

Эксперимент проводится путем математического моделирования процесса нагрева зоны сварки. Согласно математической модели источник тепла распределен по нормальному закону по поверхности пластины толщиной s . Известна эффективная мощность источника тепла и коэффициент сосредоточенности теплового потока, а также теплофизические коэффициенты металла – теплопроводность λ , температуропроводность α . Не учитываются поверхностная теплоотдача в процессе действия источника и влияние скрытой теплоты плавления металла. В процессе численного опыта задаются исходные параметры, в том числе время действия источника, и компьютерная программа определяет диаметр сварочной ванны на заданной глубине от поверхности пластины Z . Если температура определяется на поверхности пластины, на которой действует источник, то $Z = 0$. При определении температур на

обратной плоскости пластины $Z = s$. Можно проводить «опыты» и в интервале $0-Z$.

После определения диаметра ванны программа рассчитывает температуры внутри ее в достаточно большом количестве точек и определяет среднюю температуру ванны в сечении с координатой Z . Кроме того, программа вычисляет температуру в центре ванны (координата $r = 0$). Это позволяет оценить, насколько максимальная температура на оси ванны превышает среднюю температуру.

Программа работы

1. Получить у преподавателя данные по марке исследуемого металла, его толщине и виду исследуемых зависимостей.
2. Определить по справочнику теплофизические свойства металла для температуры, составляющей половину температуры плавления металла.
3. Занести исходные данные в таблицу.
4. Подготовить таблицу опытных данных в зависимости от полученного задания.
5. Выполнить необходимые численные эксперименты и записать полученные данные в таблицу.
6. Построить по полученным данным соответствующие графики.
7. Провести анализ полученных результатов.

Указания к выполнению работы

Исследования проводятся методом однофакторного эксперимента. Все параметры процесса, кроме исследуемого, в серии опытов остаются неизменными. У этого варианта исследований применительно к сварке имеется ряд трудностей, и о них необходимо помнить. Например, в нашем случае при исследовании влияния эффективной мощности на температуру и размеры сварочной ванны подразумевается, что коэффициент сосредоточенности теплового потока не изменяется. В численном эксперименте это возможно. В реальном эксперименте изменение эффективной мощности вызывает и изменение коэффициента сосредоточенности, т. е. они взаимосвязаны. Математическая модель позволяет выявить влияние эффективной мощности или коэффициента сосредоточенности в «чистом» виде.

Для приближения условий численного эксперимента к условиям реального можно использовать известные зависимости их взаимосвязи или гипотезу о постоянстве осевого теплового потока.

Применяемый подход имеет и то преимущество, что если известно влияние каких-либо параметров режима на эффективную мощность и сосредоточенность, то с помощью данной модели можно исследовать и их влияние на характеристики сварочной ванны.

Подобное можно сказать и об изучении роли теплофизических характеристик металла. В реальном эксперименте при замене материала могут существенно изменяться свойства приэлектродных областей дуги, а следовательно, ее эффективная мощность. Тем не менее именно совместное использование математического и натурального экспериментов является весьма эффективным методом проведения исследований. В любом случае правильно построенная математическая модель позволяет весьма быстро изучить, хотя бы в качественном плане, основные взаимосвязи исследуемого процесса.

Таблица 2.15

Исходные данные и результаты исследования

Марка сплава	Толщина, мм	Теплопроводность, Вт/см °С	Объемная теплоемкость, Дж/см ³ °С	Температуропроводность, см ² /с	Температура плавления, °С
1	2	3	4	5	6

Время, с	Z, мм	$q_{и}$, Вт	K , см ⁻²	$D_{в}$, мм	$T_{ср}$, °С	T_{max} , °С
7	8	9	10	11	12	13

Примечание. В таблице выделены параметры, фиксируемые в результате опыта.

Содержание отчета

1. Таблицы исходных и экспериментальных данных.
2. Формула для нормально-кругового источника тепла.
3. Графики полученных зависимостей.
4. Анализ полученных результатов.

Вопросы для самоконтроля

1. Как может использоваться информация о температуре поверхности сварочной ванны?
2. Как в данной работе определить запаздывание образования сварочной ванны по отношению к началу зажигания дуги?
3. Каким показателем можно оценить эффективность использования энергии для исследуемого процесса?
4. Какая полученная максимальная температура в центре сварочной ванны является неприемлемой в исследуемом случае?
5. Как можно использовать данные эксперименты для определения коэффициента сосредоточенности и эффективной мощности сварочной дуги?
6. Каким образом можно внести в математическую модель процесса уточнения, связанные со скрытой теплотой плавления металла?
7. Как учесть температуру подогрева детали в рамках данной модели?

Лабораторная работа 2.11

Исследование особенностей образования сварочной ванны от неподвижного источника тепла у края пластины

Цель работы – освоение применения метода отражения сварочных источников тепла при действии их вблизи края пластины и изучение на основе этого метода наиболее важных факторов, влияющих на форму и размеры сварочной ванны у края пластин.

Содержание работы

При действии сварочных источников теплоты близко к краю пластин температурное поле искажается и становится несимметричным. Например, для неподвижного источника тепла, действующего на большом расстоянии от края пластины, форма ванны представляет собой круг. С приближением источника к краю пластины форма ванны искажается и начинает всё больше отличаться от круга. Учет такого приближения в сварке часто производят введением аналогичного фиктивного источника тепла, расположенного симметрично реальному источнику в пространстве бесконечно продолженной пластины (рис. 2.3). Температура в каждой точке

пластины определяется как сумма от действия двух источников – реального и фиктивного.

Эксперимент проводится путем математического моделирования процесса нагрева зоны сварки. Согласно математической модели источник тепла представлен в виде линейного, то есть распределенного равномерно по толщине пластины. В такой модели в центре источника при $r = 0$ температура стремится к бесконечности. Поэтому использовать в данной работе расчеты для точек с такой координатой нельзя. С увеличением радиуса температура резко снижается и достаточно точно описывает форму ванны. Формула для расчета температур имеет вид:

$$T = \frac{q_{\text{и}}}{4\pi\lambda s} Ei\left(\frac{D_c^2}{16at}\right), \quad (2.18)$$

где $q_{\text{и}}$ – эффективная мощность источника тепла, Вт; λ – теплопроводность металла, Вт/(см · °С); s – толщина пластины, см; D_c – диаметр изотермы с температурой T , см; a – температуропроводность металла, см²/с; t – время действия источника тепла, с; Ei – интегральная показательная функция, приводимая в специальных справочниках или рассчитываемая с помощью стандартной компьютерной программы.

С помощью формулы (2.18) была составлена программа расчета температур в бесконечной пластине от двух источников тепла, расположенных на расстоянии $2B$ друг от друга (рис. 2.3). Здесь B – расстояние от источника до края реальной пластины. При работе с программой задается угол, по линии которого определяется температура. Угол отсчитывается от координаты r , направленной перпендикулярно краю пластины.

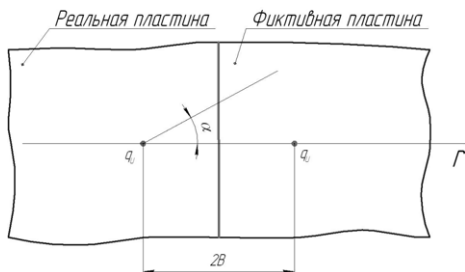


Рис. 2.3. Схема процесса

Программа работы

1. При заданной эффективной мощности источника и теплофизических свойствах материала получить форму сварочной ванны.
2. Изменяя расстояние от источника до края пластины, проследить за изменением формы ванны.
3. Определить расстояние от источника до края пластины, при котором границей сварочной ванны станет ее край.
4. Повторить опыты, используя пластины с существенно отличающимися теплофизическими свойствами, например алюминиевый сплав на сталь.

Указания к выполнению работы

В данной работе форма сварочной ванны вычерчивается не сразу, а по отдельным точкам. Определение границы сварочной ванны производится в полярной системе координат. За начальную координату принимается угол, равный нулю. Вектор направлен в сторону края пластины. После определения координаты границы ванны в этом направлении угол направления вектора изменяется. Шаг изменения угла поворота вектора определяется самим студентом и может корректироваться в процессе опытов. Максимальным значением угла является 180 градусов, когда вектор направлен в противоположную сторону от первоначального. Дальнейшее изменение угла не требуется, поскольку сварочная ванна должна быть симметрична относительно оси, перпендикулярной краю пластины.

Таблица. 2.16

Исходные данные и результаты опытов

Марка сплава	Толщина пластин, мм	q_n , Вт	Объемная теплоемкость, Дж/см ³ град	Теплопроводность, Вт/см °С
1	2	3	4	5

Температуропроводность, см ² /с	Время, с	Угол радиуса-вектора, град	Расстояние до края, мм	Радиус ванны, мм
6	7	8	9	10

Примечание. Выделены параметры, фиксируемые в результате опыта.

Содержание отчета

1. Схема расчета температур от неподвижного источника у края пластины.
2. Формы сварочных ванн для различных расстояний от источника до края пластины.
3. Анализ полученных результатов.

Вопросы для самоконтроля

1. Почему размер сварочной ванны увеличивается с приближением источника тепла к краю детали?
2. Какие решения можно предложить, чтобы уменьшить эффект увеличения размеров ванны у края пластины?
3. Учитывается ли в данной работе распределенность теплового потока по пятну нагрева?
4. Каково может быть влияние распределенности теплового потока на характер изучаемых зависимостей (размер сварочной ванны)?

Лабораторная работа 2.12

Расчетно-экспериментальный метод определения режимов автоматической сварки под флюсом стыковых соединений без разделки кромок

Цель работы — освоение методики расчетно-экспериментального определения режимов сварки, размеров и формы швов при автоматической сварке под флюсом.

Содержание работы

Одним из этапов разработки инженером-технологом технологического процесса сварки является выбор ее режимов. При этом необходимо учитывать все многообразие условий, в которых будет осуществляться технологический процесс: химический состав, размеры и толщину свариваемого металла, условия теплоотвода и многое другое.

Из-за сложности процесса сварки пока не получены точные аналитические зависимости, которые позволяли бы рассчитывать режимы и размеры шва. Режимы рассчитывают по приближенным формулам,

обобщающим многие опытные данные. Часто режимы выбирают с помощью таблиц, приводимых в специальной литературе. И в том и в другом случае выбранные режимы уточняют в производстве опытным путем, учитывая все особенности сварки данного изделия.

Целесообразно использование расчетно-экспериментального метода в определении режимов. Последовательность его применения следующая:

- а) в условиях, близких к условиям производства изделия, проводится опыт, в котором фиксируются режимы сварки и размеры шва;
- б) используя результаты опыта и расчетную методику, определяют эмпирические коэффициенты, входящие в формулы;
- в) полученные расчетные значения коэффициентов сравниваются с приводимыми в литературе.

Если сравниваемые значения коэффициентов будут достаточно близкими, то следует вывод, что рекомендуемая методика пригодна для расчета режимов при сварке изделия. При существенном различии коэффициентов возможно использование расчетных значений, полученных по итогам проведенного опыта. Однако в этом случае необходимы дополнительные опыты с целью уточнения границ применимости коэффициентов. Уточнив коэффициенты расчетного метода, можно с помощью компьютера вести поиск оптимальных режимов сварки. Такими режимами могут являться наиболее экономичные или с благоприятной формой провара.

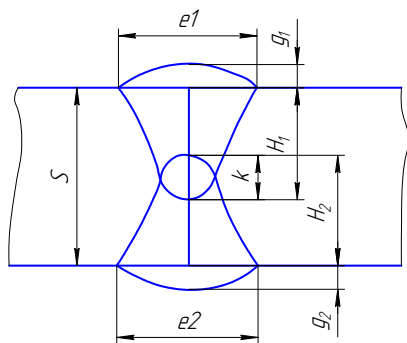


Рис. 2.4. Условия обеспечения полного провара при сварке стыковых соединений

Методика расчета режимов сварки

Исходными данными для расчета являются толщина металла, род и полярность тока, марка используемого флюса, диаметр электродной проволоки d_3 . Последовательность расчетов при двусторонней сварке стыковых соединений без разделки кромок на весу (рис. 2.4) следующая.

1. Задают необходимую глубину проплавления при сварке в мм:

$$H_1 = \frac{S}{2} + K,$$

где K – перекрытие швов при сварке с двух сторон.

2. Рассчитывают сварочный ток, обеспечивающий заданную глубину проплавления:

$$I_{\text{св}} = \frac{H_1 \cdot 100}{k_{\text{п}}},$$

где $k_{\text{п}}$ – эмпирический коэффициент, мм/А. Значения $k_{\text{п}}$ приведены в [7, с. 193, бл. 41].

3. Определяют диаметр электродной проволоки d_3 :

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot I_{\text{св}}}{\pi j}},$$

где j – рекомендуемая плотность тока, А/см². Выбираемые значения плотности тока должны находиться в пределах, рекомендуемых в таблице [7]. При этом значения диаметра проволоки округляются до ближайшего стандартного значения.

4. Определяют скорость сварки, м/час:

$$V_{\text{св}} = \frac{A}{I_{\text{св}}},$$

где A – коэффициент геометрического подобия сварочной ванны. Он выбирается по таблице [7, с. 194] в зависимости от d_3 .

5. Рассчитывают напряжение дуги, В:

$$U_{\text{д}} = 20 + \frac{0,05 \cdot I_{\text{св}}}{d_3^{0,5}}.$$

Таким образом, основные параметры режима сварки рассчитаны. Однако необходимо определить геометрические размеры шва и совместимость полученных режимов с результатами теплового расчета.

6. Рассчитывают погонную энергию сварки, Дж/см:

$$q_{\text{п}} = \frac{I_{\text{св}} \cdot U_{\text{д}} \cdot \eta_{\text{п}}}{V_{\text{св}}},$$

где $\eta_{\text{и}}$ – эффективный КПД способа сварки. Для сварки под флюсом он изменяется в пределах 0,8...0,9. Скорость сварки в формуле должна измеряться в см/с. Для этого результаты в м/час должны делиться на коэффициент 36.

7. Определяют коэффициент формы провара:

$$\psi_{\text{пр}} = k'(19 - 0,01 \cdot I_{\text{св}})^{d_{\text{в}} \cdot U_{\text{д}}},$$

где k' – коэффициент, зависящий от рода, полярности и плотности тока. Последовательность определения k' приводится в [7, с. 188].

8. Находят глубину проплавления H_{T} , мм, исходя из теории распространения тепла при сварке:

$$H_{\text{T}} = C \cdot \sqrt{\frac{q_{\text{п}}}{\psi_{\text{пр}}}}.$$

Для низкоуглеродистых и низколегированных сталей $C = 7,64 \cdot 10^{-3}$. Если расчетная глубина проплавления H_{T} близка к H_1 (в пределах $\pm 12\%$), то можно определять ширину шва и высоту усиления. В случае более существенного различия следует скорректировать режим сварки, чтобы значения H_{T} и H_1 сблизились.

Методика расчета размеров шва

1. Зная глубину провара и коэффициент формы провара $\psi_{\text{пр}}$, определяют ширину шва:

$$E = \psi_{\text{пр}} \cdot H.$$

2. Рассчитывают площадь поперечного сечения наплавленного металла:

$$F_{\text{н}} = \frac{\alpha_{\text{н}} \cdot I_{\text{св}}}{3600 \cdot V_{\text{св}} \cdot \rho},$$

где $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент наплавки, г/А · час; ρ – плотность стали, $\rho = 7,8$ г/см³.

Для определения $\alpha_{\text{н}}$ следует воспользоваться связью между ним и коэффициентом расплавления электрода $\alpha_{\text{р}}$:

$$\alpha_{\text{н}} = \alpha_{\text{р}} (1 - \Psi),$$

где Ψ – коэффициент потерь на угар и разбрызгивание. При сварке под флюсом $\Psi \approx 0,03$. Значения $\alpha_{\text{р}}$ удобно определять по графикам, которые приведены в [7, с. 189].

3. Определяют высоту усиления валика:

$$g = \frac{F_{\text{н}}}{\mu_{\text{в}} \cdot e},$$

где $\mu_{\text{в}}$ — коэффициент полноты валика. Он имеет устойчивое значение $\mu_{\text{в}} = 0,73$.

Программа работы

1. Определить взвешиванием массу наплавляемых пластин до сварки.
2. На сварочном автомате наплавить под слоем флюса поперек стыка пластин шов на режимах, указанных преподавателем, зафиксировав эти режимы.
3. Измерить основные геометрические размеры поперечного сечения шва и массу наплавленного металла, рассчитать коэффициенты формы шва.
4. По опытным данным рассчитать коэффициенты, входящие в формулы для определения режимов, и найти значения этих же коэффициентов по литературным данным.
5. Сопоставить значения коэффициентов на основе опыта с приводимыми в литературе и сделать выводы об их соответствии и применимости формул.

Описание экспериментальной установки

Принципиальная электрическая схема питания сварочной дуги и измерений электрических величин при сварке автоматом ТС-17М-У приведена на рис. 2.5. Схема содержит контакты (К1.1, К1.2) силового контактора, силовой трансформатор (Т1), дроссель насыщения (L1), трансформатор тока (Т2), амперметр, вольтметр. Измерение скорости сварки и скорости подачи электродной проволоки производится по табличке, расположенной на автомате. Измерение массы образцов производится на весах с ценой деления 5 г.

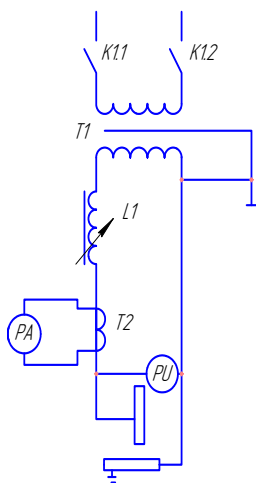


Рис. 2.5. Принципиальная электрическая схема измерений при сварке под флюсом

Указания к выполнению работы

Перед наплавкой необходимо измерить толщину пластин, диаметр электродной проволоки, массу пластин. Замеры производить не менее трех раз, в качестве результата принимать среднее арифметическое. Результаты замеров, а также другие данные внести в табл. 2.17.

Таблица 2.17

Исходные данные

Марка стали	Толщина пластин, мм	Марка флюса	Марка электродной проволоки	Диаметр проволоки, мм	Масса пластин до сварки, г
1	2	3	4	5	6

В процессе наплавки внимательно следить за приборами и определить их средние показания, зафиксировать время сварки. После наплавки и остывания пластин измерить штангенциркулем ширину шва, высоту провара, выпуклость шва в месте излома. Средние результаты замеров занести в табл. 2.18 и проставить размеры шва на эскизе его поперечного сечения (рис. 2.4).

После этого рассчитываются коэффициенты эмпирических формул.

Таблица 2.18

Результаты эксперимента

Ток дуги, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/час	Скорость подачи проволоки, м/час	Масса пластин после наплавки, г	Ширина шва, мм	Провар H , мм	Выпуклость g , мм	Время сварки, с
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Эти же коэффициенты отыскиваются в таблицах [7]. При расчетах следует внимательно выбирать единицы измерения величин, входящих в формулы. Они должны быть выражены в тех значениях, которые указаны в расшифровке формул. Расчеты должны независимо выполняться каждым членом студенческой подгруппы, проводившей опыты. После расчета каждого коэффициента и отыскивания соответствующего ему табличного значения необходимо сравнивать результаты. При отсутствии расхождений результаты можно заносить в табл. 2.19. После ее заполнения определить относительные отклонения данных на основе лабораторного опыта от данных, приводимых в [7]:

$$\Delta P = \frac{P_{\text{оп}} - P_{\text{л}}}{P_{\text{л}}} \cdot 100 \%,$$

где $P_{\text{оп}}$ — значение коэффициента на основе опыта; $P_{\text{л}}$ — значение коэффициента по литературным данным.

Таблица 2.19

Сопоставление расчетных и опытных данных

k_n , мм/А		A , А· м/час		U_d , В		q_n , Вт		q_n , Дж/см		ψ	
опыт	расч.	опыт	расч.	опыт	расч.	опыт	расч.	опыт	расч.	опыт	расч.

k'		α_n , г/А· час		F_n , см ²		μ_b		H_T , мм		J , А/мм ²	
опыт	расч.	опыт	расч.	опыт	расч.	опыт	расч.	опыт	расч.	опыт	расч.

Содержание отчета

1. Описание экспериментальной установки, ее схема, данные об измерительной аппаратуре с указанием пределов измерения и класса точности.
2. Методика и результаты опытов.
3. Выводы о работе.

Вопросы для самоконтроля

1. Какая зависимость между глубиной проплавления и током при сварке под флюсом?
2. Что показывает коэффициент расплавления электрода?
3. Что характеризует погонная энергия сварки?
4. Как определяется относительное отклонение расчетных и опытных данных?
5. Что показывает коэффициент полноты валика шва?
6. Как рассчитывается плотность сварочного тока на электроде?
7. На какой полярности выше глубина проплавления при сварке под флюсом?
8. Какие величины необходимо знать, чтобы определить площадь поперечного сечения наплавленного металла?
9. Влияет ли марка флюса на глубину проплавления? Из чего это видно?
10. Для чего необходимо проводить несколько замеров одного и того же параметра?
11. Как зависит напряжение на дуге от диаметра электродной проволоки?
12. В какой последовательности измеряются размеры шва?

Лабораторная работа 2.13

Расчет режимов автоматической сварки под флюсом стыковых соединений углеродистых сталей без разделки кромок

Цель работы – освоение навыков определения с помощью компьютера режимов автоматической сварки под флюсом листов без разделки кромок, обеспечивающих заданную форму и размеры шва.

Содержание работы

При назначении режимов сварки в первую очередь необходимо обеспечить определенные размеры и форму шва. Так, для того чтобы швы обладали высокой технологической и эксплуатационной прочностью, они должны иметь коэффициент формы провара $\Psi = 0,8 \dots 4,0$, а коэффициент высоты усиления (выпуклости шва) $\Psi_b = 7 \dots 10$.

Для расчета режимов сварки и размеров поперечного сечения шва можно использовать формулы, приведенные в [7] и использованные в предыдущей лабораторной работе. Однако система формул [7] достаточно громоздка и расчеты по ним трудоемки. Поэтому целесообразно проводить расчеты на компьютере. Режимы сварки могут отыскиваться в двух вариантах – решения прямой или обратной задачи. Под обратной задачей понимается, когда по заданным параметрам шва и некоторому критерию оптимальности сразу получается решение, удовлетворяющее требуемым условиям. Возможности современных компьютеров, как правило, позволяют делать это без особого труда. Однако сама разработка программ для решения обратной задачи достаточно сложная и трудоемкая.

Значительно проще, но несколько более трудоемкий подбор подходящих режимов путем перебора вариантов решения прямой задачи в диалоговом режиме. В этом случае компьютерная программа значительно проще. К тому же технолог (студент) имеет возможность использовать свои знания и интуицию для выбора направления поиска режима в случае, если это быстро сделать не удастся. Таким образом, с точки зрения обучения второй вариант предпочтительнее.

Для выполнения данной лабораторной работы необходимо изучить [7, § 1, 4] и выполнить лабораторную работу 2.12.

Программа работы

1. Ознакомиться с карточкой-заданием на проведение расчетов, выданной преподавателем (табл. 2.20).
2. Изучить порядок вызова компьютерной программы и работы с ней.
3. Провести расчеты на компьютере и оформить их в виде таблицы.
4. Построить графики зависимостей, указанных в задании.
5. Провести анализ полученных результатов, дать рекомендации по выбору режимов.
6. Сравнить расчетные режимы с рекомендуемыми в литературе [7].

Таблица 2.20

Исходные данные

Толщина листа, мм	Род тока	Полярность	Марка флюса	Диапазон $\Psi_{пр}$	Диапазон $\Psi_{в}$
1	2	3	4	5	6

Описание экспериментальной установки и правила работы на компьютере

Работа выполняется на любом персональном IBM-совместимом компьютере и имитирует работу на экспериментальной установке, аналогичной использованной в лабораторной работе 2.12. Работа ведется в диалоговом режиме. Ввод каждого параметра на компьютере соотносится с установкой какого-либо параметра на сварочном автомате. Определение геометрических характеристик шва также сопровождается имитацией их замера в диалоговом режиме. При этом студент должен получить представление, насколько работа с математической моделью процесса на компьютере производительнее выполнения реальной работы и какие материальные ресурсы могут быть сэкономлены.

Указания к выполнению работы

В задании указываются род и полярность тока сварки, марка флюса, диапазон глубины проплавления, для которого должен вестись расчет режимов, требования к форме шва. Результаты расче-

тов на каждом режиме заносятся в таблицу. В табл. 2.21 указываются постоянные данные: род тока, полярность, марка флюса. Если для заданного диаметра проволоки не удастся отыскать необходимый режим, студент самостоятельно принимает решение об изменении диаметра проволоки. Более оптимальным считается режим сварки, который обеспечивает средние значения коэффициентов формы шва.

Таблица 2.21

Плотность тока, А/см ²	Ток сварки, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, см/с	Скорость подачи проволоки, см/с
j	I_d	U_d	V_c	V_n
1	2	3	4	5
Глубина проплавления, мм	Ширина шва, мм	Выпуклость шва, мм	Коэффициент формы провара	Коэффициент формы валика
H	e_1	g	$\Psi_{пр}$	Ψ_v
6	7	8	9	10

Содержание отчета

1. Исходные данные для расчета и его результаты.
2. Графики зависимостей, указанные в задании.
3. Анализ полученных зависимостей, рекомендации по режимам сварки.
4. Результаты сравнения расчетных режимов с рекомендуемыми в литературе.

Лабораторная работа 2.14 Технология и оборудование для сварки алюминиевых сплавов сжатой трехфазной дугой

Цель работы – изучение особенностей оборудования для сварки алюминиевых сплавов и технологических возможностей трехфазной сжатой сварочной дуги.

Содержание работы

Сжатой является дуга, столб которой помещен в узкий канал, ограничивающий расширение столба дуги. Через столб обычно продувается поток газа, называемого плазмообразующим.

На рис. 2.6 показаны основные схемы получения сжатой дуги, используемые в сварочной технике. Так как расстояние между неплавящимся электродом и изделием по сравнению со свободной дугой возрастает, то рабочую дугу зажигают в два этапа. Вначале зажигают «дежурную» дугу между электродом и соплом. Затем с помощью плазменной струи от этой дуги возбуждают рабочую дугу между электродом и изделием. После этого «дежурная» дуга продолжает гореть или отключается.

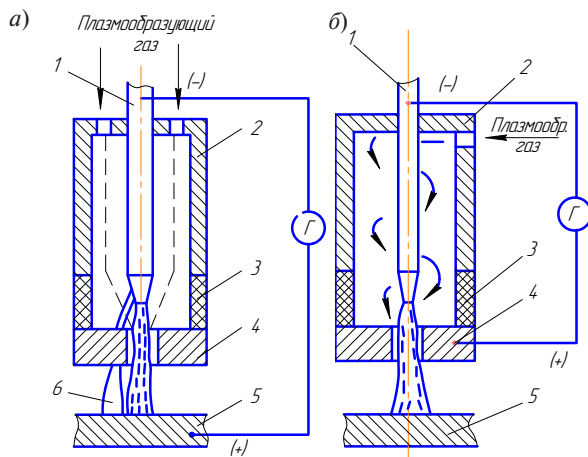


Рис. 2.6. Сжатая дуга: а) прямого действия; б) косвенного действия;
1 – вольфрамовый электрод; 2 – камера; 3 – изоляционная прокладка;
4 – сопло; 5 – изделие; 6 – двойная дуга

Сжатая дуга имеет ряд технологических преимуществ перед свободной дугой в защитных газах с неплавящимся электродом:

- а) повышается пространственная устойчивость дуги;
- б) расширяется диапазон регулирования давления дуги на металл по величине и распределенности;
- в) расширяются возможности регулирования сосредоточенности теплового потока в изделии;

г) последние два фактора обеспечивают повышение гибкости технологического процесса сварки, т. е. получение эффективных режимов, обеспечивающих требуемые свойства сварных соединений.

Пространственная стабилизация дуги достигается за счет струи плазмообразующего газа. Электрод устанавливается соосно с каналом сопла, и периферийные, более холодные слои газа затрудняют столбу дуги отклонение в стороны. Хаотические перемещения дуги уменьшаются, что приводит к повышению стабильности качества сварного соединения.

Регулирование давления дуги на металл производится изменением диаметра и длины канала сопла и расхода плазмообразующего газа. Проходя через столб дуги, газ разогревается, снижается его плотность ρ , увеличивается скорость V . Давление струи газа P_v определяется по формуле

$$P_v = \frac{g^2}{2 \cdot \rho},$$

где g — удельный расход (плотность расхода) газа в канале, $г/см^2 \cdot с$.

Помимо силового газ оказывает на изделие и тепловое воздействие. Запасая в столбе дуги тепловую энергию, он затем передает ее металлу. В результате можно регулировать интенсивность теплового потока в пятне нагрева.

Таким образом, в сжатой дуге по сравнению со свободной выделяется дополнительная электрическая энергия. Эта энергия требуется на компенсацию повышенного теплообмена в условиях продува столба дуги газом. Напряженность электрического поля в столбе дуги может увеличиваться в несколько раз. Поэтому повышается напряжение на дуге и, следовательно, напряжение холостого хода источника питания U_0 .

К основным параметрам процесса сварки сжатой дугой прямого действия относятся:

- 1) диаметр d_c и длина ℓ_c формирующего столб дуги канала сопла, мм;
- 2) ток сжатой дуги I_d , А;
- 3) род и расход плазмообразующего газа, л/с;
- 4) длина открытого участка дуги ℓ_o , мм;
- 5) расстояние от торца электрода до начала цилиндрического участка, $L_{вн}$, мм;

- б) способ ввода плазмообразующего газа в камеру плазмотрона (тангенциальный или аксиальный);
- 7) диаметр электрода, мм.

Установка состоит из источника питания и плазмотрона. В данной лабораторной работе изучается плазмотрон, установка и технологический процесс для сварки алюминиевых сплавов трехфазной дугой (рис. 2.7). Конструкция трехфазного источника питания, ее характеристики и возможности изучаются в разделе IV «Источники питания сварочной дуги».

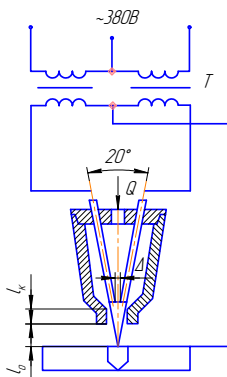


Рис. 2.7. Схема питания двухэлектродного плазмотрона от трехфазного трансформатора

В камере плазмотрона устанавливаются два вольфрамовых электрода под углом друг к другу. В качестве «дежурной» используется дуга между этими электродами, а сопло к источнику питания не подключается. Сопло выполнено из меди и охлаждается водой. Плазмотрон и изделие подключаются к специальному трехфазному источнику питания, разработанному в Тольяттинском политехническом институте (ныне Тольяттинский государственный университет).

Для подготовки к лабораторной работе необходимо изучить особенности сварки алюминиевых сплавов [8], особенности сжатых дуг [5; 6] и данное содержание работы.

Программа работы

1. Заэскизировать основные узлы плазмотрона и внести в табл. 2.22 основные геометрические характеристики.
2. Начертить принципиальную электрическую схему установки.
3. Включить установку на холостом ходу и измерить напряжение между всеми электродами, записать результаты в табл. 2.23.
4. Произвести зажигание «дежурной» дуги, измерить ее ток и напряжение, зарисовать внешний вид факела (табл. 2.24).
5. Произвести зажигание рабочих дуг на деталь из алюминиевого сплава. Измерить ток в изделии, напряжения дуг, расход плазмообразующего газа, время горения дуги. В процессе горения дуги наблюдать за ней через светофильтр.
6. Полностью заполнить табл. 2.25 опытных данных, сделать выводы о работе.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из трехфазного трансформатора, пускорегулирующей аппаратуры, двухэлектродного плазмотрона с токо-, газо- и водопроводными шлангами, баллона с аргоном, измерительных приборов.

Указания к выполнению работы

1. Результаты измерений в процессе работы заносятся в табл. 2.22–2.25.
2. При определении расхода плазмообразующего аргона в г/с необходимо перевести расход, выраженный в л/мин по показаниям ротаметра, через коэффициент. Один литр аргона при нормальном давлении имеет массу 1,78 г.

Содержание отчета

1. Схема установки.
2. Эскиз узлов двухэлектродного плазмотрона.
3. Таблицы замеров 2.22–2.25.
4. Расчеты, необходимые для заполнения таблиц.
5. Выводы о работе.

Таблица 2.22

Параметры двухэлектродного плазмотрона

Плазмо-образующий газ	Марка электрода	Материал сопла	Расход охлаждающей воды	d_c , мм	l_c , мм	α , град	d_3 , мм	Δ , мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Таблица 2.23

Характеристики измерительных приборов

Тип и марка прибора	Пределы измерения	Цена деления	Класс точности
1	2	3	4

Таблица 2.24

Параметры «дежурной» дуги

U_0 между электродами, В	U_0 «электроды – дуга», В	Расход аргона, г/с	Ток дуги, А	Напряжение дуги, В	Мощность дуги, Вт
1	2	3	4	5	6

Таблица 2.25

Характеристики зависимых дуг

Расход газа, г/с	Ток в изделии, А	Токи в электродах, А	Напряжения зависимых дуг, В	Напряжение независимой дуги, В	Коэффициент токов, K_T	Коэффициент напряжений K_N	Мощность зависимых дуг, Вт
1	2	3	4	5	6	7	8

Вопросы для самоконтроля

1. В чем заключаются технологические преимущества сжатой дуги при сварке?
2. Почему сжатая дуга питается от источника питания с повышенным напряжением холостого хода?
3. Какими параметрами можно регулировать давление сжатой дуги?
4. Какими параметрами можно регулировать мощность сжатой дуги?
5. Почему сжатую дугу зажигают в два этапа?

6. В чем недостатки процесса сварки сжатой дугой по сравнению с процессом сварки свободной дугой?
7. В чем преимущества и недостатки одно- и двухэлектродного плазмотронов?
8. Почему для сварки алюминиевых сплавов используется сжатая дуга переменного тока?
9. В чем сложность получения сжатой дуги переменного тока?
10. В какой дуге устойчивость повторных зажиганий выше – в трехфазной или однофазной – и почему?

Меры безопасности

1. Работать на установке можно только после осмотра ее учебным мастером и под его руководством.
2. После включения установки нельзя касаться ее токоведущих частей.
3. При наблюдении за дугой использовать сварочную маску с защитным стеклом.
4. После окончания опыта следует немедленно отключить установку от сети.

Лабораторная работа 2.15

Точечная плазменная сварка пластин из алюминиевых сплавов толщиной 0,5...1,5 мм трехфазной дугой

Цель работы – изучение особенностей технологии точечной плазменной сварки пластин из алюминиевого сплава.

Содержание работы

Точечная контактная сварка (ТКС) алюминиевых сплавов затруднена из-за низкого электросопротивления алюминия, его высокой теплопроводности и наличия на поверхности тугоплавкой пленки Al_2O_3 . Оборудование для КС материалоемкое, потребляет много электроэнергии, вызывает перегрузку электрической сети. Подготовка поверхностей деталей под КС сложная, трудоемкая и экологически небезопасная.

Дуговую точечную сварку алюминиевых сплавов чаще всего производят плавящимся или неплавящимся электродом в инертных газах [9; 10]. К недостаткам этих способов сварки относятся сложность возбуждения и гашения рабочей дуги, ее блуждание, низкая проплавляющая способность, трудность борьбы с окисными включениями. В таких способах затруднена передача от активного пятна дуги к нижнему свариваемому элементу (рис. 2.8). Поэтому поперечное сечение сварной точки имеет ступенчатую форму, а соединение происходит по наименьшему из диаметров в контакте двух листов.

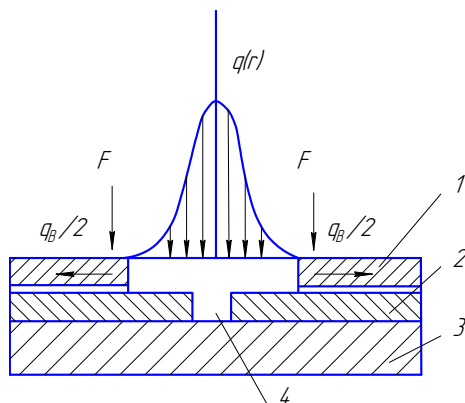


Рис. 2.8. Схема передачи тепла дуги верхнему свариваемому элементу:
 1 – верхний элемент; 2 – нижний элемент; 3 – подкладка;
 4 – сварочная ванна

На кафедре «Оборудование и технология сварочного производства» Тольяттинского политехнического института (ныне ТГУ) был разработан процесс точечной плазменной сварки (ТПС) листов из алюминиевых сплавов сжатой трехфазной дугой [11].

Для подготовки к лабораторной работе следует изучить [9], «Сварка электрозаклепками вольфрамовым электродом в аргоне» и «Сварка электрозаклепками и точками» в [10, с. 85, 95, 96], а также выполнить лабораторную работу 2.14, ознакомиться с изобретением [11].

Программа работы

1. Заэскизировать оснастку для точечной сварки – опорное сопло, подкладку, записать материалы, из которых они изготовлены.
2. Определить параметры плазмотрона для сварки и внести их в табл. 2.26.
3. Внести в табл. 2.26 сведения о свариваемых образцах.
4. По таблице рекомендуемых режимов сварки выбрать ток в изделии, расход плазмообразующего газа, длину открытого участка дуги, время сварки.
5. Произвести на специальной пластине из алюминиевого сплава контрольное зажигание дуги, определить ток в изделии и при необходимости отрегулировать его.
6. Подготовить поверхность пластин под сварку и произвести сварку трех точек с интервалом 10 с, ведя наблюдение за процессом образования соединения. Режимы сварки занести в табл. 2.27.
7. Промаркировать точки и измерить с помощью штангенциркуля или измерительного микроскопа средний диаметр точки по наружному и внутреннему диаметрам.
8. По формуле неподвижного непрерывно действующего линейного источника тепла в пластине рассчитать для первой точки эффективную мощность процесса.
9. Рассчитать подогрев пластины перед сваркой 2-й и 3-й точек.
10. Сравнить расчетные диаметры 2-й и 3-й точек с опытными значениями.
11. Разрушить полученные точки, определить диаметр соединения, сравнить с расчетными диаметрами.
12. Сделать выводы о работе.

Таблица 2.26

Исходные данные

Диаметр сопла d_c , мм	Длина сопла ℓ_c , мм	Длина на ℓ_o , мм	Марка сплава	$S_1 + S_2$, мм	Размеры и объем пластин, см ³	Объемная теплоемкость, Дж/см ³ ·°C	Температуропроводность, см ² /с
1	2	3	4	5	6	7	8

Таблица 2.27

Режимы дуги и ее расчетные характеристики

Ток в изделии, А	Время сварки, с	Расход плазмобразующего аргона, л/с	Напряжение рабочих дуг, В	Мощность рабочих дуг, Вт	Эффективный КПД
1	2	3	4	5	6

Таблица 2.28

Результаты измерений зоны расплавления и расчетов температур подогрева

№ точки	D_1 , мм	D_2 , мм	D_{cp} , мм	q_n , Вт	$\Delta T_{под}$, °С	D_{cp} , мм (расчет)	D_p , мм
1	2	3	4	5	6	7	8

Описание экспериментальной установки

Сварка производится на установке, аналогичной изученной в лабораторной работе 2.14. Установка содержит устройство для сжатия пластин и реле времени для установки времени сварки.

Указания к выполнению работы

Замеры диаметров зоны расплавления должны производиться в двух взаимно перпендикулярных направлениях не менее 3-х раз. В качестве результатов замеров принимать среднее арифметическое. Расчетным средним диаметром точки является полусумма лицевого и обратного измеренных диаметров.

Эффективная мощность процесса сварки в данном случае – это мощность, затрачиваемая в процессе сварки на нагрев свариваемых пластин. Если принять, что распространение тепла при точечной плазменной сварке происходит по схеме линейного неподвижного источника тепла в пластине, то эффективная мощность процесса q_n^n можно определить по формуле [1; 12]:

$$q_n^n = \frac{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot s \Delta T_1}{Ei \left(\frac{D_{cp}^2}{16 \cdot a \cdot t} \right)}, \quad (2.19)$$

где λ – теплопроводность сплава, Вт/см · град; s – толщина двух пластин, см; ΔT_1 – разность температуры плавления сплава и его температуры до сварки, град; D_{cp} – средний расчетный диаметр точки, см; a – коэффициент температуропроводности сплава, см²/с; t – время горения дуги, с; Ei – интегральная показательная функция, ее значения табулированы [16].

Температуру подогрева пластин после сварки первой точки можно определить по формуле

$$\Delta T_1 = \frac{q_n^n \cdot t}{V \cdot c \cdot \rho}, \quad (2.20)$$

где V – объем свариваемых пластин, см³; $c \cdot \rho$ – объемная теплоемкость сплава, Дж/см³ · град.

После сварки второй точки температура подогрева:

$$\Delta T_2 = 2 \cdot \Delta T_1.$$

Результаты измерений записать в табл. 2.26–2.28.

Содержание отчета

1. Эскизы оснастки с указанием материалов и ГОСТов, ТУ на них.
2. Расчеты по формулам (2.19) и (2.20).
3. Заполненные табл. 2.26–2.28.
4. Описание процесса формирования сварного соединения.
5. Эскиз внешнего вида точки.
6. Ответы на заданные преподавателем контрольные вопросы.
7. Выводы о результатах опытов, оценка качества сварки и процесса в целом.

Вопросы для самоконтроля

1. Почему при ДТС соединение имеет ступенчатую форму?
2. Почему ТПС должна вестись на подкладке?
3. Как влияет марка материала подкладки на производительность сварки?
4. Может ли производительность ТПС превосходить производительность ТКС?
5. Почему происходит увеличение диаметра точек по мере их сварки?
6. Какими приемами можно стабилизировать размеры соединения?
7. В чем преимущества ТПС?

8. За счет каких факторов можно увеличить производительность ТПС?
9. Повлияют ли трещины на поверхности точки на статическую прочность соединения?
10. Происходит ли катодное разрушение окисной пленки на поверхности нижнего листа при сварке?
11. Как согласно формуле (2.19) связаны площадь соединения и время сварки на заданном режиме?
12. Как влияет сосредоточенность теплового потока дуги на производительность ТПС?
13. В чем несоответствие между схемой линейного источника тепла и изученным процессом ТПС?
14. Если задать допуск на отклонение прочности сварного соединения, как определить допустимые отклонения режимов во время сварки?

Меры безопасности

1. Работать на установке можно только после осмотра ее учебным мастером и под его руководством.
2. После включения установки нельзя касаться ее токоведущих частей.
3. При наблюдении за процессом формирования точки следует использовать сварочную маску с защитным стеклом, обеспечивающую защиту от излучения сжатой дуги.
4. После сварки всех точек приступить к замерам можно только после остывания пластин до 30...40 °С.
5. После сварки следует немедленно отключить установку от сети.

Лабораторная работа 2.16

Определение требуемой точности поддержания режима при точечной плазменной сварке

Цель работы — усвоение представления о значении точности поддержания режимов при сварке, методах их оценки и возможности управления точностью получаемых сварных соединений.

Содержание работы

В процессе сварки по различным причинам могут происходить отклонения её режимов от установленных значений. Это приводит к отклонению размеров сварных соединений от проектных значений, увеличению затрат на получение качественной сварной конструкции. Наиболее простым примером является дуговая точечная сварка (сварка электродзаклепками) нахлесточных сварных соединений. При испытании сварной точки она может разрушиться по варианту а) «срез» или варианту б) «отрыв» (рис. 2.9). В первом случае рабочим сечением является площадь круга, во втором — площадь цилиндрической поверхности. Из условия равенства прочности на срез и отрыв можно показать, что оптимальным диаметром точки, обеспечивающим равнопрочность, является $D_T = 4s$, где s — толщина свариваемых элементов. Такой диаметр точки примем номинальным.

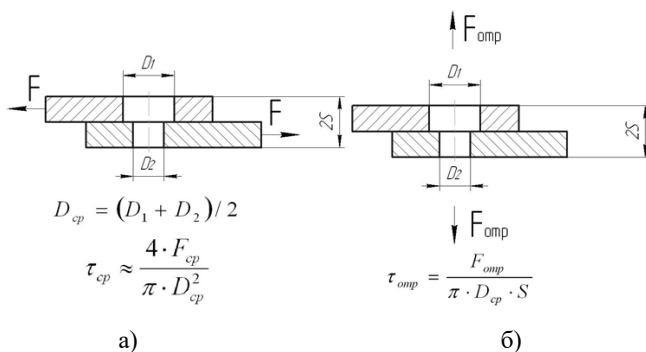


Рис. 2.9. Схема испытания сварной точки: а — на срез, б — на отрыв

При точечной сварке отклонения режимов могут приводить к отклонению эффективной мощности. На размеры точек может

оказывать влияние подогрев от сварки предыдущих точек. Также необходимо выдерживать определенное время сварки. Все это требует изучения, чтобы технолог мог выдать техническое задание на проектирование системы управления сварочным процессом.

Описание экспериментальной установки

Эксперимент проводится путем математического моделирования процесса нагрева зоны сварки. Согласно математической модели источник тепла представлен в виде линейного, то есть распределенного равномерно по толщине пластины. В такой модели в центре источника при $r = 0$ температура стремится к бесконечности. Поэтому использовать в данной работе расчеты для точек с такой координатой нельзя. С увеличением радиуса температура резко снижается и достаточно точно описывает форму ванны. Формула для расчета температур имеет вид:

$$T = \frac{q_{\text{и}}}{4\pi\lambda s} Ei\left(\frac{D_c^2}{16at}\right), \quad (2.21)$$

где $q_{\text{и}}$ – эффективная мощность источника тепла, Вт; λ – теплопроводность металла, Вт/(см · °С); s – толщина пластины, см; D_c – диаметр изотермы с температурой T , см; a – температуропроводность металла, см²/с; t – время действия источника тепла, с; Ei – интегральная показательная функция, приводимая в специальных справочниках или рассчитываемая с помощью стандартной компьютерной программы.

Подставим в формулу (2.21) $D_c = 2s$ и определим $q_{\text{и}}$:

$$q_{\text{и}} = \frac{4\pi\lambda s T_1}{Ei\left(\frac{s^2}{4at}\right)}, \quad (2.22)$$

где T_1 – температура плавления металла.

С помощью формулы (2.22) легко получить зависимость требуемого времени сварки от эффективной мощности (рис. 2.9). Если задаться определенным значением точности свариваемого сечения точки, то можно определить допустимое отклонение эффективной мощности.

Программа работы

1. Для данной марки материала получить зависимость эффективной мощности от времени сварки для нескольких толщин металла.
2. Построить графики полученных зависимостей.
3. Задавшись требованием к точности сечения точки в пределах 5...10 %, определить допустимое изменение эффективной мощности перед сваркой.
4. Определить, как изменяется допустимый процент отклонения эффективной мощности при изменении толщины металла.
5. Для заданной точности сечения точки определить требуемое изменение времени сварки, компенсирующее отклонение эффективной мощности.
6. Определить величину подогрева свариваемой детали, дающую допустимое отклонение сечения точки.
7. Построить графики зависимостей затрат энергии на образование точки от времени сварки.

Содержание отчета

1. Расчеты по формулам (2.21) и (2.22).
2. Описание процесса формирования сварного соединения.
3. Эскиз внешнего вида точки.
4. Графики полученных зависимостей.
5. Ответы на заданные преподавателем контрольные вопросы.
6. Выводы о результатах опытов, оценка точности выполнения сварки при допустимых отклонениях параметров режима.

Вопросы для самоконтроля

1. Опишите сущность процесса дуговой точечной сварки.
2. Каковы параметры режима дуговой точечной сварки?
3. Что включают геометрические параметры качества дуговой точечной сварки?
4. Изложите порядок определения точности параметров качества.

Рекомендуемая литература

1. Теоретические основы сварки : учеб. пособие / В.В. Фролов [и др.] ; под ред. В.В. Фролова. — М. : Высшая школа, 1970. — 592 с.
2. Сидоров, В.П. Приближённая двумерная модель дуги в канале плазмотрона / В.П. Сидоров // Физ. и хим. обработки материалов. — 1983. — № 3. — С. 10–11.
3. Сидоров, В.П. Расчёт параметров напряжения сжатой (плазменной) трёхфазной дуги / В.П. Сидоров, С.М. Абросимов, И.П. Куркин // Сварочное производство. — 1991. — № 11. — С. 35–37.
4. Столбов, В.И. Определение эффективной мощности источника нагрева при сварке плазменной трёхфазной дугой / В.И. Столбов, В.П. Сидоров, И.П. Куркин // Сварочное производство. — 1988. — № 5. — С. 30–32.
5. Сидоров, В.П. Расчёт теплоотода в сопло плазмотрона от столба плазменной аргоновой дуги / В.П. Сидоров // Сварочное производство. — 1987. — № 2. — С. 36–37.
6. Сидоров, В.П. Методика расчёта параметров, характеризующих возникновение аварийного режима работы плазмотрона / В.П. Сидоров // Сварочное производство. — 1984. — № 7. — С. 4–6.
7. Акулов, А.И. Технология и оборудование сварки плавлением / А.И. Акулов, Г.А. Бельчук, В.П. Демянцевич. — М. : Машиностроение, 1977. — 432 с.
8. Газоэлектрическая сварка алюминиевых сплавов / под ред. С.Н. Киселева [и др.]. — М. : Машиностроение, 1972. — 260 с.
9. Вайнбойм, Д.И. Автоматическая дуговая точечная сварка / Д.И. Вайнбойм. — М.—Л. : Машиностроение, 1966. — 592 с.
10. Потапьевский, А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом / А.Г. Потапьевский. — М. : Машиностроение, 1974. — 240 с.
11. Авторское свидетельство СССР № 1581509. Способ дуговой сварки электродозаклепками.
12. Столбов, В.И. Оптимизация режимов трехфазной сжатой дуги при сварке алюминия электродозаклепками / В.И. Столбов, В.П. Сидоров, И.П. Куркин // Сварочное производство. — 1989. — № 10. — С. 7–9.
13. Розаренов, Ю.Н. Оборудование для электрической сварки плавлением / Ю.Н. Розаренов. — М. : Машиностроение, 1987. — 208 с.

Раздел III. ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Лабораторная работа 3.1 Полупроводниковый стабилизатор горения дуги

Цель работы – изучение принципа работы полупроводникового стабилизатора горения дуги и приобретение навыков работы с ним.

Оборудование и приборы

1. Стабилизатор горения дуги типа СД-3.
2. Сварочный трансформатор типа ТС-300, «Русич-200», ТДМ-140, «Ferm-310».
3. Сварочный держак.
4. Электроды марки МР-3.
5. Сварочный щиток.
6. Осциллограф типа С1-55.
7. Измерительный шунт RS.
8. Сварочные провода сечением не менее 25 мм².

Указания для самостоятельной работы

1. Изучить принцип действия полупроводникового стабилизатора горения дуги.
2. Изучить схему коммутационного узла на тиристорах.
3. Изучить работу осциллографа и схему его включения.
4. Изучить схемы включения стабилизаторов в сварочную цепь.

Программа работы

1. Изучить конструкцию стабилизатора горения дуги типа СД-3.
2. Изучить электрическую схему полупроводникового стабилизатора горения дуги.
3. Составить схему сварочного поста с учетом параллельного включения стабилизатора горения дуги с источником питания и осциллографа.
4. Определить величину и частоту подачи стабилизирующих импульсов.

Описание работы схемы стабилизатора горения дуги

Назначение. Стабилизатор горения дуги СД-3 предназначен для поддержания её устойчивого горения при ручной дуговой сварке покрытыми электродами с рутиловым покрытием (типа МР-3, АНО-4), фтористо-кальциевым (типа УОНИ-13/45, ОЗЛ-8) или типа АНО-10 при работе с серийно выпускаемыми сварочными трансформаторами, имеющими напряжение холостого хода $U_{xx} = (45...80)$ В. Применение стабилизатора повышает устойчивость горения дуги и качество сварки и снижает разбрызгивание металла.

Этот стабилизатор дуги может применяться и при сварке алюминиевых сплавов вольфрамовым электродом переменным током в среде инертного газа для поддержания горения дуги за счет подачи стабилизирующего импульса при смене полярности [3].

Описание работы схемы. Стабилизатор дуги СД-3 питается от сети 220 В с частотой $f = 50$ Гц (рис. 3.1). Принципиальную схему стабилизатора (рис. 3.2) функционально можно разбить на несколько блоков:

- силовая часть,
- схема управления тиристорами,
- схема коммутации тока.

Силовая часть схемы питается от вторичной обмотки W2 трансформатора Т. В ее состав входят диоды VD1, VD2, дроссель L и конденсаторы C1–C4.

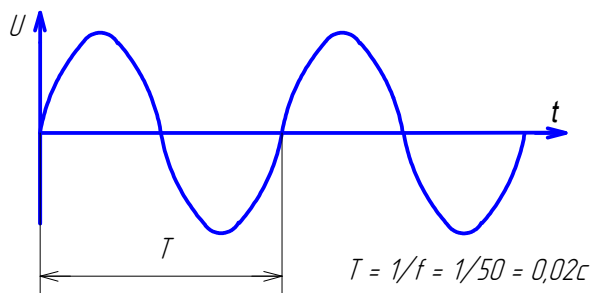


Рис. 3.1. Форма напряжения питающей сети

Тиристоры VS1, VS2, работающие в режиме управляемых вентилях, выполняют роль коммутационного узла схемы стабилизатора горения дуги.

В течение прямой полярности тока дуги конденсаторы C3, C4 заряжаются через диод VD2 положительным знаком. В момент смены прямой полярности тока на обратную тиристор VS2 открывается сигналом управления U_y , поданным с блока БУ. Схема блока управления БУ тиристорами VS1, VS2 питается от обмотки W3 трансформатора Т. При открывании тиристора VS2 через него кроме нагрузочного тока проходит разрядный ток. Конденсаторы C3, C4 разряжаются по цепи: размыкающий контакт реле К – тиристор VS2 – дроссель L – конденсаторы C5, C6 – дуга. Величина тока в импульсе, поступающего на дуговой промежуток, ограничивается величиной емкости конденсаторов C5, C6 и напряжением питания на конденсаторах C3, C4, заряжаемых от обмотки W2.

В обратную полярность тока дуги заряжаются конденсаторы C1, C2 через диод VD1. При открывании тиристора VS1 отрицательный заряд с конденсаторов C1, C2 разряжается по той же цепи, что и в прямую: дроссель L – конденсаторы C5, C6 – дуга. Длительность тока через тиристоры невелика и зависит от параметров L, C5, C6.

В результате попеременного срабатывания тиристоров VS1, VS2 на дуговой промежуток поступают кратковременные разнополярные импульсы с напряжением $U_{ст}$ до 400 В.

Защиту от одновременного срабатывания тиристоров VS1 и VS2 осуществляет токовое реле К. В этой ситуации через обмотку W2 проходит ток короткого замыкания ($I_{кз} \approx 8$ А), от этого реле мгновенно размыкает свой контакт К и восстанавливает работоспособность схемы.

Стабилизатор горения дуги типа СД-3 выдает стабилизирующие импульсы продолжительностью более $t_{ст} \approx 6 \cdot 10^{-6}$ с в начале каждой полуволны. Увидеть момент подачи импульса и форму тока дуги можно на осциллографе Р, подключенном к измерительному шунту RS (рис. 3.3).

Включение в сеть стабилизатора горения дуги и сварочного трансформатора синхронизируют включением их на одни и те же фазы. В случае несовпадения импульсов следует поменять поляр-

ность на стабилизаторе или трансформаторе. Стабилизатор горения СД-3 включается параллельно дуговому промежутку (рис. 3.3).

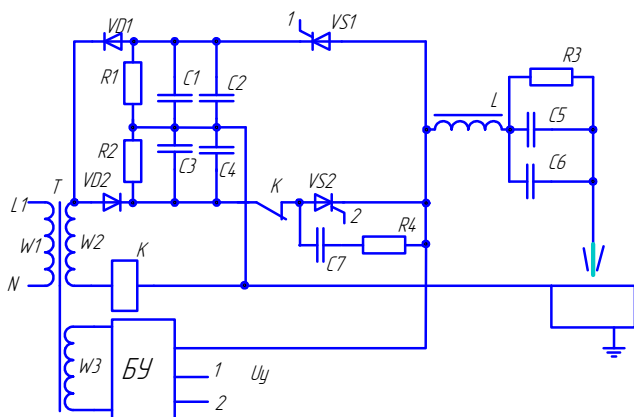


Рис. 3.2. Принципиальная схема полупроводникового стабилизатора горения дуги СД-3

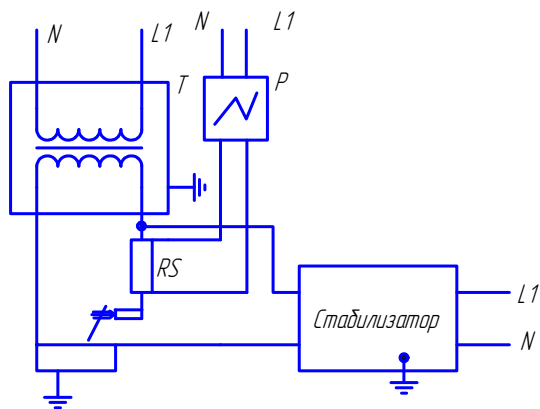


Рис. 3.3. Схема включения стабилизатора горения дуги параллельно дуговому промежутку

Указания к выполнению работы

1. Провести внешний осмотр конструкции стабилизатора СД-3.
2. Изучить порядок работы схемы стабилизатора и схемы его подключения.
3. Составить, а затем собрать схему подключения сварочного трансформатора, стабилизатора дуги, измерительного шунта и сварочного держака (рис. 3.3).
4. Включить питание стабилизатора дуги (220 В), осциллографа и сварочного трансформатора.

Внимание! Включение производить в присутствии преподавателя или лаборанта.

5. Настроить осциллограф и подключить к измерительному шунту RS.
6. Зажечь сварочную дугу и выполнить наплавку. При этом на осциллографе зафиксировать и зарисовать форму тока дуги и импульсы стабилизатора горения дуги.
7. Определить величину и частоту стабилизирующих импульсов.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Программа работы.
4. Принципиальная электрическая схема стабилизатора, подключенного в сварочную цепь со сварочным трансформатором и осциллографом.
5. Осциллограммы тока дуги $I_d = f(t)$, напряжения стабилизатора $U_{ст} = f(t)$, тока стабилизатора $I_{ст} = (t)$.
6. Выводы о работе.

Вопросы для самоконтроля

1. В чем заключается принцип работы стабилизатора горения дуги?
2. Почему источник питания и стабилизатор дуги включаются на одни и те же фазы?
3. С какой частотой подаются импульсы стабилизатора в сварочную цепь?
4. В какую полярность дуги подаются импульсы стабилизатора?

5. Как включается стабилизатор в сварочную цепь?
6. Возможно ли применение стабилизатора СД-3 при сварке алюминиевых сплавов?
7. Какую роль в схеме выполняют тиристоры?

Лабораторная работа 3.2

Генератор высокой частоты (осциллятор)

Цель работы – изучение принципа работы генератора высокой частоты, порядок его настройки и правила эксплуатации.

Оборудование и приборы

1. Генератор высокой частоты (осциллятор) типа ОСППЗ-300М или ОСПЗ-2М.
2. Сварочная горелка (узел сварочного автомата АДСВ-5).
3. Источник питания переменного или постоянного тока.
4. Набор отверток.

Указания для самостоятельной работы

1. Изучить в данной лабораторной работе материалы «Описание работы схемы осциллятора» и «Указания к выполнению работы».
2. Подготовить бланк отчета о лабораторной работе по форме (прил. 1).

Программа работы

1. Изучить принцип работы генератора высокой частоты (осциллятора).
2. Определить максимальную длину воздушного зазора ($\ell_{\text{в}} \approx \dots$) в режиме настройки колебательного контура, когда происходит пробой воздушного зазора $\ell_{\text{в}}$.
3. На сварочном стенде определить длину дугового промежутка ($\ell_{\text{д}} \approx \dots$), при которой происходит его пробой.
4. Выбрать тип источника питания.

Описание работы схемы осциллятора

Осциллятор предназначен для бесконтактного возбуждения дуги при сварке вольфрамовым электродом в среде аргона алюми-

ниевых сплавов на переменном токе или конструкционных и легированных сталей на постоянном токе. Возбуждение дуги вольфрамовым электродом с короткого замыкания на изделие недопустимо из-за возможности попадания частиц вольфрама в сварной шов [1; 3]. Осцилляторы питаются от сети 220 В с частотой 50 Гц. Электрические схемы осцилляторов последовательного включения (рис. 3.4, *а*) и параллельного включения (рис. 3.4, *б*) состоят из следующих элементов и цепей:

- С1, С2 (С1...С4, L3, L4)¹ – высокочастотные фильтры для защиты питающей сети от помех осциллятора;
- Т1 – повышающий трансформатор 220/2000 В;
- F – разрядник, конденсатор С3, (С5), индуктивность L1 (первичная обмотка трансформатора Т2) – элементы колебательного контура;
- Т2 – трансформатор связи с коэффициентом трансформации $K_{тр} \approx 1$;
- R, С4 (R, С5) – цепь защиты источника питания дуги от высокой частоты осциллятора.

На входе осциллятора включены высокочастотные фильтры для защиты сети от высокой частоты, создаваемой генератором.

Напряжение питания на осциллятор подается от сети $U_1 = 220$ В на трансформатор Т1, который повышает напряжение до $U_2 = (2000...7500)$ В и выполняет роль источника питания колебательного контура. Колебательный контур в осцилляторе образован: разрядником F, сопротивление которого изменяется в зависимости от величины воздушного промежутка $\ell_b = \text{var}$ при настройке осциллятора; емкости С3 (рис. 3.4, *а*), С5 (рис. 3.4, *б*); индуктивности L1 (первичная обмотка трансформатора Т2).

В процессе работы осциллятора конденсатор С3 (С5) заряжается до напряжения $U_2 = 2000$ В, накапливая энергию

$$W_{C3(5)} = \frac{C \cdot U_2^2}{2}.$$

Заряд длится до тех пор, пока не наступает пробой воздушного промежутка ℓ_b в разряднике F. Величина воздушного промежутка ℓ_b

¹ В скобках указаны элементы для схемы параллельного включения (рис. 3.4, *б*).

устанавливается отверткой в процессе настройки разрядника F осциллятора $l_b \approx (0...5)$ мм.

Как только произойдет пробой промежутка l_b и нарушатся его изоляционные свойства, он становится проводником тока и начинает работать колебательный контур F – C – L1. Возникает ток i_{kk} с собственной частотой.

Емкость C3 (C5) разряжается на индуктивность L1, энергия поля конденсатора C3 (C5) преобразуется в энергию магнитного поля индуктивности:

$$W_L = \frac{L1 \cdot i_{kk}^2}{2}.$$

Знакопеременный затухающий по амплитуде колебаний процесс с собственной частотой колебаний протекает в колебательном контуре.

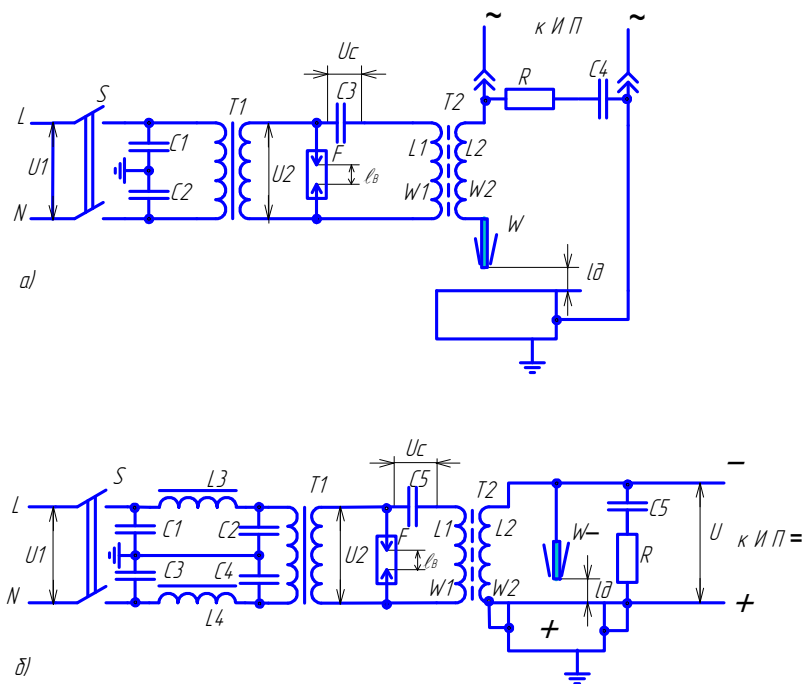


Рис. 3.4. Принципиальные схемы осцилляторов:
а – последовательного включения; б – параллельного включения

Емкость С3 (С5) и индуктивное сопротивление обмотки трансформатора Т2 подобраны так, чтобы $X_C = X_L$ (резонанс), тогда собственная круговая частота колебательного контура определяется по формуле

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L1 \cdot C}},$$

где $L1$ – индуктивность, Гн; C – емкость конденсатора С3(С5), Ф.

Колебательный контур выполняет функции генератора высокой частоты.

Резонансные свойства цепи характеризуются величиной добротности колебательного контура. Добротность контура, или коэффициент резонанса, обозначают Q , который определяется из выражения

$$Q = \frac{\rho}{R},$$

где ρ – волновое сопротивление цепи контура.

При добротности $Q > 5$ получается острый резонанс, когда резонансные значения I , U_L , U_C во много раз больше нерезонансных.

Трансформатор связи Т2 с коэффициентом трансформации около единицы выполнен с замкнутым магнитопроводом из феррита, поэтому синусоидальные колебания высокой частоты $f \approx (250...1000)$ кГц передаются в сварочную цепь без искажений.

Вторичная обмотка сварочного трансформатора источника питания переменного тока защищена от осциллятора цепью R, С4. На выходе сварочного выпрямителя ставится цепь защиты (R, С5). Иногда для надежности защиты последовательно в сварочную цепь дополнительно включают дроссель.

При длине дугового промежутка $\ell_d \approx 1...5$ мм высокое напряжение и высокая частота колебаний приведут к пробою промежутка между вольфрамовым W электродом и изделием.

Искровой разряд, созданный осциллятором, разовьется в дуговой, если подключен источник питания (ИП) дуги.

Указания к выполнению работы

1. Подготовить таблицу по форме (табл. 3.1).
2. Снять защитный кожух. Провести внешний осмотр конструкции.
3. Нарисовать фактическую принципиальную электрическую схему. (Учесть элементы конструкции выданного осциллятора.) За основу принять схему, приведенную на рис. 3.4.

4. Составить блок-схему сварочного поста, состоящего из источника питания дуги, сварочной горелки, осциллятора (учесть способ его подключения в сварочную цепь).
5. Подключить осциллятор к питающей сети 220 В. **Под наблюдением преподавателя или лаборанта!** Произвести отвертками настройку колебательного контура осциллятора. Установить подвижным электродом разрядника F длину воздушного промежутка ℓ_b , при которой происходит пробой (максимальная громкость звука). Осциллятор готов к работе в комплекте с горелкой и источником питания.
6. Собрать схему сварочного поста, установить первоначальную длину дугового промежутка $\ell_d = 1 \dots 2$ мм, подключить осциллятор к сети, при необходимости проверить его настройку.
7. Определить визуально максимальную длину дугового промежутка, при которой существует устойчивый искровой разряд.
8. Рассчитать частоту и добротность колебательного контура. (Величину индуктивного сопротивления принять равной $L \approx 1 \cdot 10^{-3}$ Гн – для осцилляторов последовательного включения и $L \approx 1 \cdot 10^{-4}$ Гн – для осцилляторов параллельного включения.)
9. Заполнить таблицу.

Таблица 3.1

Результаты измерений и расчета

№ п/п	ℓ_b , мм	ℓ_d , мм	C , Ф	L , Гн	R , Ом	ω_o	Q
1							

Содержание отчета

1. Титульный лист (прил. 1).
2. Цель работы.
3. Принадлежности.
4. Электрическая схема исследуемого осциллятора с указанием элементов.
5. Блок-схема осциллятора.
6. Таблица с результатами измерений и расчета.
7. Выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Чем объясняется необходимость применения осциллятора при возбуждении дуги?
2. Что является источником создания высокой частоты?
3. Что является источником высокого напряжения осциллятора?
4. Какие опасности возникают при работе с осциллятором?

Схемы управления электродвигателями

В сварочной технике для регулирования скорости сварки, скорости подачи присадочной проволоки, скорости сварочной головки наиболее широкое применение нашли двигатели постоянного тока.

По способу включения двигатели постоянного тока делятся на три основные группы: с *независимым возбуждением* (обмотка якоря и обмотка возбуждения питаются от различных напряжений); с *параллельным возбуждением* (рис. в табл. 3.3) (обмотка возбуждения подключается параллельно обмотке якоря); с *последовательным возбуждением* (рис. в табл. 3.5) (обмотка возбуждения включается последовательно с обмоткой якоря).

В двигателях постоянного тока с *независимым возбуждением* для изменения скорости чаще всего используют изменение напряжения на обмотке якоря $U_{\text{я}}$ или изменение сопротивления R в цепи обмотки якоря.

Наибольший диапазон изменения скорости можно получить, изменяя величину напряжения якоря с помощью различных усилителей: тиристорных, магнитных, электромашинных.

Для измерения скорости электроприводов чаще всего применяются тахометры и тахогенераторы. Тахогенераторы служат для получения напряжения, пропорционального скорости вращения вала двигателя, и представляют собой работающие в генераторном режиме электрические машины. Наибольшее применение имеют тахогенераторы постоянного тока.

Зависимость скорости вращения n от момента M нагрузки на валу двигателя называется механической характеристикой и является одной из основных. Различают механические характеристики естественные и искусственные. Естественной механической характеристикой называют зависимость $n = f(M)$ при номинальном на-

пряжении питания и отсутствии добавочных сопротивлений в цепи двигателя. Искусственная механическая характеристика двигателя – это зависимость $n = f(M)$ при питании двигателя напряжением, отличным от номинального, наличие добавочных сопротивлений в цепях якоря и обмотке возбуждения, а также при включении двигателя по специальным схемам. Когда естественные характеристики имеющихся типов двигателей не удовлетворяют предъявляемым требованиям, приходится получать искусственные путем изменения приложенного напряжения или включения регулируемых сопротивлений R в цепь якоря.

При всех способах сварки плавящимся электродом в защитной среде газа или флюса, при всех способах сварки неплавящимся электродом с подачей присадочной проволоки в зону сварки необходимо обеспечивать реверс электродвигателя. Для двигателя это означает возможность изменения направления вращения его вала. Такое же требование предъявляется к электродвигателям, обеспечивающим перемещение сварочных головок, горелок, электродной или присадочной проволоки. Изменить направление вращения двигателя постоянного тока можно, если изменить полярность напряжения питания или только на обмотке якоря или на обмотке возбуждения.

Передаточный коэффициент K выражает отношение выходной величины к соответствующему значению входной величины в установившемся режиме:

$$K = \Delta X_{\text{вых}} / \Delta X_{\text{вх}},$$

где Δ – символ, обозначающий, что значение X берется как приращение на участке прямой или касательной к кривой.

Применительно к конкретным функциональным элементам передаточный коэффициент называют также коэффициентом усиления (в усилителях), коэффициентом редукции (в редукторах), коэффициентом трансформации (в трансформаторах) и т. д.

Лабораторная работа 3.3

Изучение работы двигателя постоянного тока параллельного возбуждения в приводе подачи присадочной проволоки

Цель работы – изучение способов регулирования оборотов двигателя постоянного тока параллельного возбуждения в приводе подачи присадочной проволоки $V_{пр.пр}$ и способа определения передаточного коэффициента K объекта управления (ОУ).

Оборудование и приборы

1. Двигатели постоянного тока: СЛ-521, СЛ-261, Д5-ТД.
2. Блоки питания: Б5-47, Б5-49, Б5-АС, ВСА-111К.
3. Соединительные провода.
4. Амперметры, вольтметры.
5. Тахометр, тахогенератор.

Указания для самостоятельной работы

1. Изучить способы регулирования оборотов двигателей постоянного тока параллельного возбуждения (см. материал «Схемы управления электродвигателями» в ЛР 3.2).
2. Подготовить табл. 3.2 «Технические характеристики двигателя».

Таблица 3.2

Технические характеристики двигателя

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Справочные данные	Примечание
1	Номинальная мощность	$P_{ном}, Вт$		Обоснование выбора блока питания: $P_{ном. БП} > P_{ном. дв}$ $U_{ном. БП} \geq U_{я}$,
2	Номинальное напряжение	$U_{ном. об}, В$		
3	Ток обмотки возбуждения	$I_{об}, А$		
4	Номинальное напряжение	$U_{ном. оя}, В$		
5	Ток обмотки якоря	$I_{оя}, А$		$I_{ном. БП} \geq I_{оя} + I_{об}$, $q \leq 3 \%$
6	Номинальная скорость вращения	$n, об/мин$		

3. Изучить схему включения обмоток якоря М и обмоток возбуждения ОВМ электродвигателя и схему их питания постоянным током (рис. в табл. 3.3).

Таблица 3.3

Экспериментальные данные

Наименование параметра	Единица измерения	Результаты измерения			Примечание
		R 1	R 2	R 3	
Скорость вращения n , ($X_{\text{вых}}$)	об/мин				
Номинальное напряжение $U_{\text{я}}$, ($X_{\text{вх}}$)	В				
Ток обмотки якоря $I_{\text{я}}$, ($X_{\text{вх}}$)	А				
Передаточный коэффициент $K = \Delta_{\text{вых}} / \Delta_{\text{вх}}$					

Программа работы

1. Выбрать способ регулирования числа оборотов двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.
2. Определить диапазон регулирования оборотов двигателя при изменении сопротивления в цепи якоря R (табл. 3.3).
3. Построить статическую характеристику объекта управления ОУ $X_{\text{вых}} = f(X_{\text{вх}})$.

Указания к выполнению работы

1. Заполнить табл. 3.2 «Технические характеристики двигателя».
2. Выбрать блок питания соответствующей мощности для двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.
3. Собрать схему питания обмоток двигателя (рис. в табл. 3.3).
4. Экспериментально определить возможность регулирования скорости вращения двигателя, принудительно изменяя сопротивление в цепи якоря R (R_1, R_2, R_3).
5. Используя тахометр или тахогенератор, измерить величину оборотов минимальную, среднюю, максимальную ($n_{\text{min}}, n_{\text{cp}}, n_{\text{max}}$).

6. Построить статическую регулировочную характеристику ОУ:
 $n = f(R)$.
7. Рассчитать передаточный коэффициент K .
8. Заполнить табл. 3.3.

Содержание отчета

1. Титульный лист (прим. 1).
2. Цель работы.
3. Принадлежности.
4. Схема питания обмоток двигателя постоянного тока и регулирования числа оборотов.
5. Функциональная схема разомкнутой системы управления скоростью подачи присадочной проволоки $V_{пр}$.
6. Результаты справочных данных, измерений, наблюдений (табл. 3.2, 3.3), графические зависимости ОУ: $X_{вых} = f(X_{вх})$.
7. Выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. За счет чего можно регулировать число оборотов электродвигателя?
2. Какие способы известны для увеличения диапазона регулирования оборотов двигателя параллельного возбуждения, кроме изученных в лабораторной работе?
3. Что такое тахогенератор и каково его назначение?
4. В каком сварочном оборудовании применяются электродвигатели и каково их назначение?
5. Как обосновать выбор блока питания в лабораторной работе?

Лабораторная работа 3.4

Изучение работы двигателя постоянного тока последовательного возбуждения в приводе подачи присадочной проволоки

Цель работы – изучение способов регулирования оборотов двигателя постоянного тока последовательного возбуждения в приводе подачи присадочной проволоки $V_{\text{пр.пр}}$ и способа определения передаточного коэффициента K объекта управления ОУ.

Оборудование и приборы

1. Двигатели постоянного тока: Д-40Т, Д-4АТФ, Д-12ТФ, МУ-320, Д-7, ДМ-33 (МА-40).
2. Блоки питания: Б5-47, Б5-49, Б5-АС, ВСА-111К.
3. Соединительные провода.
4. Амперметры, вольтметры.
5. Тахометр, тахогенератор.

Указания для самостоятельной работы

1. Изучить способ регулирования оборотов двигателей постоянного тока последовательного возбуждения (см. материал «Схемы управления электродвигателями» в ЛР 3.2).
2. Подготовить табл. 3.4 «Технические характеристики двигателя».
3. Изучить схему включения обмоток якоря М и обмоток возбуждения ОВМ электродвигателя и схему их питания (рис. в табл. 3.5).

Программа работы

1. Изучить способ регулирования оборотов двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.
2. Определить возможность регулирования скорости вращения при изменении сопротивления R в цепи якоря и обмотки возбуждения двигателя, соединенных последовательно (табл. 3.5).
3. Построить статическую характеристику $X_{\text{вых}} = f(X_{\text{вх}})$ объекта управления ОУ.

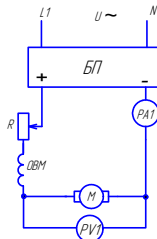
Таблица 3.4

Технические характеристики двигателя

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Справочные данные	Примечание
1	Номинальная мощность	$P_{\text{ном}}$, Вт		Обоснование выбора блока питания: $U_{\text{БП}} > U_{\text{оя}} + U_{\text{ов}}$, $I_{\text{БП}} \geq I_{\text{оя}}$
2	Номинальное напряжение	$U_{\text{ном. ов' оя'}}$, В		
3	Ток обмотки возбуждения и якоря	$I_{\text{ов' оя'}}$, А		
4	Скорость вращения	n , об/мин		

Таблица 3.5

Экспериментальные данные

Наименование параметра	Единица измерения	Результаты измерения			Примечание
		R1	R2	R3	
Скорость вращения n , ($X_{\text{вых}}$)	об/мин				 <p>Для двигателя типа СЛ выбрать блок питания переменного тока</p>
Номинальное напряжение $U_{\text{я}}$, ($X_{\text{вх}}$)	В				
Ток обмотки возбуждения и якоря $I_{\text{я}}$, ($X_{\text{вх}}$)	А				
Передаточный коэффициент $K = \Delta_{\text{вых}} / \Delta_{\text{вх}}$					

Указания к выполнению работы

1. Заполнить табл. 3.4 «Технические характеристики двигателя».
2. Выбрать блок питания для двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.
3. Собрать схему питания обмоток двигателя с измерительными приборами, учитывая возможность регулирования скорости вращения двигателя (рис. в табл. 3.5).
4. Определить возможность регулирования скорости вращения двигателя, изменяя сопротивление R в цепи обмотки якоря и обмотки

возбуждения, соединенных последовательно. Принудительно установить R_1, R_2, R_3 , измеряя тахометром или тахогенератором минимальное, среднее, максимальное число оборотов ($n_{\min}, n_{\text{cp}}, n_{\max}$).

5. Построить зависимость $n = f(R)$.
6. Рассчитать передаточный коэффициент K .
7. Заполнить табл. 3.5.

Содержание отчета

1. Титульный лист (прил. 1).
2. Цель работы.
3. Принадлежности.
4. Схема питания обмоток двигателя постоянного тока и регулирования скорости его вращения.
5. Функциональная схема разомкнутой системы управления скоростью подачи присадочной проволоки $V_{\text{пр}}$.
6. Результаты справочных данных, измерений, наблюдений (табл. 3.4, 3.5), графические зависимости ОУ: $X_{\text{вых}} = f(X_{\text{вх}})$.
7. Выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. За счет чего можно регулировать число оборотов электродвигателя последовательного возбуждения?
2. Каким способом можно расширить диапазон регулирования оборотов двигателя?
3. Что такое тахогенератор и каково его назначение?
4. В каком сварочном оборудовании применяются электродвигатели последовательного возбуждения и каково их назначение?
5. Как обосновать выбор блока питания в лабораторной работе?

Лабораторная работа 3.5

Блоки питания постоянного и переменного тока

Цель работы – изучение схемы блока питания и приобретение навыков работы с ним.

Оборудование и приборы

1. Блоки питания постоянного или переменного напряжения Б5-45, Б5-47, Б5-49, ВСА-111К, Н-700, ИСН-1 и др.
2. Амперметры, вольтметры и осциллограф.
3. Нагрузка для блоков питания: активные сопротивления типа ПЭВР-100 (47 Ом, 100 Вт), реостаты, обмотки двигателей постоянного или переменного токов, катушки реле, контакторов, пускателей.

Указания для самостоятельной работы

1. Изучить литературу [7; 8; 9], лекционный материал о блоках питания переменного и постоянного тока и указания к выполнению работы.
2. Ознакомиться с техническим описанием блока питания и его устройством.
3. Изучить характер нагрузки для блока питания.
4. Изучить принципиальную схему блока питания.
5. Подготовить таблицы для результатов исследований и технических характеристик блока питания и нагрузки.

Программа работы

1. Ознакомиться с устройством блока питания [9] и его техническими характеристиками.
2. Определить допустимую величину тока и напряжения на нагрузке.
3. Составить схему блока питания, используя пример на рис. 3.5.
4. Провести измерение параметров выходного напряжения $U_{\text{вых}}$, выходного тока $I_{\text{вых}}$, определить коэффициент пульсации:
$$q_2 = \Delta U_{\text{ном}} / U_{\text{ном}}$$

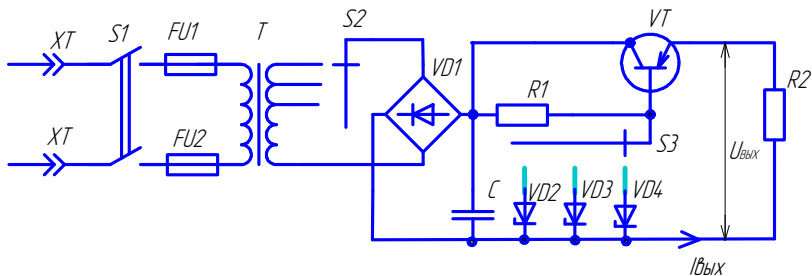


Рис. 3.5. Принципиальная схема блока питания (пример)

Описание блока питания

В лабораторных работах используются блоки питания постоянного тока (Б5-45, Б5-47, Б5-49, Б5-АС, Н-700) и универсальные, рассчитанные на переменный и постоянный токи (ВСА-111К, ИСН-1).

Блоки питания переменного тока могут быть образованы из следующих узлов:

- понижающих или повышающих трансформаторов с постоянным по величине напряжением на выходе ($U_2 = \text{const}$);
- понижающих трансформаторов с отпайками во вторичной обмотке W_2 для регулирования выходного напряжения ($U_2 = \text{var}$);
- автотрансформатора с отпайками в первичной обмотке W_1 для регулирования выходного напряжения ($U_2 = \text{var}$).

Схемы блоков питания постоянного тока (рис. 3.5) в общем виде могут быть образованы:

- из трансформатора Т (или один из вариантов блока питания переменного тока);
- двухполупериодного выпрямителя, собранного на диодах VD1;
- сглаживающего фильтра С, VT;
- стабилизатора выходного напряжения $U_{\text{вых}}$: VD2–VD4, R1, VT;
- управляющего устройства, регулирующего $U_{\text{вых}}$, $I_{\text{вых}}$: S2, S3.

Описание конструкции и принципа действия конкретного блока питания приводится в *техническом описании*, в нем же приведены технические данные. Все органы управления, регулирования и контроля блоков питания выводятся на лицевую панель блоков питания. При отсутствии инструкции на блок питания блок-схему

можно составить по органам управления и надписям на лицевой панели блока питания.

Напряжение питания $U_1 = 220$ В подается на блок через разъемное двухпроводное соединение ХТ или электрическую вилку и тумблер S1.

В качестве нагрузки для блока питания постоянного тока в лабораторных работах могут быть использованы реостаты типа ПВР, обмотки двигателей постоянного тока, лампы, нагревательные элементы (ТЭН), обмотки реле типа РП, ТКЕ, МКУ, электромагнитных контакторов (КМ); для блоков переменного тока – обмотки асинхронных двигателей, реле, пускателей. Для подключения нагрузки в блоках питания предусмотрены специальные клеммы.

Указания к выполнению работы

1. Ознакомиться со схемой предложенного преподавателем блока питания.
2. Изучить принцип работы потребителя (нагрузки), его устройство и схему подключения.
3. Подключить к соответствующим выходным клеммам блока питания нагрузку и измерительные приборы.
4. Подать с блока питания напряжение и ток, соответствующие номинальным значениям нагрузки (ток нагрузки не должен превышать допустимый ток блока питания).
5. Ознакомиться с инструкцией работы осциллографа. Подключить осциллограф к выходу блока питания и определить пульсацию q_2 (или воспользоваться справочными данными).
6. Нарисовать принципиальную схему изучаемого блока питания. За основу взять приведенную обобщенную схему из примера (рис. 3.5).
7. Предусмотреть подключение измерительных приборов. Нарисовать функциональную блок-схему изучаемого блока питания аналогично примеру, приведенному на рис. 3.6.
8. По справочным данным заполнить табл. 3.8 «Технические данные блока питания» (табл. 1, 2 [9]).

9. Рассчитать величину тока, потребляемую нагрузкой при номинальном напряжении питания, и установить возможность подключения блока питания к данной нагрузке.
10. Экспериментально проверить технические данные в режимах холостого хода и нагрузки. Определить величину пульсации q_1, q_2 .
11. Сделать выводы о пригодности и работоспособности блока питания (заполнить табл. 3.8 и 3.9).

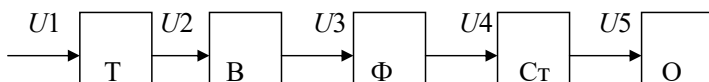


Рис. 3.6. Функциональная схема блока питания (пример)

Таблица 3.6

Технические данные реле

№ п/п	Тип	Напряжение, В		Ток, мА	Потребляемая мощность, Вт	Срок службы, ч	Контакты	
		срабатывания	отпускания				Количество, шт.	Ток в цепи коммут., А
1	РП21-УХЛ.1	24		10	0,5	10^7	3(з + р)*	< 3
2	РПУ-1	110 24		90 480		10^5 10^5	2з	< 10
3	ТКЕ-52ПД	24		15	4,0	—	2(з + р)	< 5
4	ТКЕ-53ПД	24		15	4,0	—	3(з + р)	< 5
5	ТКЕ-56ПД	24		20	0,5	—	6(з + р)	< 5
6	РЭС-9 РЭС-524	23		30		10^6	3 разм.	0,2; 0,5
7	РКН РС4.512	<60		5		10^7	2 разм.	0,2
8	РПН РС4.552	<60		2,5		10^7	2 зам. 2 разм.	0,2
9	РЭ 513Т	12— 220		200		10^7	1(з + р)	4 2 10
10	РФ4.500	24		62		10^7	1з + 1р	1

* з — замыкающий контакт; р — размыкающий контакт.

Таблица 3.7

Технические данные электромагнитных контакторов

№ п/п	Тип	Напряжение, В		Ток, А	Потребляемая мощность, Вт	Число включений	Контакты	
		срабатывания	отпускания				Ток в цепи коммутации, А	Кол-во, шт.
1	КМ-25	27	<14	0,6	16,2	—	25	1
2	КМ-50Д	27	<19	0,42	21,0	5×10^3	50	1
3	КМ-100Д	27	<18	2,5	67,5	5×10^3	100	1
4	КМ-200	27	<14	3,0	81	15×10^3	200	1
5	КМ-300	24		3,0	90		300	1
6	КМ-400	27	<14	3,5	96	15×10^3	400	1
7	КМ-500	24		4,0	100		500	1
8	КМ-600	27	<19	4,0	107,5	15×10^3	600	1

Таблица 3.8

Технические данные блока питания типа...

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Справочные данные	Расчетные данные	Примечание
1	Напряжение сети, В	U_1			Рассчитать допустимую величину тока и напряжения нагрузки
2	Максимальное напряжение блока, В	U_{2max}			
3	Предел регулирования выходного напряжения, В	$U_{2min} - U_{2max}$			
4	Максимальный ток, А	I_{max}			
5	Мощность блока питания, Вт	P			
6	Коэффициент пульсации напряжения	q		$q = \Delta U_n / U_n$	

Таблица 3.9

Экспериментальные данные

Режим работы блока питания	Напряжение сети, В	Выходное напряжение, В	Ток блока питания, А	Осциллограмма выходного напряжения $U = f(t)$
Холостой ход				
Нагрузка				

Содержание отчета

1. Титульный лист (прил. 1).
2. Цель работы, принадлежности к лабораторной работе.
3. Принципиальная схема исследуемого блока питания с подключенной нагрузкой и обозначенными элементами, входящими в схему.
4. Функциональная схема блока питания.
5. Технические данные блока питания (табл. 3.8).
6. Результаты измерения в режимах холостого хода и нагрузки (табл. 3.9).
7. Выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Что относится к параметрам блока питания?
2. Какие элементы входят в блок питания?
3. Какую функцию выполняет фильтр?
4. Опишите область применения блока питания в сварке.
5. Какую функцию выполняет стабилизатор напряжения?
6. Как снизить пульсацию на выходе выпрямителя?

Лабораторная работа 3.6

Блоки питания постоянного тока для электромагнитных и электромеханических элементов автоматики

Цель работы – изучение схемы блока питания, конструкции электромагнитных и электромеханических элементов автоматики и правил их эксплуатации.

Оборудование и приборы

1. Блоки питания постоянного тока.
2. Электромагнитные контакторы, электромеханические реле, пускатели (табл. 3.6, 3.7 в ЛР 3.5 [9]).
3. Соединительные провода.
4. Измерительные приборы (амперметры, вольтметры, осциллограф).

Указания для самостоятельной работы

1. Изучить методическое пособие [9], лекционный материал.
2. Изучить конструкции и принцип работы элементов автоматики: реле, контакторов, пускателей [4; 9; 10].
3. Подготовить бланк отчета о лабораторной работе по форме (прил. 1).

Программа работы

1. Изучить схемы включения обмоток реле, электромагнитных контакторов.
2. Ознакомиться со справочными данными на электромагнитные реле (табл. 3.6 в ЛР 3.5) и контакторы (табл. 3.7 в ЛР 3.5 [9]).
3. Изучить схему блока питания постоянного тока.
4. Выбрать тип блока питания для питания катушек реле, контакторов и других элементов.
5. Провести измерение напряжения U_{cp} и тока I_{cp} срабатывания в выданных преподавателем элементах автоматики.

Работа электромагнитных реле и контакторов

Реле — это устройство, которое автоматически осуществляет скачкообразное изменение выходного сигнала под воздействием управляющего сигнала. Управляющим сигналом является напряжение, подаваемое на катушку реле. Сигнал на выходе — параметр коммутируемой контактами реле электрической цепи: ток, напряжение, мощность.

С конструктивной точки зрения электромагнитное реле представляет собой электромагнит, якорь которого связан с контактной группой, включенной в управляющие цепи системы регулирования или управления. При срабатывании электромагнита контакты реле замыкают или размыкают одну или несколько цепей управления, ток в которых может быть больше, чем ток в катушке реле.

Наиболее часто применяются реле с поворотной конструкцией якоря. В реле с поворотным якорем при протекании тока по катушке возникает магнитный поток, создающий усилие, которое притягивает якорь к неподвижному магнитопроводу. Сила магнитного притяжения преодолевает силу возвратной пружины. Когда в

катушке ток равен нулю, пружина 5 возвращает якорь в исходное положение (рис. 3.7, а).

Электромагнитный контактор типа КМ – это устройство, которое под воздействием управляющего сигнала скачкообразно изменяет выходной сигнал большой величины тока. Контакттор – это электромагнит, который связан с контактной группой, как правило, с замыкающими контактами, коммутирующими сварочные цепи (рис. 3.7, б).

При протекании тока в катушке контактора возникает магнитный поток, создающий усилие, которое втягивает сердечник, замыкая контакты контактора.

Когда ток в катушке равен нулю $I_k = 0$, сердечник благодаря собственному весу и действию пружины возвращается в исходное положение вместе с контактной группой.

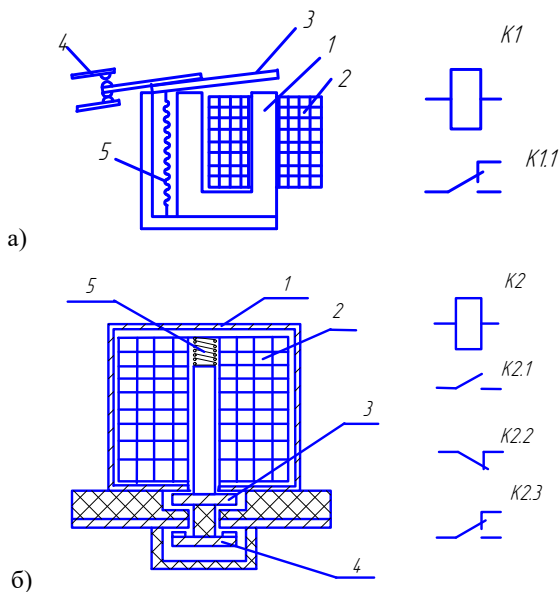


Рис. 3.7. Конструкция и обозначение:
а – реле; б – контактора

Указания к выполнению работы

1. Заполнить табл. 3.10 «Технические характеристики реле (контакторов, пускателей)».
2. Выбрать блок питания реле, контактора. Результаты занести в табл. 3.11.
3. Собрать схему питания катушек реле или контактора. Результаты измерений занести в табл. 3.10, 3.11.
4. Проверить работоспособность реле, контактора, блока питания.

Таблица 3.10

Технические характеристики реле (контакторов, пускателей)

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Технические данные реле, контакторов			Примечание		
			Справочные	Расчетные	Экспериментальные			
					1 опыт		2 опыт	3 опыт
1	Напряжение срабатывания	U_{cp} , В				Указать блок питания		
2	Ток срабатывания	I_{cp} , А						
3	Количество контактов	Зам. Разм.						

Таблица 3.11

Технические характеристики блока питания...

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Технические данные		Примечание
			Справочные	Экспериментальные	
1	Номинальная мощность	P , Вт			Сравнить параметры $U_{вых}$, $I_{вых}$, $P_{вых}$ с паспортными параметрами реле (контактора)
2	Предел регулирования напряжения	$U_{вых}$, В			
3	Предел регулирования тока	$I_{вых}$, А			
4	Пульсация на выходе	q , %			

Содержание отчета

1. Титульный лист (прил. 1).
2. Цель работы.
3. Принадлежности.
4. Схема блока питания с включением реле, контактора, пускателя.
5. Конструкция реле (контактора, пускателя).
6. Результаты измерений и наблюдений (табл. 3.10, 3.11).
7. Выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. По каким признакам выбирают блок питания для катушек реле?
2. Из каких элементов состоит электромагнитное реле?
3. Из каких элементов состоит блок питания постоянного тока?
4. Что такое контактор, из каких элементов он состоит?

Рекомендуемая литература

1. Газоэлектрическая сварка алюминиевых сплавов / под ред. С.Н. Киселева [и др.]. — М. : Машиностроение, 1972. — 260 с.
2. Короткова, Г.М. Источники питания для сварки / Г.М. Короткова. — Тольятти. : КуАИ, 1980. — 56 с.
3. Оборудование для дуговой сварки : справочное пособие / под ред. В.В. Смирнова. — Л. : Энергоиздат, 1986. — 656 с.
4. Цепенев, Р.А. Автоматизация сварочных процессов : учеб. пособие / Р.А. Цепенев. — Тольятти : УКЦ Конкурс, 1990. — 106 с.
5. Андреев, В.П. Основа электропривода / В.П. Андреев, Ю.А. Сабинин. — М. : ГЭИ, 1956. — 447 с.
6. Львов, Н.С. Автоматика и автоматизация сварочных процессов / Н.С. Львов, Э.А. Гладков. — М. : Машиностроение, 1982. — 302 с.
7. Жеребцов, И.П. Основы электроники / И.П. Жеребцов. — Л. : Энергоатомиздат, 1989. — 352 с.
8. Основы промышленной электроники / под ред. В.Г. Герасимова. — М. : Высш. шк., 1978. — 336 с.
9. Короткова, Г.М. Элементы систем управления машиностроительным оборудованием : учеб. пособие / Г.М. Короткова, К.В. Моторин. — Тольятти, 2004. — 121 с.
10. Колосов, С.Н. Элементы автоматики : учебник / С.Н. Колосов, И.В. Калмыков, В.И. Нефедова. — М. : Машиностроение, 1970. — 632 с.

Раздел IV. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ СВАРОЧНОЙ ДУГИ

◆ СВАРОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Лабораторная работа 4.1 Исследование сварочного трансформатора ТС-100 с секционированными обмотками

Цель работы – изучение конструкции сварочного трансформатора с секционированными обмотками, принципа формирования внешней вольт-амперной характеристики и способа регулирования тока дуги.

Оборудование и приборы

1. Т1 – сварочный трансформатор типа ТС-100.
2. R1 – активное сопротивление типа РБ-300.
3. pV_1, pV_2 – вольтметры электромагнитной системы.
4. pA_1, pA_2 – амперметры электромагнитной системы.
5. Т2 – трансформатор тока.

Программа работы

1. Изучить конструкцию сварочного трансформатора и способ регулирования сварочного тока.
2. Собрать сварочную цепь с измерительными приборами.
3. Снять показания приборов при трех положениях регулятора сварочного тока и при нескольких режимах (х. х., нагрузка, к. з.). Заполнить табл. 4.2.
4. Построить графики, провести расчеты и сделать выводы.

Описание сварочного трансформатора ТС-100

✦ Назначение

Сварочный трансформатор ТС-100 предназначен для ручной дуговой сварки покрытыми электродами и может применяться в бытовых условиях. Напряжение на дуге (рис. 4.1) при сварке покрытыми электродами может изменяться от 18 до 42 В в зависимо-

сти от длины дуги, диаметра электрода, марки электрода и других параметров. Наличие в покрытии электрода ионизирующих компонентов (калий, кальций, натрий) обеспечивает стабильность горения дуги и смену полярности при сварке на переменном токе.

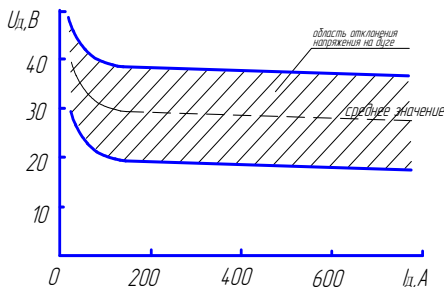


Рис. 4.1. Статические характеристики дуги при сварке покрытыми электродами [2]

★ Описание конструкции

Сварочный трансформатор ТС-100 (рис. 4.2) состоит из двух разнесенных катушек W_1 и W_2 первичной обмотки с отпайками, расположенными на разных стержнях магнитопровода, и двух катушек вторичной обмотки W_3 и W_4 , разнесенных друг от друга по стержню на нерегулируемое расстояние ϵ .

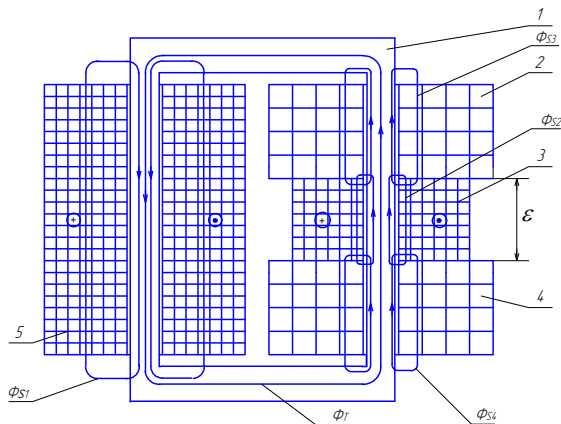


Рис. 4.2. Электромагнитная схема трансформатора ТС-100:
 1 – магнитопровод; 2, 4 – вторичные обмотки W_3 , W_4 ;
 3, 5 – первичные обмотки W_1 , W_2

Разнесение первичных и вторичных обмоток позволяет создать повышенные магнитные потоки рассеяния Φ_s , а следовательно, и большое индуктивное сопротивление X_s трансформатора. Все катушки первичной и вторичной обмоток закрепляют неподвижно относительно друг друга на стержнях магнитопровода. Замкнутый шихтованный магнитопровод собран из электротехнической стали.

Регулирование тока дуги производится изменением числа витков в первичной обмотке и их расположением относительно вторичной.

✦ Работа схемы поста

Однофазный сварочный трансформатор с секционированными обмотками ТС-100 относится к трансформаторам с увеличенными потоками рассеяния.

Напряжение сети $U_1 = 220$ В подается на первичную обмотку через контакты автомата $S1$ (рис. 4.3).

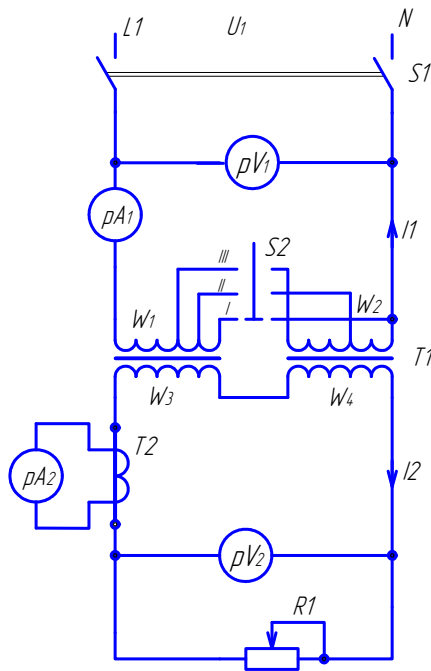


Рис. 4.3. Принципиальная схема сварочного поста: Т1 – сварочный трансформатор; Т2 – трансформатор тока; R1 – нагрузка сварочного трансформатора для снятия вольт-амперной характеристики

В режиме холостого хода под действием напряжения U_1 по первичным обмоткам W_1, W_2 течет ток холостого хода $I_{x.x}$. Магнитодвижущие силы F_1, F_2 , равные $I_{x.x} \cdot W_1$ и $I_{x.x} \cdot W_2$, создают магнитный поток Φ_T . Из-за большого расстояния между обмотками часть Φ_{S1} магнитного потока, минуя вторичную обмотку, замыкается только по воздуху, другая часть — Φ_{S2} — по воздуху и вторичным обмоткам W_3 и W_4 (рис. 4.2).

Суммарный магнитный поток Φ трансформатора определяется суммой потоков (рис. 4.2):

$$\Phi = \Phi_T + \Phi_{S1} + \Phi_{S2}. \quad (4.1)$$

Магнитный поток Φ_T , пронизывая витки вторичной обмотки, создает в ней электродвижущую силу E_2 . В режиме холостого хода $U_2 = E_2$.

В схеме предусмотрено изменение переключателем $S2$ числа витков первичных обмоток W_1 и W_2 , а следовательно, и намагничивающих сил F_1 и F_2 , от которых зависят величины магнитных потоков рассеяния Φ_{S1}, Φ_{S2} (рис. 4.2). Это позволяет регулировать магнитный поток Φ_T в магнитопроводе.

Таким образом, напряжение холостого хода зависит от потоков рассеяния, величина которых определяется обмотками W_1 и W_2 , т. е.

$$U_{xx} = f(W_1 + W_2).$$

В режиме нагрузки под действием напряжения сети U_1 в первичной обмотке ток I_1 создает $F_1 = I_1 \cdot W_1$ и $F_2 = I_1 \cdot W_2$, во вторичной обмотке ток I_2 создает $F_3 = I_2 \cdot W_3$ и $F_4 = I_2 \cdot W_4$.

Магнитодвижущие силы $F_1 \dots F_4$ создают магнитные потоки $\Phi_1 \dots \Phi_4$. Их суммарный магнитный поток Φ_T проходит только по магнитопроводу (рис. 4.2), а потоки рассеяния $\Phi_{S1}, \Phi_{S2}, \Phi_{S3}$ и Φ_{S4} замыкаются в пространстве между обмотками.

Суммарный поток рассеяния, действующий между обмотками:

$$\sum \Phi_S = \Phi_{S1} + \Phi_{S2} - \Phi_{S3} - \Phi_{S4}, \quad (4.2)$$

где Φ_{S1}, Φ_{S2} — потоки рассеяния, сцепленные только с первичной обмоткой; Φ_{S3}, Φ_{S4} — потоки рассеяния, сцепленные с вторичной обмоткой. Полный магнитный поток трансформатора:

$$\Phi = \Phi_T + \sum \Phi_S. \quad (4.3)$$

Регулированием числа витков W_1 и W_2 изменяется $\sum\Phi_S$, а следовательно, и магнитный поток трансформатора:

$$\Phi_T = \Phi - \sum\Phi_S.$$

В трансформаторе предусмотрены три ступени регулирования.

На первой ступени число витков первичной обмотки определяется только W_1 , а $W_2 = 0$. Это означает, что

$$F_1 = I_1 \cdot W_1; \quad \sum\Phi_S = \Phi_{S1} - \Phi_{S3} - \Phi_{S4}; \quad \Phi_{S2} = 0$$

(рис. 4.2). На этой ступени Φ_T минимальной величины, следовательно, и $I_{д.мин}$.

На второй ступени $W_1 = 0,8W_1$ и $W_2 = 0,5W_2$ витков. Это означает, что

$$\Phi_T \approx 0,8\Phi_1 + 0,5\Phi_2, \text{ а } \sum\Phi_S \approx 0,8\Phi_{S1} + 0,5\Phi_{S2} - \Phi_{S3} - \Phi_{S4}.$$

На этой ступени Φ_T средней величины, следовательно, и $I_{д.ср}$ (рис. 4.2).

На третьей ступени $W_1 = 0,7W_1$ витков и W_2 полностью, тогда

$$\Phi_T \approx 0,7\Phi_1 + \Phi_2, \text{ а } \sum\Phi_S \approx 0,7\Phi_{S1} + \Phi_{S2} - \Phi_{S3} - \Phi_{S4}.$$

На этой ступени Φ_T максимальной величины, следовательно, и $I_{д.макс}$ (рис. 4.2).

Уравнение ЭДС для вторичной обмотки в режиме нагрузки:

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 + \sum\underline{E}_3 - \underline{I}_2 R_2, \quad (4.4)$$

где E_2 – ЭДС вторичной обмотки; $\sum E_3 = -jI_2 X_S$ – сумма ЭДС, созданных потоками рассеяния; X_S – индуктивное сопротивление трансформатора; $I_2 R_2$ – падение напряжения в активных сопротивлениях сварочной цепи.

Активное сопротивление сварочной цепи R_2 значительно меньше индуктивного сопротивления трансформатора X_S , поэтому величиной его пренебрегаем. Тогда уравнение ЭДС для вторичной обмотки:

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - jI_2 X_S. \quad (4.5)$$

Внешняя вольт-амперная характеристика формируется за счет потоков рассеяния $\sum\Phi_S$, которые создаются секционированием и разнесением обмоток. Падающая вольт-амперная характеристика трансформатора, пересекаясь со статической характеристикой дуги, образует точку равновесия энергетической системы или точки устойчивого горения дуги.

Ток дуги регулируется изменением числа витков первичной обмотки (три ступени регулирования).

В режиме короткого замыкания (к. з.) величина $I_{к.з}$ ограничена значениями напряжения холостого хода $U_{х.х}$ и индуктивным сопротивлением трансформатора X_S :

$$I_{к.з} \approx U_{х.х} / X_S$$

Начальное возбуждение дуги при ручной дуговой сварке производится с к. з.

Коэффициент полезного действия η сварочных трансформаторов определяется в точках устойчивого горения дуги при $I_{и} = I_{д}$ и $U_{и} = U_{д}$ по формуле ($I_{и}$, $U_{и}$ – ток и напряжение источника; $I_{д}$, $U_{д}$ – ток и напряжение дуги):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}, \quad (4.6)$$

где P_1 – активная мощность первичной цепи, Вт; P_2 – активная мощность сварочной цепи в точках устойчивого равновесия системы, Вт; φ_1 , φ_2 – угол сдвига тока дуги относительно напряжения холостого хода; $\cos \varphi_1 \approx \cos \varphi_2 \approx 0,55 \dots 0,6$.

Указания к выполнению работы

1. Собрать схему сварочного поста с измерительной аппаратурой (рис. 4.3).
2. Определить цену делений и заполнить табл. 4.1.
3. Установить первую ступень регулирования тока.

Внимание! Включать питающее напряжение можно только после проверки схемы преподавателем или лаборантом!

4. Записать показания приборов в табл. 4.2 в режимах холостого хода, нагрузок, изменяя количество замкнутых контактов $R_{н}$ и короткого замыкания. Изменить число витков первичной обмотки, установив переключатель на вторую, затем на третью ступени. Продолжить запись показаний во всех режимах (х. х., нагрузки, к. з.).
5. Построить графики:

1) внешней вольт-амперной характеристики $U_2 = f(I_2)$ трансформатора для трех ступеней в одних координатных осях;

2) статической вольт-амперной характеристики дуги для ручной дуговой сварки $U_d = f(I_d)$ (график перенести с рис. 4.1 в тех же координатных осях, что и $U_2 = f(I_2)$).

6. Определить по графику максимальный и минимальный ток дуги и рассчитать кратность регулирования

$$K_p = \frac{I_{д.макс.}}{I_{д.мин.}}$$

7. Рассчитать значения η по формуле (4.6) для трех точек устойчивого равновесия системы и построить график $\eta = f(I_d)$.

$$\cos \varphi_1 \approx \cos \varphi_2 \approx 0,55 \dots 0,6.$$

8. Значения I_1 определить по графику $I_1 = f(I_2)$ (строить по необходимости).

9. Определить коэффициент трансформации в режиме холостого хода:

$$K_{тр} \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{W_1 + W_2}{W_3 + W_4}. \quad (4.7)$$

Содержание отчета

1. Титульный лист (прил. 1).
2. Название лабораторной работы.
3. Цель работы.
4. Электромагнитная схема сварочного трансформатора, электрическая схема поста с измерительной аппаратурой.
5. Таблицы 4.1 и 4.2.
6. Графики зависимостей $U_2 = f(I_2)$ для трех ступеней и $U_d = f(I_d)$ в одних координатных осях; $I_d = f(W_1 + W_2)$ и $\eta = f(I_d)$; $I_1 = f(I_2)$.
7. Выводы. Указать способ формирования $U_2 = f(I_2)$, способ регулирования I_d и недостатки конструкции с вашей точки зрения.

Вопросы для самоконтроля

1. Что называется сварочным трансформатором?
2. Какую роль выполняет магнитопровод трансформатора?
3. Почему вольт-амперная характеристика ТС-100 падающая?
4. Как регулируется величина сварочного тока?
5. Опишите область применения трансформатора ТС-100.
6. Какие материалы можно сваривать на ТС-100?

7. Какова картина распределения потоков рассеяния?
8. За счет каких параметров трансформатора ограничивается величина $I_{к.з}$?
9. Какие соотношения $I_{к.з}/I_d$ получены в работе?
10. Как изменяется X_G ?

Таблица 4.1

Измерительные приборы (*пример*)

№	Условные обозначения приборов в схеме	Измеряемый параметр	Цена деления (пример)	* Дата гос. проверки
1	pA_1	$I_1, I_{x,x}$	5 А/дел.	10.01.2016
2	pU_1	U_1		
3	pA_2	$I_2, I_{к.з}$		
4	T_2	$I_2, I_{к.з}$		
5	pU_2	$U_{x,x}, U_2, U_d$		

* – Проводится ежегодно

Таблица 4.2

Результаты измерений и расчетов

Кол-во витков $W_1 + W_2$	Режим	Измерение				Расчет		
		$U_1, В$	$U_2, В$	$I_1, А$	$I_2, А$	$P_1, ВА$	$P_2, ВА$	η
1 ступень (296)	XX							
	H1							
	H2							
	H3							
	H4							
	H5							
	H6							
2 ступень (240)	XX							
	H1							
	H2							
	H3							
	H4							
	H5							
	H6							

Кол-во витков $W_1 + W_2$	Режим	Измерение				Расчет		
		$U_1, В$	$U_2, В$	$I_1, А$	$I_2, А$	$P_1, ВА$	$P_2, ВА$	η
	КЗ							
3 ступень	ХХ							
(220)	Н1							
	Н2							
	Н3							
	Н4							
	Н5							
	Н6							
	КЗ							

Лабораторная работа 4.2 **Изучение сварочного трансформатора** **с магнитным шунтом**

Цель работы – изучение принципа работы сварочного трансформатора с магнитным шунтом, принципа формирования вольт-амперной характеристики, способа регулирования тока и области применения, приобретение навыков работы с оборудованием.

Оборудование и приборы

1. Т1 – сварочный трансформатор с магнитным шунтом ТДМ-140, «Русич-200» или Ferm-310.
2. Rн – активное сопротивление типа РБ-300.
3. рV1, рV2 – вольтметры электромагнитной системы.
4. рА1, рА2 – амперметры электромагнитной системы.
5. Т2 – трансформатор тока.

Программа работы

1. Изучить конструкцию сварочного трансформатора и способ регулирования сварочного тока.
2. Собрать сварочную цепь с измерительными приборами.
3. Снять показания приборов при трех положениях регулятора сварочного тока в режимах х. х., нагрузка, к. з. Заполнить табл. 4.3.
4. Построить графики, провести расчеты и сделать выводы.

Описание сварочного трансформатора ТДМ-140

✦ Назначение

Сварочный трансформатор предназначен для ручной дуговой сварки при питании от сети $U_1 = 220$ В. Напряжение на дуге при сварке покрытыми электродами может изменяться от 18 до 42 В в зависимости от длины дуги, диаметра электрода, марки электрода и других параметров (рис. 4.1). Наличие в покрытии электрода ионизирующих компонентов (калий, кальций, натрий) обеспечивает стабильность горения дуги и смену полярности при сварке на переменном токе.

✦ Описание конструкции

Сварочный трансформатор броневого типа состоит из замкнутого Ш-образного магнитопровода (рис. 4.4), на среднем стержне которого закреплены первичная W_1 и вторичная W_2 обмотки, разнесенные относительно друг друга на расстояние ε . Между обмотками расположен магнитный шунт 3, который может перемещаться между боковыми стержнями магнитопровода с помощью винтовой пары.

✦ Работа схемы поста

Напряжение сети $U_1 = 220$ В подается через контакты автоматов QF и S на первичную обмотку W_1 (рис. 4.5).

В режиме холостого хода сварочная цепь разомкнута, т. е. ножи балластного реостата R_n , разомкнуты и ток во вторичной цепи равен нулю $I_2 = 0$.

В режиме нагрузки предполагается формирование сварного соединения с заданными параметрами, когда $U_d \neq 0$, $I_d \neq 0$. Сопротивление дуги R_d заменено активным сопротивлением нагрузки R_n , величина которого регулируется количеством замкнутых ножей.

Под действием U_1 по первичной обмотке W_1 протекает ток I_1 , создавая намагничивающую силу $F_1 = I_1 \cdot W_1$, а затем магнитные потоки Φ_1 , Φ_2 .

В сварочной цепи ток I_2 создает намагничивающую силу $F_2 = I_2 \cdot W_2$ и магнитные потоки Φ_2 , Φ_{s2} .

Потоки рассеяния первичной Φ_{s1} и вторичной Φ_{s2} обмоток имеют возможность замкнуться через подвижный магнитный шунт 3 (рис. 4.4).

В зависимости от положения шунта внутри магнитопровода есть возможность регулировать величину суммарного потока рассеяния $\Sigma\Phi_s = \Phi_{s1} + \Phi_{s2}$, а следовательно, и величину индуктивного сопротивления трансформатора X_s .

Уравнение ЭДС для вторичной обмотки в режиме нагрузки имеет вид:

$$U_2 = E_2 + \Sigma E_s - I_2 R_2,$$

где E_2 – ЭДС вторичной обмотки; $\Sigma E_s = -jI_2 X_s$ – ЭДС, созданная потоками рассеяния; X_s – индуктивное сопротивление: $X_s = \omega L$ и зависит от положения магнитного шунта.

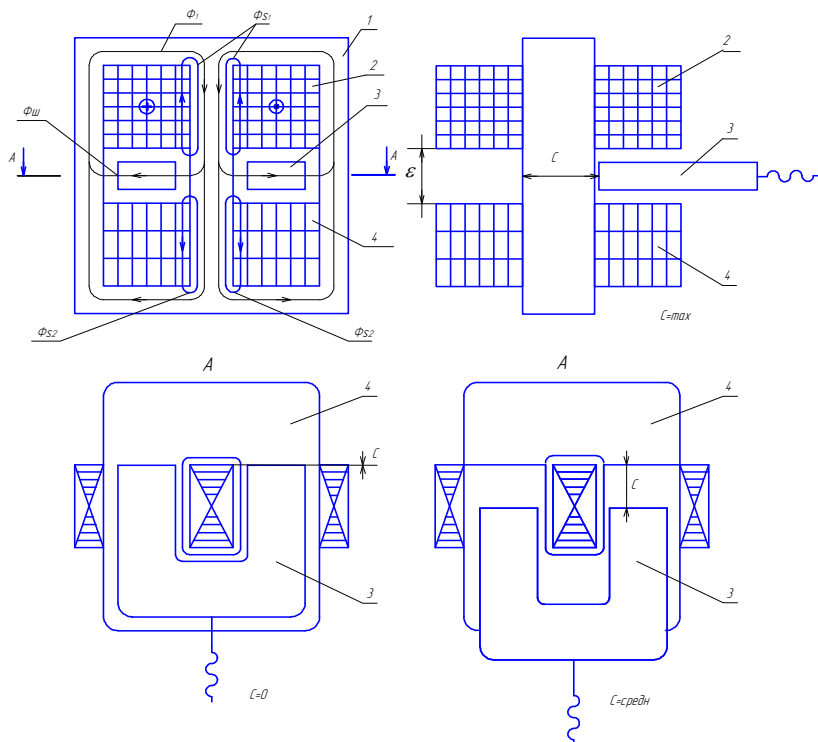


Рис. 4.4. Электромагнитная схема сварочного трансформатора ТДМ-140:
 1 – магнитопровод; 2 – первичная обмотка W_1 ; 3 – магнитопровод шунта;
 4 – вторичная обмотка W_2

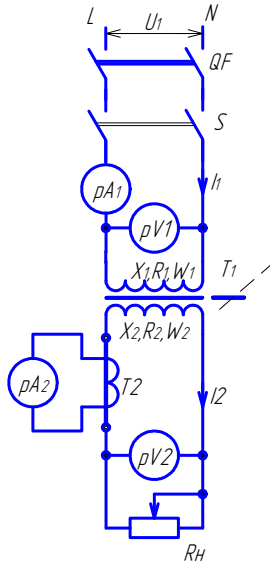


Рис. 4.5. Принципиальная схема сварочного поста с ТДМ-140:

T1 – сварочный трансформатор; T2 – трансформатор тока;

Rн – балластное сопротивление

Ток дуги I_d рассчитывается по формуле

$$I_d \approx \frac{\sqrt{U_{X.X}^2 - U_d^2}}{X_T + X_p}, \quad (4.8)$$

где X_r , X_p – индуктивное сопротивление вторичной обмотки трансформатора и дросселя (реактивное); $U_d = U_n$ – в состоянии устойчивого равновесия, т. е. при пересечении характеристик дуги и трансформатора или горении дуги.

Активными сопротивлениями сварочной цепи пренебрегаем ($R_2 \approx 0$).

При полностью вставленном шунте, т. е. $C = 0$ (рис. 4.4), магнитный поток шунта $\Phi_{ш}$ максимальный, а основной магнитный поток трансформатора минимальный, следовательно, сварочный ток тоже минимальный. Если магнитный шунт вытянуть из трансформатора (C – среднее или max), то магнитный поток шунта уменьшается, а основной поток возрастает, что приводит к увеличению сварочного тока. Изменяя положение шунта, можно регулировать величину сварочного тока.

В режим короткого замыкания $U_2 \approx 0$, величина тока $I_2 = I_{к.з}$:

$$I_{к.з} \approx \frac{U_{х.х}}{X_{\Sigma}}. \quad (4.9)$$

Для ручной дуговой сварки $I_{к.з} = (1,2...1,3) I_{д}$, так как с этого режима начинается возбуждение дуги при ручной дуговой сварке.

Коэффициент полезного действия сварочных трансформаторов определяется в точках устойчивого горения дуги при $I_{и} = I_{д}$ и $U_{и} = U_{д}$ по формуле (4.6). $I_{и}$, $U_{и}$ – ток и напряжение источника; $I_{д}$, $U_{д}$ – ток и напряжение дуги.

Указания к выполнению работы

1. Собрать схему поста в соответствии с рис. 4.5. Определить цену делений приборов со схемы и заполнить табл. 4.1.
2. Установить шунт в положение, когда он полностью вдвинут в магнитопровод, т. е. $C \approx 0$ (рис. 4.4).

Внимание! Включать питающее напряжение можно только после проверки схемы преподавателем или лаборантом!

3. Записать показания приборов в графу «Измерение» табл. 4.3, изменяя режимы работы трансформатора (х. х., нагрузка, к. з.) количеством замкнутых ножей от 1 до 6 на балластном реостате R_n .
4. Продолжить эксперимент в положениях магнитного шунта при C – среднее и C – тах, продолжая записывать показания приборов в табл. 4.3.
5. По результатам эксперимента построить в одних координатных осях:
 - 1) внешние вольт-амперные характеристики трансформатора $U_2 = f(I_2)$ для трех положений магнитного шунта;
 - 2) статическую вольт-амперную характеристику дуги для ручной дуговой сварки $U_{д} = f(I_{д})$ перенести с рис. 4.1.
6. Определить кратность регулирования $K_p = \frac{I_{д.макс}}{I_{д.мин}}$ по результатам эксперимента.
7. Рассчитать значения η по формуле (4.6) для точек устойчивого равновесия системы и построить график $\eta = f(I_{д})$.
8. Определить коэффициент трансформации $K_{тр} = U_1 / U_{х.х.}$.
9. Построить график регулировочной кривой $I_{д} = f(C)$.

Вопросы для самоконтроля

1. Что называется сварочным трансформатором?
2. Какую роль выполняет магнитопровод трансформатора?
3. Почему вольт-амперная характеристика ТДМ-140 падающая?
4. Каким образом регулируется величина сварочного тока?
5. Опишите область применения трансформатора ТДМ-140.
6. Для сварки каких металлов можно применять ТДМ-140?
7. Какова картина распределения магнитных потоков рассеяния?
8. Каким образом ограничивается величина $I_{к.з}$?
9. Почему режим к. з. для ТДМ-140 не является аварийным?

Содержание отчета

1. Титульный лист (прил. 1).
2. Название лабораторной работы.
3. Цель работы.
4. Электромагнитная схема сварочного трансформатора.
5. Электрическая схема лабораторного поста с измерительной аппаратурой.
6. Таблица 4.1. Измерительные приборы.
7. Таблица 4.3. Результаты измерений и расчетов.
8. Графики зависимостей $U_2 = f(I_2)$, $U_d = f(I_d)$, $I_d = (C)$, $\eta = f(I_d)$.
9. Выводы. Указать способ формирования вольт-амперной характеристики $U_2 = f(I_2)$, способ регулирования тока дуги $I_d = f(?)$ и выявленные недостатки конструкции.

Таблица 4.3

Результаты измерений и расчетов

Зазор в шунте С, мм	Режим	Измерение				Расчет		
		U_1 , В	U_2 , В	I_1 , А	I_2 , А	P_1 , ВА	P_2 , ВА	η
1ступень	ХХ							
($C \approx 0$)	Н1							
	Н2							
	Н3							
	Н4							
	Н5							
	Н6							

Зазор в шунте С, мм	Режим	Измерение				Расчет		
		$U_1, В$	$U_2, В$	$I_1, А$	$I_2, А$	$P_1, ВА$	$P_2, ВА$	η
	КЗ							
2 ступень	XX							
(С среднее)	Н1							
	Н2							
	Н3							
	Н4							
	Н5							
	Н6							
	КЗ							
3 ступень	XX							
(С max)	Н1							
	Н2							
	Н3							
	Н4							
	Н5							
	Н6							
	КЗ							

◆ СВАРОЧНЫЕ УСТАНОВКИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Дуга переменного тока нашла широкое применение при автоматической сварке под слоем флюса, ручной и автоматической сварке изделий из алюминия и его сплавов неплавящимся электродом в защитной среде газа.

При синусоидальном токе дуги $I_d = I_{\max} \sin \omega t$ (см. рис. 3.1) активное пятно (катод) в один полупериод находится на изделии, в другой – на электроде.

К концу каждого полупериода ток дуги уменьшается до нуля, при этом уменьшается и напряженность электрического поля, вследствие чего падает степень ионизации столба дуги, рассасывается пространственный объемный заряд в приэлектродных областях. Все это ухудшает условия существования дугового разряда.

Электрическая дуга не может существовать при произвольных значениях длины, тока, напряжения и физико-химических свойствах среды между электродом и изделием.

Наиболее полно свойства дуги выражает ее статическая вольт-амперная характеристика $U_d = f(I_d)$ (рис. 4.6) [1; 2].

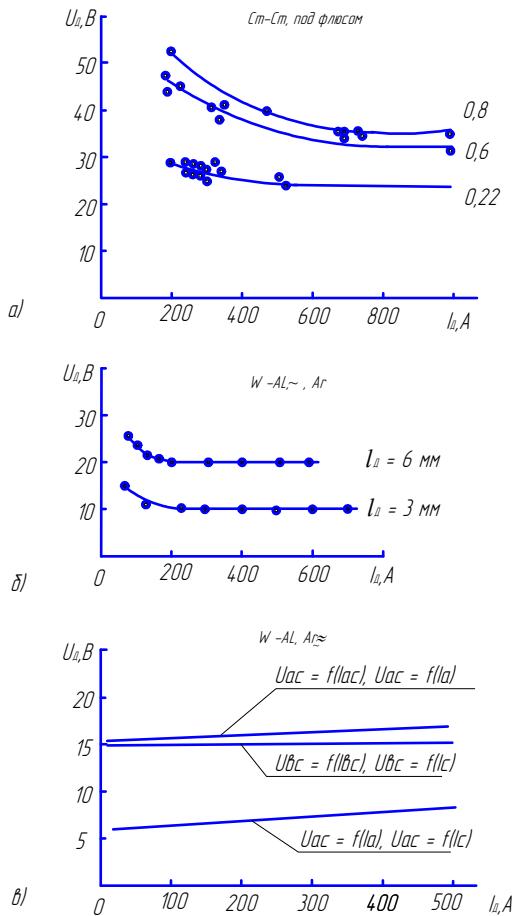


Рис. 4.6. Статические характеристики дуги: а – при сварке плавящейся проволокой под слоем флюса; б – при сварке неплавящимся электродом алюминиевых сплавов в среде аргона переменным током; в – при сварке трехфазной дугой алюминиевых сплавов в среде аргона

При сварке под слоем флюса физико-химическая среда между стальными электродом и изделием в основном определяется свойствами флюса. Статические вольт-амперные характеристики дуги при сварке под слоем флюса иллюстрируют диапазон тока, напря-

жения и длины дуги, или, другими словами, условия, при которых возможно существование стабильного дугового разряда при использовании переменного тока (рис. 4.6, *a*). Напряжение на дуге при сварке под слоем флюса в зависимости от скорости подачи, диаметра проволоки, марки флюса и других параметров составляет от 30 до 50 В (рис. 4.6, *a*).

При сварке неплавящимся электродом на переменном токе в защитной среде газа алюминиевых сплавов физико-химические свойства среды между вольфрамовым электродом и изделием из алюминиевых сплавов определяются теплофизическими свойствами электродов и свойствами защитного газа аргона (Ar), гелия (He) или смеси газов. Напряжение на дуге при этом отклоняется от 10 до 20 В в зависимости от параметров, влияющих на сопротивление дуги: длина дуги, диаметр электрода, расход и состав защитного газа и др. (рис. 4.6, *b*, *e*).

Периодическая смена полярности тока создает условия для обрыва дуги. Особенно затруднен переход с прямой полярности на обратную. Это связано с тем, что неплавящийся вольфрамовый электрод на обратной полярности (W^+) допускает меньшую плотность тока по сравнению с прямой полярностью (W^-). Алюминию «трудно» выполнять обязанности катода, так как его поверхность покрыта окисной пленкой Al_2O_3 , температура плавления которой 2030 °С, а разрушение ее целостности — процесс сложный.

Обрыв дуги в момент смены полярности тока предотвращается или специальным устройством — стабилизатором дуги, который может включаться последовательно и параллельно в сварочную цепь, или увеличением скорости перехода тока через нуль до 100 кА/с. Скорость перехода тока через нуль $d_i/d_t \geq 100$ кА/с удается получить, когда синусоидальная форма тока преобразуется специальными устройствами в прямоугольную при $f = 50$ Гц (рис. 4.10, *b*, ЛР 4.3 [8]).

Стабилизацию повторных возбуждений дуги можно обеспечить, увеличив частоту тока дуги, при этом возрастает d_i/d_t .

При сварке под слоем флюса, как и при сварке покрытыми электродами, стабилизация горения дуги осуществляется за счет ионизирующих компонентов Ca, K, Na.

Различие теплофизических свойств неплавящегося электрода (сплав вольфрама) и изделия (сплав алюминия) приводит к «выпрямлению» переменного тока, т. е. к появлению постоянной составляющей тока I_0 :

$$I_d(t) = I_0 + I_{\max 1} \sin(\omega t + \psi_1) - I_{\max 2} \cos(\omega t + \psi_2) + \\ + I_{\max 3} \sin(\omega t + \psi_3) - \dots I_{\max n} \sin(\omega t + \psi_n), \quad (4.10)$$

где $I_d(t)$ – ток дуги – периодически изменяющаяся во времени функция; I_0 – постоянная составляющая тока дуги (выпрямленный ток); $I_{\max 1}$, $I_{\max 2}$ – амплитуды основной и высших гармоник.

Наличие постоянной составляющей тока в сварочной цепи приводит к тому, что окисная пленка при горении дуги полностью не разрушается, стабильность горения дуги ухудшается. Поэтому постоянную составляющую тока следует уменьшать или уничтожать ($I_0 = 0$).

Один из самых распространенных способов полного уничтожения I_0 – включение последовательно в сварочную цепь емкости из расчета 330 мФ на 1 А сварочного тока [2].

Разработаны различные способы «уничтожения», уменьшения или регулирования постоянной составляющей тока специальными устройствами (мостами), собранными на тиристорах, включенных в сварочную цепь [1; 2; 3].

Начальное возбуждение дуги, т. е. ионизация дугового промежутка при сварке изделий из алюминия и его сплавов, производится специальным генератором высокой частоты – осциллятором, который в зависимости от модели включается последовательно или параллельно. В отдельных случаях допускается начальное возбуждение с к. з. на технологических пластинах.

Для устойчивого горения дуги источники питания и установки переменного тока для аргонодуговой сварки должны иметь падающие внешние вольт-амперные характеристики $U_2 = f(I_2)$.

В общем случае уравнение $U_2 = f(I_2)$ имеет вид [2]:

$$U_2 = \underline{U}_{\text{ХХ}} - jI_2 (X_T + X_p) - I_2 (R_T + R_p + R_v + R_B), \quad (4.11)$$

где X_T , X_p – индуктивные сопротивления сварочного трансформатора и дросселя (реактивное); R_T , R_p , R_v , R_B – активные сопротивления сварочного трансформатора, дросселя, тиристоров (транзисторов), дополнительного (балластного) сопротивления.

При любом способе сварки статическая вольт-амперная характеристика (ВАХ) источника питания должна быть согласована со статической вольт-амперной характеристикой (ВАХ) дуги (рис. 4.14, 4.16, а). Только правильное сочетание характеристик обеспечит устойчивость энергетической системы «источник – дуга», т. е. устойчивость процесса сварки.

При сварке вольфрамовым электродом, как и при сварке покрытым электродом, когда ВАХ дуги имеет в основном жесткую характеристику (рис. 4.6, б, в), источник питания выбирается с падающей характеристикой. При этом наклон ВАХ источника, т. е. падение напряжения в диапазоне режима сварки, по требованиям аттестации может составлять (рис. 4.7) [9]:

$$\text{ВАХ} = \Delta U / \Delta I = 0,08 - 0,2 \text{ В/А.} \quad (4.12)$$

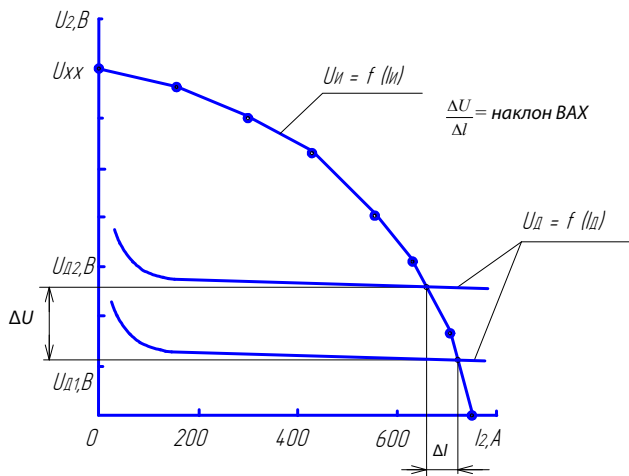


Рис. 4.7. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) источника питания $U_{и} = f(I_{и})$ и дуги $U_{д} = f(I_{д})$

Регулирование величины сварочного тока — неперемutable требование, предъявляемое к источникам питания.

Изменение толщины свариваемого изделия, его материала, защитной среды условий формирования шва требует регулирования величины тока дуги. В современных источниках питания ток дуги может быть функцией или $X_{г}$ или $X_{г'}$ или $R_{г}$ или $X_{г} R_{г}$ или $R_{б}$. Величина сварочного тока ориентировочно определяется по уравнению (4.8).

Форма тока дуги $i_d = f(t)$ определяется с помощью осциллографа Р, подключенного к измерительному шунту RS, включенному последовательно в сварочную цепь (рис. 4.9).

Для изучения конструкции и принципа работы источника питания его принципиальную схему разбивают на отдельные блоки. В общем виде пример функциональной блок-схемы источника питания переменного тока (установки) для сварки W-A1 в защитной среде газа приведен на рис. 4.8 и показывает взаимодействие блоков. При сварке под слоем флюса блоки A_1 , A_4 , A_5 отсутствуют.

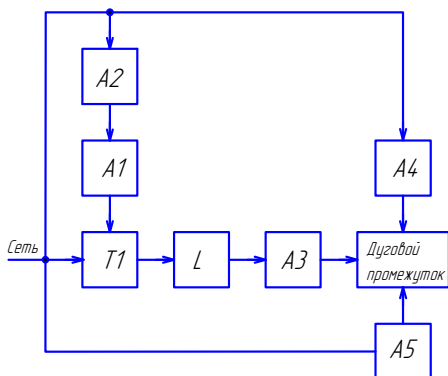


Рис. 4.8. Функциональная блок-схема источника питания или установки переменного тока для сварки в защитной среде газа (пример):

- T_1 – сварочный трансформатор; L – дроссель; A_1 – прерыватель тока;
- A_2 – блок управления током; A_3 – блок уничтожения I_0 ;
- A_4 – блок стабилизации повторных возбуждений;
- A_5 – блок начальной ионизации дугового промежутка

Лабораторные работы проводятся на современном сварочном оборудовании, которое выпускается заводами как серийно (ИПК-350, ТИР-300, МПУ-4, ИСВУ-80), так и экспериментально (УДГУ-100, УДГТ-150У2, ИТД-100).

В производственных условиях на сварочное оборудование, работающее в цехах и лабораториях, составляется график плано-предупредительного ремонта. Возможны аварийные ситуации, когда оборудование выходит из строя, отправляется на ремонтно-восстановительные работы с последующей аттестацией и воз-

вращается в производство. Аттестация восстановленного или вновь поставленного оборудования должна проводиться для каждого источника питания, вводимого в эксплуатацию. Возможна аттестация по сокращенной программе, установленной для предприятия. Аттестация оборудования требуется при проведении сварочных работ на объектах повышенной опасности, т. е. подведомственных Ростехнадзору [9].

Цель лабораторных работ – изучить правила компоновки функциональных схем источников питания и специальных установок для сварки на переменном токе и приобрести навыки аттестации сварочного оборудования.

В результате выполнения лабораторных работ студенты должны:

- знать принцип работы современных и перспективных источников питания переменного тока, способы формирования падающих вольт-амперных характеристик и регулирования тока, стабилизации повторных возбуждений дуги и начальной ионизации дугового промежутка и правила аттестации сварочного оборудования;
- уметь собрать сварочный пост с измерительной аппаратурой, провести исследование и аттестацию установки, определить ее комплектность.

Лабораторная работа 4.3

Исследование источника питания переменного тока ТИР-300

Цель работы – изучение работы схемы однофазного источника питания переменного тока, принципа формирования внешней вольт-амперной характеристики и способа регулирования тока сварки.

Оборудование и приборы

1. Источник питания ТИР-300.
2. Горелка для ручной сварки.
3. Активное сопротивление РБ-300.
4. Лабораторный стенд.
5. рА1, рА2 – амперметры.
6. рV1, рV2 – вольтметры.

7. RS – измерительный шунт.
8. P – осциллограф.
9. T₂ – трансформатор тока.

Программа работы

1. Изучить теоретические сведения, приведенные в методических материалах (см. материал «Сварочные установки переменного тока» перед ЛР 4.3).
2. Изучить конструкцию сварочной установки, принципиальную схему подключения и определить способ регулирования сварочного тока.
3. Составить функциональную блок-схему установки.
4. Собрать сварочную цепь с измерительными приборами.
5. Снять показания приборов при трех положениях регулятора сварочного тока и нескольких режимах (х. х., нагрузка, к. з.). Заполнить табл. 4.4.
6. Построить графики, провести расчеты и сделать выводы.

Описание источника питания ТИР-300

✦ Назначение

Источник питания переменного тока ТИР-300 предназначен для ручной и автоматической сварки алюминиевых сплавов неплавящимся электродом в защитной среде инертного газа.

✦ Устройство и работа схемы источника питания

Схема источника питания ТИР-300 состоит из следующих элементов и узлов (рис. 4.9) [2; 3]:

- сварочный трансформатор T1;
- линейный дроссель L2;
- тиристорный мост VS1...VS4;
- дроссель насыщения L1;
- устройство для начального возбуждения дуги и стабилизатор повторных возбуждений A4;
- блок управления A2 коммутацией тиристоров VS1...VS4 и обмотками управления W_{y1}...W_{y4} дросселя насыщения L1.

зованного тиристорным коммутатором, показана на рис. 4.10, б. Управление тиристорным мостом осуществляется через блок А2.

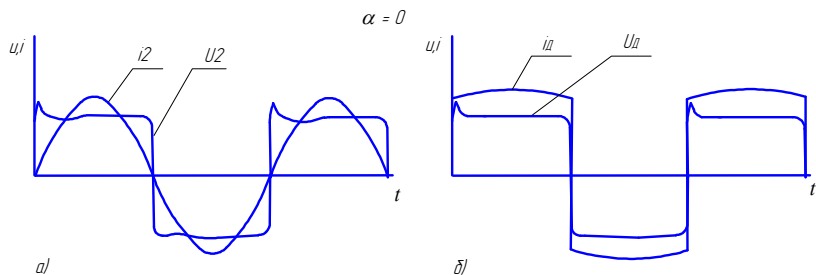


Рис. 4.10. Динамические характеристики:
 а – до тиристорного моста; б – после тиристорного моста

Дроссель насыщения $L1$ позволяет регулировать величину тока и частично формирует крутопадающую вольт-амперную характеристику источника.

Сварка неплавящимся электродом алюминия и его сплавов начинается с начального возбуждения дуги без касания изделия электродом. Для этой цели используют специальное устройство А4, включенное в сварочную цепь последовательно с дугой. Ионизация дугового промежутка происходит в течение 1 секунды с момента включения устройства.

Прямоугольная форма переменного тока дуги (рис. 4.10, б) позволяет производить сварку без стабилизаторов дуги, так как обеспечивает высокую скорость перехода тока через нуль. (В источниках типа ТИР стабилизаторы можно не использовать.)

Источник питания работает в режимах холостого хода (х. х.), нагрузки (Н1–Н6), короткого замыкания (к. з.). Технологическими условиями при сварке алюминиевых сплавов короткие замыкания не допускаются.

Для источников этого типа режимы нагрузки и короткого замыкания по величине тока отличаются мало.

Указания к выполнению работы

1. Подготовить табл. 4.4.
2. Составить функциональную блок-схему (см. пример на рис. 4.8).
3. Собрать силовую схему источника питания.
Внимание! Получить разрешение на включение источника у преподавателя. Включить источник.
4. Провести исследование источника питания для трех значений I_y в дросселе L1 и записать результаты измерений в табл. 4.4. В качестве нагрузки использовать дугу или активное сопротивление (подбирая замыкающими ножами балластного реостата РБ-300 условие, чтобы $U_2 \approx U_d$ (рис. 4.6, б).
5. Построить графики:
 - 1) $U_2 = f(I_2)$ для трех значений регулятора тока сварки I_y на одних осях;
 - 2) $U_d = f(I_d)$ с рис. 4.6, б, в тех же координатных осях, что и $U_2 = f(I_2)$.
6. Рассчитать КПД по формуле (4.6) для точек устойчивого равновесия, полученных графическим построением.
7. Составить комплектность сварочного поста установки, заполнить табл. 4.5.
8. Определить наклон вольт-амперной характеристики по формуле (4.12) установки (рис. 4.10) и область ее применения, на основании чего сделать заключение о результатах аттестации по этому показателю.

Содержание отчета

1. Титульный лист (прил. 1).
2. Название лабораторной работы.
3. Цель работы.
4. Электрическая схема поста.
5. Функциональная блок-схема.
6. Таблицы 4.4, 4.5.
7. Зависимости $U_2 = f(I_2)$ для трех значений I_y и $U_d = f(I_d)$.
8. Вывод о способе формирования ВАХ источника питания, способе регулирования тока сварки и результатах аттестации источника питания.

Таблица 4.4

Результаты измерений и расчетов

I_y, A	Режим	Измерение					Расчет			
		$U_1,$ В	$I_1,$ А	$U_2,$ В	$I_2,$ А	$I_o,$ А	$P_1^*,$ Вт	$P_2^*,$ Вт	η	ВАХ, В/А
I_{y1}	XX									
	Н1									
	Н2									
	Н3									
	Н4									
	Н5									
КЗ										
	Н1									
	Н2									
	Н3									
	Н4									
	Н5									
I_{y2}	XX									
	Н1									
	Н2									
	Н3									
	Н4									
	Н5									
КЗ										
	Н1									
	Н2									
	Н3									
	Н4									
	Н5									
I_{y3}	XX									
	Н1									
	Н2									
	Н3									
	Н4									
	Н5									
КЗ										
	Н1									
	Н2									
	Н3									
	Н4									
	Н5									

* $P_1 = U_1 \cdot I_1 \cos \varphi_1$; $P_2 = U_2 \cdot I_2 \cos \varphi_2$; $\cos \varphi_1 \approx \cos \varphi_2 \approx 0,48 \dots 0,5$.

Таблица 4.5

Комплектность сварочного поста (*пример*)

№ п/п	Наименование устройства, узла	Количество
1	Сварочная установка типа...	1
2	Осциллятор типа ОСППЗ-2М	1
3	Сварочный автомат (полуавтомат)	1
4	Сварочная горелка (держак, держатель со шлангом)	1
5	Подающий механизм	1
6	Баллон с защитным газом (аргон, углекислота)	1

Вопросы для самоконтроля

1. В чем особенности дуги переменного тока при сварке покрытым электродом, под флюсом и в защитной среде газа?
2. Как уничтожается постоянная составляющая тока при сварке покрытым электродом, под слоем флюса и в защитной среде газа?
3. Как производится стабилизация повторных возбуждений дуги при сварке покрытым электродом, под флюсом, в защитной среде газа?
4. Каким способом происходит начальная ионизация дугового промежутка при сварке покрытым электродом, под флюсом, в защитной среде газа?
5. Как формируется внешняя вольт-амперная характеристика установки?
6. Как регулируется величина тока сварки?

Лабораторная работа 4.4

Исследование установки УДГТ-150У2 для точечной сварки трёхфазной сжатой дугой

Цель работы – изучение принципа работы установки УДГТ-150У2 для сварки электрозаклепками трёхфазной сжатой дугой неплавящимися вольфрамовыми электродами в среде защитного газа алюминиевых сплавов.

Оборудование и приборы

1. Установка УДГТ-150У2.
2. Стенд.
3. pA1, pA2, pA3 – амперметры.
4. pV1, pV2, pV3 – вольтметры.
5. T1, T2 – трансформаторы тока.
6. RS1, RS2, RS3 – измерительные шунты.
7. P – осциллограф С1-55.
8. R1, R2, R3 – активные сопротивления.

Программа работы

1. Изучить теоретические сведения, приведенные в методических материалах (см. материал «Сварочные установки переменного тока» перед ЛР 4.3).
2. Изучить конструкцию сварочной установки, принципиальную схему подключения и определить способ регулирования сварочного тока.
3. Составить функциональную блок-схему установки.
4. Собрать сварочную цепь с измерительными приборами.
5. Снять показания приборов при трех положениях регулятора сварочного тока и нескольких режимах (х. х., нагрузка, к. з.). Заполнить табл. 4.6.
6. Построить графики, провести расчеты и сделать выводы.

Описание установки УДГТ-150У2

✦ Назначение

Установка УДГТ-150У2 предназначена для ручной и автоматической точечной сварки электрозаклепками сжатой трёхфазной дугой неплавящимися вольфрамовыми электродами в среде защитных газов алюминиевых сплавов толщиной до 5 мм. Установка работает в импульсном режиме [5].

✦ Принципиальная схема установки

Выделим в схеме установки (рис. 4.11) отдельные узлы:

- силовой блок (сварочные трансформаторы Т1, Т2);
- схема управления током А1;
- блок начального возбуждения дуги – осциллятор А2 (отключен);
- прерыватели тока VS1, VS2.

Сварочные трансформаторы Т1, Т2 выполнены с разнесёнными обмотками, которые по первичной и вторичной цепям включены по схеме открытого треугольника, образуя силовой блок (рис. 4.11). Трансформаторы изготовлены из витого магнитопровода в виде полуколец, соединенных диаметрами.

В сварочной цепи при выбранной схеме включения обмоток устанавливаются соотношения тока: $I_a = I_b$, $I_c = \sqrt{3} \cdot I_a$ (рис. 4.12).

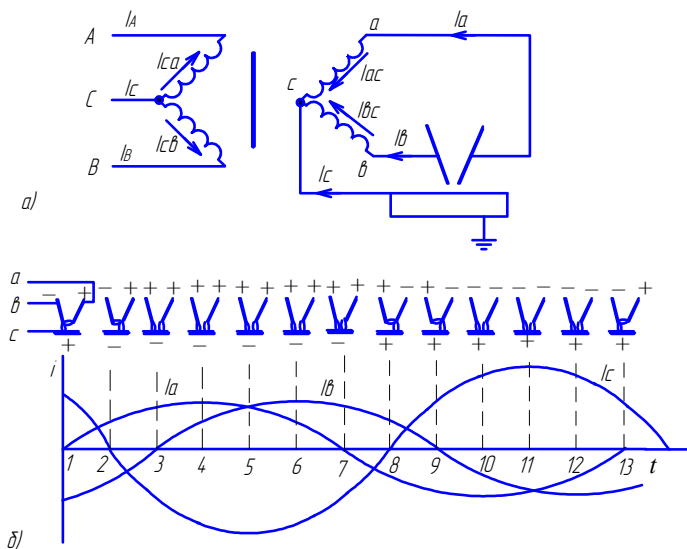


Рис. 4.12. Схемы: *a* – включения обмоток; *б* – горения дуги

Сжатие трехфазной дуги происходит внутри двухэлектродного плазматрона специальной конструкции (рис. 4.13). Ионизированный поток плазмы, вырываясь из сопла, осуществляет точечное расплавление свариваемых внахлест деталей.

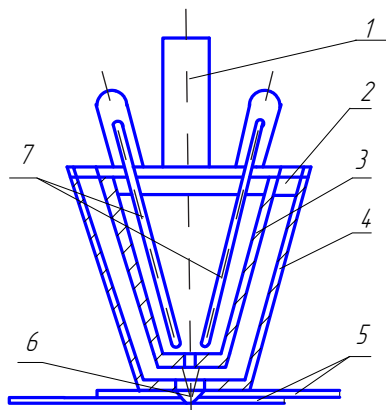


Рис. 4.13. Двухэлектродный плазматрон:
 1 – ручка; 2 – корпус; 3 – основное сопло; 4 – опорное сопло;
 5 – свариваемые детали; 6 – сварная точка

В качестве нагрузки в работе с этой установкой используется специальная схема из активных сопротивлений, включённых треугольником (рис. 4.11): $R_1 = R_2 = R_{д1} = R_{д2} = 0,144 \text{ Ом}$; $R_3 = R_{д3} = 0,1 \text{ Ом}$.

Указания к выполнению работы

1. Подготовить табл. 4.4, 4.5.
2. Составить функциональную блок-схему (см. пример на рис. 4.8).
3. Собрать силовую схему установки.

Внимание! Получить разрешение на включение установки у преподавателя. Включить установку.

4. Произвести замеры токов и напряжений для трёх значений R_1 , R_2 , R_3 , принудительно изменяя их величины, записать результаты измерений в табл. 4.6.
5. Построить графики:
 - 1) $U_2 = f(I_2)$ для трёх значений R_1 , R_2 , R_3 по результатам исследования на одних осях;
 - 2) $U_{д} = f(I_{д})$ в тех же координатных осях, что и $U_2 = f(I_2)$, используя методические указания (рис. 4.6, в).
6. Рассчитать по формуле (4.6) КПД η для точек устойчивого равновесия системы, определенных графически.
7. Составить комплектность сварочного поста с установкой и заполнить табл. 4.5.

Содержание отчета

1. Титульный лист (прил. 1).
2. Название лабораторной работы.
3. Цель работы.
4. Электрическая схема и функциональная блок-схема установки.
5. Табл. 4.4, 4.5.
6. Зависимости $U_2 = f(I_2)$ для трёх значений R_1 , R_2 , R_3 и $U_{д} = f(I_{д})$.
7. Выводы.

Результаты измерений и расчетов

Активные сопротив- ления	Ре- жим	Измерение					Расчет		
		$U_1, В$	$I_1, А$	$U_2, В$	$I_2, А$	$I_3, А$	$P_1^*, Вт$	$P_2^*, Вт$	$\eta, \%$
$R1$	XX Н1 Н2 Н3 Н4 Н5 К3								
$R2$	XX Н1 Н2 Н3 Н4 Н5 К3								
$R3$	XX Н1 Н2 Н3 Н4 Н5 К3								

$$* P_1 = \sqrt{3} \times U_1 \times I_1 \times \cos \varphi_1; P_2 = \sqrt{3} \times U_2 \times I_2 \times \cos \varphi_2; \cos \varphi_1 \approx \cos \varphi_2 \approx 0,48 \dots 0,5.$$

Вопросы для самоконтроля

1. Как формируется внешняя вольт-амперная характеристика установки?
2. Как регулируется величина тока сварки?
3. Как производится стабилизация повторных возбуждений дуги при трёхфазной точечной сварке сжатой дугой неплавящимися вольфрамовыми электродами алюминиевого сплава в защитной среде газа?
4. Каким способом происходит ионизация дугового промежутка в начале сварки от данной установки?

5. Уничтожается ли постоянная составляющая тока при трёхфазной сварке сжатой дугой в среде защитного газа?
6. Каким образом регулируется время сварки?
7. Особенности трёхфазной сжатой дуги переменного тока при точечной сварке неплавящимися вольфрамовыми электродами в среде защитного газа.

◆ СВАРОЧНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Полупроводниковые преобразователи переменного тока в постоянный для питания сварочной дуги получили название сварочных выпрямителей.

В настоящее время разработана широкая номенклатура сварочных выпрямителей различной мощности и назначения [2; 6; 7].

Полупроводниковые сварочные выпрямители по сравнению с моторно-генераторными преобразователями значительно проще по конструкции, более надежны, не требуют постоянного обслуживания. На них идет значительно меньше активных материалов, трудоемкость их изготовления невелика. Сварочные выпрямители имеют большой КПД, низкие потери при холостом ходе. Они бесшумны в работе.

Сварочные выпрямители на тиристорах отличаются меньшей массой, повышенным КПД, а также обеспечивают ряд таких технологических свойств процесса сварки, как стабилизация режима сварки при колебании длины дуги и напряжения сети, дистанционное управление, простейшее программирование сварочного тока (плавное нарастание, спадание тока, импульсный режим).

Быстродействие и малая мощность управления позволяют использовать тиристорные сварочные выпрямители в качестве исполнительного органа систем автоматического управления технологическими сварочными комплексами [6].

Сварочный выпрямитель (рис. 4.14) состоит из следующих основных элементов: трансформатора T , дросселя L , выпрямителя VD , собранного на полупроводниковых вентилях. Часто в комплект выпрямителей входит дроссель, включенный в цепь постоянного тока для сглаживания пульсаций и обеспечения переноса электродного металла при сварке плавящимся электродом в защитной среде газа.

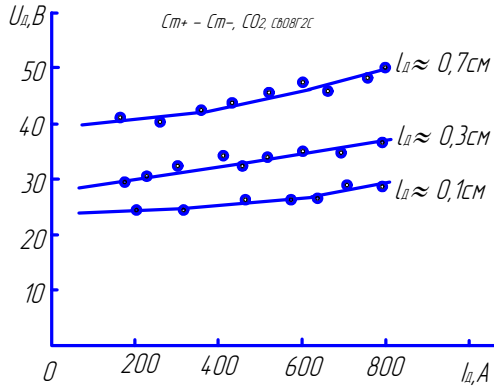


Рис. 4.15. Статические характеристики дуги при сварке плавящейся проволокой в защитной среде газа свободной дугой

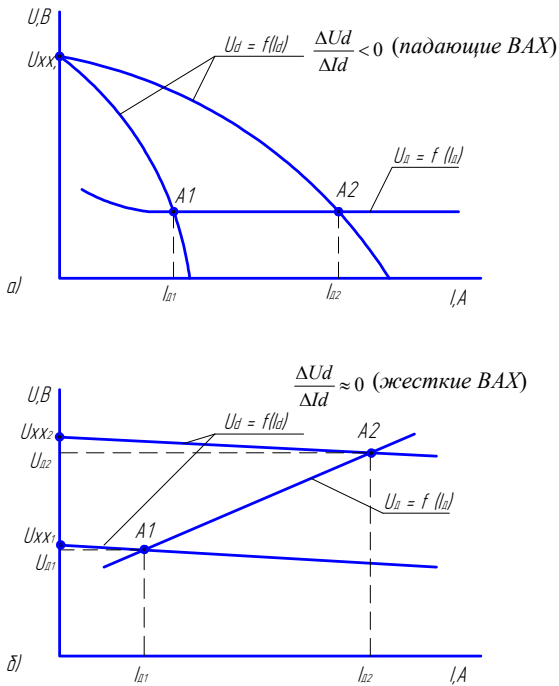


Рис. 4.16. Энергетическая система «источник питания – дуга»: а – при падающей ВАХ; б – при жесткой ВАХ выпрямителя

Взаимосвязанная энергетическая система «выпрямитель – дуга» должна быть устойчива, для этого характеристика (ВАХ) выпрямителя $U_d = f(I_d)$ и статическая характеристика (ВАХ) дуги $U_d = f(I_d)$ должны пересекаться в одной точке, в которой $I_d = I_d$, $U_d = U_d$ (рис. 4.16).

В сварочных выпрямителях с падающими внешними характеристиками ток регулируется от минимального $I_{д1}$ до максимального $I_{д2}$ при неизменном значении напряжения холостого хода $U_{x.x}$ (рис. 4.16, а). Кратность регулирования тока выпрямителя определяется отношением $K_p = I_{д2}/I_{д1}$.

Выпрямители с падающими внешними характеристиками применяют при сварке покрытыми электродами, неплавящимся электродом в защитной среде газа, сжатой дугой, микроплазменной, механизированной под флюсом.

При импульсном режиме сварки основной ток включается импульсами с заданной частотой. В момент паузы горит маломощная дежурная дуга, питаемая от дополнительного источника, подключенного, как правило, параллельно дуговому промежутку.

Выпрямители с жесткими и пологопадающими характеристиками (рис. 4.16, б) используются при механизированной сварке плавящейся проволокой в среде защитных газов и под флюсом.

Величина сварочного тока в выпрямителях этого типа определяется напряжениями $U_{д1}$ и $U_{д2}$, которые однозначно связаны с $U_{x.x1}$ и $U_{x.x2}$ (рис. 4.16, б). Величина $U_{x.x}$ регулируется дискретно через $\Delta U_{x.x}$ (0,8...2) В или плавно.

Форма тока дуги $i_d = f(t)$ определяется с помощью осциллографа Р, подключенного к измерительному шунту RS, включенному последовательно в сварочную цепь.

Сварочные выпрямители, применяемые для сварки изделий, подведомственных Ростехнадзору, должны через три года проходить переаттестацию. Для обеспечения устойчивого процесса сварки наклон вольт-амперной характеристики, определяемый по формуле (4.12), должен быть: ВАХ = 0,08...0,2 В/А для падающих характеристик и не более 0,08 В/А – для жестких характеристик в диапазоне режима сварки (рис. 4.7).

Цель лабораторных работ — изучить принцип работы сварочных выпрямителей, закрепить теоретические знания по разделу «Сварочные выпрямители» и «Специальные источники питания постоянного тока», приобрести навыки аттестации оборудования.

После выполнения лабораторных работ студент должен:

- знать принцип работы современных и перспективных сварочных выпрямителей, способ регулирования тока дуги и формирования внешних вольт-амперных характеристик выпрямителя;
- уметь собрать сварочный пост с измерительной аппаратурой, провести исследования, определить область применения сварочного выпрямителя.

Указания к выполнению лабораторных работ 4.5, 4.6, 4.7

1. Подготовить табл. 4.7.
2. Определить цену деления приборов.
3. Составить функциональную блок-схему сварочного выпрямителя.
4. Составить комплектность сварочного поста с выпрямителем и заполнить табл. 4.8.
5. Собрать силовую схему сварочного поста с измерительной аппаратурой и нагрузкой РБ-300.
6. Снять внешние вольт-амперные характеристики выпрямителя $U_d = f(I_d)$ для трех положений регулятора тока — min, ср., max (три значения угла открытия тиристора α) и при различных режимах (х. х., нагрузка, к. з.).
7. В качестве нагрузки использовать активное сопротивление РБ-300 (подбирая замыкающими ножами условие: $U_2 \approx U_d$) или зажечь дугу.
8. Построить графики (ВАХ) зависимости $U_d = f(I_d)$ для трех значений тока сварки (min, ср., max) и статическую (ВАХ) дуги $U_d = f(I_d)$ с рис. 4.1, 4.6, 4.15 на одном графике.
9. Рассчитать КПД по формуле (4.6) для точек устойчивого равновесия системы и построить график $\eta = f(I_d)$.
10. Рассчитать наклон вольт-амперной характеристики по формуле (4.12) и сделать вывод об исправности и области применения аттестованного выпрямителя.

Результаты исследования

Регулятор тока α^	Режим	Измерение				Расчет			
		U_1 , В	I_1 , А	U_d , В	I_d , А	P_1^{**} , Вт	P_2 , Вт	η	ВАХ, В/А
α min	XX								
	H1								
	H2								
	H3								
	H4								
	H5								
	K3								
α средн.	х.х. – к.з.								
α max	х.х. – к.з.								

* Положение регулятора тока (α – угол открытия тиристора) задается преподавателем.

** $P_1 = \sqrt{3} \cdot I_1 U_1 \cos \varphi_1$; $P_2 = I_d \cdot U_d$; $\cos \varphi_1 \approx 0,7$ для ВСВУ-400 и ВДУ-20У2; $\cos \varphi_1 \approx 0,8$ для ВСП-160.

Таблица 4.8

Комплектность сварочного поста (*пример*)

№ п/п	Наименование устройства, узла	Количество
1	Сварочный выпрямитель типа...	1
2	Осциллятор типа ОСППЗ-2М	1
3	Сварочный автомат (полуавтомат)	1
4	Сварочная горелка (держак, держатель со шлангом)	1
5	Подающий механизм	1
6	Баллон с защитным газом (аргон, углекислота)	1

Содержание отчета (лаб. раб. 4.5, 4.6, 4.7)

1. Титульный лист (прил. 1).
2. Название лабораторной работы.
3. Цель работы.
4. Оборудование, измерительная аппаратура, оснастка, вспомогательное оборудование.

5. Электрическая схема и функциональная блок-схема сварочного поста.
6. Таблицы 4.7, 4.8.
7. Зависимости $U_d = f(I_d)$ для трех значений регулятора сварочного тока и $U_d = f(I_d)$ на одном графике. Зависимость $i_d = f(t)$.
8. Выводы об аттестации сварочного выпрямителя и области его применения.

Вопросы для самоконтроля (лаб. раб. 4.5, 4.6, 4.7)

1. Перечислите основные узлы сварочного выпрямителя.
2. Как формируется ВАХ — $U_d = f(I_d)$ выпрямителя в основном и вспомогательном источниках питания (или источнике дежурной дуги)?
3. Каким образом регулируется величина сварочного тока (основной и дежурной дуги)?
4. Как производится начальное возбуждение дуги?
5. Для каких способов сварки применяется изученный выпрямитель?
6. Какие металлы можно сваривать от изученного выпрямителя?

Лабораторная работа 4.5 Исследование сварочного выпрямителя ВСП-160

Цель работы — изучение схемы шестифазного сварочного выпрямителя и приобретение навыков его аттестации.

Оборудование и приборы

1. Сварочный выпрямитель ВСП-160.
2. Активное сопротивление РБ-300.
3. Стенд.
4. рА1, рА2 — амперметры.
5. рV1, рV2 — вольтметры.
6. RS — измерительный шунт.

Описание сварочного выпрямителя ВСП-160

✦ Назначение

Сварочный выпрямитель ВСП-160 предназначен для механизированной и автоматической сварки плавящейся проволокой в защитной среде газа.

✦ Работа схемы выпрямителя и описание конструкции

Сварочный выпрямитель состоит из следующих узлов (рис. 4.17) [2; 6; 8]:

- сварочный трансформатор Т1;
- выпрямитель VS1...VS6;
- дроссель L;
- схема управления А2.

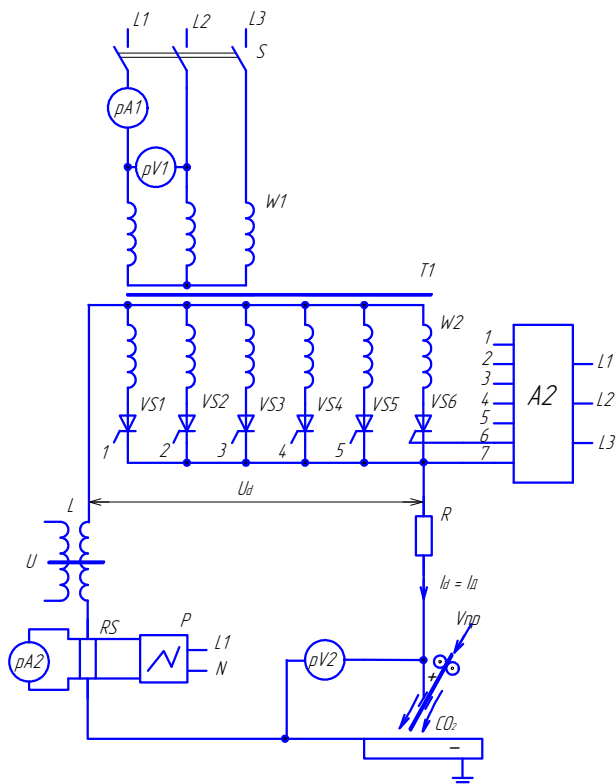


Рис. 4.17. Принципиальная схема сварочного выпрямителя ВСП-160: Т1 – сварочный трансформатор; VS1...VS6 – выпрямитель; L – дроссель; А2 – блок управления; Р – осциллограф

Трехфазный сварочный трансформатор Т1 с жесткой характеристикой понижает напряжение сети с $U_1 = 380$ В до 30 В. Первичные обмотки W1 соединены звездой, вторичные W2 – шестифазной звездой.

Сварочный выпрямитель VS1...VS6 собран на тиристорах, соединенных по шестифазной схеме выпрямителя без уравнильного провода.

Схема управления тиристорами формирует наклон внешней вольт-амперной характеристики, который можно изменять. Величина напряжения регулируется от 15 до 30 В.

Дроссель L в сварочной цепи уменьшает пульсацию выпрямленного тока и регулирует процесс переноса металла электрода.

Начальное возбуждение дуги происходит с короткого замыкания электродной проволоки на изделие.

Указания к выполнению работы, содержание отчета, вопросы для самоконтроля и табл. 4.7, 4.8 см. в материале «Сварочные выпрямители» (перед ЛР 4.5).

Лабораторная работа 4.6 **Исследование сварочного выпрямителя ВСВУ-400**

Цель работы – изучение работы схемы универсального сварочного выпрямителя и приобретение навыков оценки его свойств.

Оборудование и приборы

1. Сварочный выпрямитель ВСВУ-400.
2. Активное сопротивление типа РБ-300.
3. Стенд лабораторный.
4. рА1, рА2, рА3 – амперметры.
5. рV1, рV2 – вольтметры.
6. RS1, RS2 – измерительные шунты.
7. Р – осциллограф.

Описание сварочного выпрямителя ВСВУ-400

✦ Назначение

Сварочный выпрямитель ВСВУ-400 предназначен для ручной и автоматической сварки неплавящимся электродом в защитной среде газа, а также для сварки сжатой дугой ($U_{xx} = 110$ В; 200 В).

Сварочные выпрямители работают в непрерывном и импульсном режимах при сварке свободной и сжатой дугой.

✦ **Работа схемы выпрямителя и описание конструкции**

Сварочный выпрямитель (рис. 4.18) состоит из следующих узлов [2; 7]:

- трехфазного сварочного трансформатора Т1;
- сварочного выпрямителя на тиристорах VS1...VS6 с воздушным охлаждением;
- сглаживающего дросселя L1;
- трехфазного дросселя источника «дежурной» дуги L2;
- выпрямительного моста на шести диодах VD1.

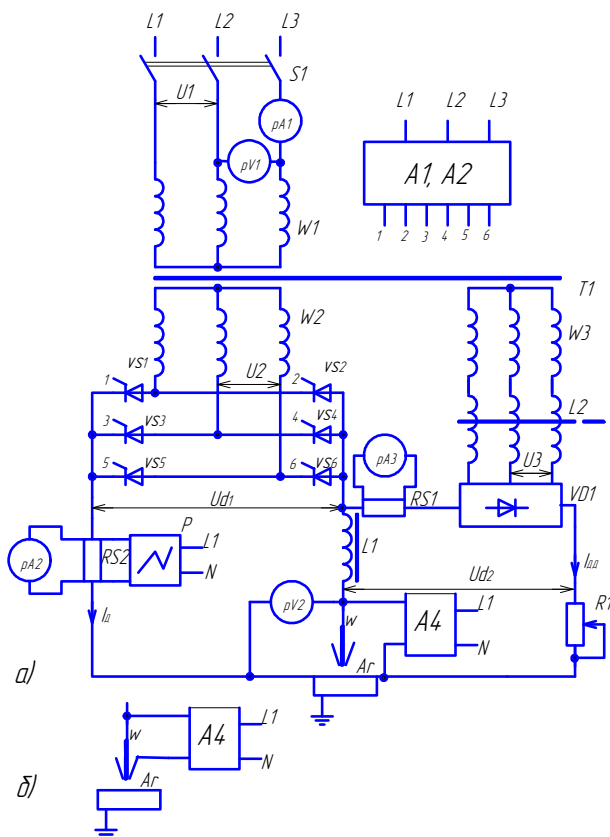


Рис. 4.18. Принципиальная схема выпрямителя ВСВУ-400:
 а – при свободной; б – при сжатой дуге

Трехфазный сварочный трансформатор Т1 выполнен с увеличенным магнитным потоком рассеяния Φ_s за счет полного разнесения первичных (W1) и вторичных (W2) обмоток. Напряжение сети $U_1 = 380$ В понижается до $U_2 = 42$ В.

Трехфазный сварочный мост собран на тиристорах VS1...VS6: позволяет формировать крутопадающую внешнюю вольт-амперную характеристику, регулировать величину тока дуги и управлять импульсным режимом. В связи с тем что все процессы регулирования связаны с изменением угла открытия тиристора α в сварочной цепи, выпрямленный ток имеет большую пульсацию, а на минимальном токе становится прерывистым.

Чтобы уменьшить пульсации выпрямленного тока, в сварочную цепь включают дроссель L1 с большим индуктивным сопротивлением. Для этого магнитопровод дросселя имеет фиксированный воздушный зазор. Таким образом, сварочный выпрямитель на выходе имеет 42 В, обладает крутопадающей вольт-амперной характеристикой, плавно и дистанционно регулирует величину тока схемой управления (блок А1). Работать может в непрерывном и импульсном режимах.

Прерыватель тока (блок А2) через тиристорный мост регулирует длительность импульса и паузы.

Вспомогательный источник питания, или источник «дежурной» дуги, образован обмоткой W3 трансформатора Т1, дросселем L2, выпрямителем VD1 и активным сопротивлением R1.

Трехфазный сварочный трансформатор Т1 (обмотки W1 и W3) с малым индуктивным сопротивлением понижает $U_c = 380$ В до $U_3 = 110$ В (200 В). Падающая характеристика формируется трехфазным дросселем L2 с воздушным зазором в магнитопроводе.

Трехфазный мост VD1 собран на диодах. Ток дежурной дуги $I_{д.д}$ регулируется активным переменным резистором R1.

Начальное возбуждение дуги при сварке свободной дугой как в непрерывном, так и в импульсном режимах производится осциллятором (блок А4) с электрода на изделие.

При сварке сжатой дугой схема включения осциллятора переключается так, чтобы возбуждение происходило с электрода на медное сопло (рис. 4.18, б).

Указания к выполнению работы, содержание отчета, вопросы для самоконтроля и табл. 4.7, 4.8 см. в материале «Сварочные выпрямители» (перед ЛР 4.5).

Лабораторная работа 4.7

Исследование сварочного выпрямителя ВДУ-20У2

Цель работы – изучение работы сварочного выпрямителя для ручной дуговой сварки и приобретение навыков оценки его свойств.

Оборудование и приборы

1. Выпрямитель ВДУ-20У2.
2. R1 – активное сопротивление типа РБ-300.
3. pA1, pA2 – амперметры.
4. pV1, pV2 – вольтметры.
5. RS – измерительный шунт.
6. P – осциллограф.

Описание сварочного выпрямителя

✦ Назначение

Сварочный выпрямитель ВДУ-20У2 предназначен для ручной сварки покрытым электродом на постоянном токе, а также для сварки неплавящимся электродом в защитной среде газа.

✦ Работа схемы установки и описание конструкции

Установка состоит из следующих узлов (рис. 4.19):

- однофазного сварочного трансформатора T1;
- сварочного выпрямителя, состоящего из диодов VD1...VD4;
- сглаживающего дросселя L.

Сварочный выпрямитель образован трансформатором T1 (W1, W2, W3), выпрямителем VD1...VD4 и дросселем L. Однофазный сварочный трансформатор T1 с увеличенными потоками рассеяния понижает напряжение сети с $U_1 = 380$ В до $U_2 = 80$ В.

Вторичные обмотки сварочного трансформатора (W2, W3) перемещаются относительно первичных (W1). Перемещение обмоток производят ходовым винтом и гайкой, жестко соединенной с подвижными обмотками.

Падающую вольт-амперную характеристику ВДУ-20У2 формирует трансформатор за счет магнитных потоков рассеяния Φ_s . Последовательно с выпрямителем VD1...VD4 включен дроссель L.

Указания к выполнению работы, содержание отчета, вопросы для самоконтроля и табл. 4.7, 4.8 см. в материале «Сварочные выпрямители» (перед ЛР 4.5).

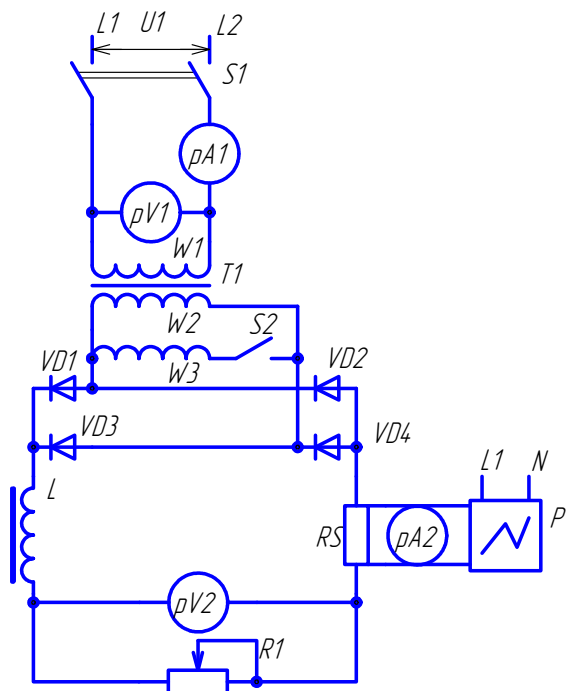


Рис. 4.19. Принципиальная схема сварочного выпрямителя ВДУ-20У2:
 T1 – сварочный трансформатор; VD1...VD4 – диодный мост; L – дроссель;
 R1 – балластный реостат; P – осциллограф

Рекомендуемая литература

1. Патон, Б.Е. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки / Б.Е. Патон, В.К. Лебедев. — М. : Машиностроение, 1956. — 359 с.
2. Браткова, О.Н. Источники питания сварочной дуги / О.Н. Браткова. — М. : Высшая школа, 1982. — 181 с.
3. Короткова, Г.М. Источники питания для сварки / Г.М. Короткова. — Куйбышев : КуАИ, 1980. — 55 с.
4. Короткова, Г.М. Источники питания для сварки / Г.М. Короткова, Р.А. Цепенев. — Куйбышев : КуАИ, 1978. — 40 с.
5. Короткова, Г.М. Технология и оборудование для сварки трехфазной дугой неплавящимся электродом : учеб. пособие / Г.М. Короткова, В.И. Столбов. — Куйбышев : КуАИ, 1984. — 85 с.
6. Закс, М.И. Сварочные выпрямители / М.И. Закс. — Л. : Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1983. — 93 с.
7. Короткова, Г.М. Источники питания для сварки на постоянном токе / Г.М. Короткова, Р.А. Цепенев. — Куйбышев : КуАИ, 1981. — 75 с.
8. Короткова, Г.М. Элементы систем управления машиностроительным оборудованием / Г.М. Короткова, К.В. Моторин. — Тольятти : ТГУ, 2004. — 121 с.
9. Правила аттестации сварочных источников питания по Ростехнадзору.
10. Оборудование для дуговой сварки : справочное пособие / под ред. В.В. Смирнова. — Л. : Энергоиздат, 1986. — 656 с.
11. Милютин, В.С. Источники питания для сварки / В.С. Милютин, М.П. Шалимов, С.М. Шанчуров. — М. : Айрис-пресс, 2007. — 384 с.
12. Короткова, Г.М. Источники питания переменного тока для сварки неплавящимся электродом алюминиевых сплавов : монография / Г.М. Короткова. — Тольятти : ТГУ, 2009. — 335 с.

Лабораторная работа 5.1

Способ программного изменения величины тока сварки

Цель работы — исследование возможности применения реостата заварки кратера сварочного автомата АДСВ-5 для заданных условий изменения величины тока сварки.

Оборудование и приборы

1. Реостат заварки кратера (РЗК) в промышленном исполнении.
2. Мост универсальный Е7-4 для измерения величины сопротивления, емкости и индуктивности.
3. Секундомер.

Требования к условиям изменения тока сварки и исходные данные для выполнения работы

1. Кратность изменения тока сварки от номинального до минимального значения должна быть не менее трех:

$$\frac{I_{\text{н}}}{I_{\text{min}}} \geq 3.$$

2. Закон изменения тока сварки от номинального до минимального должен быть линейным.
3. Время изменения тока сварки от номинального до минимального значения, т. е. время заварки кратера, должно быть равно 6 ± 1 с.
4. Значение тока сварки равно номинальному при максимальном значении тока управления в цепи обмотки подмагничивания ОП сварочного трансформатора Т1 (рис. 5.1).
5. Сопротивление обмотки ОП равно 2 Ом; напряжение питания обмотки ОП равно 20 В постоянного тока.
6. Величины тока сварки $I_{\text{св}}$ и тока управления i_y в обмотке подмагничивания связаны соотношением:

$$I_{\text{св}} = 40 + 16 i_y$$

Программа работы

1. Ознакомиться с конструкцией, принципом работы и схемой реостата заварки кратера.
2. Выполнить измерения сопротивлений (R1–R11) каждого из одиннадцати участков реостата (РЗК) или в каждой точке по схеме включения.
3. Выполнить необходимые расчеты и построить зависимость $I_{св} = f(t_3)$.
4. Проверить и сделать выводы о соответствии реостата заварки кратера привода необходимым требованиям (см. выше в данной ЛР «Требования...», п. 1–3).

Описание конструкции и работы реостата заварки кратера

После окончания процессов дуговой сварки, обрыва дуги в металле остается воронкообразное углубление, называемое кратером и являющееся недопустимым дефектом. Кратер опасен уменьшением толщины свариваемого изделия, возможностью возникновения окисных и шлаковых включений, а за счет резкого отключения тепловложения могут возникнуть трещины, которые приведут к разрушению изделия [2].

Принцип действия реостата заварки кратера состоит в постепенном уменьшении тока дуги, во время которого в кратер наплавляется металл, создающий усиление шва, в результате которого оказавшиеся там включения всплывают, а снижение тока дуги уменьшает тепловложение до минимального. Затем ток отключается.

Конструктивно реостат заварки кратера выполнен отдельным блоком и состоит из следующих узлов:

- *электропривод* – двигатель постоянного тока (М) независимого возбуждения (ОВМ) и редуктор;
- *плата из изоляционного материала*, на которой по окружности смонтированы двенадцать плоских металлических (латунных) пластин – **ламелей**, каждая из которых с обратной стороны платы имеет электрический вывод в виде шпильки для подсоединения проводов; в центре платы смонтировано сплошное латунное кольцо;
- *подвижный кронштейн-контакт* – установлен на выходном валу редуктора и жестко с ним связан; подвижный контакт одним кон-

цом скользит по ламелям, а другим по сплошному кольцу на плате; через подвижный контакт осуществляется подвод напряжения к резисторам и переключение сопротивления;

- *набор резисторов* из нихрома, снабженных контактными хомутами для секционирования сопротивлений; хомуты соединены проводами со шпильками ламелей;
- *на кронштейне*, крепящем плату, смонтирована *кнопка управления*, предназначенная для проверки работы электропривода;
- *на плате* напротив первой и двенадцатой ламелей установлены *конечные (путевые) выключатели S3 и S4*.

Сопротивления реостата включаются последовательно в цепь обмотки подмагничивания сварочного трансформатора, как показано на схеме (рис. 5.1).

На рис. 5.1 представлена часть принципиальной схемы, поясняющая принцип работы реостата заварки кратера.

В исходном состоянии перед сваркой подвижный контакт находится на первой ламели и шток конечного выключателя S4 нажат так, что его замыкающий контакт в цепи лампы Н замкнут, а размыкающий в цепи катушки реле К2 — разомкнут. Лампа Н, расположенная на шкафу управления сварочного автомата АДСВ-5, горит. Это означает, что реостат (его движок) находится в нужном положении [1].

При нажатии на кнопку S1 подается напряжение на катушку контактора К1 и его контакты, замыкаясь, подключают сварочный трансформатор Т1 к питающей цепи 380 В. Идет процесс сварки при номинальном токе, так как всё напряжение 20 В поступает на обмотку подмагничивания ОП трансформатора и ток управления i_y равен максимальной величине ($i_y = U/R_i$).

Чтобы прекратить процесс сварки, нажимают кнопку S2 и тем самым подают напряжение на катушку реле К2. Контакты реле К2 замыкаются, и напряжение с понижающего трансформатора Т2 подается на автотрансформатор Т3 (регулятор скорости). С Т3 через выпрямительный мост VD2 напряжение подается на якорь двигателя М. Вал двигателя начинает вращаться со скоростью, пропорциональной величине напряжения, поступающего с трансформатора Т3. Величина необходимого напряжения выставляется поворотом рукоятки Т3, которая расположена на лицевой панели шкафа управления автомата АДСВ-5.

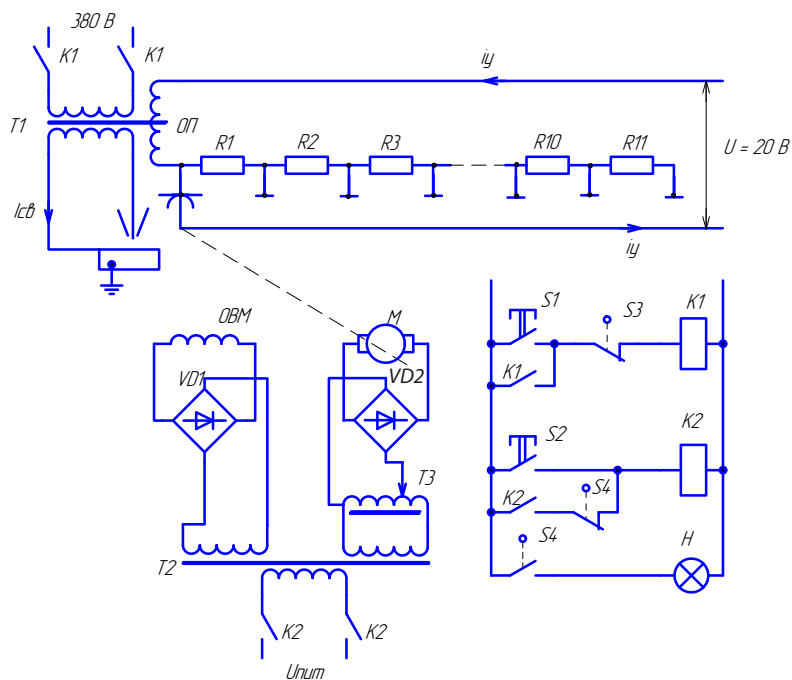


Рис. 5.1. Принципиальная схема работы реостата заварки кратера:
 Т1 – трансформатор сварочный; Т2 – трансформатор понижающий;
 Т3 – автотрансформатор

Когда подвижный контакт сходит с первой ламели, он перестает воздействовать на конечный выключатель S4. Контакты S4 в цепи катушки реле K2 замкнутся, и кнопку S2 можно отпустить. Контакт S4 в цепи лампы Н разомкнется, лампа погаснет. При вращении вала двигателя подвижный контакт реостата перемещается с ламели на ламель, начиная с первой. В результате этого перемещения в цепь обмотки подмагничивания поочередно включаются резисторы R1, R2...R11, которые ограничивают ток i_y . Уменьшение i_y вызывает уменьшение тока сварки.

Когда подвижный контакт возвращается на 12-ю ламель, сопротивление в цепи обмотки подмагничивания максимальное. Подвижный контакт воздействует механически сначала на шток путевого выключателя S3, который размыкает питание катушки контактора K1. Контакты K1 отключают сварочный трансформатор Т1 от питающей сети, дуга гаснет.

Подвижный контакт продолжает движение с 12-й ламели на первую. При этом контакты путевого выключателя S3 в цепи K1 возвращаются в исходное (замкнутое) состояние, а подвижный контакт воздействует на конечный выключатель S4. При этом размыкается цепь питания катушки реле K2, реле отключается, следовательно, отключается питание от якоря двигателя М. Вал двигателя перестает вращаться, подвижный контакт останавливается на первой ламели. При отключении питания катушки реле K2 его контакт замыкается в цепи питания лампы Н, она вновь загорается. Реостат готов к следующему циклу работы.

Указания к выполнению работы

1. Ознакомиться с конструкцией и принципом работы реостата заварки кратера по настоящему пособию.
2. Ознакомиться с порядком работы универсального моста E7-4 при измерении активного сопротивления на постоянном токе по инструкции к прибору.
3. Выполнить тренировочное измерение сопротивления резистора марки МЛТ или ПЭВ.
4. Выполнить измерения сопротивлений ($R1...R11$) каждого из одиннадцати участков реостата (РЗК) или по схеме включения с помощью универсального моста.
5. Выполнить необходимые расчеты ($i_y, I_{св}$) для построения зависимости тока сварки в функции времени за шесть секунд:

$$I_{св} = f(t_3),$$

где t_3 — время заварки кратера.

Все необходимые данные поместить в самостоятельно составленную таблицу.

6. Проверить, обеспечивает ли необходимое время заварки кратера привод реостата; если обеспечивает, то при каком положении регулятора скорости.
7. Сделать выводы о возможности применения реостата заварки кратера, учитывая необходимые требования (см. выше в данной ЛР «Требования...», п. 1–3).

Содержание отчета

1. Титульный лист (прил. 1).
2. Название и цель работы.
3. Схема управления реостатом заварки кратера (рис. 5.1) и перечень элементов схемы.
4. Исходные данные для выполнения работы (см. выше в данной ЛР «Требования...», п. 1–3).
5. Таблица результатов измерений и вычислений (составить самостоятельно).
6. График изменения тока сварки в функции времени заварки кратера: $I_{св} = f(t_3)$.
7. Выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Для чего применяется РЗК?
2. Из каких основных элементов состоит реостат заварки кратера?
3. Что такое сварочный кратер?
4. На чем основан принцип работы реостата заварки кратера сварочного автомата АДСВ-5?
5. Как происходит работа схемы управления реостатом заварки кратера?
6. Как происходит измерение сопротивления на постоянном токе универсальным мостом?
7. Чем регулируется время заварки кратера?

Лабораторная работа 5.2 Автоматический регулятор напряжения дуги

Цель работы — овладение навыками проверки работы системы автоматической стабилизации напряжения дуги.

Оборудование и приборы

1. Сварочный автомат АДСВ-5 в комплекте со шкафом управления.
2. Источник питания сварочной дуги ИПК-350-4.
3. Цифровой ламповый вольтметр постоянного тока.
4. Часовой индикатор линейных перемещений.

5. Защитные маски сварщика.
6. Линейка масштабная.

Программа работы

1. По настоящему руководству ознакомиться с устройством и принципом работы системы автоматической стабилизации напряжения дуги.
2. Освоить порядок включения сварочного автомата в работу и порядок настройки и управления его устройствами.
3. Измерить крутизну наклона поверхности свариваемой детали к горизонту (в мм/м).
4. Подготовить автомат к сварке.
5. Зажечь дугу и снять зависимость $U_d = f(\ell_d)$.
6. Проверить точность системы стабилизации при сварке.

ВНИМАНИЕ! Практическая часть (работа с оборудованием) проводится при непосредственном участии и под наблюдением преподавателя или лаборанта с целью обеспечения необходимых мер безопасности и предотвращения поломки оборудования.

Описание работы системы автоматической стабилизации напряжения дуги

Изменение длины дугового промежутка в процессе сварки может привести к дефектам шва или к нарушению процесса сварки, что и обуславливает применение автоматических регуляторов. В основу работы регулятора положена зависимость между напряжением дуги U_d и длиной дуги ℓ_d (рис. 5.2); увеличение ℓ_d вызывает соответствующее увеличение U_d . Таким образом, если в процессе сварки стабилизировать автоматически величину U_d , то можно принять, что будет стабилизирована и величина ℓ_d . Поэтому в автоматической системе стабилизации напряжения дуги в качестве регулируемой величины выбрано напряжение дуги U_d , а управляющим воздействием является вертикальное перемещение сварочной горелки [1; 2].

Основные элементы системы следующие (рис. 5.3):

- схема сравнения двух напряжений – элементы: V1; R1; V2; R2;
- усилитель напряжения (реверсивный) выполнен на двойном триоде (лампа типа 6Н1П);

- усилитель промежуточный – поляризованное двухобмоточное реле К1 (К1Л, К1П). Усилитель мощности (реверсивный) выполнен на транзисторах;
- исполнительный механизм – двигатель постоянного тока М с независимым возбуждением;
- редуктор, преобразующий вращение вала двигателя М в поступательное перемещение сварочной горелки через специальный механизм.

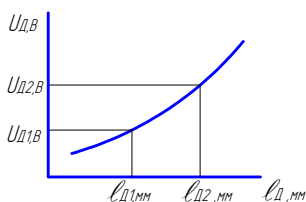


Рис. 5.2. Зависимость напряжения дуги от длины дуги

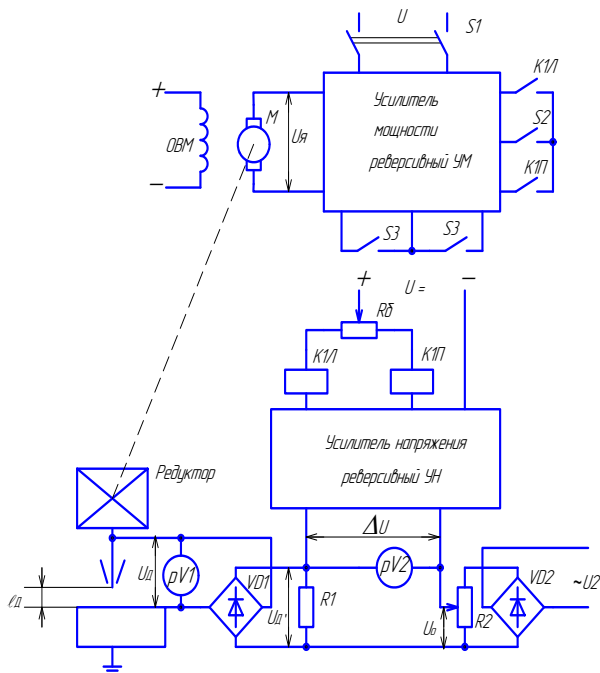


Рис. 5.3. Схема системы автоматической стабилизации напряжения дуги

В процессе работы системы на резистор R1 схемы сравнения подается преобразованное выпрямителем VD1 напряжение дуги U'_d .

Встречно этому напряжению на резистор R2 подается задающее, или опорное, напряжение U_o , величина которого зависит от положения движка резистора R2. При равенстве напряжений U'_d и U_o сигнал ΔU на входе усилителя напряжения (УН) равен нулю. Балансное сопротивление резистора R_o за счет перемещения его движка выставляется таким образом, чтобы токи в катушках поляризованного реле К1Л и К1П были одинаковы, когда $\Delta U = 0$. В этом случае контакты реле К1Л и К1П на входе усилителя мощности (УМ) разомкнуты и напряжение U_y на якоре двигателя М равно нулю. Вал двигателя находится в покое, и горелка не перемещается. Напряжению U'_d соответствует определенное значение ℓ_d .

Чтобы уменьшить или увеличить ℓ_d , следует изменить величину U_o , для чего необходимо движок резистора R2, который установлен на переносном пульте управления автомата АДСВ-5, переместить вправо или влево. Если увеличить U_o , то нарушится равенство $U'_d = U_o$ и на входе усилителя УН возникнет сигнал ΔU определенной полярности и величины:

$$\Delta U = U_o - U'_d.$$

В зависимости от полярности ΔU нарушается баланс токов в катушках реле К1 и в результате замкнется один из контактов (допустим, К1Л) на входе усилителя УМ, а это, в свою очередь, приведет к тому, что на выходе усилителя УМ возникнет напряжение U_y определенной полярности. Вал двигателя М начнет вращаться с постоянной скоростью, и сварочная горелка будет подниматься, увеличивая длину дуги ℓ_d . С ростом ℓ_d (рис. 5.2) увеличивается значение U'_d . Перемещение сварочной горелки вверх будет происходить до тех пор, пока преобразованное напряжение U'_d вновь не станет равным уже новому значению U_o . При этом равенстве вновь $\Delta U = 0$ и контакт К1Л разомкнется.

Если значение U_o останется неизменным, а по тем или иным причинам изменяется значение ℓ_d (например, при сварке изделий, имеющих кривизну в вертикальной плоскости), то, очевидно, изменится величина U'_d , следовательно, нарушится равенство $U_o = U'_d$. Возникший сигнал ΔU заставит сработать реле К1, и двигатель полу-

чит напряжение определенной полярности. Сварочная горелка начнет перемещаться в нужном направлении до тех пор, пока напряжение U'_d не станет равным напряжению U_0 и возникшее изменение ℓ_d будет компенсировано соответствующим перемещением сварочной горелки. Таким образом, значение ℓ_d автоматически стабилизируется за счет стабилизации U_d .

Перемещение сварочной горелки вверх-вниз может осуществляться вручную или автоматически.

Расположение органов управления и их назначение

Тумблер S1 — блок дуги «Включен-отключен» — предназначен для подключения регулятора к питающей сети и расположен на панели управления сварочной головки.

Тумблер S2 — включение блока на «Автоматическую» работу или «Ручную» — расположен на переносном пульте управления.

Тумблер S3 — горелка «Вверх-вниз» — предназначен для управления положением горелки вручную, расположен на переносном пульте управления рядом с тумблером S2.

Резистор R2 — «Опорное напряжение» — предназначен для установки требуемой длины дуги, расположен на переносном пульте управления.

Резистор R₆ — «Баланс» — предназначен для настройки поляризованного реле в нейтральное положение, расположен на панели блока регулятора.

Указания к выполнению работы

Определение крутизны наклона пластины, имитирующей свариваемую деталь

Задать на пластине участок длиной 100 мм. Началом считать левый край участка.

Тумблер «Каретка» на пульте сварочной головки поставить в нейтральное положение, а тумблер S1 «Блок дуги» — в положение «Вкл.».

Тумблер S2 «Вкл. блок» на переносном пульте поставить в положение «Ручн.».

Подать напряжение на общую схему управления (выполняет руководитель лабораторных работ).

Включением тумблера S3 — горелка «Вверх-вниз» на переносном пульте переместить горелку в крайнее верхнее положение.

Включением тумблера «Каретка» переместить автомат влево до положения, при котором шток индикатора расположится над начальной отметкой выбранного участка.

Включением тумблера S3 — горелка «Вверх-вниз» опустить горелку вниз (следить, чтобы электрод не коснулся изделия), оставив между электродом и изделием расстояние примерно 2 мм. Зафиксировать (записать) показания индикатора по двум его шкалам.

Включением тумблера «Каретка» переместить автомат вправо до положения, когда шток индикатора совпадет с концом выбранного участка. Зафиксировать показания индикатора.

Вычислить крутизну детали в мм/м и записать.

Настройка балансного усилителя

Рукоятку «Баланс» на панели блока регулятора установить в крайнее правое положение.

Тумблер S2 «Вкл. блок» поставить в положение «Автом.», при этом горелка начнет перемещаться вверх.

Рукоятку «Баланс» поворачивать влево, пока не прекратится движение сварочной горелки. Необходимо иметь в виду, что прекращение движения горелки может быть вызвано срабатыванием конечного выключателя. В этом случае рукоятка «Баланс» поворачивается влево до тех пор, пока не начнется перемещение горелки вниз, после чего, поворачивая рукоятку «Баланс» вправо, добиться остановки горелки до срабатывания конечного выключателя.

Тумблер S2 поставить в положение «Ручн».

Определение зависимости $U_d = f(l_d)$

Включением тумблера S3 — горелка «Вверх-вниз» установить расстояние между электродом и поверхностью изделия примерно 3 мм. Записать показания индикатора.

Рукоятку «Опорное напряжение» на переносном пульте поставить в крайнее левое положение (опорное напряжение равно нулю).

Зажечь дугу (выполняется под наблюдением руководителя лабораторных работ).

После того как дуга загорится, записать показания цифрового вольтметра до десятых долей вольта.

Включением тумблера S3 – горелка «Вверх-вниз» переместить горелку вверх на 3 мм (по индикатору). Записать показания цифрового вольтметра до десятых долей вольта. Вновь переместить горелку на 3 мм и вновь записать показания вольтметра.

(При оформлении окончательных результатов показания вольтметра умножить на 2, так как на прибор подается выпрямленное и уменьшенное напряжение дуги.)

Опустить горелку, используя тумблер S3, до начального положения (первое показание индикатора).

Настройка системы и ее работа

Поворотом рукоятки «Опорное напряжение» вправо сбалансировать напряжение дуги с точностью до $\pm 0,2$ В, используя для контроля показание цифрового вольтметра.

Установить тумблер S2 в положение «Автом.». При этом горелка может несколько переместиться вверх или вниз либо остаться в покое.

Осторожно перемещая рукоятку «Опорное напряжение» вправо или влево и наблюдая за дугой через стекло маски, выставить желательную длину дугового промежутка. Помнить, что при повороте рукоятки «Опорное напряжение» вправо длина дуги возрастает, влево – уменьшается.

После того как желаемая длина дуги выставлена, записать показания индикатора (по двум шкалам).

Тумблер «Каретка» поставить в положение «Влево» и переместить сварочный автомат примерно на 100–150 мм. Вновь записать показание индикатора.

Тумблер S2 поставить в нейтральное положение. Отключить источник питания.

По начальному и конечному показаниям индикатора определить разницу длины дуги в начале сварки и в конце.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Схема системы автоматической стабилизации дуги.
3. Эскиз расположения пластины и пояснение к определению крутизны наклона; результаты измерений и вычислений.
4. Таблица с результатами измерений зависимости $U_d = f(\ell_d)$ и график этой зависимости.
5. Данные измерения погрешности работы системы с кратким пояснением, как они получены.

Вопросы для самоконтроля

1. Чем обусловлена необходимость применения системы стабилизации напряжения дуги?
2. Назначение элементов и принцип работы системы.
3. Порядок настройки и проверки системы (п. «Настройка балансного усилителя» к настройке и проверке системы не относится).

Лабораторная работа 5.3

Принципиальная электрическая схема установки ИПК-350

Цель работы – развитие навыков чтения и описания принципиальных электрических схем сварочного оборудования.

Пояснения к принципиальной электросхеме

Источник питания ИПК350-4 предназначен для сварки алюминия и его сплавов на переменном токе неплавящимся электродом в среде аргона.

Схема управления источника обеспечивает цикл работы технологических устройств, указанный на рис. 5.4.

Для наглядности (в учебных целях) на схеме управления (рис. 5.5) каждой операции циклограммы соответствует сигнальная лампочка [3]:

- Н1 – «осциллятор»,
- Н2 – «дуга»,
- Н3 – «каретка»,
- Н4 – «аргон».

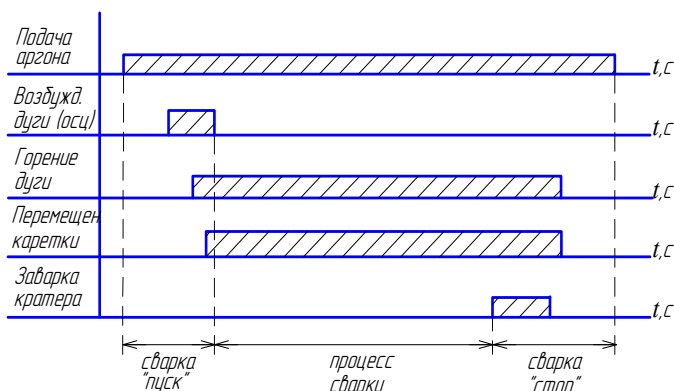


Рис. 5.4. Циклограмма процесса сварки

Включение под напряжение каждой лампочки следует считать началом выполнения соответствующей операции, а отключение – окончанием операции.

Первый этап работы схемы (рис. 5.5) – сварка «пуск» – начинается с нажатия на кнопку S1 «Пуск» и оканчивается отключением осциллятора. При построении диаграммы следует помнить, что реле K2 срабатывает, т. е. получает питание, в момент времени, когда замыкаются контакты K1 в первичной цепи сварочного трансформатора TC1, а отключается K2 в тот момент, когда замыкается контакт K8 во вторичной цепи TC1.

Контакт K8 в реальной схеме отсутствует и введен в настоящую схему для того, чтобы было ясно, что при возникновении дуги напряжение на дуговом промежутке уменьшается, следовательно, реле K2 отпускает – возвращается в исходное состояние.

После отключения осциллятора осуществляют непосредственно процесс сварки – второй этап работы схемы.

Третий этап – сварка «Стоп» – начинается с нажатия кнопки S2 «Стоп». При воздействии на кнопку получает питание реле K10, которое включает двигатель M реостата заварки кратера в работу. Через некоторый промежуток времени, обусловленный скоростью вращения вала двигателя M, подвижный контакт (на схеме контакт не указан) реостата заварки кратера механически воздействует на конечный выключатель S3. С момента размыкания контактов S3

в цепи реле К7 начинается автоматическое отключение схемы, которое заканчивается отключением реле К11.

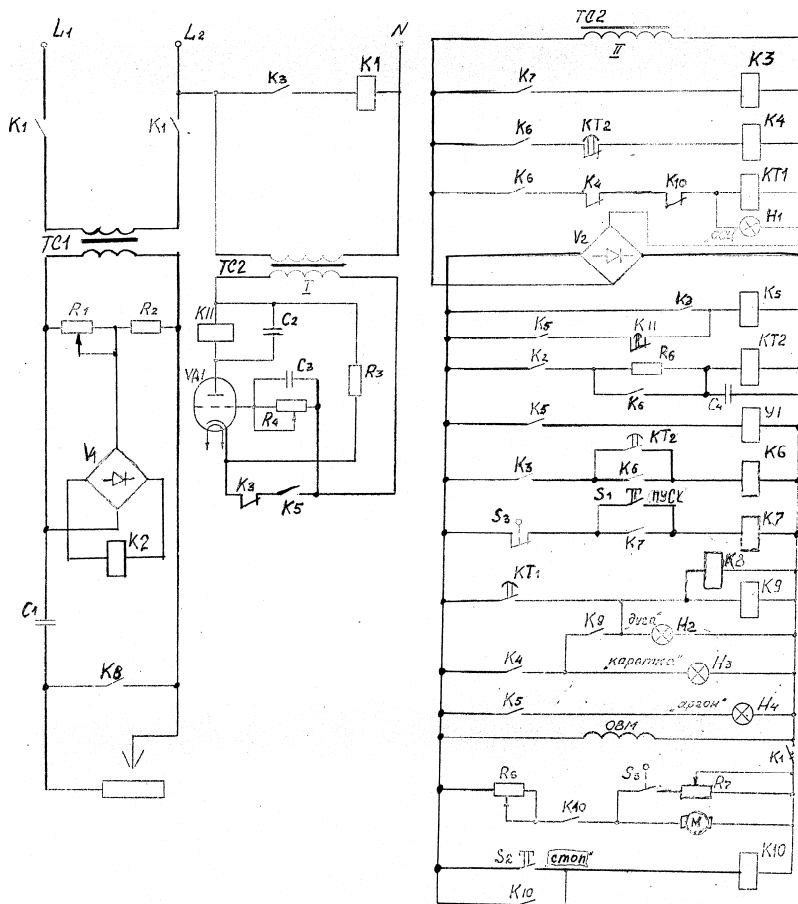


Рис. 5.5. Принципиальная схема управления

Указания к составлению диаграммы взаимодействия

Назначение диаграммы взаимодействия — графическое описание работы принципиальной электрической схемы управления какими-либо объектами [3].

Диаграмма взаимодействия учитывает работу всех устройств циклограммы, всех кнопок управления и всех реле, лампочек, двигателей, изображенных на принципиальной электрической схеме.

Работу устройств, указанных в циклограмме, а также работу кнопок на диаграмме взаимодействия изображают прямоугольниками, работа реле изображается трапецией.

Диаграмма взаимодействия строится в масштабе времени и имеет столько горизонтальных строк, сколько объектов и элементов управления (кнопок, выключателей, реле и т. п.) содержит схема.

Определение мощности трансформатора ТС2

На построенной диаграмме взаимодействия необходимо выявить промежуток времени, когда в работе находится наибольшее количество элементов схемы управления, питаемой от трансформатора ТС2, принимая во внимание и те промежутки времени, когда работают наиболее энергоемкие устройства, получающие питание от этого трансформатора.

Для определения мощности трансформатора ТС2 принять:

- мощность, потребляемая каждым реле схемы управления, – 0,5 ватта;
- мощность, потребляемая электромагнитным клапаном $У_1$, – 1,0 ватт;
- мощность, потребляемая каждой лампочкой, – 5 ватт;
- мощность, потребляемая двигателем вместе с обмоткой возбуждения, – 30 ватт.

Расчетная мощность трансформатора ТС2, потребляемая им из сети:

$$P = P_2 / \eta,$$

где P_2 – мощность вторичной обмотки трансформатора ТС2, которая определяется как сумма мощностей одновременно работающих устройств, питаемых этим трансформатором; η – КПД трансформатора (принять равным 0,95).

Указания к выполнению работы

1. Ознакомиться со схемой управления источником питания ИПК350-4 и порядком ее работы по настоящему пособию.
2. Построить диаграмму взаимодействия для схемы управления.
3. Определить требуемую мощность трансформатора ТС2, используя диаграмму взаимодействия и данные п. «Определение мощности трансформатора ТС2», приведенного выше.

Содержание отчета

1. Титульный лист (прил. 1).
2. Наименование и цель работы.
3. Диаграмма взаимодействия.
4. Данные для расчета мощности трансформатора ТС2.
5. Расчет мощности трансформатора ТС2.

Вопросы для самоконтроля

1. Назначение источника питания и элементов принципиальной электрической схемы.
2. Условные обозначения на электрической схеме.
3. Объяснить работу схемы, используя диаграмму взаимодействия.
4. Назначение диаграммы взаимодействия.

Лабораторная работа 5.4 Определение пределов стабилизации параметров режима сварки

Цель работы – изучение методики определения пределов стабилизации параметров режима аргонодуговой сварки неплавящимся электродом; расчет пределов стабилизации параметров режима по экспериментальным данным.

Зависимость параметров качества от параметров режима

Любой технологический процесс характеризуется некоторой совокупностью параметров, которые можно разделить на четыре группы:

1) параметры, характеризующие пространственное положение рабочего инструмента по отношению к обрабатываемому изделию (материалу);

2) параметры, характеризующие режим работы агрегатов, участвующих в технологическом процессе;

3) параметры, характеризующие качество продукции, для выпуска которой предназначен технологический процесс;

4) возмущающие воздействия (возмущения), которые прямо или косвенно влияют на величину параметров, характеризующих качество продукции.

Возмущения могут быть приложены в различных точках технологического процесса, в частности, они могут непосредственно влиять на параметры качества, вызывать отклонения параметров режима от номинальных значений, могут быть связаны с отклонением характеристик материала, поступающего на вход технологического процесса. Производственная практика показывает, что наибольшее влияние на отклонение показателей качества от норм оказывают возмущения, вызывающие изменения величины параметров режима от установленных номинальных значений. Таким образом, чтобы сохранить показатели качества на заданном уровне, необходимо прежде всего стабилизировать параметры режима, что осуществляется системами автоматического регулирования (САР), точность работы которых характеризуется пределами стабилизации параметров режима [1]. Возникает задача определения этих пределов по заданным пределам параметров (показателей) качества продукции. Эта задача, как правило, решается экспериментально-расчетным путем.

Рассмотрим методику решения на частном примере при следующих условиях:

- 1) продукция характеризуется тремя показателями качества – Y_1, Y_2, Y_3 ;
- 2) технологический процесс характеризуется двумя параметрами режима – X_1, X_2 .

Решение задачи о допустимых пределах стабилизации параметров режима X_1 и X_2 может идти по следующим этапам [3].

Этап 1. Экспериментальным или расчетным путем с последующей экспериментальной проверкой определяются номинальные значения $X_{1ном}$ и $X_{2ном}$, при которых достигается заданное значение (или номинальное) показателей качества, т. е.

$$Y_1 = Y_{1ном}; \quad Y_2 = Y_{2ном}; \quad Y_3 = Y_{3ном}.$$

Этап 2. Задаются, рассчитываются или определяются экспериментально верхняя и нижняя допустимые границы параметров Y_1, Y_2, Y_3 и по ним допустимые отклонения $\Delta Y_{1д}, \Delta Y_{2д}, \Delta Y_{3д}$. Например, для параметра $Y_{1д}$:

$$\Delta Y_{1д} = \frac{Y_{1max} - Y_{1min}}{2},$$

где $Y_{1\max}$ и $Y_{1\min}$ — максимально и минимально допустимые значения параметра Y_1 .

Тогда любое значение Y_1 является номинальным (допустимым), если оно лежит в диапазоне

$$Y_1 - \Delta Y_{1д} \leq Y_{1ном} \leq Y_1 + \Delta Y_{1д},$$

где $\Delta Y_{1д} = \frac{Y_{1\max} - Y_{1\min}}{2}$ — среднеарифметическое значение предельно допустимых величин параметра Y_1 .

Этап 3. Экспериментальным и расчетным путем определяется функциональная зависимость между параметрами качества и режима:

$$(Y_1, Y_2, Y_3) = f(X_1, X_2).$$

Чем шире диапазон изменений параметров X_1 и X_2 вверх и вниз от номинальных значений, тем легче решается вопрос о допустимых пределах их стабилизации.

Если эксперимент ведется классическим путем, то в рассматриваемом случае должны быть сняты следующие характеристики:

$$(Y_1, Y_2, Y_3) = f_1(X_1), \text{ при } X_2 = X_{2ном} = \text{const};$$

$$(Y_1, Y_2, Y_3) = f_2(X_2), \text{ при } X_1 = X_{1ном} = \text{const}.$$

Условный вид этих характеристик показан на рис. 5.6. Для удобства изложения методики будем считать, что все зависимости имеют прямолинейный характер.

Этап 4. В точках, соответствующих номинальным значениям параметров режима, по найденным экспериментальным зависимостям определяются коэффициенты влияния K . В общем случае коэффициент K характеризует наклон касательной к линии в этих точках и определяется через частную производную. Однако в первом приближении и при прямолинейных зависимостях этот коэффициент может быть найден как отношение приращения параметра Y к приращению параметра X :

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta X}.$$

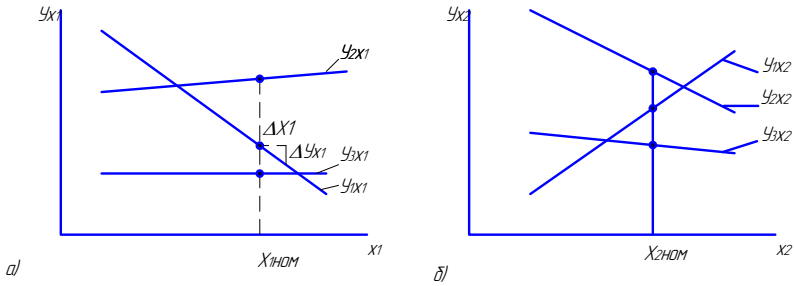


Рис. 5.6. Зависимость параметров качества от величины отдельных параметров режима

При определении коэффициента K необходимо учитывать наклон соответствующей линии, что влияет на знак коэффициента K . Если наклон слева направо вниз – коэффициент имеет знак минус, если слева направо вверх – знак плюс. С учетом этого замечания для линий (рис. 5.6, а, б) коэффициенты влияния соответственно равны:

$$\frac{\Delta Y_{1x1}}{\Delta X_1} = -K_1; \quad \frac{\Delta Y_{2x1}}{\Delta X_1} = K_2; \quad \frac{\Delta Y_{3x1}}{\Delta X_1} = K_3 = 0;$$

$$\frac{\Delta Y_{1x2}}{\Delta X_2} = K_4; \quad \frac{\Delta Y_{2x2}}{\Delta X_2} = -K_5; \quad \frac{\Delta Y_{3x2}}{\Delta X_2} = -K_6.$$

Откуда

$$\left. \begin{aligned} \Delta Y_{1x1} &= -K_1 \Delta X_1; & \Delta Y_{1x2} &= K_4 \Delta X_2 \\ \Delta Y_{2x1} &= K_2 \Delta X_1; & \Delta Y_{2x2} &= -K_5 \Delta X_2 \\ \Delta Y_{3x1} &= K_3 \Delta X_1; & \Delta Y_{3x2} &= -K_6 \Delta X_2 \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

Этап 5. Составляется уравнение для определения пределов стабилизации параметров режима. Общее отклонение показателя качества определяется двумя слагаемыми:

$$\Delta J = \Delta J_{x1} + \Delta J_{x2}, \quad (5.2)$$

где ΔJ – общее отклонение параметра качества; ΔJ_{x1} и ΔJ_{x2} – отклонения, вызванные изменениями величины параметров режима X_1 и X_2 .

Тогда с учетом уравнений (5.1) и (5.2) для трех показателей качества можно записать:

$$\left. \begin{aligned} \Delta Y_1 &= \Delta Y_{1x1} + \Delta Y_{1x2} = -K_1 \Delta X_1 + K_4 \Delta X_2; \\ \Delta Y_2 &= \Delta Y_{2x1} + \Delta Y_{2x2} = K_2 \Delta X_1 - K_5 \Delta X_2; \\ \Delta Y_3 &= \Delta Y_{3x1} + \Delta Y_{3x2} = K_3 \Delta X_1 - K_6 \Delta X_2. \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

Отклонения параметров вверх и вниз от номинальных значений носят случайный характер. В связи с этим знаки отклонений ΔX_1 и ΔX_2 могут или совпадать, или быть различными. Поэтому при одних и тех же абсолютных значениях ΔX_1 и ΔX_2 величина отклонения ΔY зависит от знака этих отклонений. При расчете пределов стабилизации параметров режима знаки отклонений ΔX в уравнениях (5.3) следует выбирать из условия, при котором значения ΔY_1 , ΔY_2 , ΔY_3 будут максимальными и одного знака:

$$\left. \begin{aligned} \Delta Y_1 &= -K_1(-\Delta X_1) + K_4\Delta X_2 = K_1\Delta X_1 + K_4\Delta X_2; \\ \Delta Y_2 &= K_2\Delta X_1 - K_5(-\Delta X_2) = K_2\Delta X_1 + K_5\Delta X_2; \\ \Delta Y_3 &= K_3\Delta X_1 - K_6(-\Delta X_2) = K_3\Delta X_1 + K_6\Delta X_2. \end{aligned} \right\} \quad (5.4)$$

Этап 6. Определяется область пределов стабилизации параметров режима. В уравнениях (5.4) заменяем ΔY на ΔY_d :

$$\left. \begin{aligned} \Delta Y_{1д} &= K_1\Delta X_1 + K_4\Delta X_2 \\ \Delta Y_{2д} &= K_2\Delta X_1 + K_5\Delta X_2 \\ \Delta Y_{3д} &= K_3\Delta X_1 + K_6\Delta X_2 \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

Из уравнений (5.5) находим пределы стабилизации параметров режима относительно каждого параметра качества по выражениям:

$$\Delta X_2 = \frac{\Delta Y_{1д} - K_1\Delta X_1}{K_4}; \quad (5.6)$$

$$\Delta X_2 = \frac{\Delta Y_{2д} - K_2\Delta X_1}{K_5}; \quad (5.7)$$

$$\Delta X_2 = \frac{\Delta Y_{3д} - K_3\Delta X_1}{K_6}. \quad (5.8)$$

Задаваясь различными значениями ΔX_1 , из выражений (5.6), (5.7), (5.8) находим соответствующие значения ΔX_2 и строим зависимости $\Delta X_2 = f(\Delta X_1)$ для каждого параметра качества (рис. 5.7). Заштрихованная область на этом рисунке характеризует область допустимых отклонений пределов стабилизации параметров режимов X_1 и X_2 .

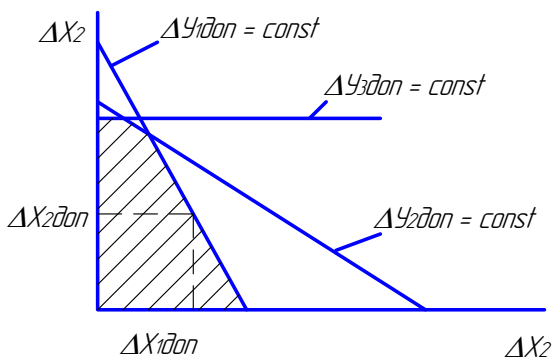


Рис. 5.7. Построение области допустимых пределов изменения параметров режима

Этап 7. Задаемся максимально допустимым значением отклонения одного параметра режима, допустим, $\Delta X_{2\max}$. По рис. 5.7 находим, что

$$\Delta X_{1д} \geq \Delta X_{1\max}.$$

Окончательно

$$\Delta X_{1д} \geq \Delta X_{1\max}; \Delta X_{2д} \geq \Delta X_{2\max}.$$

Это и есть решение поставленной задачи для рассматриваемого случая.

Указания к выполнению работы

1. Изучить теоретическую часть.

2. Определить пределы стабилизации для тока сварки $I_{св}$, скорости сварки $V_{св}$, используя следующие данные:

а) параметры качества сварочного шва (рис. 5.8): e – ширина шва, q – высота усиления шва, $e1$ – ширина проплава, $q1$ – высота корня шва;

б) предельные значения параметров качества:

минимальные значения: максимальные значения:

$e - 3 \text{ мм}$

$e - 4 \text{ мм}$

$q - 0,6 \text{ мм}$

$q - 0,8 \text{ мм}$

$e1 - 2 \text{ мм}$

$e1 - 2,8 \text{ мм}$

$q1 - 0,8 \text{ мм}$

$q1 - 1 \text{ мм}$

в) зависимость параметров качества от параметров режима (рис. 5.9).

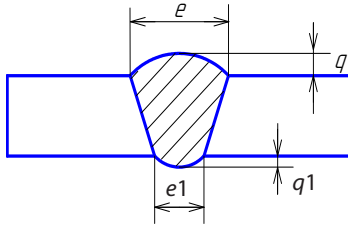


Рис. 5.8. Параметры сварного шва

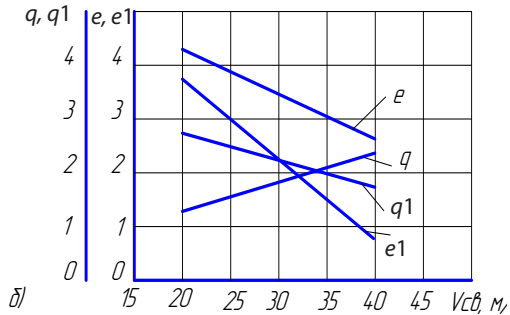
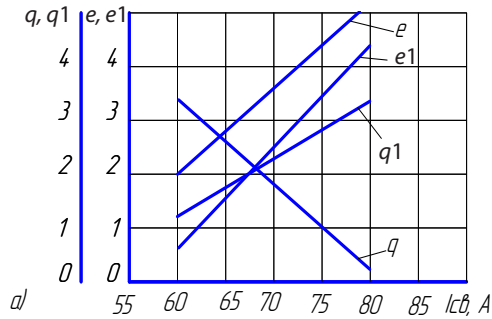


Рис. 5.9. Экспериментальные зависимости параметров шва при изменении параметров режима сварки: *а* – зависимость параметров шва от тока сварки; *б* – зависимость параметров шва от скорости сварки

Содержание отчета

1. Титульный лист (прил. 1).
2. Название и цель работы.
3. Методика эксперимента по определению данных для построения графиков, представленных на рис. 5.9.
4. Данные для расчета пределов стабилизации параметров $I_{св}$ и $V_{св}$.

Вопросы для самоконтроля

1. Какими группами параметров характеризуется технологический процесс?
2. Какого вида возмущения влияют на технологический процесс?
3. Каков порядок определения пределов стабилизации параметров режима?

Лабораторная работа 5.5 Приемы построения систем автоматического жесткого управления

Цель работы — знакомство с конструкцией и принципом работы электромагнитных реле; изучение приемов построения релейных схем управления для заданного алгоритма.

Электромагнитные реле

Устройство и работа электромагнитных реле

Реле осуществляют скачкообразное управление электрически-ми, механическими или любыми иными устройствами при достижении параметра, на который они реагируют, определенного (заданного) значения [5]. В соответствии с этим реле обычно состоят из трех основных органов:

- а) воспринимающего (чувствительного), который воспринимает управляющее воздействие и преобразует его в воздействие на промежуточный орган;
- б) промежуточного, который при достижении управляющим воздействием заданной величины передает это воздействие исполнительному органу;
- в) исполнительного, осуществляющего скачкообразное изменение управляемой величины.

Реле, предназначенные для управления работой электрических цепей, в качестве исполнительного органа имеют контакты. Существуют, однако, и бесконтактные электронные реле.

Электромагнитными называются такие электрические реле, воспринимающим (чувствительным) органом которых является катушка, надетая на железный сердечник.

Нейтральные электромагнитные реле срабатывают независимо от направления тока в катушке, поэтому они могут работать как на постоянном, так и на переменном токе. В поляризованных реле направление движения якоря зависит от направления тока в катушке реле, поэтому поляризованные реле срабатывают только под действием постоянного тока. Электромагнитные реле разделяются на две основные группы:

- а) с угловым перемещением якоря (поворотные);
- б) с линейным перемещением (втяжные).

В электромагнитных реле воспринимающим органом является электромагнит, который преобразует энергию электрического тока в энергию магнитного поля, возникающего в сердечнике. Магнитное поле, воздействуя на промежуточный орган – якорь (с противодействующей пружиной), стремится притянуть его к сердечнику. Когда ток в катушке превышает определенную заданную величину, магнитное поле преодолевает противодействие пружины и якорь притягивается к сердечнику, осуществляя переключение в контактной системе (исполнительном органе).

Электромагнитное реле времени выполнено с воздушным успокоителем, представляющим собой резиновую грушу, закрепленную между неподвижной стойкой и якорем реле. В стойке высверлено одно или несколько узких отверстий, через которые внутренняя полость груши сообщается с окружающей средой. При срабатывании реле якорь давит на грушу, заставляя воздух выходить из нее наружу. Скорость перемещения якоря, а следовательно, и время срабатывания реле зависят от количества и величины отверстий. Регулируется время срабатывания реле винтом, перекрывающим основное отверстие.

Этап срабатывания характеризуется промежутком времени от момента подачи напряжения на катушку реле до замыкания контактов. В течение этого этапа различаются два характерных момента – начало движения якоря и замыкание контактов [1]. Промежуток времени от начала движения якоря до замыкания контактов называется временем движения $t_{дв}$.

Рабочий этап длится от начала воздействия на управляемую цепь (замыкание или размыкание контактов) до прекращения управляющего сигнала (отключение катушки реле от источника

напряжения). Для надежного удержания контактов реле в замкнутом состоянии необходимо, чтобы установившееся (рабочее) значение в катушке I_p было больше тока срабатывания I_{cp} . Отношение рабочего значения тока к величине тока срабатывания называется коэффициентом запаса:

$$K_{\text{зап}} = \frac{I_p}{I_{cp}}.$$

Для различных реле коэффициент запаса имеет значения от 1,5 до 4.

Этап отпускания длится от момента прекращения действия управляющего сигнала (отключение катушки реле от источника напряжения) до прекращения воздействия реле на управляемую цепь, т. е. до размыкания контактов.

При отключении катушки реле от источника ток в катушке уменьшается до нуля не мгновенно, а в течение некоторого времени.

Обычно отпускание происходит при токе несколько меньше тока срабатывания. Отношение тока отпускания к току срабатывания называется коэффициентом возврата реле:

$$K_v = \frac{I_{от}}{I_{cp}}.$$

Этап покоя длится от момента прекращения воздействия реле на управляемую цепь (размыкание контактов) до начала следующего управляющего сигнала, т. е. до подачи напряжения на катушку реле. В течение этого времени якорь и контакты реле занимают исходное положение, а катушка реле обесточена.

Описание работы релейных схем

Релейными называются схемы, в которых управление электрическими цепями осуществляется с помощью различных реле. В состав релейных схем входят как управляющие электрические цепи, воздействующие на чувствительный орган, так и управляемые, переключение которых осуществляется контактами реле.

При построении релейных электрических схем необходимо четко уяснить разновидности контактов реле и их состояние в зависимости от напряжения на обмотке (катушке) реле. Наклонные линии на циклограмме (рис. 5.10) соответствуют времени, в течение которого состояние контактов меняется на противоположное [1; 3].

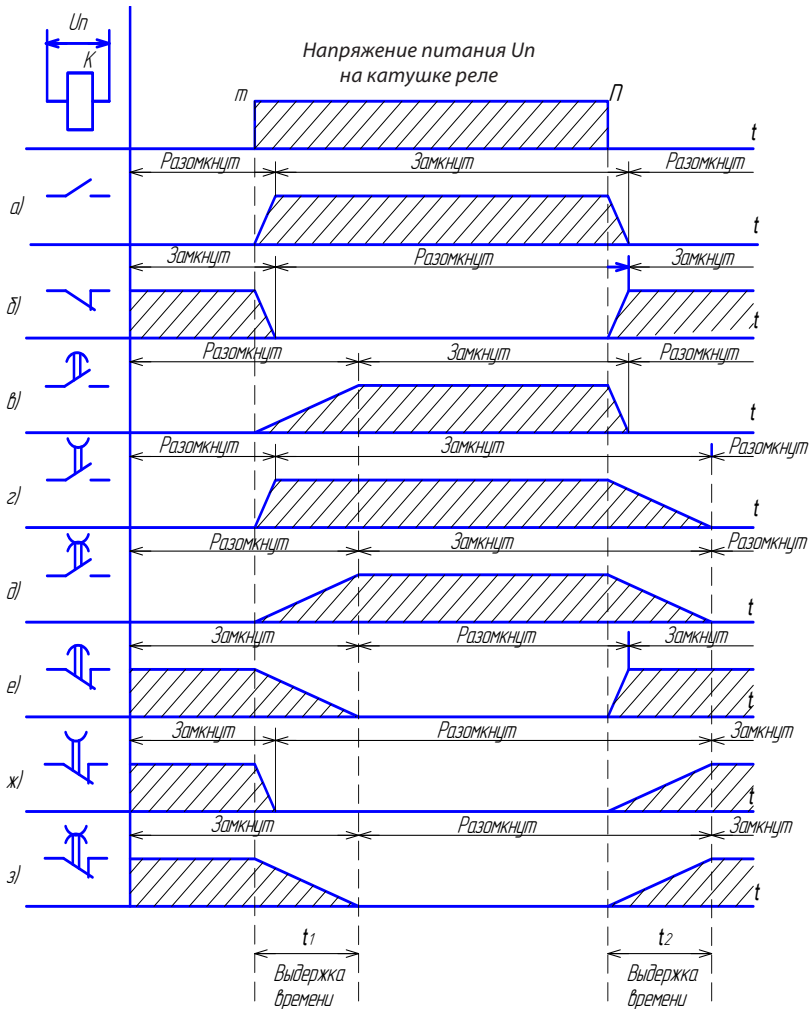


Рис. 5.10. Условные обозначения и диаграмма состояния контактов реле (не путать с диаграммой взаимодействия)

Отсчет выдержки времени для различных видов контактов реле времени начинается или с момента подачи напряжения на катушку реле (точка m) или с момента снятия напряжения (точка n). На циклограмме показаны следующие виды контактов (сверху вниз соответственно):

а) замыкающий без выдержки времени;

- б) размыкающий без выдержки времени;
- в) замыкающий с выдержкой времени на замыкание;
- г) замыкающий с выдержкой времени на размыкание;
- д) замыкающий с выдержкой времени на замыкание и размыкание;
- е) размыкающий с выдержкой времени на размыкание;
- ж) размыкающий с выдержкой времени на замыкание;
- з) размыкающий с выдержкой времени на размыкание и замыкание.

Контакты и обмотка реле могут изображаться в разных местах схемы независимо от механических связей между ними. Чтобы удобнее было читать такие схемы, все контакты, принадлежащие одному реле, должны обозначаться тем же индексом, что и обмотка этого реле (рис. 5.12). Само реле к цепи питания подключается нажатием кнопки S1 «Вкл». Параллельно этой кнопке включен еще один замыкающий контакт K1. Конструктивно катушка реле K1 и все контакты этого реле находятся в одном устройстве. Однако на схемах контакты реле расположены в разных местах.

Управление срабатыванием и отпусканием реле осуществляется обычно кнопками, которые при нажатии замыкают (или размыкают) цепь питания обмотки реле, а при отпускании возвращаются в исходное положение.

На принципиальных электрических схемах реле времени могут обозначаться символом К (обязательная буква при обозначении любых типов реле) или сочетанием букв КТ.

Реле времени в зависимости от конструкции могут иметь или только контакты, работающие с выдержкой времени, или с выдержкой и без выдержки в различных сочетаниях и количестве. Изображение на диаграмме взаимодействия работы реле времени с различными по типу наборами контактов показано на рис. 5.11.

Если необходимо, чтобы после отпускания кнопки реле оставалось включенным, используются схемы самоблокировки реле — сохранение реле заданного положения после прекращения внешнего воздействия. Самоблокировка может быть электрической (рис. 5.13) или механической.

При электрической самоблокировке блокировочным контактом служит одна пара замыкающих контактов данного реле, которая подключается параллельно кнопке «Вкл.».




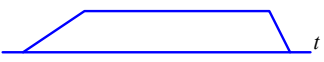

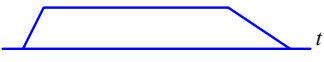

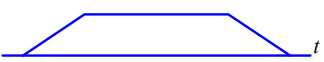
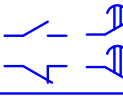

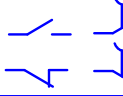


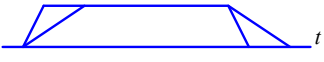
Группа контактов реле	Изображение работы реле
	
	
	
	
	
	
	

Рис. 5.11. Изображение на диаграмме взаимодействия работы реле с различными контактами

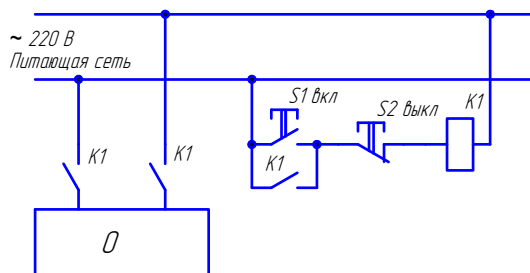


Рис. 5.12. Пример изображения принципиальной электрической схемы

При нажатии на кнопку «Вкл.» реле срабатывает, блокировочный контакт замыкается, и с этого момента обмотка реле питается через цепь блокировки независимо от положения кнопки «Вкл.». Выключается реле кнопкой «Выкл.», которая имеет размыкающие контакты и включается в общую цепь питания обмотки реле (рис. 5.13, а) или в цепь блокировки (рис. 5.13, б).

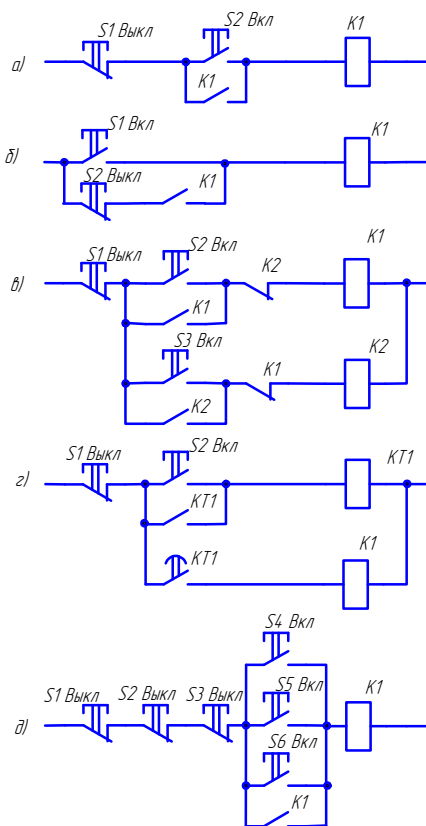


Рис. 5.13. Типовые релейно-контактные схемы

Для устранения возможности одновременного срабатывания двух реле (например, одновременного пуска двигателя вправо и влево) применяется взаимная блокировка реле: механическая или электрическая. При электрической блокировке одно реле, срабатывая, размыкает цепь питания обмотки другого реле (рис. 5.13, в).

Если различные цепи какого-либо устройства необходимо включить в определенной последовательности, применяется схема, представленная на рис. 5.13, з. Из рисунка видно, что реле К1 срабатывает только после замыкания контактов реле времени КТ1 через заданную выдержку времени.

Иногда бывает необходимо включить и выключить какие-либо реле из нескольких мест (например, включение сварки производится с источника питания, с автомата или с выносного пульта управления). В этом случае можно использовать схему (рис. 5.13, д). Кнопки включения реле соединяются параллельно, кнопки выключения – последовательно [5].

Основное назначение релейных схем – создание систем автоматического жесткого управления (САЖУ). Они обеспечивают включение и отключение различных устройств, участвующих в технологическом процессе, по заранее заданной программе (алгоритму) в функции времени, пути или изменения какого-либо параметра технологического процесса.

Настоящая работа предполагает разработку САЖУ для одного из двух (по выбору студента) алгоритмов (рис. 5.14).

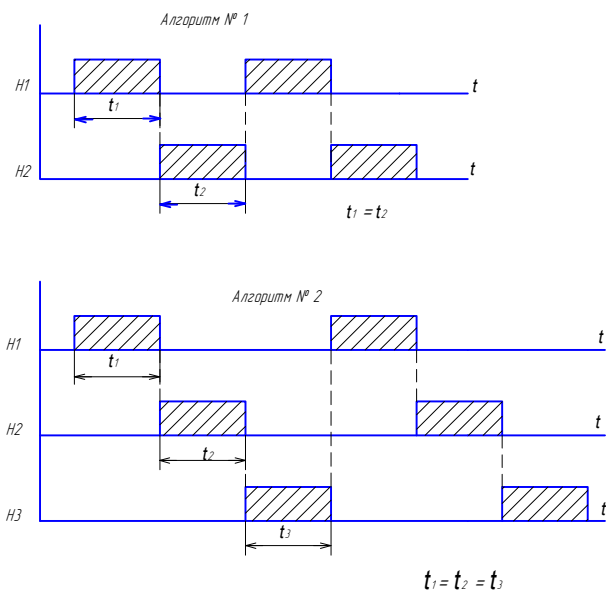


Рис. 5.14. Алгоритм работы объектов управления

Алгоритм № 1 – два условных объекта (лампы) работают поочередно. После двух циклов работы схема автоматически отключается от питающей сети.

Алгоритм № 2 – три условных объекта (лампы) работают поочередно. Циклы следуют один за другим до тех пор, пока схема не будет отключена от питания сети вручную.

Разработка схемы САЖУ для конкретного алгоритма начинается с вычерчивания общей питающей сети. Если напряжение питания объектов не совпадает с напряжением питающей сети, вычерчиваются промежуточные устройства (понижающие трансформаторы, автотрансформаторы, выпрямители).

Аналогично решается вопрос о питающем напряжении релейной аппаратуры.

Указания к выполнению работы

1. Ознакомиться с устройством и принципом работы электромагнитных реле типа МКУ-48, РВП и т. п.
2. Составить (разработать) принципиальную схему для осуществления работы объектов по одному из алгоритмов (рис. 5.14), используя электромагнитные реле: нейтральное и пневматическое реле времени.

Содержание отчета

1. Титульный лист (прил. 1).
2. Название и цель работы.
3. Краткое описание конструкции электромеханических реле и циклограммы состояния контактов.
4. Алгоритм работы объектов и принципиальная схема.
5. Описание принципиальной схемы.

Вопросы для самоконтроля

1. Основные узлы и принцип работы электромагнитных реле.
2. Основные приемы включения и отключения реле.
3. Что такое алгоритм?
4. Назначение систем автоматического жесткого управления.

Лабораторная работа 5.6

Автомат для аргонодуговой сварки АДСВ-5

Цель работы — изучение принципа работы электрической схемы и приобретение умения проверки и настройки блоков управления сварочным автоматом.

Оборудование и приборы

1. Сварочный автомат АДСВ-5.
2. Сварочный пост с пластиной (образцом).
3. Линейка.
4. Секундомер.

Программа работы

1. Изучить назначение, конструкцию, техническую характеристику и управление автоматом.
2. Изучить схему управления электродвигателем.
3. Проверить работоспособность ручек управления.
4. Определить регулировочную зависимость скорости сварки от положения регулятора.
5. Определить точность проведенного эксперимента.

Описание автомата АДСВ-5

Назначение и техническая характеристика автомата

Автомат АДСВ-5 предназначен для аргонодуговой сварки неплавящимся электродом в защитной среде газа продольных швов с использованием присадочной проволоки и без нее, на постоянном или переменном токе [1; 3].

Техническая характеристика сварочного автомата

1. Свариваемый материал — алюминиевые и титановые сплавы, нержавеющие стали
2. Толщина свариваемого материала, мм — 0,8–5
3. Скорость сварки, м/час — 10–90
4. Скорость подачи присадочной проволоки, м/час — 10–100
5. Диаметр присадочной проволоки, мм — 1–2
6. Диаметр вольфрамового электрода, мм — 1–4

7. Габаритные размеры, мм (длина × ширина × высота):

- а) автомат – 825×450×790
- б) шкаф управления – 1075×500×1600
- в) пульт переносной – 65×76×200

8. Вес, кг:

- а) автомат – 65
- б) шкаф управления – 160
- в) пульт переносной – 0,55

Описание конструкции

Сварочный пост (рис. 5.15) для аргодуговой сварки состоит из сварочного автомата, шкафа управления 14, переносного пульта управления 22, каретки 4, на которой жестко закреплены сварочная горелка 2, электродвигатели перемещения горелки и может быть подключен источник питания 21 постоянного или переменного тока.

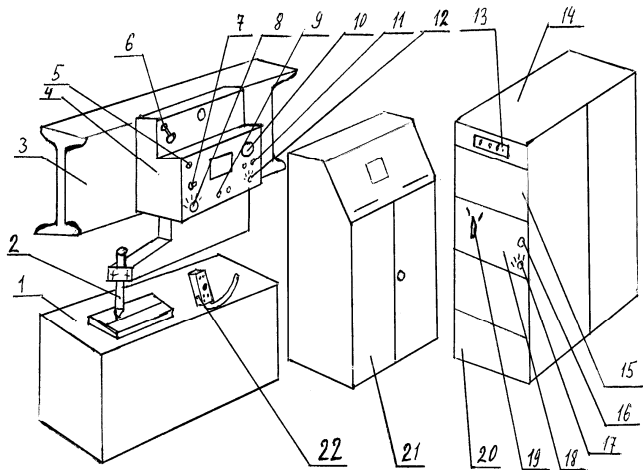


Рис. 5.15. Компоновочная схема сварочного поста

В шкафу управления находятся следующие блоки: реостат заварки кратера 18, регулятор выдержек времени для продувки газа до и после сварки, блок 20 слежения за длиной дуги. В верхней части шкафа управления находятся кнопки 13 включения и выключения питания всего автомата и сигнальная лампа, оповещающая о включении питания.

На лицевых панелях блоков управления имеются органы управления, среди которых основными являются: регулятор времени 17 заварки кратера с сигнальной лампой 16, контролирующей готовность блока к работе, переключатель 19 видов источников питания сварочной дуги и т. д.

Каретка автомата установлена на двутавровой балке 3, прикрепленной к стене, и обеспечивает перемещение горелки над сварочным столом 1 влево и вправо с заданной скоростью. Для ограничения перемещения влево и вправо на задней стенке каретки установлены конечные выключатели, а на двутавровой балке – упоры. На лицевой панели каретки имеются следующие ручки управления:

- тумблер 5 включения блока дуги, который включается в режиме настройки и работы блока регулирования длины дуги;
- тумблер 7 переключения направления перемещения каретки влево и вправо;
- регулятор ступенчатого 6 и плавного 8 изменения скорости перемещения каретки, т. е. скорости сварки;
- кнопки 11 изменения направления перемещения присадочной проволоки;
- регулятор 12 скорости подачи присадочной проволоки;
- кнопки 9 включения и выключения процесса сварки;
- кнопка 10 аварийного отключения автомата.

Для удобства управления сварочным автоматом имеется переносной пульт управления 22, на котором дублированы кнопки включения и выключения процесса сварки, имеется тумблер включения направления перемещения горелки вверх и вниз, установлен регулятор опорного напряжения, задающий длину дуги, и тумблер изменения перемещения горелки поперек стыка (влево, вправо). Все механизмы перемещения горелки имеют ограничения за счет установленных конечных выключателей.

Схема управления электродвигателем

Схема представлена на рис. 5.16. В исходном состоянии контакты путевых выключателей S3 и S5 должны быть замкнуты, а на обмотку возбуждения ОВМ электродвигателя подано малое напряжение (часть теряется на резисторе R). При нажатии на кнопку S2 срабатывает реле

К1, которое своими замыкающими контактами подает напряжение на обмотку якоря М электродвигателя и повышенное напряжение на обмотку возбуждения, минуя резистор R. Каретка перемещается со скоростью сварки, заданной регулятором Т2 (автотрансформатором). Размыкающий контакт К1.2, установленный в цепи катушки реле К2, размыкается во избежание одновременного включения реле К1 и К2, так как такое включение может привести к короткому замыканию в цепи якоря электродвигателя. Для выключения схемы следует нажать кнопку S1, тогда выключается реле К1 и своими контактами размыкает питание электродвигателя. Если не нажать вовремя на кнопку S1, то каретка доедет до крайнего положения, сама нажмет на шток конечного выключателя кнопки S3, отключит питание реле К1 и электродвигатель М остановится. Для перемещения каретки в другую сторону следует нажать кнопку S4, после чего сработает реле К2 и своими контактами подаст напряжение на электродвигатель, но с измененной на противоположную полярностью питания. Движение горелки прекращается размыканием кнопки S1. Размыкающий контакт реле К2.1, установленный в цепи катушки реле К1, служит также для блокировки от короткого замыкания.

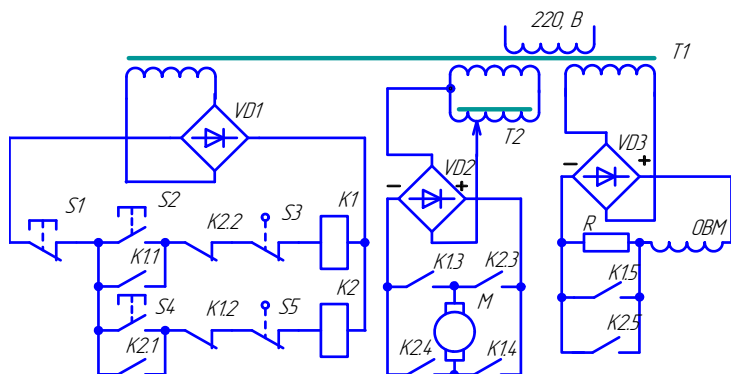


Рис. 5.16. Схема управления электродвигателем

Указания к выполнению работы

1. Включить питание (380 В) автомата кнопками на шкафу управления. **(Выполнять с разрешения и под наблюдением преподавателя!)**

2. Проверить работоспособность ручек на панели и на переносном пульте управления автоматом. Установить регулятор скорости сварки в положение, отличное от нуля. Переместить автомат влево и вправо при различных положениях регулятора скорости. Включив блок дуги, проверить возможность перемещения горелки вверх и вниз и работоспособность конечных выключателей. Включить тумблер перемещения горелки влево и вправо, расположенный на переносном пульте, и проверить работоспособность регулятора и конечных выключателей. Проверку выключателей можно проводить принудительно, нажимая на кнопку выключения.

3. Снять зависимость скорости сварки от положения рукоятки плавного регулятора для двух ступеней. Для этого выполнить следующие операции: отметить линейкой на свариваемой пластине контрольный участок 100 мм, установить горелку на расстоянии 20–30 мм до крайнего положения контрольного участка, выбрать три положения ручки плавного регулирования скорости сварки в диапазоне до 10 делений. Включить скорость сварки. Замерить с помощью секундомера время прохождения контрольного участка при выбранных положениях регулятора. В каждом положении провести по три измерения. Измерение производить после смещения и последующего восстановления положения рукоятки регулятора, чтобы учесть погрешность установки. Результаты измерений представить в форме табл. 5.1. Определить среднеарифметические значения времени прохождения контрольного участка, по которым рассчитать скорость сварки в измеренных положениях для всего диапазона регулирования. Результаты расчета также внести в табл. 5.1.

4. Построить регулировочные зависимости $V_{\text{св}}$ от положения регулятора для двух ступеней в одних осях.

5. Для определения точности проведенного эксперимента из табл. 5.1 выбрать значения времени T_i и рассчитать скорость сварки для каждого положения $V_{\text{св}}$ [4]. Рассчитать среднеарифметическое значение скорости сварки: $\bar{V}_{\text{св}} = \frac{1}{n} \cdot \sum V_i$, отклонения измеренного

значения от среднего — $\Delta V = \bar{V}_{\text{св}} - V_{\text{св}}$, квадраты этих отклонений — ΔV^2 , сумму этих квадратов — $\Sigma \Delta V^2$ и дисперсию — $S^2 = \frac{1}{(n-1)} \cdot \Sigma \Delta V^2$. Рассчитав доверительный интервал: $\Delta V = t \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}$, заполнить табл. 5.2, что позволит определить значения скорости для выбранных точек. Принять $t = 4,3$; n — количество измерений при каждом положении регулятора.

6. Сделать вывод об изученной конструкции, схеме, о пригодности всего автомата к работе с учетом точности полученных результатов.

Таблица 5.1

Результаты измерений и расчетов

Положение ступенчатого регулятора	Положение плавного регулятора	№ опыта	Значение измеренного времени T_i , с	Скорость сварки, $V_{\text{св}}$, м/час	Среднеарифметическая скорость сварки $\bar{V}_{\text{св}}$, м/час	
		1				
		2				
		3				
			1			
			2			
			3			
			1			
			2			
			3			

Таблица 5.2

Результаты расчета

Положение ступенчатого регулятора	Положение плавного регулятора	Значение скорости $V_{\text{св}}$, м/час	Среднеарифметическая скорость, $\bar{V}_{\text{св}}$, м/час	ΔV	ΔV^2	$\Sigma \Delta V^2$	Дисперсия S^2	Доверительный интервал, $\Delta \bar{V}$

Содержание отчета

1. Титульный лист (прил. 1).
2. Цель работы.
3. Электрическая схема управления электродвигателем.
4. Таблицы с результатами измерений и расчетов.
5. Графики регулировочных зависимостей.
6. Выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Область применения автомата АДСВ-5.
2. Из каких основных блоков состоит автомат АДСВ-5?
3. Назначение каждого блока сварочного автомата.
4. Работа схемы управления электродвигателем.
5. Объяснить результаты, полученные в работе.
6. Продемонстрировать порядок управления автоматом.

Лабораторная работа 5.7

Влияние возмущений на параметры сварочной ванны

Цель работы – изучение влияния возмущений мощности теплового источника и скорости сварки на параметры проплавления.

Область применения

Сложность автоматизации сварочного процесса связана с необходимостью учета при построении расчетных моделей сложных физических процессов, происходящих в сварочном контуре (электрических, электромагнитных, тепловых, механических, гидродинамических, радиационных), особенно при изменении параметров процесса и физических констант во времени и от внешних условий. В автоматике такой процесс называют возмущенным. Возмущения, вызывая отклонения от номинала основных параметров режима (тока и напряжения, дуги, скорости сварки) и изменяя условия ввода теплоты в зоне стыка, могут привести к отклонению свойств сварного соединения от требуемых, т. е. к появлению недопустимых дефектов (непровары, подрезы, наплывы, поры и др.). Это явление особенно ярко выражено при сварке тонколистовых

конструкций, поэтому основными затруднениями при их производстве являются частые прожоги и непровары металла, которые в ряде случаев приводят к браку.

Исследование действия возмущений выполняется при анализе и синтезе систем автоматического регулирования. Моделирование действий возмущений на проплавление возможно при установлении параметров теплового источника и металла, а также при установлении величины и характера действующего возмущения.

Известно, что изменения силы сварочного тока влияют на глубину и форму провара, долю основного металла в металле шва, на выпуклость шва. В ряде случаев это вызывает также изменения в химическом составе шва, а следовательно, и в его механических свойствах и склонности к образованию горячих трещин [7].

Изменения напряжения дуги влияют на ширину шва, особенно на угловых швах, а при сварке стыковых соединений приводят к изменениям формы шва, что вызывает непровар кромок, увеличение усиления и образования наплывов.

Непостоянство скорости сварки вызывает изменения погонной энергии дуги, формы шва, глубины проплавления. При значительных изменениях скорости сварки вследствие гидродинамических явлений в сварочной ванне возможно образование пор и подрезов в сварном шве. Таким образом, качественное сварное соединение в условиях действия возмущений можно получить только при условии принудительной стабилизации и регулирования параметров режима в процессе сварки.

Внешние воздействия на систему регулирования имеют самый разнообразный характер — это может быть скачок, кратковременное импульсное возмущение, монотонно изменяющееся возмущение, гармоническое, произвольное. Для системы одним из наиболее «неприятных» является возмущение типа скачка. И хотя такой вид возмущения в реальных условиях встречается реже других, именно его чаще используют в качестве типового при исследовании систем автоматического регулирования.

Возмущения имеют суммируемые и компенсирующие воздействия, т. е. увеличение тока приводит к увеличению проплавления, однако при увеличении скорости сварки данный эффект можно полностью компенсировать и даже изменить результат на противоположный.

Программа работы

1. Ознакомиться с методическим указанием к выполнению работы.
2. Получить сечения сварочной ванны при действии положительных и отрицательных возмущений по скорости сварки и мощности источника тепла.
3. Оформить отчет и подготовиться к устной защите.

Описание методики моделирования

Возмущение по мощности источника (рис. 5.17) реализуют при достижении системой состояния теплонасыщения от источника q_1 , включением дополнительного источника (возмущающего) $\pm q_2$, который позволяет определить реакцию на возмущение мощности.

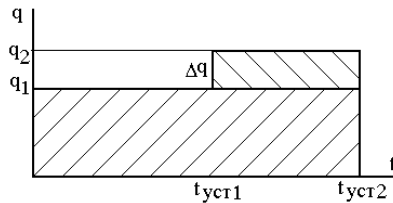


Рис. 5.17. Схема моделирования возмущений по мощности источника тепла

При действии заданного источника до достижения установившегося состояния температурного поля $t_{уст1}$ определялись искомые размеры сварочной ванны (ширина, глубина, длина) и включался дополнительный источник. Действие основного источника продолжалось. После этого отыскивали установившееся состояние процесса для температурного поля от суммарного действия двух источников. При этом определяли изменения характерных размеров сварочной ванны от действия возмущения.

Для моделирования прямоугольной формы возмущений скорости движения сварочного источника тепла применялась следующая теоретическая схема.

После достижения исследуемым параметром (глубиной провара, длиной сварочной ванны и т. д.) заданного значения $t_{уст1}$ дополнительно включается источник тепла той же мощности,двигающийся с другой скоростью V_2 (рис. 5.18). Одновременно включается сток

тепла (отрицательный источник тепла), движущийся со скоростью первого источника V_1 . Действие стока теплоты моделирует прекращение действия первого источника. Неустановившееся температурное поле от второго источника накладывается на поле прекратившего действие первого источника.

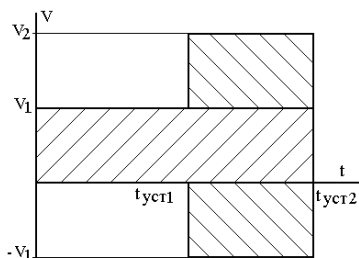


Рис. 5.18. Моделирование возмущения по скорости сварки

Рассмотрим взаимодействие изменений мощности источника тепла и скорости сварки на проплавление металла (рис. 5.19).

Возмущения	Уменьшение скорости сварки ($-\Delta V$)	Увеличение скорости сварки ($+\Delta V$)
Уменьшение мощности сварочного источника ($-\Delta Q$)	Глубина проплавления изменяется незначительно	Глубина проплавления уменьшается
Увеличение мощности сварочного источника ($+\Delta Q$)	Глубина проплавления увеличивается	Глубина проплавления изменяется незначительно

Рис. 5.19. Групповое воздействие возмущающих факторов на проплавление металла

Режимы постоянства глубины проплавления (длины ванны) можно определить линией равного влияния (ЛРВ) мощности и скорости сварки (рис. 5.20). Задаваясь различной величиной провара, можно построить семейство ЛРВ, позволяющих определить изменение проплавления при возмущении одной или двух исходных величин процесса сварки. К примеру, по рис. 5.20 исходным примем режим половинного проплавления толщины металла $h/s = 0,5$, $q = 850$ Вт, $v = 5$ мм/сек. При увеличении мощности $\Delta q = 70$ Вт (+8 %) глубина проплавления увеличивается до $h/s = 0,9$, при этом, чтобы компен-

сировать данное возмущение, необходимо увеличить скорость сварки до $v = 5,4$ мм/сек (+8 %). Уменьшение мощности на величину $\Delta q = -70$ Вт (-8 %) и соответственно уменьшение глубины проплавления \approx до $h/\delta = 0,4$. Способ регулирования по ЛРВ может быть использован для процесса сварки при управлении по математической модели. В этом случае в процессе сварки ведется слежение за изменяющимися параметрами процесса, рассчитываются отклонения регулируемого параметра, а коррекция режима производится только для одного из параметров процесса.

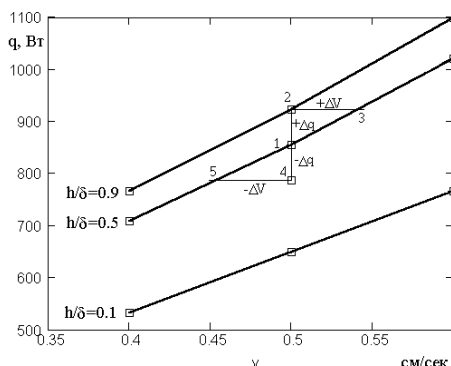


Рис. 5.20. Линии равного влияния мощности источника и скорости сварки при заданном уровне провара для $s = 0,2$ см

Режимы суммируемого положительного либо отрицательного воздействия возмущений мощности источника и скорости сварки на глубину проплавления приводят к значительным изменениям режима сварки. Количественные оценки могут быть даны при предварительном определении допустимого совместного влияния.

Указания к выполнению работы

В данной работе для определения величины искомой функции по графику требуется режим «трассировки». Он относится к операциям над графиками и запускается при выделенном графике нажатием правой кнопки мыши и выбора «Тгасе» [9]. В этом режиме появляется окно, указывающее координаты точки трассировки.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Программа работы.
3. Решение задач лабораторной работы.
4. Выводы по работе.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие возмущения и их характер известны при дуговой сварке?
2. К каким дефектам приводит воздействие возмущений?
3. Схема и результат совместного действия возмущений.
4. Моделирование возмущений мощности теплового источника и скорости сварки.

Рекомендуемая литература

1. Цепенев, Р.А. Автоматизация сварочных процессов : учеб. пособие / Р.А. Цепенев. — Тольятти : Конкурс, 1990. — 106 с.
2. Львов, Н.С. Автоматика и автоматизация сварочных процессов : учеб. пособие / Н.С. Львов, Э.А. Гладков. — М. : Машиностроение, 1982. — 302 с.
3. Цепенев, Р.А. Автоматика и автоматизация производственных процессов : учеб. пособие / Р.А. Цепенев. — Куйбышев, 1984. — 62 с.
4. Цепенев, Р.А. Основы научных исследований и техника эксперимента : методические указания к изучению курса / Р.А. Цепенев. — Тольятти : ТолПИ, 1994. — 43 с.
5. Квартин, М.И. Электромеханические и магнитные устройства автоматики и их расчеты / М.И. Квартин. — М. : Высшая школа, 1973.
6. Рабкин, Д.М. Дуговая сварка алюминия и его сплавов / Д.М. Рабкин. — М. : Машиностроение, 1982. — 95 с.
7. Справочник сварщика / под ред. В.В. Степанова. — М. : Машиностроение, 1982. — 560 с.
8. Китаев, А.М. Справочная книга сварщика / А.М. Китаев, Я.А. Китаев. — М. : Машиностроение, 1985. — 256 с.
9. Дьяконов, В.В. MathCAD 2000 : учебн. курс / В.В. Дьяконов. — СПб. : Питер, 2000. — 592 с.

Раздел VI. ПРОИЗВОДСТВО СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Лабораторная работа 6.1 Исследование деформаций при нагреве электрической дугой кромки пластины и способы их компенсаций

Цель работы – приобретение навыков экспериментального определения деформации при сварке и освоении приемов их устранения при нагреве одной кромки в свободном или предварительно изогнутом состоянии.

Оборудование и приборы

1. Сварочный трактор АДГ-602.
2. Источник питания сварочным током с балластным реостатом РБ-302.
3. Баллон с аргоном.
4. Приспособление с винтовыми прижимами для закрепления пластины при нагреве.
5. Приспособление для измерения прогиба пластины.
6. Приспособление с винтовыми зажимами для изгиба пластины.
7. Чугунная разметочная плита.
8. Линейка металлическая длиной 500 мм.
9. Кернер.
10. Чертилка.
11. Молоток.
12. Деформометр или штангенциркуль.
13. Калькулятор.

Сущность работы

В процессе сварки происходят нагрев металла и его расширение в направлении движения источника тепла. Менее нагретые и холодные участки металла препятствуют свободному удлинению волокон, в результате чего в нагретых зонах возникают напряжения сжатия и протекают пластические деформации укорочения. При остывании металла происходит его сокращение, появляются напряжения растяжения, а затем и пластические деформации укорочения, воз-

никающие при нагреве. Это приводит к появлению усадочной силы (рис. 6.1, а) [2]:

$$P_{yc} = \sigma \times s \times h, \quad (6.1)$$

где s – толщина пластины, м; h – ширина пластины, м; σ – остаточное напряжение, МПа.

Эпюра напряжений в пластине после сварки одной кромки приведена на рис. 6.1, б.

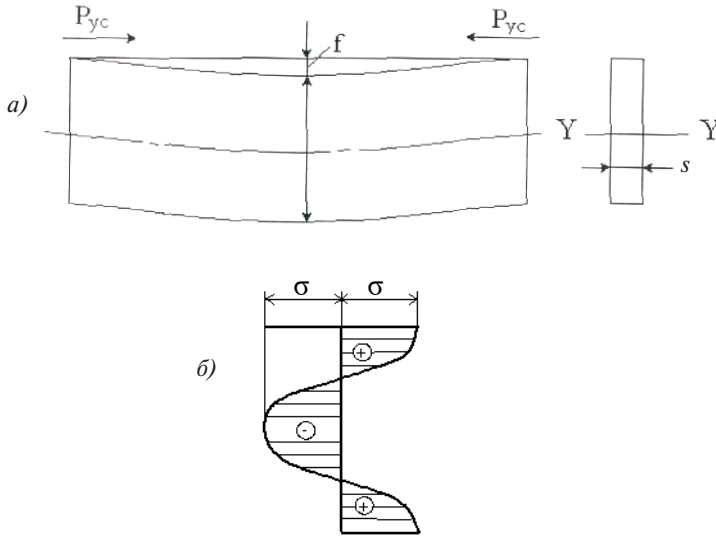


Рис. 6.1. Эпюра напряжений:
а – в полосе; б – после сварки одной кромки

Усадочные силы вызывают укорочение изделия и, если шов расположен не по центру тяжести сечения, создают еще изгибающий момент:

$$M = P_{yc} \cdot \frac{h}{2}. \quad (6.2)$$

При этом возникает прогиб пластины балки:

$$f = \frac{M \cdot L^2}{8 \cdot E \cdot I}, \quad (6.3)$$

где E – модуль продольной упругости, МПа; I – момент инерции пластин относительно оси Y , м⁴; L – расстояние между конусами в приспособлении.

Продольное укорочение балок невелико, а прогиб балок в зависимости от длины, жесткости, расположения и режимов сварки может достигать значительных величин. Для устранения прогибов балок используют термическую, механическую и термомеханическую правку [4].

Одним из распространенных методов компенсации прогиба балок в процессе сварки является предварительный изгиб ее в противоположную сторону. При этом в металле создаются растягивающие напряжения, которые уменьшают величину усадочной силы при сварке, наплавке, нагреве.

Указания к выполнению работы

1. Для выполнения экспериментальных работ используют две пластины из стали размером $500 \times 50 \times 1 \dots 2$ мм. Произвести разметку осей и закрепить базы по 100 мм с обеих сторон пластины (рис. 6.2). Измерения баз произвести по 3 раза. Результаты измерений занести в табл. 6.1.

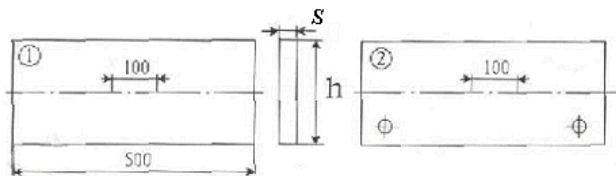


Рис. 6.2. Образцы для исследований

Таблица 6.1

Измерения баз

Образец	№ базы	Начальные замеры до нагрева	Средние значения	Замеры после нагрева 2-й кромки	Средние значения	Укорочение базы	Средние значения укорочения базы
		мм					
I	1						
	2						

Образец	№ базы	Начальные замеры до нагрева	Средние значения	Замеры после нагрева 2-й кромки	Средние значения	Укорочение базы	Средние значения укорочения базы
		мм					
II	1						
	2						

2. Установить образец *1* (без отверстий) на призмы *3* в специальное приспособление (рис. 6.3). Зажать пластину двумя винтами. Чертилкой нанести размерную линию на пластине по боковой стороне левого камертона. Снять отсчет показаний индикаторной головки и занести в табл. 6.2.

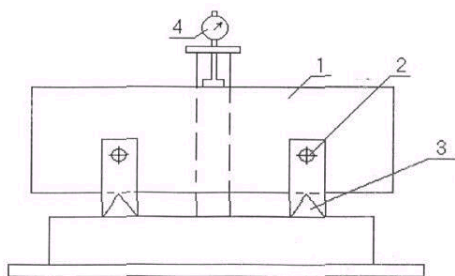


Рис. 6.3. Приспособление для измерения прогиба пластины:
1 – пластина; *2* – прижимной винт; *3* – призмы; *4* – индикатор

Таблица 6.2

Измерение прогибов

Образец	Показания индикатора до нагрева	Показания индикатора после нагрева кромки	Прогиб f , мм	Показания индикатора после нагрева второй кромки	Остаточный прогиб
1					
2					

3. Вынуть пластину из приспособления и прогреть кромку ее дугой с помощью аргонодуговой горелки, оставив непрогретой площадку под ножку индикатора.

4. Установить остывший образец в приспособление и произвести измерение прогиба пластины f на длине L (рис. 6.3). Результат занести в табл. 6.2.

5. Пользуясь формулой (6.3), определить остаточное напряжение в образце от нагрева.

6. Вычислить предварительный прогиб для второй пластины по формуле (6.3), при котором в кромке пластины должны возникнуть растягивающие напряжения, равные напряжениям в первом образце, при условии, что вторая пластина будет подвергнута изгибу в приспособлении (рис. 6.4).

7. Установить вторую пластину в приспособлении (рис. 6.4), вставить штыри 2 и с помощью гаек 3 вручную выбрать зазоры. Установить лимб индикатора на нулевую отметку. Показания индикатора записать в табл. 6.2. Равномерно подвинчивая гайки, создать расчетный прогиб пластины по пункту 6.

8. Изогнутую пластину вместе с приспособлением установить на сварочный стол и прогреть выпуклую кромку на режиме, соответствующем п. 3. Наблюдать за изменением показаний индикатора при нагреве пластины. Дать полностью остыть пластине.

9. Отпустить гайки, сняв натяг, и выбрать вручную зазоры. Записать показания индикатора. Вынуть пластину из приспособления, произвести измерения баз и занести данные в табл. 6.1. При сомнениях в показании индикатора проверить прямолинейность пластины на разметочной плите.

10. Для ликвидации прогиба первой пластины от прогрева первой кромки произвести нагрев второй кромки на режимах п. 3. После остывания пластину установить в приспособление (рис. 6.3), снять показания индикатора и занести в табл. 6.2. Измерить размеры баз и занести данные в табл. 6.1.

11. Обработать экспериментальные данные. Определить укорочения в пластинах и остаточные напряжения. Построить фактическую эпюру остаточных напряжений.

12. Сделать выводы по данным экспериментальной работы.

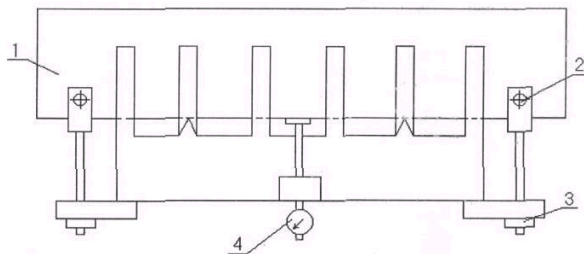


Рис. 6.4. Приспособление для создания предварительного изгиба пластины: 1 – пластина; 2 – штырь; 3 – гайка; 4 – индикатор

Содержание отчета

1. Цель лабораторной работы.
2. Содержание работы (конспективно).
3. Результаты исследований.
4. Выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Почему после нагрева одной кромки пластины возникает ее изгиб?
2. Как влияет предварительный изгиб на остаточные напряжения и остаточную деформацию пластины?
3. Какой способ компенсации деформаций предпочтительнее и почему?

Лабораторная работа 6.2 Исследование деформаций при ручной дуговой сварке пластины по оси симметрии

Цель работы – приобретение навыков экспериментального определения влияния двухосного напряженного состояния на деформации в пластине.

Оборудование и приборы

1. Источник питания сварочным током с балластным реостатом РБ-302.
2. Сварочный стол.

3. Приспособление с рычажно-клавишными прижимами.
4. Чугунная разметочная плита.
5. Линейка металлическая длиной 500 мм.
6. Кернер.
7. Чертилка.
8. Молоток.
9. Секундомер.
10. Деформометр или штангенциркуль.
11. Калькулятор.

Сущность работы

В результате локального нагрева и неравномерного расширения металла при сварке возникают сварочные напряжения и деформации. Напряжения в сварном изделии относятся к разряду внутренних собственных напряжений, так как существуют они без приложения внешних нагрузок. Причинами возникновения внутренних напряжений и деформаций при сварке являются также литейная усадка и вторичные структурные превращения в металле шва и околошовной зоне. Литейная усадка, связанная с уменьшением объема металла при остывании и кристаллизации сварочной ванны, создает сжимающие силы в продольном и поперечном направлениях. Влияние структурных изменений на рост внутренних напряжений особенно проявляется при сварке высокопрочных закаливающих сталей.

В зависимости от объемов, в которых уравниваются внутренние напряжения, различают напряжения 1-го рода – в пределах микрообъемов, 2-го рода – в пределах одного или нескольких зерен и 3-го рода – в пределах ультрамакроскопических объемов (кристаллическая решетка). Напряжения 3-го рода отражают искажения ячеек решетки. Напряжения и деформации можно разделить на временные, вызванные неравномерным нагревом в процессе сварки, и остаточные, сохранившиеся после полного остывания изделия. При разной толщине свариваемого металла наблюдаются поля остаточных напряжений трех типов: одноосное (на металле малых толщин), двухосное и трехосное (объемное), характерные для металла средних и больших толщин. По направлению действия остаточные напряжения разделяют на продольные (направленные

параллельно оси шва) и поперечные (перпендикулярно оси шва). Деформации сварной конструкции проявляются в виде продольного и поперечного (по отношению к оси шва) укорочения, а также изгиба, который связан с образованием угловых деформаций, что, в свою очередь, приводит к потере устойчивости.

Сварочные напряжения оказывают отрицательное влияние на конечные свойства соединений и приводят к возникновению трещин, а при наличии низких температур и концентраторов напряжений – к хрупкому разрушению конструкции.

Дефекты швов (поры, шлаковые включения, непровары, трещины, подрезы и др.) служат концентраторами напряжений. Они усиливают вредное влияние остаточных напряжений, особенно при знакопеременных нагрузках.

Остаточные напряжения в сварных соединениях определяют экспериментально и расчетами [1; 2].

Характер напряженного состояния в сварных соединениях из цветных металлов и сплавов аналогичен полям остаточных напряжений в соединениях из сталей (рис. 6.5).

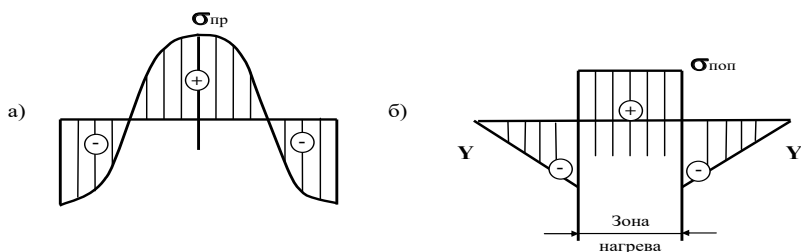


Рис. 6.5. Распределение остаточных напряжений при сварке пластины по оси симметрии: *а* – продольные; *б* – поперечные

В отличие от низкоуглеродистой и аустенитной сталей, для которых напряжения в сварных соединениях близки к пределу текучести, максимальные остаточные напряжения в швах на алюминиевых и титановых сплавах ниже предела текучести и составляют обычно 0,5...0,7. Такое различие объясняется тем, что алюминиевые и титановые сплавы обладают меньшим запасом температурной деформации по сравнению со сталью:

$$\varepsilon_{\tau} = \alpha \cdot \Delta T, \quad (6.4)$$

где α – коэффициент линейного расширения, град⁻¹; ΔT – температура нагрева от начальной температуры, град.

Расчет деформаций сварных изделий затруднен, а в ряде случаев невозможен.

Разработаны методики расчетов для простейших конструкций, которые можно свести к пластинам и балкам.

Фактическая величина поперечной усадки при дуговой однопроходной сварке пластины встык без зазора определяется по формуле

$$\Delta_{\text{поп}} = (1 \dots 1,4) \frac{q}{c\gamma s V_c} \alpha, \quad (6.5)$$

где $c\gamma$ – объемная теплоемкость, мДж/(м³ °С); V_c – скорость сварки, м/с; q – эффективная мощность сварочного источника теплоты, Вт; s – толщина свариваемых пластин, мм.

Продольные остаточные деформации укорочения при сварке пластины встык, если не возникают деформации изгиба в процессе сварки, определяют, пользуясь методом фиктивных сил по формулам (6.6), (6.7):

$$\Delta_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{yc}} \cdot l}{EF}, \quad (6.6)$$

где P_{yc} – приведенная так называемая усадочная сила, Н; l – длина свариваемой пластины, м; F – площадь поперечного сечения пластины, м²; E – модуль упругости, Па.

Для стыковых соединений вдоль шва:

$$P_{\text{yc}} = (1 \dots 1,5) \frac{q}{V_c}, \quad (6.7)$$

где q – эффективная тепловая мощность источника тепла, Вт; V_c – скорость сварки, см/с.

Угол поворота концов пластин относительно друг друга (радиан) определяют по формуле

$$\varphi = \frac{M_{\text{н}} \cdot l}{EI}, \quad (6.8)$$

где $M_{\text{н}} = P_{\text{поп}} \times y_0$ – изгибающий момент, Н×м; $P_{\text{поп}} = \sigma \times S$; y_0 – расстояние от оси, проходящей через центр тяжести сечения пластины, до точки приложения P_{yc} , м; I – момент инерции сечения пластины относительно оси симметрии, м⁴; σ – поперечные напряжения, МПа; S – площадь поперечного сечения пластины, м².

Указания к выполнению работы

1. Разметить пластину с двух сторон, нанести чертилкой ось X—X, проставить номера баз исполнения 1, 2, 3, 4 (рис. 6.6).

2. Произвести измерение баз по 3 раза каждой с точностью до сотых долей мм. Результаты измерений занести в табл. 6.3.

3. Сварить полосу по оси X—X ручной дуговой сваркой. Во время сварки вести наблюдения за показаниями вольтметра, амперметра и временем сварки. Данные занести в табл. 6.4.

4. Вычислить эффективную тепловую мощность источника теплоты при КПД $\eta_{\text{и}} = 0,6$:

$$q = I \times U_{\text{э}} \times \eta_{\text{и}} \quad (6.9)$$

5. Вычислить ожидаемую поперечную и продольную усадку от нагрева по формулам (6.5) и (6.6). Расчетные данные занести и в табл. 6.3:

$$\alpha = 13 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}; c\gamma = 4,77 \text{ МДж}/(\text{м}^3 \text{ } ^\circ\text{C}).$$

6. После полного остывания пластины произвести повторное измерение баз. Результаты занести в табл. 6.3 и получить экспериментальные значения $\Delta_{\text{поп}}$, φ .

7. Определить фактические продольные и поперечные напряжения в пластине, используя экспериментальные результаты из табл. 6.3.

Построить в масштабе эпюры поперечных и продольных напряжений в пластине и определить размеры зон напряжений растяжения и сжатия (рис. 6.5).

8. Те же экспериментальные работы провести на второй пластине, осуществив сварку ее по п. 3 в закрепленном состоянии в приспособлении с клавишными прижимами (рис. 6.7).

Определить фактическое усилие зажима Q и сравнить его с расчетным по лабораторной работе 6.4.

9. По результатам работы сделать вывод и предложить способы компенсации деформаций.

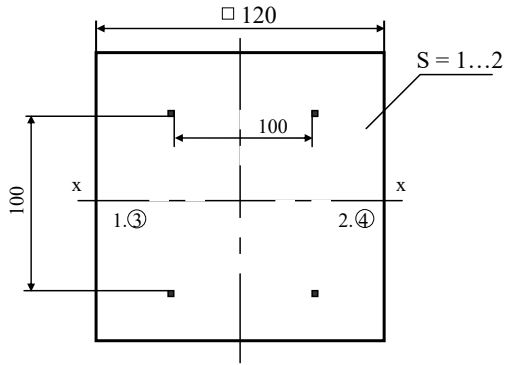


Рис. 6.6. Экспериментальный образец: 1, 2 – с первой стороны; 3, 4 – со второй стороны

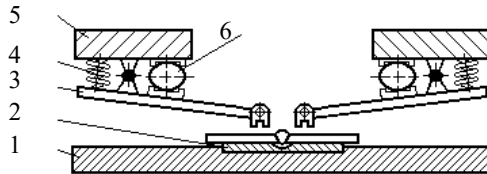


Рис. 6.7. Схема рычажно-клавишного зажимного механизма:
1 – стол; 2 – медная подкладка; 3 – рычаг; 4 – пружина;
5 – балка подвижная; 6 – шланг гидравлический

Таблица 6.3

Результаты исследований полученных деформаций

№ базы	Начальные замеры	Среднее значение	Замеры после нагрева	Среднее значение	Укорочение базы	Экспериментальные данные		Расчетные данные	
						$\Delta_{\text{поп}}$	φ	$\Delta_{\text{поп}}$	$\Delta_{\text{пр}}$
1									
2									

№ базы	Начальные замеры	Среднее значение	Замеры после нагрева	Среднее значение	Укорочение базы	Экспериментальные данные		Расчетные данные	
						$\Delta_{\text{поп}}$	φ	$\Delta_{\text{поп}}$	$\Delta_{\text{пр}}$
3									
4									

Таблица 6.4

Параметры режима нагрева

Показания приборов		Время нагрева, t , сек
Вольтметр, U , В	Амперметр, I , А	

Содержание отчета

1. Наименование лабораторной работы.
2. Краткое содержание работы.
3. Результаты исследования.
4. Выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Как влияет двухосное напряженное состояние на деформации пластины?
2. Почему возникает угловой поворот концов пластины?
3. Почему возникает изгиб кромок пластины параллельных линий нагрева?

Лабораторная работа 6.3

Определение деформации тавровой балки при сварке швов

Цель работы – приобретение навыков по экспериментальному определению деформаций при сварке тавровой балки и освоение приемов исправления изгиба продольной оси балки термическим способом.

Оборудование и приборы

1. Источник питания сварочным током с балластным реостатом РБ-302.
2. Аргонодуговая горелка.
3. Сварочный стол.
4. Стойка с индикаторной головкой.
5. Линейка.
6. Чертилка.
7. Напильник.
8. Амперметр.
9. Вольтметр.
10. Секундомер.
11. ЭВМ.

Сущность работы

При сварке тавровых соединений из-за неравномерного нагрева полки по толщине возникает угловой поворот ее концов α , приводящий к образованию деформаций грибовидности (рис. 6.8, *a*).

Одновременно при остывании швов в металле пояса и стенки возникают остаточные напряжения и создается усадочная сила в продольном направлении, вызывающая укорочение балки $\Delta_{\text{пр}}$ и изгиб продольной оси тавра f (рис. 6.8, *б*) [3; 4].

Укорочение балки:

$$\Delta_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{ус2}} \cdot L}{E \cdot F}, \quad (6.10)$$

где $P_{\text{ус2}} = (1,2 \div 1,4) \cdot P_{\text{ус1}}$ – усадочная сила при заварке 2-х швов, Н;
 F – площадь поперечного сечения, м^2 .

$$P_{ycl} = 16,7 \cdot \frac{q}{V_c}, \quad (6.11)$$

где $q = I \cdot U \cdot \eta$ – эффективная мощность сварки, Вт; η – КПД источника тепла; V_c – скорость сварки, см/с.

Прогиб балки:

$$f = \frac{M_T \cdot L^2}{8 \cdot E \cdot I_T}, \quad (6.12)$$

где $M_T = P_{yc2} \cdot (y - s)$ – изгибающий момент, Н · м; I_T – момент инерции сечения тавра, м⁴.

Момент инерции тавра для данного конкретного случая определяют:

$$I_T = s \cdot h \cdot \left[\left(\frac{s^2}{12} + y^2 + \frac{h^2}{12} \right) + \left(\frac{h+s}{2} - y \right)^2 \right], \quad (6.13)$$

где y – координата центра тяжести таврового сечения, м:

$$y = \frac{1}{2} \cdot \frac{(h+s)^2 + (h-s) \cdot s}{2 \cdot h + s}. \quad (6.14)$$

Вследствие изгиба тавровой балки от нецентрального по отношению к оси приложения усадочной силы напряжения в стенке тавра дважды изменяют знак (рис. 6.8, в). Остаточные напряжения в стенке тавровых и двутавровых балок являются причиной потери ее устойчивости (выпучивание стенки).

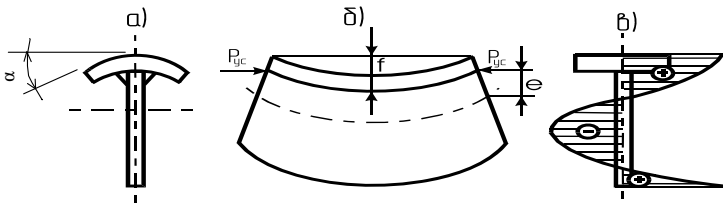


Рис. 6.8. Деформации сварного тавра: *a* – угловая деформация; *б* – изгиб балки; *в* – эпюра остаточных напряжений в тавре

Деформации при сварке можно уменьшить или даже предотвратить. Методы уменьшения деформаций разделяют на три группы в зависимости от того, применяются ли они до сварки, в процессе сварки или после сварки.

До сварки прежде всего предусматривают рациональное конструирование сварочного изделия (симметричное расположение

швов относительно оси конструкции, выбор минимально допустимых по расчету сечений швов и т. п.). Вырезку заготовок листовых и балочных конструкций и их сборку под сварку часто осуществляют с учетом величины и характера ожидаемых деформаций. Например, применяют сварку элементов под углом с таким расчетом, чтобы после сварки соединение заняло прямолинейное расположение, раскрой стенки тавра с начальной кривизной и др.

Для компенсации укорочения от продольной и поперечной усадки принимают увеличенные первоначальные размеры конструктивных элементов. В ряде случаев эффективно создание деформаций, обратных сварочным деформациям.

Методы, используемые в процессе сварки, заключаются в следующем:

- 1) выбор рациональной последовательности в выполнении сварных швов;
- 2) снижение погонной энергии при сварке;
- 3) уменьшение площади зоны пластических деформаций путем интенсивного охлаждения;
- 4) закрепление изделия в жестком положении.

Методы, используемые после сварки, основаны на применении термической и термомеханической правки, а также правки путем создания пластических деформаций в элементах изделия, обратных сварочным деформациям: проковки, растяжения, изгиба и прокатки роликами. Устранение деформаций может быть достигнуто путем высокого отпуска или вибрационной обработки сварных узлов в жестких зажимных приспособлениях.

Указания к выполнению работы

1. Произвести разметку пластин, чертилкой нанести разметочные линии и проставить номера мест измерения (рис. 6.9).

2. Установить балку в приспособление (рис. 6.10) так, чтобы запил на стенке совпал с конусом в приспособлении. Закрепить балку винтами.

3. Установить стойку 4 на плите 5 (рис. 6.10), используя головку 3, произвести отсчет показаний в каждой из пяти точек, причем каждый отсчет берут 3 раза. Все показания занести в табл. 6.5.

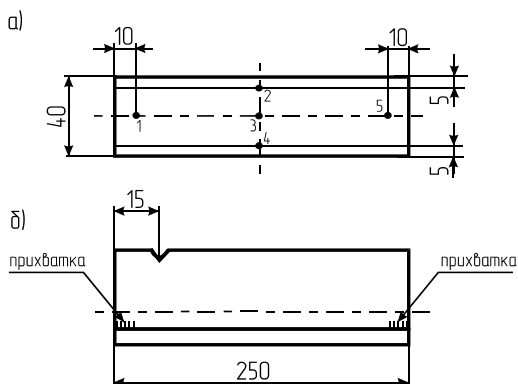


Рис. 6.9. Разметка и сборка балки:
a – разметка полки; *б* – сборка балки

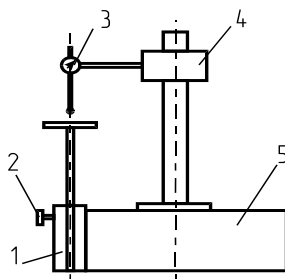


Рис. 6.10. Приспособление для измерения:
1 – приспособление для установки балки; *2* – винт прижимной;
3 – индикатор; *4* – стойка индикатора; *5* – плита

4. Произвести последовательную сварку швов в положении «в лодочку» ручной дуговой сваркой или автоматической сваркой в среде защитных газов. При сварке зафиксировать показания приборов (U , I) и время сварки (t). Занести в табл. 6.6.

5. После полного остывания балки вновь установить ее в приспособление и выполнить замеры по п. 3.

6. По результатам измерений определить углы поворота концов полки и величину прогиба балки f (рис. 6.8). Результаты занести в табл. 6.6.

7. Определить укорочение балки по формулам (6.10) и (6.11). Результат занести в табл. 6.6.

8. Определить остаточные сварочные напряжения в балке, преобразовав формулу (6.12), используя расчетную схему (рис. 6.11) и формулы (6.13) и (6.14). Результат занести в табл. 6.6.

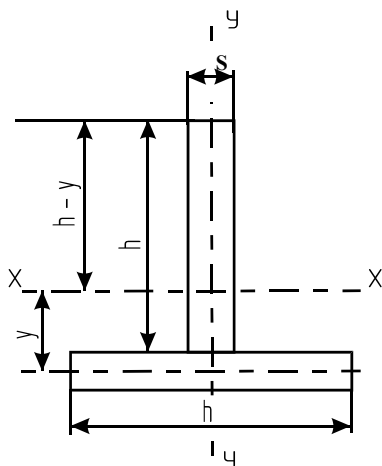


Рис. 6.11. Расчетное сечение тавра

9. Построить эпюру напряжений по фактическим данным п. 8 (рис. 6.8, в).

10. Произвести исправление изгиба балки путем жесткого концентрированного нагрева аргонодуговой горелкой до температуры $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ по двум вариантам (рис. 6.12):

- прогреть кромку стенки и после остывания снять отсчеты индикатора в точках 1, 3, 5; определить уменьшение прогиба балки и занести в табл. 6.6;
- разметить мелом на стенке треугольник и произвести нагрев металла в его контуре по схеме (рис. 6.12). После остывания снять отсчеты в точках 1, 3, 5, определить уменьшение прогиба балки и занести в табл. 6.6.

11. В случае неполного исправления прогиба балки повторить нагрев.

12. Сформулировать выводы по результатам работы.

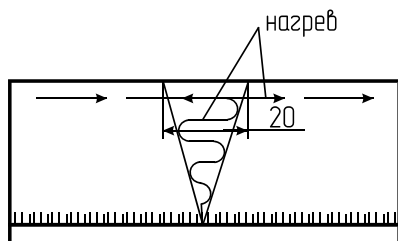


Рис. 6.12. Способы исправления изгиба балки

Таблица 6.5

Показания индикатора

База отсчета	До сварки		После сварки		После нагрева кромки		После нагрева клина	
	отсчет	среднее значение	отсчет	среднее значение	отсчет	среднее значение	отсчет	среднее значение
1								
2					—	—	—	—
3								
4					—	—	—	—
5								

Таблица 6.6

Результаты исследований

Режимы сварки			Углы поворота концов пластины	f , мм	σ , МПа	$\Delta_{пр}$, мм	Остаточный прогиб балки после нагрева, мм	
I , А	U , В	t , с					кромки	«клина»

Содержание отчета

1. Цель лабораторной работы.
2. Содержание работы (конспективно).
3. Результаты исследований.
4. Выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Почему при сварке балки возникает деформация изгиба и грибовидности?
2. Назовите методы компенсации деформаций.

Лабораторная работа 6.4 Выбор установочных баз, схем расположения прижимных устройств и усилий при проектировании сборочных и сварочных приспособлений

Цель работы – приобретение навыков по проектированию приспособлений для сварочного производства.

Оборудование и приборы

1. Чертежные принадлежности.
2. Калькулятор.

Сущность работы

Исходными данными для разработки конструкции приспособления являются: конструкция сварного узла, технология его изготовления, производственная программа и назначение приспособления; форма и сопряжение деталей в изделии, размеры и характер их расположения, габариты изделия являются существенными при определении первоначальной схемы приспособления [4; 5].

Для громоздких изделий рекомендуется применение поворотных механизированных или совмещенных с краном приспособлений.

Конструктивно приспособления проектируют в два этапа:

- 1) разрабатывают принципиальную схему приспособления на основе общих принципов базирования деталей в приспособлении;
- 2) конструируют приспособление.

На первом этапе выбирают, обосновывают и рассчитывают элементы приспособления (упоры, прижимы).

На втором этапе из выбранных элементов разрабатывают общий вид приспособления, исходя из принципиальной схемы.

Общие сведения о базировании деталей в приспособлении

Базированием называется определение положения деталей в изделии относительно друг друга или изделия относительно приспособления рабочего инструмента технологического сварочного оборудования (сварочной горелки, мундштуков сварочных аппаратов, электродов контактных машин и т. п.). Требуемое положение деталей или изделия в приспособлении обеспечивают установочные элементы. Установка детали заключается в наложении на нее шести жестких двусторонних координатных связей, приложенных в опорных точках, согласно ГОСТ 21495–76. При этом деталь лишается шести степеней свободы (правило шести точек). При реализации схемы базирования в приспособлении деталь контактирует с установочными элементами в опорных точках.

Неотрывный контакт базовых поверхностей детали с установочными элементами приспособления обеспечивается приложением сил прижима (зажима). В схеме базирования призматической детали используют комплект баз из трех взаимно перпендикулярных плоскостей (рис. 6.13). На рисунке видно, что если наложить на деталь шесть координатных связей, то она будет лишена всех степеней свободы (цифры указывают номера связей и степеней свободы).

Плоскость XOY называют главной, на которой располагают три точки – 1, 2, 3.

Плоскость YOZ называют направляющей, на ней располагают две точки – 4 и 5.

Плоскость XOZ называют упорной, на ней располагают точку 6.

Неотрывный контакт установочных баз детали от базовых поверхностей приспособления (упоров) во всех плоскостях обеспечивают приложением сил P_1, P_2, P_3 .

Таким образом, под базированием следует понимать размещение деталей узла в приспособлении их базовыми поверхностями на уста-

новочных элементах, причем в качестве главной базы выбирают поверхность с большими габаритными размерами (большой площадью поверхности), а в качестве направляющей – поверхность большей длины. Точность установки деталей в приспособлении будет определяться точностью размера между опорными базами приспособления и плотностью прилегания собираемых деталей к этим поверхностям.

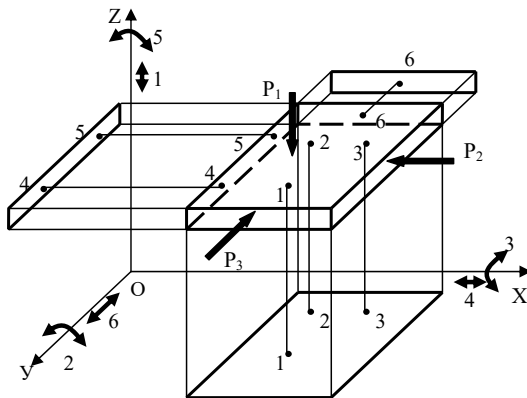


Рис. 6.13. Схема базирования призматической детали

Погрешности базирования номинально должны быть равны нулю, так как конструкция приспособления всегда предполагает плотное прилегание деталей собираемого изделия к базам приспособления, особенно при наличии прижатия.

Но реально всегда могут быть загрязнения и забоины на деталях и упорах, упругие деформации обычно проявляются при освобождении от прижимов деталей, поэтому установочные поверхности могут отойти от поверхностей упоров в приспособлении.

При проектировании приспособлений следует учитывать допуски на неприлегание поверхностей деталей к упорам в усредненных пределах (табл. 6.7).

Допуски на зазоры упоров сборочных приспособлений
(погрешности базирования)

Состояние кромки упора	Состояние кромки детали	Зазор с допуском, мм
Механически обработана	Механически обработана	от $0 + 0,2$ до $0 + 0,5$
Механически обработана	Не обработана	от $0 + 0,5$ до $0 + 1$
Не обработана	Не обработана	от $0 + 1$ до $0 + 2$

В некоторых случаях отраслевые нормативы допускают большие зазоры. Так, в судостроении при сборке секций в стендах-постелях неприлегание обшивки к лекалам допускается до 5 мм.

Существует некоторое правило о взаимосвязи допусков на точность конструкции и приспособления, например, трехкратное ужесточение допуска на базовые размеры приспособления по сравнению с требованиями к точности конструкции, собираемой по этим базовым размерам.

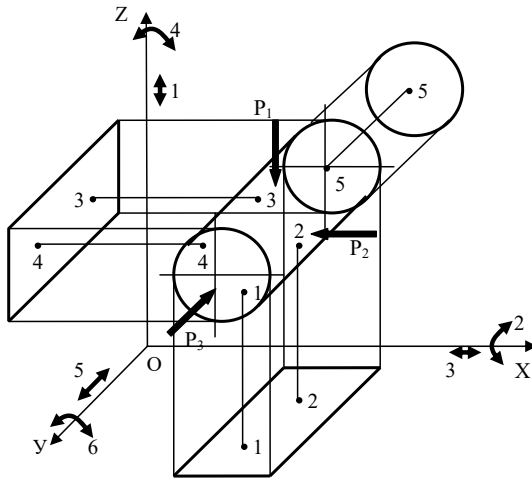


Рис. 6.14. Схема базирования цилиндрической детали

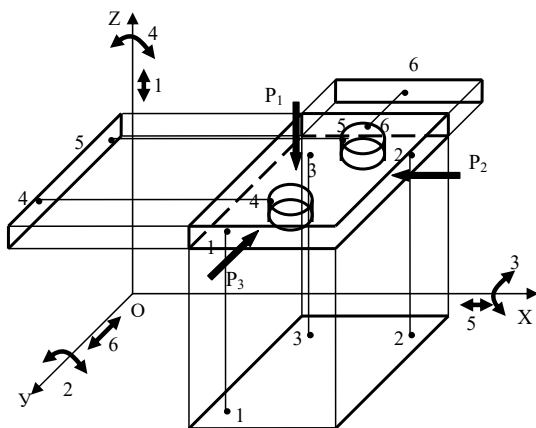


Рис. 6.15. Схема базирования детали по плоскости и отверстиям

Разработка принципиальной схемы приспособления

Принципиальная схема сборочного приспособления представляет собой чертеж сварного изделия, на котором в виде условных обозначений (табл. 6.8) указаны места, способы фиксирования и закрепления всех деталей, а также способы и устройства (упрощенно) для установки, поворота, подъема, съема изделия и другие механизмы. На схеме указывают размеры, которые конструктор должен соблюдать при проектировании приспособления с особой точностью, и величину необходимого усилия зажатия.

Детали и механизмы приспособления изображают на принципиальной схеме условными обозначениями, как правило, карандашом или чернилами другого цвета. При необходимости отдельные механизмы приспособления могут быть выполнены довольно подробно.

В качестве установочных баз предпочтительнее использовать механически обработанные поверхности и отверстия деталей. Размещение упоров не должно вызывать защемления в приспособлении собранного и прихваченного изделия.

Условные обозначения опор и зажимов по ГОСТ 3.1107–81

Наименование	Вид спереди, сзади	Вид сверху	Вид снизу
Опора неподвижная			
Опора подвижная			
Опора плавающая			
Опора регулируемая			
Зажим одиночный			
Зажим двойной			
Вращающийся центр			

Располагать неподвижные упоры следует не по всему периметру, а лишь по двум смежным сторонам, что позволяет обеспечить свободный съем с приспособления прихваченного или сваренного изделия (рис. 6.16). Прижимы размещают против упоров так, чтобы не создавать опрокидывающего момента каждой детали.

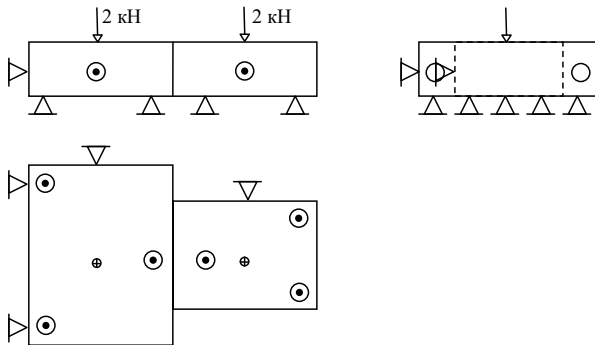


Рис. 6.16. Принципиальная схема приспособления для сборки изделия

Определение силы зажима

Расчет зажимных устройств производят в две стадии: сначала определяют необходимые усилия зажатия деталей или изделий, затем рассчитывают конструкции зажимных устройств и других элементов приспособления на прочность и жесткость под действием этих сил.

Особое внимание при расчете сил зажима следует уделить при проектировании сборочно-сварочных приспособлений, так как необходимо учесть силы, обеспечивающие плотное прижатие деталей друг к другу, и силы, удерживающие изделие от деформирования в процессе прихватки и сварки, либо силы, необходимые для предварительного прогиба деталей или изделия с целью компенсации деформаций от сварки.

Определяют форму и размеры остаточных сварных деформаций или возможных отклонений. Затем расчетным путем устанавливают усилия, необходимые для компенсации остаточных деформаций. При расчетах следует ориентироваться на максимально возможные величины усилий с учетом их места приложения и направления.

Требуемая сила зажима определяется с учетом коэффициента запаса K_m , который для ручных зажимов рекомендуется брать равным 2, а для механизированных — 1,5.

При проектировании стенов для сварки прямолинейных стыков листовых конструкций для компенсации деформаций совместного увода кромок применяют прижимы сплошной балкой или клавишами с усилием, прилагаемым к обеим кромкам, 40 кН на 1 м длины шва с учетом коэффициента запаса.

При сравнительно малых угловых деформациях и небольших толщинах ($s < 5$ мм) для листовых конструкций и при сварке тавровых соединений применяют метод расчета, основанный на зависимости сил прижатия от величины угловой сварочной деформации (рис. 6.17), по формуле (6.15).

Для того чтобы листы на линии прижимов не отходили от установочных элементов приспособления при угловой деформации, необходимо приложить усилие:

$$Q = \frac{s^3 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot E}{4l^2} \text{ [Н/м]}, \quad (6.15)$$

где s – толщина детали, м; α – угол поворота детали, рад; E – модуль упругости, Па [$E = 2 \cdot 10^{11}$ Па]; l – расстояние до линии прижима, м.

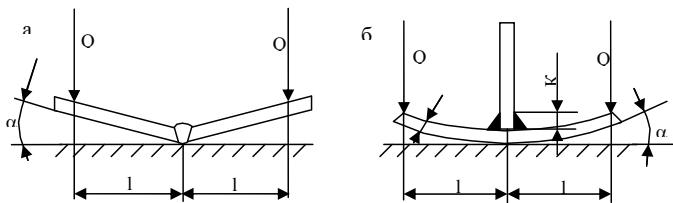


Рис. 6.17. Расчетные схемы при сварке: *a* – совместный увод кромок в стыковом соединении; *б* – грибовидность в тавровом соединении

Для определения сосредоточенного усилия прижатия детали следует воспользоваться формулой

$$Q_C = K_M \cdot Q \cdot l_{ш} \text{ [Н]}, \quad (6.16)$$

где $l_{ш}$ – длина первоначально выполняемого шва, м.

Полученное по формуле (6.16) числовое значение усилия прижима проставляется в принципиальной схеме приспособления, как показано на рис. 6.16.

При расчете усилия прижима тавровых балок небольшой длины (рис. 6.18) можно пользоваться формулами (6.17), (6.18), (6.19):

$$Q = \frac{48f \cdot E \cdot J}{L^3} = \frac{6P_{yc} \cdot e}{L} \text{ [Н/м]}, \quad (6.17)$$

где L – длина балки, м; P_{yc} – усадочная сила от двух швов, Н; J – момент инерции тавра, м^4 ; e – расстояние от центра тяжести сечения балки до центра тяжести тавровых швов, м; f – прогиб балки от сварки, м.

С достаточной степенью точности усадочную силу определяют:

1) для одного таврового шва –

$$P_{yc} = 1,7 \cdot D \cdot K^2; \quad (6.18)$$

2) для соединения с двумя швами –

$$P_{yc} = 1,7 \cdot 1,15 \cdot D \cdot K^2, \quad (6.19)$$

где K – катет шва, см; D – коэффициент, зависящий от способа сварки (при механизированной сварке $D = 30000$, при ручной сварке $D = 40000$).

Прогиб балки от сварки:

$$f = \frac{M \cdot L^2}{8 \cdot E \cdot J}, \quad (6.20)$$

где M – изгибающий момент, Н · м [$M = P_{\text{yc}} \cdot e$].

Для двутавровой балки усилие прижатия определяют по той же формуле (6.17).

Если по технологии сварки сначала приваривают один пояс, а затем другой, то расчет проводят в два этапа: определяют усилие прижатия для балки таврового сечения, а затем – для двутаврового сечения. Суммируют полученные значения с учетом знака и получают необходимое усилие прижатия в сборочно-сварочном приспособлении. Аналогичным образом рассчитывают усилия в приспособлениях для сварки коробчатых балок.

При проектировании приспособлений для сборки рамных, решетчатых и других конструкций требуется предусмотреть прижимные элементы для зажатия различных видов раскосов, связей, планок, косынок, кронштейнов, накладок и т. п. Определить усилия зажатия таких деталей расчетными методами весьма трудоемко, а часто и невозможно.

Учитывая производственный опыт машиностроительных заводов и проектных организаций, для закрепления таких деталей усилие каждого необходимого прижима выбирают в пределах 2...6 кН.

При установке свариваемых изделий на столы или рамы вращателей, кантователей или манипуляторов необходимо обеспечить их надежное сцепление с установочными элементами или поверхностями этих устройств, препятствующее выпадению изделия при поворотах.

Усилие прижатия изделия определяют по формуле

$$Q = \frac{k_1 \cdot \mu \cdot P}{n}, \quad (6.21)$$

где k_1 – коэффициент запаса, равный 1,5; μ – коэффициент трения скольжения стали по стали, равный 0,2; P – масса изделия, кг; n – количество прижимов.

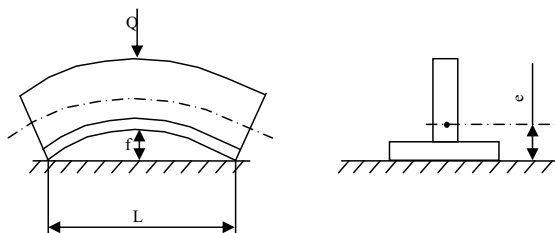


Рис. 6.18. Расчетная схема при сварке балки таврового сечения

Указания к выполнению работы

1. Разработать чертеж сварного изделия в соответствии с выданным преподавателем вариантом и стандартами на сварные соединения.
2. Выбрать теоретическую схему базирования деталей в приспособлении и разработать принципиальную схему сборочного приспособления.
3. Рассчитать усилия прижатия деталей с учетом ожидаемых деформаций при выполнении сварных швов согласно составленной расчетной схеме.
4. Проставить полученные значения усилий на принципиальной схеме.

Содержание отчета

1. Наименование работы.
2. Содержание работы (конспективно).
3. Чертеж изделия.
4. Принципиальная схема приспособления.
5. Расчетная схема и расчет усилий прижатия.

Вопросы для самоконтроля

1. Что понимают под базированием изделия?
2. Сколько существует общих схем базирования?
3. Сколько этапов выделяется при проектировании приспособления?
4. Укажите назначение приспособления.

Рекомендуемая литература

1. Николаев, Г.А. Сварные конструкции. Технология и проектирование сварных конструкций : учеб. пособие / Г.А. Николаев, С.А. Куркин, В.А. Винокуров. — М. : Высшая школа, 1983. — 340 с.
2. Николаев, Г.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций : учеб. пособие / Г.А. Николаев, С.А. Куркин, В.А. Винокуров. — М. : Высшая школа, 1982. — 272 с.
3. Экспериментальные исследования сварочных напряжений и деформаций / Б.С. Касаткин [и др.]. — Киев : Наукова Думка, 1976. — 148 с.
4. Козулин, М.Г. Технология сварочного производства и ремонта металлоконструкций : учеб. пособие для вузов / М.Г. Козулин. — Тольятти : ТГУ, 2002. — 280 с.
5. Рыморов, Е.В. Новые сварочные приспособления / Е.В. Рыморов — Л. : Стройиздат, 1988. — 125 с.
6. Стандарты предприятий.

Раздел VII. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Лабораторная работа 7.1 Распределение напряжений в сварных соединениях, выполненных сваркой плавлением

Цель работы – приобретение навыков экспериментального исследования влияния формы сварного соединения на распределение в нём напряжений от внешней нагрузки.

Задачи работы:

- освоить методику измерения деформаций с помощью тензорезисторов;
- построить эпюры напряжений в поперечных сечениях сварных соединений и определить наиболее напряжённые участки соединений;
- определить коэффициенты концентрации напряжений.

Особенности концентрации напряжений в сварных соединениях

Изменение сечений элементов конструкций, в частности в районе сварных швов, нарушает условия распределения силового потока в металле сварных соединений и приводит к местной концентрации напряжений. Степень концентрации напряжений в соединениях зависит от их конструктивного оформления. Особенно усложняют напряженное состояние сварных соединений различные концентраторы напряжений: дефекты сварных швов, нерациональные конструкции соединений и очертание сварных швов. Например, в стыковых швах существенное влияние на характер распределения напряжений оказывает величина усиления и радиус перехода от металла шва к основному металлу.

При оценке прочности различных типов сварных соединений необходимо учитывать концентрацию напряжений и её влияние в зависимости от величины и вида внешней нагрузки.

Степень концентрации напряжений оценивается коэффициентом:

$$\alpha_{\sigma} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}}, \quad (7.1)$$

где σ_{\max} и σ_{\min} — соответственно максимальное и минимальное значения напряжений в рассматриваемом сечении.

Стыковые швы представляют собой наиболее совершенную форму сварных соединений, в которых концентрация напряжений невелика.

На рис. 7.1 приведены эпюры напряжений в стыковом соединении, которые показывают, что даже в таком благоприятном по своей форме соединении распределение напряжений неравномерно. Наиболее напряженным участком соединения является зона перехода от шва к основному металлу (точка А), именно в этом месте в процессе эксплуатации сварных конструкций чаще всего наступает разрушение.

Увеличение усиления шва приводит к местному росту деформаций и возникновению концентрации напряжений (рис. 7.2).

Концентрация напряжений имеет место и в корне металла шва, в зоне перехода к основному металлу (рис. 7.1).

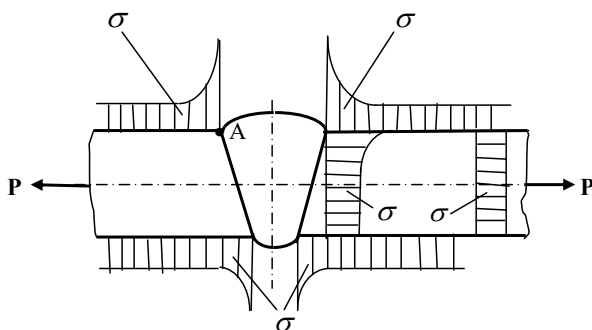


Рис. 7.1. Распределение напряжений в стыковом сварном соединении

При определении напряжений в нахлесточных соединениях необходимо учитывать деформации соединяемых элементов и швов. Под действием растягивающих усилий соединяемые элементы (основной металл) удлиняются и во фланговых швах возникают деформации сдвига (рис. 7.3). Точки 1–1 и 2–2 под действием сдвиговых усилий перемещаются в положение 1'–1' и 2'–2'. Наибольшие сдвиги наблюдаются в крайних точках шва А и В, наименьшие — в средних (рис. 7.3, эпюра АВ). В связи с этим касательные напряжения τ по длине флангового шва распределены неравномерно.

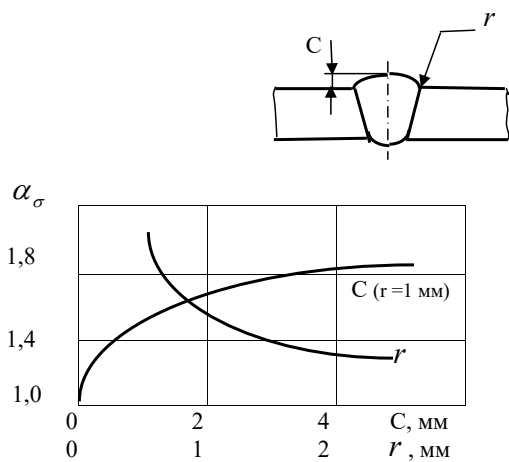


Рис. 7.2. Изменение коэффициента концентрации напряжений α_σ в зависимости от величин C и r

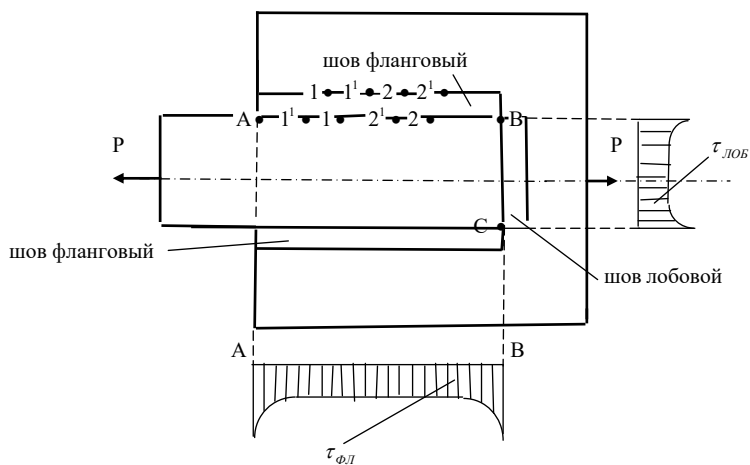


Рис. 7.3. Распределение напряжений в нахлесточном соединении

Концентрация напряжений в точках В и С приводит к неравномерному распределению напряжений τ в лобовом шве (рис. 7.3, эпюра ВС). Следовательно, с точки зрения опасности возникновения разрушения наиболее нагруженными являются точки В и С нахлесточного соединения.

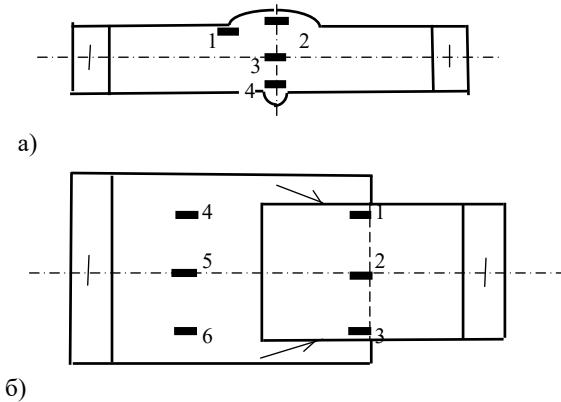


Рис. 7.4. Модели сварных стыковых (а) и нахлесточных (б) соединений;
 ■ — тензодатчик сопротивления

Для оценки напряжений в различных точках и сечениях сварного соединения используются металлические модели сварных стыковых, тавровых и нахлесточных соединений (рис. 7.4) с наклеенными проволочными датчиками сопротивления (тензодатчиками).

Конструктивно проволочные тензосопротивления (рис. 7.5) представляют собой спираль (решетку) 1, состоящую из нескольких петель (витков) проволоки диаметром 20...30 мкм, наклеенных на тонкую бумажную или лаковую (пленочную) основу 2. Сверху решетка также закрыта тонкой бумагой или плёнкой 3. Эти датчики в сочетании с электроизмерительной аппаратурой обладают высокой чувствительностью (например, тензосопротивления при базе $l_6 = 20$ мм обеспечивают измерение деформаций величиной до десятых долей микрометра).

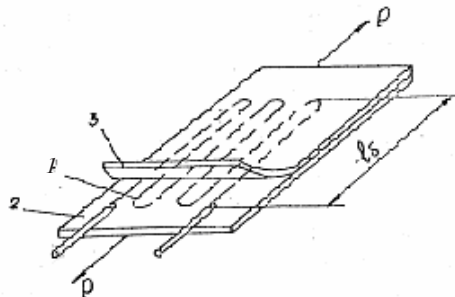


Рис. 7.5. Схема проволочного тензосопротивления

Проволочный датчик наклеивают на поверхность исследуемого соединения. Если соединение деформируется, то изменяются геометрические размеры и электрические свойства проволоки датчика, что приводит к изменению электрического сопротивления:

$$\frac{\Delta R/R}{\Delta \ell_{\sigma}/\ell_{\sigma}} = K = \text{const}, \quad (7.2)$$

где ΔR – абсолютное приращение сопротивления тензорезистора; R – номинальное сопротивление тензорезистора; $\Delta \ell_{\sigma}$ – абсолютное приращение базы тензорезистора (рис. 7.5); K – коэффициент тензочувствительности, то есть изменение сопротивления датчика прямо пропорционально величине его деформации в соотношении (7.2).

Тогда, в соответствии с законом Гука, напряжения в точке соединения определяют по формуле:

$$\sigma = \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{K} \cdot E, \quad (7.3)$$

где E – модуль упругости материала сварного соединения (для стали $E = 2 \cdot 10^6$ кг/см²).



Рис. 7.6. Блок-схема измерения

Структура большинства электрических приборов для измерения неэлектрических величин может быть представлена блок-схемой, изображённой на рис. 7.6. Назначение каждого из узлов весьма четко определено его наименованием. Первый из них – преобразователь – является устройством, обеспечивающим восприятие измеряемой входной величины и преобразование её в величину, удобную для передачи по линиям связи, усиления, измерения или регистрации электрическими средствами. Наряду с термином «преобразователь» в технической литературе часто встречается другой термин – «дат-

чик», имеющий одинаковое с первым значение. Неэлектрические величины, преобразованные в электрические напряжения или ток, измеряются или регистрируются соответствующим устройством. В качестве измерительного устройства часто используются показывающие стрелочные и цифровые приборы. Если непосредственное преобразование входной величины в выходную произвести не удаётся, применяется промежуточное преобразование, например в тензометрических преобразователях, где измеряемая величина (например, сила) преобразуется в деформацию упругого элемента, которая приводит к изменению электрического сопротивления.

Для измерения деформаций сварных соединений при внешней механической нагрузке каждый из рабочих датчиков, наклеенных на модель соединения, включали в схему моста Уитстона в качестве одного его плеча (T_p) (рис. 7.7). Другое плечо моста образовано термокомпенсационным датчиком T_k , наклеенным на ненагружаемую деталь, изготовленную из основного металла. Мост питают постоянным током от источника E . В измерительную диагональ включают гальванометр G . Базовые резисторы R_1 и R_2 образуют внутренний полумост. Реохорд R служит для уравнивания (балансировки) моста.

Перед началом измерений мостовую схему балансируют. При приложении механической нагрузки к образцу изменяется сопротивление рабочего датчика T_p , это приводит к разбалансировке схемы измерения и вызывает появление тока в диагонали моста. Величина тока прямо пропорциональна изменению сопротивления датчика T_p и, следовательно, величине деформации. При использовании датчиков в схеме измерительного моста Уитстона необходимо избегать ошибок в измерении деформации, возникающих от непостоянства температуры окружающей среды. Изменения сопротивлений рабочего T_p и компенсационного T_k датчиков вследствие температурного влияния одинаковы, и так как эти датчики помещены в прилегающие плечи моста (рис. 7.7), то баланс измерительной схемы не нарушается, поэтому удаётся исключить влияние изменения температуры на показания гальванометра и зафиксировать отклонения, вызванные только деформацией исследуемого образца.

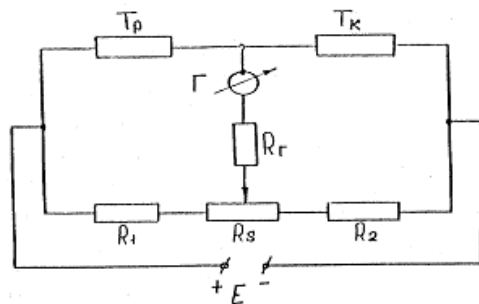


Рис. 7.7. Схема моста Уитстона

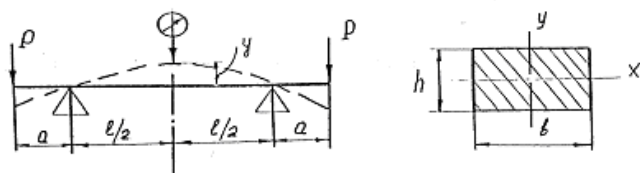


Рис. 7.8. Схема тарировочной балочки

Для калибровки измерительной схемы и оценки чувствительности тензодатчиков строят так называемый тарировочный график. Тарировочное устройство представляет собой балку прямоугольного сечения (рис. 7.8) с наклеенными тензодатчиками из той же партии выпуска, что и рабочие датчики. Схема нагружения балки обеспечивает чистый изгиб той её части, которая расположена между опорами (длиной ℓ). Для измерения величины прогиба балки y при тарировке в плоскости среднего сечения установлен индикатор.

Зависимость между прогибом балки y и напряжением, действующим в поверхностных слоях металла балки, определяется как:

$$y = P \cdot a \frac{\ell^2}{8EI}, \quad (7.4)$$

где P – величина нагрузки на балку; a, ℓ – параметры схемы нагружения (рис. 7.8); E – модуль упругости (модуль Юнга); I – момент инерции.

Учитывая, что $P \cdot a = M$ и $W = 2 \frac{I}{h}$, находим:

$$y = \frac{\ell^2 \cdot \sigma}{4 \cdot h \cdot E} \quad \text{и} \quad \sigma = 4 \cdot h \cdot y \frac{E}{\ell^2}, \quad (7.5)$$

где h – высота балки, см; y – стрела прогиба, см; ℓ – расстояние между опорами, см.

Нагружение моделей сварных соединений осуществляют на специальной испытательной машине путём растяжения.

Указания к выполнению работы

1. Ознакомиться с методом измерения напряжений при помощи тензодатчиков сопротивления.
2. Подготовить измерительную систему к проведению испытаний.
3. Произвести балансировку мостовой схемы, пользуясь переключателями «тысячи» и «сотни», и реохордом. В процессе балансировки не допускать зашкаливания контрольных и измерительных приборов.
4. Произвести тарировку измерительной схемы.
5. Подключить тензосопротивление, наклеенное на поверхность тарировочной балки, к измерительной схеме.
6. Произвести балансировку измерительной схемы, результаты (показания переключателей «тысячи» и «сотни» и шкалы реохорда) занести в табл. 7.1 (строка 1). Повторить не менее двух раз.
7. Произвести отсчёты D по показаниям переключателей «тысячи», «сотни» и по шкале реохорда «десятки» при последовательном нагружении тарировочной балки (табл. 7.1); после каждого нагружения балки необходимо производить балансировку измерительного моста. Результаты испытаний занести в табл. 7.1. Повторить не менее двух раз.
8. Определить величину напряжений по формуле (7.5); результаты расчётов представить в табл. 7.1.
9. Построить тарировочный график, используя результаты табл. 7.1.
10. Установить модель сварного соединения в испытательную машину и присоединить тензодатчики модели к измерительной схеме.

11. Произвести последовательную балансировку тензодатчиков, наклеенных на модель сварного соединения. Результаты испытаний занести в табл. 7.2.

Перед заполнением табл. 7.2 представить в отчёте эскиз испытуемого образца со схемой расположения тензодатчиков.

12. Нагрузить модель и, снимая отсчеты D после балансировки каждого тензодатчика, представить результаты испытаний в табл. 7.2 (столбец 5).

13. Разгрузить испытуемую модель и привести измерительную схему в исходное положение.

14. Определить расчётом величину ΔD , результаты расчётов представить в табл. 7.2 (столбец 7).

15. Используя тарировочный график, определить величину напряжений в металле модели, результаты представить в табл. 7.2 (столбец 8).

16. Построить эпюры напряжений в рассматриваемых сечениях моделей соединений.

17. Подсчитать по формуле (7.1) коэффициенты концентрации напряжений в характерных зонах сварных соединений.

Таблица 7.1

№ п/п	Стрела прогиба y , см	Отсчет по шкале реохорда при сбалансированной схеме		Разность отсчетов $\Delta D = D_n - D_1$	Напряжение δ , кгс/см ²
		D	D_{cp}		
1	0				
2	0,05				
3	0,10				
4	0,15				

Таблица 7.2

№ об- раз- ца	№ тен- зодат- чика	Отсчет по шкале реохорда при сбалансированной схеме				Разность отсчетов $\Delta D = D_{н\text{ ср}} -$ $-D_{0\text{ ср}}$	Напря- жение σ , кгс/см ²
		без нагружения		после нагружения			
		D_0	$D_{0\text{ ср}}$	$D_{н}$	$D_{н\text{ ср}}$		
1	2	3	4	5	6	7	8
	1						
	2						
	8						

Содержание отчета

1. Цель и задачи работы.
2. Конструктивные особенности моделей сварных соединений.
3. Результаты измерений и расчетов.
4. Эпюры распределения напряжений в соединениях.
5. Анализ полученных результатов.

Вопросы для самоконтроля

1. В чем сущность метода электротензометрирования?
2. В каких точках стыкового шва напряжения имеют максимальное значение?
3. В каких точках нахлесточного соединения касательные напряжения имеют максимальное значение?
4. Оказывает ли влияние на прочность концентрация напряжений?
5. В каких соединениях (стыковых или нахлесточных) концентрация напряжений больше?
6. Какие факторы вызывают концентрацию напряжений в стыковых и нахлесточных соединениях?

Лабораторная работа 7.2

Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния металла сварных соединений с помощью метода сеток

Цель работы – освоение элементов методики экспериментального определения напряженно-деформированного состояния сварных соединений в условиях внешнего растяжения.

Задачи работы:

- изучение распределения деформаций в различных типах сварных соединений;
- выявление наиболее нагруженных участков сварных соединений;
- определение концентрации деформаций в различных зонах соединений.

Особенности оценки полей деформаций методом сеток

В сварных соединениях при работе в условиях внешнего механического нагружения наблюдается неравномерное распределение напряжений в различных зонах металла. Особенно резко выражена концентрация напряжений в зоне перехода металла стыкового шва к основному металлу (рис. 7.9). Из-за наличия геометрической неоднородности соединения силовой поток изменяет свою форму (рис. 7.10).

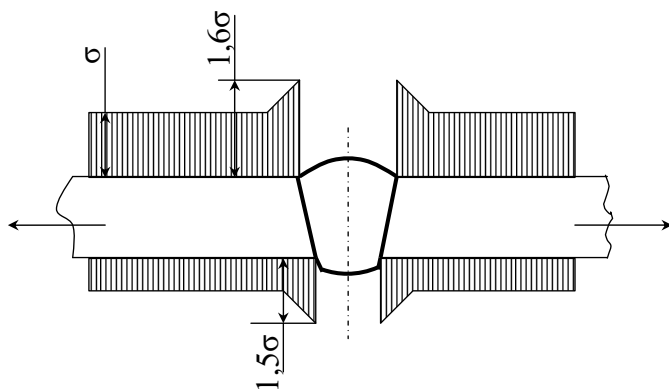


Рис. 7.9. Распределение напряжений в стыковом соединении

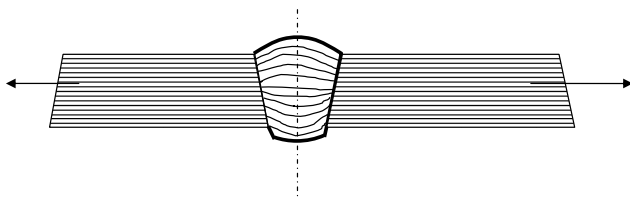


Рис. 7.10. Схема силового потока в стыковом соединении

В экспериментальной исследовательской практике наметилось несколько методов расчёта напряжённо-деформированного состояния металла, в том числе метод с использованием нанесённой на поверхности сетки. Этот метод базируется на основных положениях теории конечных деформаций. Для оценки напряжений в различных зонах сварных соединений используют резиновые модели стыковых и нахлесточных соединений с нанесённой специальной делительной сеткой.

Определение напряженно-деформированного состояния на свободной поверхности деформируемого тела по искаженным ячейкам координатной сетки несложно в силу того, что поверхность является главной плоскостью напряженно-деформированного состояния и нормальный к поверхности главный компонент напряжения равен нулю.

Под действием приложенных внешних сил форма сварного соединения меняется, а предварительно нанесённая на его поверхность сетка искажается; заметно изменяются размеры отдельных ячеек этой сетки; размер всех ячеек сетки в направлении действия растягивающей силы увеличивается, то есть все элементы сетки растягиваются.

Одинаковая форма всех ячеек сетки до деформации после деформации становится различной: в зоне концентрации деформаций ячейки сетки становятся более вытянутыми, чем вне этой зоны. Линии сетки, прямые до деформации, заметно искривляются после деформации. Таким образом, деформация оказывается неоднородной.

Делительные сетки применяют для изучения значительных по величине (более 5 %) упругих (на материале типа резины) и пластических деформаций. Зная зависимость между деформацией и напряжением, можно получить представление о распределении и ве-

личине местных деформаций и неоднородности поля напряжений на базе сетки.

Обработка сетки построена на следующих принципах:

- 1) основные параметры локального (в пределах единичной ячейки делительной сетки) формоизменения определяются путём сопоставления конечной формы и размеров ячейки с её начальной (исходной) формой и размерами;
- 2) главные компоненты тензора деформаций определяются натуральными логарифмами отношений.

В методе сеток используется основное допущение о том, что в пределах объёма, ограниченного ячейкой делительной сетки, тело считается изотропным, а деформация однородной.

Чаще всего при изучении деформированного состояния тела используют квадратную координатную сетку. Делительная сетка наносится так, чтобы продольные её риски при стационарном течении металла совпадали с силовыми линиями (линиями тока). В этом случае для любого текущего положения на линии тока малого объёма, ограниченного размерами ячейки делительной сетки, можно получить имеющие чёткий геометрический и физический смысл характеристики конечных деформаций удлинения по крайней мере в трёх направлениях:

– в направлении продольных рисков, т. е. в направлении, совпадающем с направлением линии тока (рис. 7.11):

$$\varepsilon_1 = \ell n \frac{a}{a_0} \quad (7.6)$$

(a и a_0 – текущий и начальный размеры ячейки вдоль продольной риски, совпадающей с линией тока);

– в тангенциальном направлении из условия симметрии:

$$\varepsilon_{\Theta} = \ell n \frac{r}{r_0} \quad (7.7)$$

(r_0 и r – начальное и текущее расстояние центра ячейки, расположенного на линии тока, от кромки образца);

– в направлении, совпадающем с направлением поперечной риски, пересекающей продольную в центре ячейки:

$$\varepsilon_2 = \ell n \frac{b}{b_0} \quad (7.8)$$

(b и b_0 – текущий и начальный размеры ячейки вдоль поперечной риски).

В предположении, что при движении вдоль соответствующих линий тока нагружение было простым, определяется интенсивность деформации:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_1^2 \varepsilon_2^2}. \quad (7.9)$$

Главные деформации ε_1 и ε_2 определяются здесь для каждой линии тока.

Полученные с помощью формул (7.6), (7.8) и (7.9) результаты используются для оценки неравномерности распределения деформаций в сварных соединениях.

Указания к выполнению работы

1. Ознакомиться с методом измерения напряжений при помощи делительных сеток.
2. Перенести на прозрачную бумагу делительную сетку поверхности ненагруженной модели соединения.
3. Перенести на прозрачную бумагу делительную сетку поверхности нагружённой модели соединения.

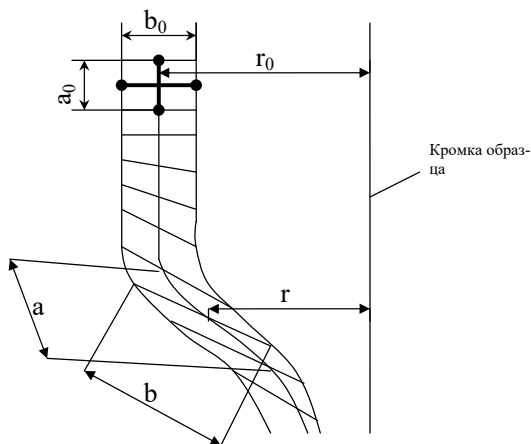


Рис. 7.11. Схема изменения формы ячейки делительной сетки при её движении вдоль линии тока

4. Путём сопоставления формы и размеров ячейки модели нагруженного образца с формой и размерами ячейки модели образца в исходном (ненагруженном) состоянии в соответствии со схемой на рис. 7.11 по формулам (7.6) и (7.8) определить главные деформации в различных зонах сварного соединения.
5. Используя зависимость (7.9), оценить интенсивность деформации в различных зонах сварного соединения.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема проведения работы (последовательность выполнения, эскизы образцов соединений, расчетный аппарат).
3. Результаты измерений и расчётов.
4. Эпюры распределения деформаций в характерных зонах сварных соединений.
5. Анализ полученных результатов.

Вопросы для самоконтроля

1. Причины возникновения концентрации деформаций в сварных соединениях.
2. В каких зонах (объемах) стыкового соединения наблюдается максимальное значение деформаций?
3. В каких зонах (объемах) нахлесточного соединения наблюдается максимальное значение деформаций?
4. Влияние концентрации деформаций на прочность сварных соединений.

Лабораторная работа 7.3

Определение остаточных сварочных напряжений магнитным методом

Цель работы — изучение методики измерения остаточных напряжений в сварных конструкциях магнитным методом, углубление теоретических знаний об особенностях распределения остаточных напряжений в различных типах соединений, выполненных ручной и автоматической сваркой.

Особенности неразрушающего магнитного метода оценки остаточных напряжений

Существующие механические напряжения могут значительно изменить магнитные свойства ферромагнитных материалов. Это связано с тем, что при наличии напряжений деформируется кристаллическая решетка металла и атомы смещаются из своего нормального положения. Вследствие этого меняется характер магнитных полей в кристалле. На кристаллографическую анизотропию накладывается магнитоупругая, вызванная дополнительным воздействием атомов в результате искажения кристаллической решетки при деформации.

В результате действия механических напряжений при заданной напряженности магнитного поля H изменяется величина магнитной индукции B , а вместе с ней и магнитная проницаемость μ :

$$B = \mu \cdot H. \quad (7.10)$$

Исходя из закона сохранения энергии, при намагничивании можно определить зависимость относительного изменения магнитной проницаемости от механических напряжений. Если на ферромагнитное тело действует механическое напряжение σ , то этому напряжению соответствует деформация, определяемая в области упругих напряжений законом Гука, при этом магнитная проницаемость μ изменяется.

Полагаем, что для ферромагнетиков с малой коэрцитивной силой H_c и большой начальной магнитной проницаемостью μ_0

$$B = 4\pi \cdot I; \quad \mu = 4\pi \cdot \chi, \quad (7.11)$$

где χ — магнитная восприимчивость.

Магнитная энергия при намагничивании ферромагнитного тела до индукции B при напряженности H_c равна:

$$\int_0^B \frac{H_c}{8\pi} dB.$$

Если на ферромагнитное тело действует напряжение σ , которое деформирует его на величину $\lambda = \Delta\ell/\ell$, то для его намагничивания до индукции B необходимо поле напряженностью H , в то время как без деформации напряженность поля H_c .

Предполагая, что H есть однозначная функция для плотности энергии, на основании закона сохранения энергии:

$$\sigma \cdot \lambda = \int_0^B \frac{H_c}{8\pi} dB - \int_0^B \frac{H}{8\pi} dB.$$

Зависимость магнитострикции λ от интенсивности намагничивания I может быть выражена как:

$$\lambda = \lambda_0(I^2 - I_0^2), \quad (7.12)$$

где λ_0 — коэффициент магнитострикции, выражающий способность ферромагнетика к магнитострикции; I_0 — значение интенсивности намагничивания, при котором магнитострикция еще равна нулю.

С учетом зависимостей (7.11) и (7.12) можно записать:

$$\int_0^B \frac{H_c}{8\pi} dB - \int_0^B \frac{H}{8\pi} dB = \frac{\sigma \cdot \lambda_0}{16\pi^2} (B^2 - B_0^2).$$

После преобразований получаем:

$$\frac{H_c}{B} - \frac{H}{B} = \frac{1}{\pi} \sigma \cdot \lambda_0.$$

Так как $\mu = B/H$ и $\mu_0 = B/H_0$, то

$$\frac{1}{\mu_0} - \frac{1}{\mu} = \frac{\Delta\mu}{\mu \cdot \mu_0} = \frac{1}{\pi} \sigma \cdot \lambda_0$$

и окончательно

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = \frac{1}{\pi} \lambda_0 \cdot \mu_0 \cdot \sigma.$$

Таким образом, изменение магнитной проницаемости пропорционально напряжению σ .

Краткое описание измерителя механических напряжений ИНИ-1Ц

Измеритель механических напряжений ИНИ-1Ц (именуемый в дальнейшем прибор) предназначен для неразрушающего контроля механических напряжений в сварных конструкциях из ферромагнитных материалов.

Техническая характеристика:

диапазон измерения механических напряжений	0...0,8 σ_T ;
погрешность измерения, %	не более 8;
время установления рабочего режима, с	не более 15;

потребляемая мощность, Вт	не более 5;
габариты, мм	70×200×240;
масса прибора, кг	не более 3.

Выбор полярности измеряемой величины осуществляется автоматически, выбор диапазона измерений – вручную.

Режим измерений периодический. Время измерения не более 3 с.

Отсчетное устройство обеспечивает индикацию трех с половиной разрядов измеряемой величины, полярности сигнала и допускает работу с подсветкой.

Продолжительность непрерывной работы прибора при питании от сети переменного тока не более 24 ч. Время перерыва до повторного включения не менее 5 минут.

Принцип работы прибора основан на использовании магнитоупругого эффекта – изменения магнитных свойств ферромагнитного материала под действием механических напряжений. Прибор создает магнитный поток в контролируемом металле и регистрирует величину его изменения. Величина изменения магнитного потока пропорциональна действующим в изделии значениям упругих механических напряжений.

Прибор имеет функциональное исполнение в виде следующих блоков:

- магнитоупругого преобразователя (датчика);
- блока питания;
- блока опорного напряжения;
- аналогового блока;
- аналого-цифрового преобразователя;
- блока индикации.

Основной измерительный орган прибора – магнитоупругий датчик (преобразователь) ДМИ-1 (рис. 7.12). Датчик представляет собой преобразователь трансформаторного типа (рис. 7.12, а), первичная обмотка которого является обмоткой намагничивания, а вторичная – индикаторной. Обе обмотки размещены на П-образных сердечниках, расположенных под углом 90° друг относительно друга. На поверхности испытываемого металла, в зоне действия датчика, образуется магнитный мост, плечами которого являются участки, заключенные между точками сопряжения сердечников

с контролируемой поверхностью. Линия АВ указывает направление растянутых «волокон» металла (рис. 7.12, б). Для напряженного состояния металла магнитное сопротивление в соседних плечах будет равно $R_{\mu} \pm C \cdot \Delta R_{\mu}$. Здесь R_{μ} — магнитное сопротивление для напряженного металла. Возникающая в индикаторной обмотке ЭДС будет зависеть от степени разбаланса магнитного моста и, следовательно, от величины магнитной анизотропии, соответствующей величине упругих напряжений.

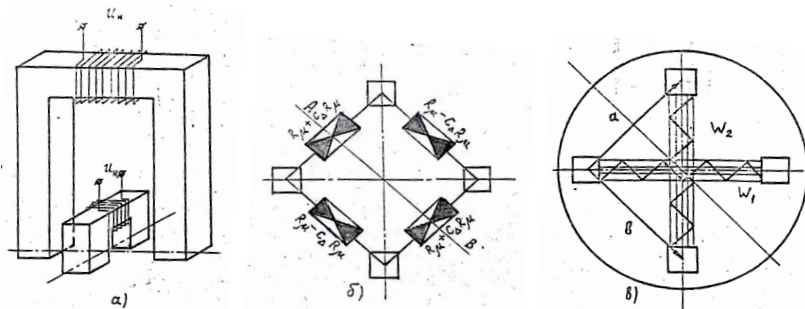


Рис. 7.12. Схема датчика ДМИ-1: а — датчик;
б — магнитный мост датчика; в — условное обозначение датчика

Полученный с датчика сигнал в виде ЭДС разбаланса магнитного моста поступает на вход блока преобразования сигнала датчика и усиливается.

Переключатель «ПИТАНИЕ», расположенный на передней панели прибора снизу, служит для включения и выключения прибора.

Ручки «УСТАНОВКА НУЛЯ», «ГРУБО—ТОЧНО» служат для установки нуля фазового детектора.

Переключатель «ДИАПАЗОН» служит для изменения усиления выходного сигнала преобразователя.

Переключатель «☀» служит для включения подсветки шкалы.

Для подготовки прибора к работе необходимо:

- установить сетевой шнур и подключить прибор к сети переменного напряжения 220 В;
- подключить штекер датчика к разъему на передней панели прибора;
- включить питание прибора;

- переключатель «ДИАПАЗОН» установить в положение «1»;
- установить потенциометрами «ГРУБО» и «ТОЧНО» нуль на шкале прибора.

Примечание. При поднесении к датчику ферромагнитной массы (отвертка, образец и др.) показания прибора должны изменяться на всех поддиапазонах.

Указания к выполнению работы

1. Ознакомиться с устройством, органами управления работой измерителя напряжений ИНИ-1Ц.

2. Произвести измерение магнитной анизотропии в продольном (относительно сварного шва) направлении в характерных зонах сварных соединений:

1) разметить контролируемые соединения (сварные пластины) и нанести измерительную сетку для установки датчика прибора ИНИ-1Ц (рис. 7.13). Датчик ориентируют длинной стороной параллельно сварному шву.

Шаг установки датчика – 5 мм от оси сварного шва (слева и справа) к краю пластины;

2) произвести измерения и полученные данные представить в таблице.

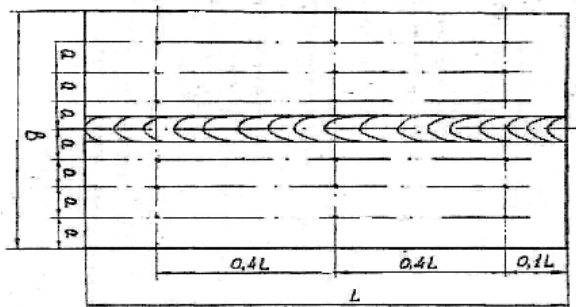


Рис. 7.13. Схема установки датчика

3. Произвести калибровку измерителя напряжений ИНИ-1Ц:

- 1) разгрузить тарировочную балочку (рис. 7.14);
- 2) установить на поверхность балочки деформометр (база измерения указана на поверхности балочки);

- 3) создать при помощи нагружающего устройства на поверхности балочки напряжения растяжения различной величины. Рекомендуется задавать напряжения, соответствующие удлинениям $\Delta l_1 = 0,01$ мм и $\Delta l_2 = 0,02$ мм;
- 4) измерить деформометром величины удлинений;
- 5) снять деформометр с балочки, установить датчик прибора ИНИ-1Ц на базе измерения и определить значения анизотропии при заданном удлинении Δl ;
- 6) установить значение «0» на приборе ИНИ-1Ц;
- 7) определить величины механических напряжений, используя закон Гука, $\sigma = E \cdot \varepsilon$, где $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости материала балочки; $\varepsilon_1 = \Delta l_1 / l = 0,01$ мм/50 мм, $\varepsilon_2 = \Delta l_2 / l = 0,02$ мм/50 мм;
- 8) построить графическую калибровочную зависимость «показания прибора – величина напряжений» (рис. 7.15).

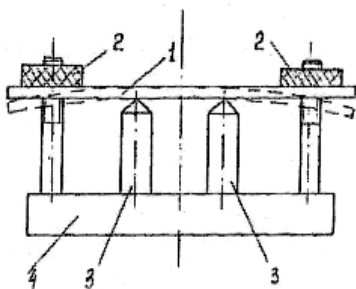


Рис. 7.14. Тарировочное устройство: 1 – балочка тарировочная; 2 – гайки нагружающие; 3 – опоры; 4 – плита



Рис. 7.15. Тарировочный график

4. Определить характер распределения остаточных напряжений в сварных соединениях:

- 1) измерить величину магнитной анизотропии в базовых точках сварного соединения (рис. 7.13);
- 2) оценить величину остаточных напряжений в характерных зонах сварного соединения, используя калибровочную зависимость $\sigma = I(\sigma)$ (рис. 7.15);
- 3) построить эпюры распределения продольных остаточных напряжений в характерных зонах сварного соединения (рис. 7.16);
- 4) определить оптимальный с точки зрения образования остаточных напряжений способ сварки или термической обработки, сравнить ручную и автоматическую сварку:

№ образца	Схема выполнения шва	Способ сварки
1		Ручная дуговая сварка штучными электродами
2		Ручная дуговая сварка штучными электродами
3		Ручная дуговая сварка штучными электродами
4		Ручная дуговая сварка штучными электродами
5		Полуавтоматическая сварка в смеси 70% Ar + 30% CO ₂

№ образца	Схема выполнения шва	Способ сварки
6		Полуавтоматическая сварка в смеси 70% Ar + 30% CO ₂ Последующая термообработка ($T_{\text{нагр}} = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержка 2 часа, последующее остывание на воздухе)

- 5) дать рекомендации по уменьшению величины остаточных напряжений в сварных соединениях;
- 6) оформить отчет о лабораторной работе в соответствии с требованиями;
- 7) привести в порядок рабочее место.

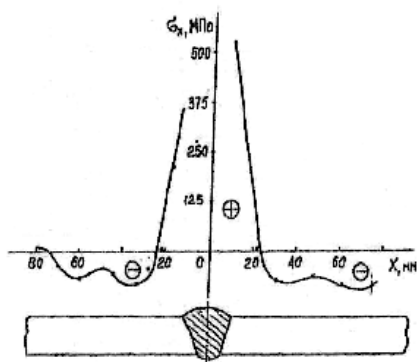


Рис. 7.16. Характер распределения остаточных сварочных напряжений

Содержание отчета

1. Цель лабораторной работы.
2. Программа работы.
3. Описание прибора для проведения исследований и краткая его характеристика.
4. Методика и результаты исследований.
5. Выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Какая связь существует между магнитными свойствами ферромагнитного материала и механическими напряжениями?
2. Особенности устройства магнитоупругого датчика ДМИ-1.
3. Сущность методики неразрушающей оценки остаточных напряжений в сварных соединениях.
4. Назначение и особенности тарировки прибора ИНИ-1Ц.
5. Существующие методы уменьшения остаточных сварочных напряжений.

Лабораторная работа 7.4 **Влияние собственных напряжений на прочность** **сварных соединений**

Цель работы — приобретение навыков экспериментальной оценки влияния технологических дефектов на прочность сварных соединений при наличии собственных напряжений.

Влияние технологических дефектов на прочность **многопроходного сварного шва**

Возникновение сварочных деформаций и напряжений связано с наличием температурного градиента в соединяемых деталях. Основными факторами, определяющими величину и характер распределения сварочных напряжений, являются неравномерный нагрев при сварке и стесненность деформирования металла в зоне сварки.

Резкое изменение формы поверхности деформируемого сварного соединения приводит к неравномерному распределению напряжений. Причинами, нарушающими плавное распределение напряжений по поперечному сечению соединения, могут служить вырезы, галтели, выступы, трещины, непровары и т. п. Они называются концентраторами напряжений. Обнаружено, что степень влияния остаточных напряжений на прочность конструкций при статической нагрузке в основном зависит от пластических свойств материала и концентрации напряжений и деформаций.

При многопроходной сварке листов большой толщины с V-образной разделкой кромок вследствие усадки металла верхних слоев

(валиков) шва в металле корня шва накапливаются пластические деформации удлинения. Если эти деформации при наличии концентраторов сосредоточиваются в малом объеме материала (непровар в корне шва, резкий переход от основного металла к металлу шва), то вследствие полного исчерпания пластических свойств металла возможно образование трещин. Если трещина не возникает в процессе выполнения и охлаждения шва, то не исключена возможность образования ее при внешнем механическом нагружении конструкции. В этом случае рабочие напряжения совместно с остаточными вызовут дополнительные пластические деформации в тех местах концентрации деформаций и напряжений, где пластические свойства исчерпаны в большей степени.

Способность материала образца пластически деформироваться определяется величиной относительного остаточного удлинения после разрыва:

$$\delta = \frac{\ell_{\text{к}} - \ell_0}{\ell_0} = \frac{\Delta\ell}{\ell_0}, \quad (7.13)$$

где ℓ_0 и $\ell_{\text{к}}$ — первоначальная и конечная длины исследуемой части образца; $\Delta\ell$ — полное абсолютное удлинение.

Учитывая, что величина удлинения $\Delta\ell$ равна сумме равномерно- $\Delta\ell_{\text{р}}$ и сосредоточенного в области шейки образца удлинения $\Delta\ell_{\text{ш}}$,

$$\delta = \frac{\Delta\ell}{\ell_0} = \frac{\Delta\ell_{\text{р}}}{\ell_0} + \frac{\Delta\ell_{\text{ш}}}{\ell_0}. \quad (7.14)$$

Слагаемое $\Delta\ell_{\text{ш}}/\ell_0$ не имеет ясного физического смысла, поскольку сосредоточенное удлинение $\Delta\ell_{\text{ш}}$ образуется на меньшей длине, чем ℓ_0 .

Вместо условных относительных деформаций, при определении которых в качестве основной принимается исходная длина, целесообразнее использовать истинные относительные деформации, при определении которых абсолютная деформация относится к длине, соответствующей моменту деформирования:

$$\varepsilon = \ln \frac{\ell_{\text{к}}}{\ell_0}. \quad (7.15)$$

В настоящей работе имитируется состояние металла корня шва при многопроходной сварке и определяется влияние концентрации напряжений на характеристики прочности металла шва при наличии остаточных напряжений.

На изменение прочности влияет острота надреза, характеризующаяся отношением a/r или $\frac{r}{(d/2)}$ (рис. 7.17). При этом наблюдаются два эффекта: с увеличением остроты надреза прочность повышается, а пластичность снижается (рис. 7.18). У надрезанных образцов предел текучести может возрастать от 5 до 40 %, а предел прочности — от 25 до 60 %.

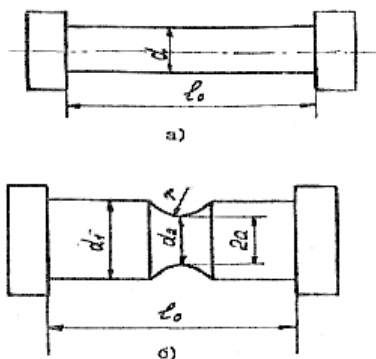


Рис. 7.17. Геометрические характеристики образцов:
a — гладкий образец; *b* — образец с надрезом

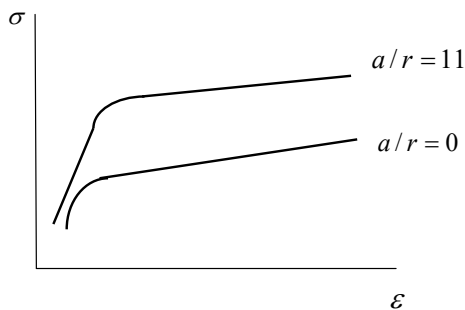


Рис. 7.18. Изменение механических свойств в зависимости от остроты надреза r

Важное значение при изучении связи структуры металла с его механическими свойствами (прочностью) придается исследованию поверхности разрушения (изломов). В ряде случаев только по одному излому можно сделать заключение о характере и причинах

поломки или аварии сварной конструкции. В науке о прочности направление, занимающееся изучением строения изломов, получило название фрактографии.

При изучении механизма разрушения излом необходимо связать с условиями нагружения, характером напряженно-деформированного состояния, видом и схемой приложения нагрузок. Влияние деформации, предшествующей разрушению при однократном нагружении, выражается в следующей особенности изломов: при большой «шейке» (большая сосредоточенная деформация и высокая степень объемности напряженного состояния) фокус разрушения располагается в центре сечения образца, то есть не определяется локальными свойствами материала; при малой «шейке» (меньшая степень объемности напряженного состояния в центре образца вследствие малой деформации) фокус излома смещен, как правило, относительно центра и связан с каким-либо случайным слабым местом в материале.

Вязкие изломы (вязкое или пластичное разрушение) возникают, как правило, тогда, когда предшествующая разрушению деформация велика и проявляется в значительном объеме. Макроскопический излом при вязком разрушении характеризуется волокнистой, матовой, сильно шероховатой поверхностью, когда фронт разрушения распространяется перпендикулярно направлению действия максимальных растягивающих напряжений, или имеет шелковистый вид, когда разрушение совпадает с направлением действия касательных напряжений.

Хрупкие изломы, как правило, возникают от действия нормальных напряжений, чем определяется их макро- и микроориентация, однако известны случаи хрупкого разрушения и от касательных напряжений. Такие разрушения чаще наблюдаются у литых металлов и сплавов. При хрупком внутризеренном разрушении (внутрикристаллический скол), поскольку оно связано с определенными кристаллографическими плоскостями, образуются кристаллические фасетки, которые при визуальном исследовании и при небольшом увеличении выглядят как очень блестящие гладкие участки.

Описание лабораторной установки

Установка (рис. 7.19), имитирующая работу сварного шва в процессе охлаждения соединения, воспроизводит условия деформации металла сварного соединения с V-образной разделкой кромок при многопроходной сварке (рис. 7.20).

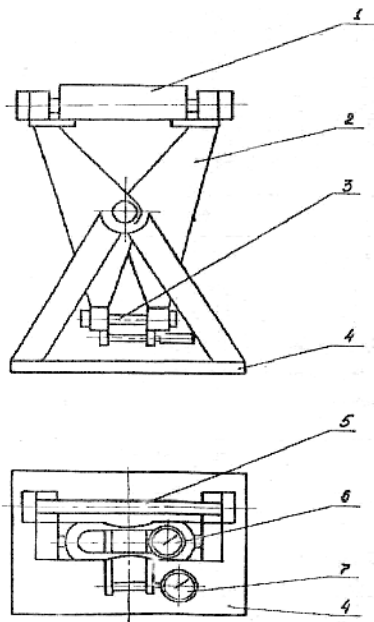


Рис. 7.19. Установка для определения параметров нагружения образца:
1 – скоба динамометрическая; 2 – система нагружения; 3 – образец;
4 – основание; 5 – стержень; 6 – головка индикаторная; 7 – экстензометр

В нижних захватах системы нагружения 2 (рис. 7.19) помещается испытуемый образец 3, в верхние захваты помещается стержень 5 из жаропрочной стали, нагретый до температуры 600...700 °С. При остывании стержня 5 вследствие препятствия свободному сокращению его длины возникают собственные напряжения, вызывающие развитие пластических деформаций в испытуемом образце 3. Вся деформация сосредоточивается в сечении образца на малой базе и при наличии концентратора напряжений (в районе надреза) вызывает хрупкое разрушение металла.

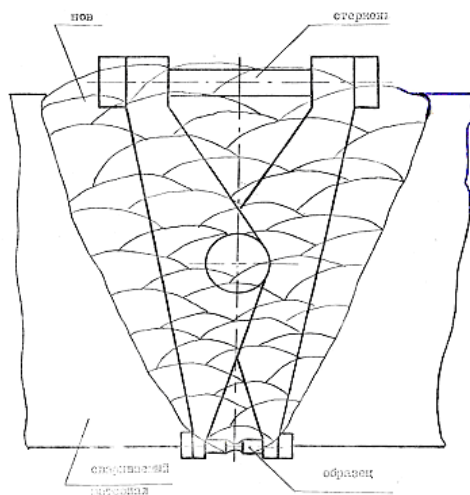


Рис. 7.20. Схема имитации работы многопроходного сварного шва

Указания к выполнению работы

1. Ознакомиться с особенностями проведения лабораторной работы.
2. Изучить конструкцию установки (рис. 7.19).
3. Определить геометрические характеристики образцов (рис. 7.17).
4. Поместить в печь типа МП-2УМ стержень 5 (рис. 7.19) для нагрева до температуры 650...700 °С.
5. Установить образец 3 (рис. 7.17 и 7.19) в захваты установки.
6. Вынуть стержень 5, нагретый до заданной температуры, из печи специальными клещами и установить его в верхние захваты рычагов установки.
7. Ликвидировать люфты в системе нагружения установки с помощью специальных гаек.
8. В процессе остывания стержня 5 до комнатной температуры периодически фиксировать секундомером в таблице значения нагрузки P с помощью динамометрической скобы 1 (рис. 7.19) и величину удлинения образца 3 с помощью экстензометра 7 (рис. 7.19).
9. По окончании экспериментальной части работы привести в порядок рабочее место и приступить к оформлению результатов работы.

10. Результаты экспериментов представить в виде таблицы.
11. По данным таблицы и формуле (7.15) определить абсолютную деформацию образца в заданные моменты времени измерения.
12. Используя закон Гука, определить нормальные напряжения в поперечном сечении образца в заданные моменты времени измерения.
13. Результаты расчетов представить в таблице.
14. Используя табличные данные, представить графически результаты экспериментов (рис. 7.18).

Таблица 7.3

№ п/п	Время измерения t , с	Величина нагрузки P		Величина удлинения		Абсолютная деформация	Напряжения σ , кгс/мм ²
		число делений индикатора	кг	число делений индикатора	мм		
1	2	3	4	5	6	7	8
Образец 1							
Образец 2							

Содержание отчета

1. Цель лабораторной работы.
2. Программа работы.
3. Описание экспериментальной установки.
4. Методика и результаты исследований.
5. Выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Факторы, определяющие величину и характер распределения остаточных сварочных напряжений.
2. Причины возникновения концентрации напряжений.
3. Отличие условных относительных деформаций от истинных относительных деформаций.
4. Хрупкие и вязкие разрушения сварных соединений, их отличительные особенности.

Лабораторная работа 7.5

Определение поперечных деформаций при сварке встык свободных деталей

Цель работы — освоение методики экспериментального определения остаточных перемещений и деформаций в сварных соединениях и конструкциях при поперечной усадке.

Особенности образования и оценки поперечной усадки при сварке листов встык

Остаточные перемещения в большинстве случаев определяют стандартными мерительными инструментами и индикаторными головками.

Деформации удобно разделить на несколько видов, в том числе:

- деформации в плоскости свариваемых пластин, когда перемещениями вдоль третьей оси (по толщине) можно пренебречь. Такие деформации, например, возникают при сварке пластин, которые не теряют устойчивость и не выходят из плоскости из-за неравномерной по толщине пластины поперечной усадки (рис. 7.21, *а*);
- деформации в плоскости, перпендикулярной шву, например деформации, связанные с угловым поворотом (рис. 7.21, *б*) и др.

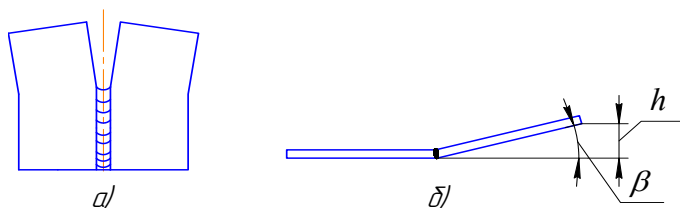


Рис. 7.21. Различные виды сварочных деформаций (перемещения): *а* — в плоскости свариваемых пластин; *б* — угловой поворот пластин

В большинстве случаев возникает сразу несколько видов деформаций.

При оценке перемещений сварных соединений, узлов и конструкций используют, в частности, следующие простейшие элементы деформаций, определяемые отдельно в сварных соединениях:

- равномерная составляющая поперечной усадки $\Delta_{\text{поп}}$, найденная при условии беспрепятственного сокращения со стороны дру-

гих элементов. На величину $\Delta_{\text{поп}}$ сокращаются листы при сварке встык;

– неравномерная составляющая поперечной усадки, оцениваемая обычно углом β и возникающая при сварке встык.

Одним из наиболее распространенных сварных соединений является прямолинейное однопроходное сварное соединение двух пластин встык.

В случае сварки двух пластин с зазором кромки каждой из пластин будут испытывать поперечное перемещение V (рис. 7.22, б). Впереди источника нагрева ничто не препятствует перемещению кромок навстречу друг другу. В момент сваривания кромок перемещение достигает максимальной величины V_{max} , а взаимное приближение кромок составляет $2V_{\text{max}}$. Если бы металл после сварки, находясь при высокой температуре, обладал высокой прочностью, то уменьшение V позади источника нагрева приводило бы сразу к подтягиванию пластин друг к другу и образованию поперечной усадки $2V_{\text{max}}$.

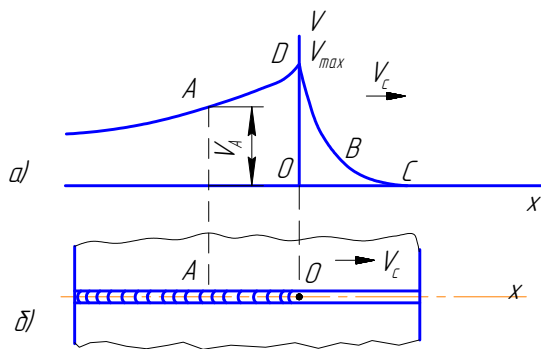


Рис. 7.22. Образование поперечной усадки при однопроходной сварке встык

В действительности на участке ОА металл обладает небольшим сопротивлением пластической деформации, в результате чего на этом участке металл течет и происходит удлинение на величину $2(V_{\text{max}} - V_A)$.

В точке А пластическое удлинение металла в направлении поперек шва прекращается; взаимное сближение кромок составляет $2V_A$.

В дальнейшем после полного остывания металла возникает поперечная усадка $\Delta_{\text{поп}} = 2V_A$.

В пластинах, свариваемых встык без зазора, кромки впереди источника тепла не могут перемещаться беспрепятственно. До некоторой точки В (рис. 7.22, а) происходит упругое вдавливание металла из-за того, что кромки упираются друг в друга. От точки В до точки D происходит пластическая деформация осаживания металла. При этом участок СВ, который испытывает упругую деформацию, влияет на величину V_{max} в точке D вследствие упругого взаимодействия участков металла ВС и BD. В результате при сварке пластин без зазора величина $2V_{\text{max}}$ оказывается меньше, а следовательно, меньше и поперечная усадка, равная $2V_A$.

При электродуговой однопроходной сварке пластин встык, когда они собраны без зазора,

$$\Delta_{\text{поп}} \leq (0,5 \dots 0,7) \cdot 2 V_{\text{max}}.$$

Поперечная усадка свариваемых встык пластин обнаруживается не сразу после сварки, а лишь после полного остывания пластин, хотя сближение кромок происходит непосредственно в процессе их сваривания.

При повторном нагреве по одному и тому же месту поперечная усадка от второго шва равна усадке от первого шва, если при этом не изменить условия нагрева.

Если пластины сваривают с зазором, то может оказаться, что еще до подхода источника тепла вследствие временных деформаций кромки могут сблизиться или отойти друг от друга. В этом случае полная поперечная усадка будет состоять из перемещений, возникающих от временных деформаций пластин в целом, и перемещений непосредственно в зоне сварки.

Длина поперечного волокна по поверхности листа:

$$b_i = \frac{a_i}{\cos \frac{f_i}{C_0}}, \quad (7.16)$$

где a_i — длина базы измерения (рис. 7.23), мм; f_i — стрела прогиба, мм; C_0 — расстояние от точки замера стрелы прогиба до ближайшего конца базы замеров, мм; i — количество проходов.

Поперечное укорочение по поверхности листа:

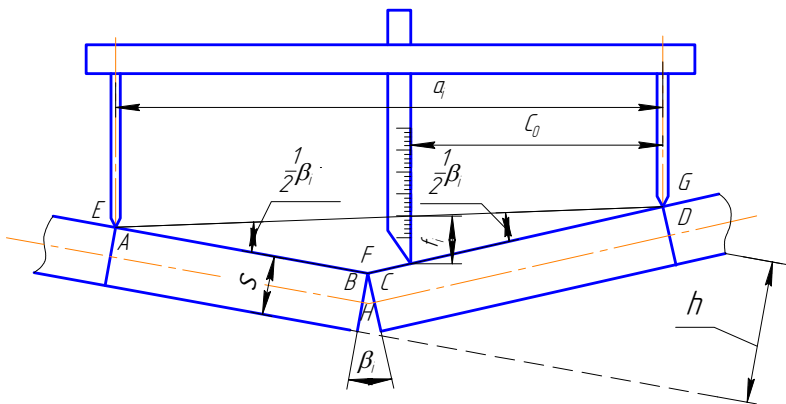
$$\Delta b_i = \frac{a_{i-1}}{\cos \frac{f_{i-1}}{C_0}} - \frac{a_i}{\cos \frac{f_i}{C_0}}. \quad (7.17)$$

Чтобы суммировать поперечные укорочения от отдельных проходов сварочных соединений, а также сравнивать расчетные значения с измеренными, необходимо определить их по одному какому-либо поперечному волокну. Обычно суммируют поперечное укорочение от отдельных проходов по волокну, расположенному посередине толщины свариваемых листов.

Если замеры поперечного укорочения произведены по обеим сторонам листа, то поперечное укорочение посередине толщины листов определяется по формуле

$$\Delta b_{oi} = \frac{1}{2}(\Delta b_{bi} + \Delta b_{Hi}), \quad (7.18)$$

где Δb_{bi} – поперечное укорочение, измеренное по верхней поверхности свариваемых листов, мм; Δb_{Hi} – поперечное укорочение, измеренное по нижней поверхности свариваемых листов, мм.



$$EF = FG = \frac{a}{2} \cdot \cos \frac{\beta_i}{2}; \quad BH + HC = s \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta_i}{2} = \frac{s \beta_i}{C_0}; \quad b_i = ABH + HCD$$

Рис. 7.23. Схема определения поперечного укорочения по поверхности свариваемых листов

Объем поперечного укорочения всего сварного соединения от сварки m проходов

$$W = \Delta b \cdot \delta \cdot \ell_{\text{ш}}, \quad (7.19)$$

где Δb – поперечное укорочение, определенное по формуле (7.18), мм; s – толщина свариваемых листов, мм; $\ell_{\text{ш}}$ – длина шва, мм.

Указания к выполнению работы

1. Ознакомиться с целью работы, сварочным оборудованием, измерительным инструментом, методом расчетно-экспериментального определения остаточных перемещений.
2. Собрать образцы под сварку (рис. 7.24).
3. Нанести базы измерений на верхней и нижней поверхностях пластин согласно схеме, представленной на рис. 7.24.
4. Замерить базы на верхней и нижней сторонах пластины штангенциркулем с точностью до 0,1 мм. Число замеров каждой базы не менее трех.
5. Поместить собранные пластины в приспособление.

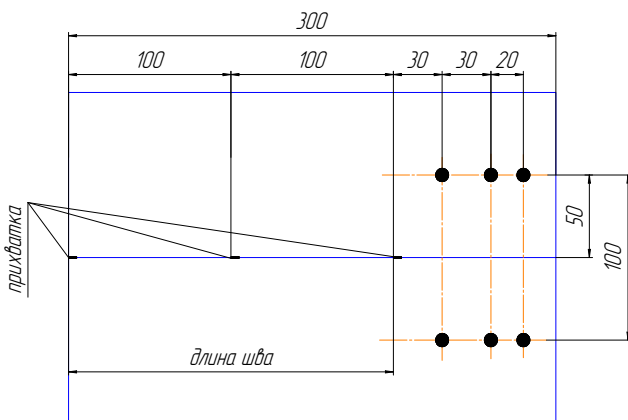


Рис. 7.24. Схема подготовки пластины

6. Подготовить сварочное оборудование к работе.
7. Выбрать режим сварки, позволяющий осуществить провар пластин на глубину не более $s/3$ где s – толщина свариваемого материала.

8. Осуществить сварку первого шва длиной 200 мм.
9. Освободить остывшую деталь из приспособления и произвести измерение баз в соответствии с п. 4 и схемами на рис. 7.22–7.24.
10. Вновь выполнить работы в соответствии с п. 5 и 9, осуществляя процесс сварки на режимах, позволяющих получить глубины проплавления, равные $2s/3$ и s (s – толщины свариваемого материала).
11. Используя полученные экспериментальные данные, представить графически в соответствии с современными требованиями зависимости:

$$\Delta_{\text{поп}} = \Delta_{\text{поп}}(n);$$

$$\Delta b = \Delta b(n);$$

$$W = W(n);$$

$$W = W(\ell_{\text{ш}}),$$

где $\Delta_{\text{поп}}$ – поперечная усадка, мм; n – число проходов; Δb – поперечное укорочение, мм; W – объем поперечного укорочения, мм³.

12. Дать объяснение результатов работы.
13. Оформить отчет в соответствии с требованиями, сдать отчет преподавателю.

Содержание отчета

1. Цель лабораторной работы.
2. Программа работы.
3. Схема определения поперечных перемещений соединения.
4. Методика и результаты исследований.
5. Выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Как классифицируют сварочные деформации?
2. Особенности образования поперечной усадки при сварке пластин встык с технологическим зазором и без зазора.
3. Как определяют величину полной поперечной усадки?
4. Параметры режима дуговой сварки штучными электродами.

Лабораторная работа 7.6 Определение угловых деформаций при сварке листов встык

Цель работы — приобретение навыков экспериментальной оценки остаточных перемещений и деформаций в сварных конструкциях.

Особенности образования угловых деформаций в стыковых сварных соединениях

Односторонний подвод тепла при сварке плавлением обычно вызывает неравномерный нагрев металла по толщине (рис. 7.25, *a*). Во время сварки более нагретые слои металла расширяются сильнее, чем менее нагретые. Точка *A*, принадлежащая более нагретой верхней плоскости, продвинется в точку A_1 , в то время как точка *B*, принадлежащая менее нагретой нижней плоскости, переместится в точку B_1 . Отрезок AA_1 больше отрезка BB_1 . В таком положении произойдет сваривание пластин. После полного остывания точки *A* и *B* стремятся возвратиться в прежнее положение, в результате чего возникает угловой излом (рис. 7.25, *б*).

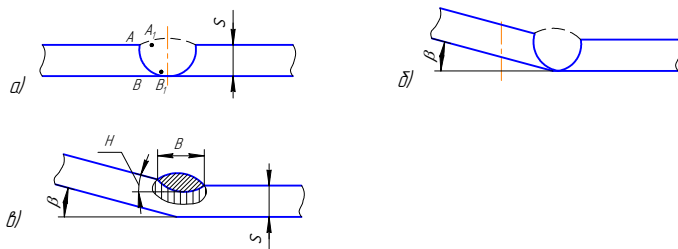


Рис. 7.25. Деформации листов в плоскости, перпендикулярной шву (обозначения в тексте)

При наплавке валика на пластину помимо неравномерного перемещения точек по глубине провара возникает также пластическая деформация металла в более нагретых зонах. На рис. 7.25, *в*, прямой штриховкой показана область пластических деформаций металла. После остывания в зоне пластических деформаций произойдет сокращение металла и возникнут угловые деформации.

В стыковых однопроходных сварных соединениях даже при полном проваре может возникать угловая деформация β . В двухпроходных сварных соединениях остаточная угловая деформация зависит от выбранных режимов сварки первого и второго проходов и может иметь различный знак.

Когда сварка встык производится в два прохода, за толщину листа при выполнении первого прохода следует принимать только глубину проплавления, а не всю толщину листа. При выполнении второго прохода необходимо учитывать всю толщину и ту относительную глубину проплавления, которая выполняется за второй проход.

В многопроходных стыковых швах угловые деформации могут быть получены как сумма угловых деформаций от каждого прохода. Таким образом, при i -м слое величина угловой деформации β_i определится как функция количества слоев (рис. 7.26).

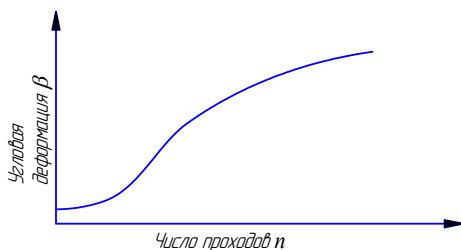


Рис. 7.26. Изменение угловых деформаций в процессе выполнения слоев

При широких различно закрепленных листах угловые деформации, вызванные стыковыми швами, приводят к различному характеру местных деформаций полотнища. Так, при свободном опирании свариваемых листов на плиту вследствие собственного веса листы будут не только поворачиваться на некоторый угол один относительно другого, но и изгибаться. Если предположить, что один из листов тяжелее другого и остается плоским на плите, то второй лист получит волнистость, показанную на рис. 7.27.

Замеры угловых деформаций обычно производят по поверхности свариваемых листов (пластин). Для определения изменения длины поперечного волокна от i -го прохода необходимо измерить базу (расстояние между двумя точками или кернами, лежащими на

линии, перпендикулярной шву, слева и справа от оси шва), обычно принимаемую равной 100 мм и более, и стрелку прогиба до и после сварки i -го прохода.

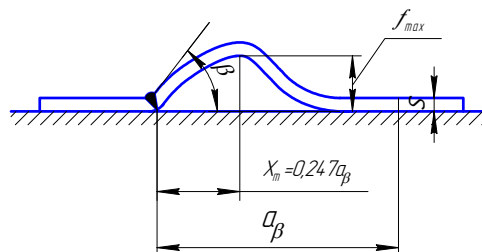


Рис. 7.27. К определению зависимости от угловой деформации стрелки выпучины и длины отставшего от плиты участка

Указания к выполнению работы

1. Ознакомиться с целью работы, сварочным оборудованием и измерительным инструментом, с методами расчетно-экспериментального определения остаточных перемещений.
2. Собрать образцы под сварку (рис. 7.28).
3. Нанести базы измерений на верхней и нижней поверхностях пластин согласно схеме, показанной на рис. 7.28.
4. Замерить базы на верхней и нижней сторонах пластины штангенциркулем с точностью до 0,1 мм. Число замеров каждой базы не менее трех.
5. Подготовить сварочное оборудование к работе.
6. Подобрать режим сварки, позволяющий осуществить провар пластин глубиной не более $s/3$, где s – толщина свариваемого материала.
7. Осуществить сварку первого шва по всему стыку.
8. Произвести замер баз остывшей пластины в соответствии с п. 4 и схемой на рис. 7.28.
9. Вновь выполнить работы в соответствии с п. 5, 7 и 8, осуществляя процесс сварки на режимах, позволяющих получить глубины проплавления, равные $2S/3$ и s (s – толщины свариваемого материала).

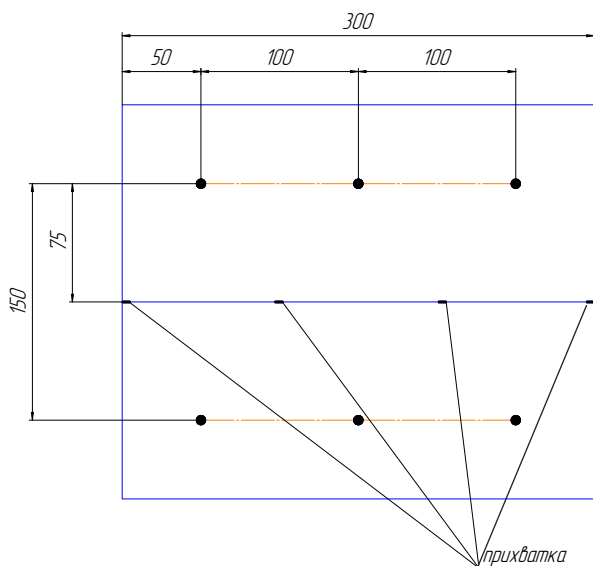


Рис. 7.28. Схема подготовки пластины

10. Используя полученные экспериментальные данные, представить графически в соответствии с современными требованиями зависимости:

$$f_{\max} = f_{\max}(n);$$

$$\beta = \beta(n);$$

$$a_{\beta} = a_{\beta}(n);$$

$$f_{\max} = f_{\max}(\beta);$$

$$a_{\beta} = a_{\beta}(\beta),$$

где β – угловая деформация, мин; n – число проходов; f_{\max} – стрелка выпучины (рис. 7.27), мм; a_{β} – длина отставшего участка (рис. 7.27), мм.

11. Объяснить результаты работы.
 12. Оформить отчет в соответствии с требованиями, сдать отчет преподавателю.
 13. Привести в порядок рабочее место и сдать лаборанту.

Содержание отчета

1. Цель лабораторной работы.
2. Программа работы.
3. Описание методики исследований.
4. Анализ полученных результатов исследований.
5. Выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Причины возникновения угловых деформаций.
2. Причины образования пластических деформаций в сварных соединениях.
3. Понятие термина «база измерения».
4. Необходимость оценки угловых деформаций соединений и узлов.

Лабораторная работа 7.7 Определение рабочих напряжений в сварных сосудах давления

Цель работы — приобретение навыков экспериментального определения деформаций в сварных сосудах давления, углубление теоретических знаний о характере напряженно-деформированного состояния в металле сварных соединений, работающих в условиях механического нагружения.

Особенности распределения деформаций и напряжений в сварных сосудах давления

К многочисленной группе тонкостенных сварных сосудов относятся паровые котлы, газгольдеры и резервуары различного назначения, работающие под высоким внутренним давлением.

В общем случае при действии на сосуд какой-либо симметричной нагрузки (например, не изменяющейся в окружном направлении) элемент срединной поверхности сосуда растягивается во взаимно перпендикулярных направлениях. При этом для тонкостенных оболочек (сосудов) характерно, что нормальные напряжения по толщине стенки распределяются равномерно.

Для определения напряжений в зависимости от величины внутреннего давления и геометрических параметров сосуда используется так называемая безмоментная теория оболочек, где основной расчетной зависимостью является уравнение Лапласа:

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_t}{\rho_t} = \frac{P}{s}, \quad (7.20)$$

где σ_m — меридианальные напряжения, действующие на площадках окружного сечения; σ_t — окружные напряжения, действующие на площадках меридиального сечения; ρ_m — радиус кривизны меридиана в рассматриваемой точке; ρ_t — радиус кривизны окружного сечения; s — толщина стенки сосуда; P — расчетное давление на глубине h (рис. 7.29):

$$P = P_{\text{изб}} + \gamma \cdot h, \quad (7.21)$$

где $P_{\text{изб}}$ — избыточное давление жидкости; γ — масса единицы объема жидкости.

Решая уравнение Лапласа (7.20) и учитывая соответствующие краевые условия, можно для любой точки сварного тонкостенного сосуда определить напряжения σ_m и σ_t .

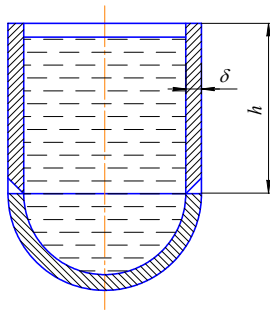


Рис. 7.29. Оболочка сосуда

Для сферического сосуда, находящегося под действием равномерного внутреннего давления P (рис. 7.30) (собственной массой и массой жидкости пренебрегаем), вследствие его симметрии во всех направлениях напряжения

$$\sigma_m = \sigma_t = \sigma \quad \text{и} \quad \rho_t = \rho_m = R.$$

Тогда

$$\sigma = \frac{\rho \cdot R}{2 \cdot \delta}. \quad (7.22)$$

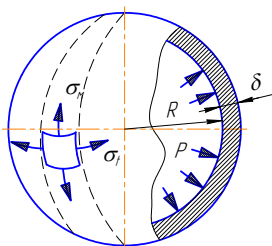


Рис. 7.30. Сферический сосуд

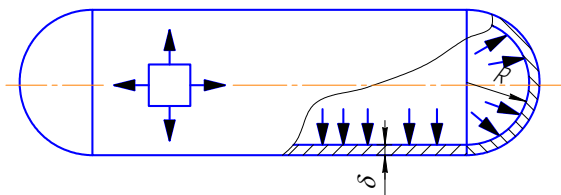


Рис. 7.31. Цилиндрический сосуд

В цилиндрической части горизонтального резервуара (рис. 7.31) меридианами являются образующие, для которых $\rho_m = \infty$. Тогда для случая равномерного внутреннего давления в этой конструкции из уравнения (7.20)

– окружное напряжение (при $\rho_t = R$):

$$\sigma_t = \frac{\rho \cdot R}{\delta}; \quad (7.23)$$

– меридиальное напряжение:

$$\sigma_m = \frac{\rho \cdot R}{2 \cdot \delta}. \quad (7.24)$$

Сравнение выражений (7.23) и (7.24) позволяет отметить, что напряжения в продольном сечении резервуара (и в продольных сварных швах) в два раза больше напряжений, действующих в его поперечных сечениях (и в кольцевых сварных швах) σ_m . В соответствии с известным положением принимаем $\sigma_t = \sigma_1$ и $\sigma_m = \sigma_2$, тогда для сферического сосуда давление $\sigma_1 = \sigma_2$, а для цилиндрического $\sigma_1 = 2\sigma_2$.

Таким образом, зная геометрические размеры сосудов, величину внутреннего давления, удельную массу жидкости и массу сосу-

дов, можно определить расчетные напряжения, действующие в любой точке тонкостенной конструкции.

Характерной особенностью листовых конструкций является большая протяженность сварных швов, которые определяют герметичность и прочность сосуда.

Обычно характер напряженного состояния в сварных соединениях определяют экспериментальным путем с использованием тензодатчиков сопротивления, представляющих собой наклеенную на полоску бумаги тонкую зигзагообразную проволоку. Датчик наклеивается на поверхность сварного сосуда так, чтобы направление базы датчика совпадало с направлением, по которому требуется произвести замер деформации. По изменению электрического сопротивления, связанного с изменением длины проволоки, судят о величине деформации в данном направлении:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{K}, \quad (7.25)$$

где ΔR — приращение электрического сопротивления R ; K — коэффициент тензочувствительности датчика.

Наиболее просто коэффициент чувствительности K в выражении (7.25) определяют с помощью прибора для измерения деформаций, на котором устанавливается любое, но точно известное значение K .

По показаниям датчиков, наклеенных на специальную тарировочную балочку, находят среднее арифметическое значение измеренной деформации:

$$\varepsilon_{\text{ср}} = \frac{\sum^n \varepsilon_i}{n},$$

где ε_i — показания по каждому отдельному тензодатчику; n — число датчиков.

Так как тензодатчики сопротивления характеризуются различной величиной K , то перед началом работы производят тарировку тензодатчиков. Простейшим тарировочным приспособлением служит балочка равного сопротивления прямоугольного сечения (рис. 7.32), нагружаемая постоянным изгибающим моментом $P \cdot l$. На балочку наклеиваются тензодатчики Д, включенные в измерительную цепь по схеме моста. При нагружении балочки по извест-

ным из сопротивления материалов соотношениям определяют величины деформаций и напряжений (приведенные ниже формулы достоверны лишь для одноосного напряженного состояния материалов, работающих в области упругих деформаций):

$$\sigma = \frac{M}{W}; \quad (7.26)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (7.27)$$

где $M = P \cdot l$ – постоянный изгибающий момент; $W = \frac{b \cdot h^2}{6}$ – момент сопротивления тарировочной балочки; E – модуль упругости материала балочки.

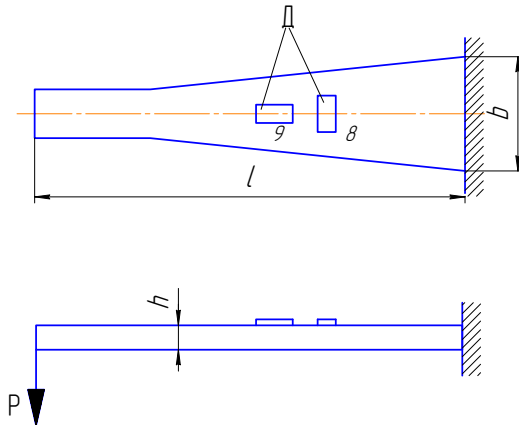


Рис. 7.32. Цифры у датчиков Д обозначают номер датчика в измерительной схеме

На основе обобщенного закона Гука связь между деформациями и напряжениями для плосконапряженного состояния можно представить в таком виде:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu \cdot \varepsilon_2); \\ \sigma_2 &= \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_2 + \mu \cdot \varepsilon_1), \end{aligned} \right\} \quad (7.28)$$

где E – модуль упругости материала сосуда; μ – коэффициент Пуассона.

Указания к выполнению работы

1. Включить в сеть и прогреть в течение 15 минут прибор для измерения статической деформации.

2. Проверить работоспособность прибора, для чего переключатель П-1 (рис. 7.33) установить в положение «Эталон нуля» – «ЭТО» и сбалансировать прибор переключателями П-2, П-3 и реохордом «Настройка». Записать показания.

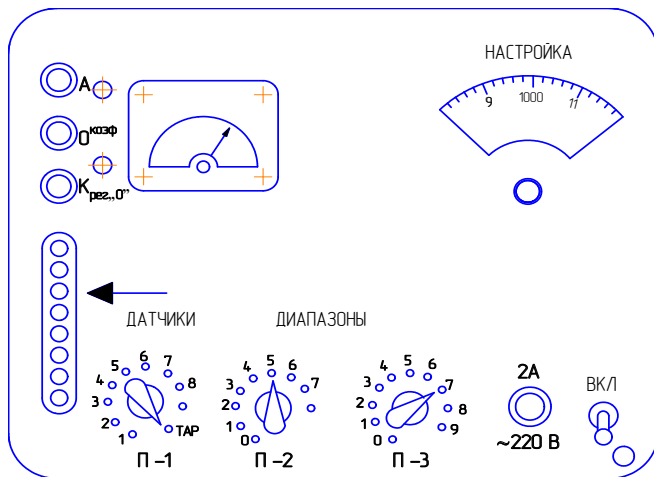


Рис. 7.33. Общий вид передней панели прибора

3. Переключатель П-1 поставить в положение «Тарировка» («ТАР»), при этом дается разбаланс моста в 0,1 Ом. На шкале реохорда должна быть разница, равная 417 делениям применительно к типовой тарировке ($R = 120 \text{ Ом}$, $K = 2$). Для других случаев см. табл. 7.4.

Таблица 7.4

K	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2
ε_i	462×10^{-6}	440×10^{-6}	417×10^{-6}	397×10^{-6}	380×10^{-6}

Если необходимое число делений на шкале реохорда отсутствует, то следует ручкой «Коэф.» найти такое положение, при котором разбаланс моста в 0,1 Ом дает необходимую разность по шкале реохорда.

4. Подключить при помощи разъема датчики 8 и 9 тарифовочной балочки (рис. 7.32).

5. Произвести балансировку входного моста и снятие исходных (нулевых) показаний, для чего:

- 1) установить грубый баланс с помощью переключателя П-3, оставив его в положении, при котором стрелка индикатора резко перебрасывается с одной стороны на другую;
- 2) если датчики моста не балансируются (большой разброс по сопротивлению), то балансируют переключателем расширенных диапазонов П-2, а затем уже переключателем П-3;
- 3) выполнить точную установку на нуль, вращая реохорд со шкалой, снять показания, которые складываются из номера диапазона переключателя П-3 (или переключателей диапазонов П-2 и П-3) и отсчета по шкале реохорда.

6. Произвести ступенчатое нагружение тарифовочной балочки грузами массой 19,6; 39,2; 58,8; 78,4 и 98 Н, записывая после каждого нагружения отсчет по шкале «НАСТРОЙКА» при нулевом положении стрелки индикатора-миллиамперметра прибора. Нагружение выполнить дважды.

7. Оформить результаты в виде табл. 7.5, подсчитать величину напряжений в материале балочки по формуле (7.26) и построить тарифовочный график (рис. 7.34), где n — число делений шкалы «НАСТРОЙКА» прибора.

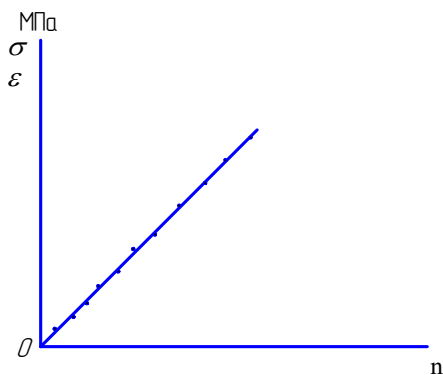


Рис. 7.34. Тарифовочный график

Таблица 7.5

№ п/п	$P, Н$	Отсчет по шкале «НАСТРОЙКА» при сбалансированной схеме	Число делений по шкале «НАСТРОЙКА», n	Среднее значение, $n_{ср}$	$\sigma, МПа$	ε
1	0					
2	2					
5	10					

8. Подключить при помощи разъема датчики исследуемых цилиндрического и сферического сосудов.

9. Произвести балансировку мостов рабочих датчиков, наклеенных на поверхность сосуда (в соответствии с п. 5.1...5.3). Результаты записать в табл. 7.6. Балансировку выполнить два раза.

10. С помощью ручного насоса создать внутреннее давление $p = 0,5$ МПа в цилиндрическом и сферическом сосудах.

11. Снять показания по шкале настройки для всех датчиков (при нулевом положении стрелки индикатора-миллиамперметра). Измерения выполнить два раза и занести в табл. 7.6.

12. С помощью ручного насоса создать внутреннее давление $p = 1,0$ МПа в цилиндрическом и сферическом сосудах.

Таблица 7.6

№ датчика	Давление, МПа	Сосуд	Отсчет по шкале «НАСТРОЙКА» при сбалансированной схеме	Среднее значение, $n_{ср}$	Разность отсчетов с нагрузкой и без нагрузки, $\Delta n = n_i - n_0$	Величина напряжений		Величина деформаций	
						σ_1	σ_2	ε_1	ε_2
1									
2									
8									

13. Повторить п. 11.
14. Разгрузить сосуды, отключить прибор и разобрать схему установки.
15. По тарировочному графику (рис. 7.34) определить напряжения σ_1 , σ_2 и деформации ϵ_1 , ϵ_2 в отдельных зонах сварных сосудов. Результаты измерений занести в табл. 7.6.
16. Используя экспериментальные значения ϵ_1 и ϵ_2 для отдельных зон сварных сосудов (рис. 7.35), определить на основе обобщенного закона Гука (7.28), напряжения σ_1 и σ_2 в этих зонах.
17. Зная геометрические характеристики сосудов (рис. 7.35), найти расчетные значения σ_m и σ_t при давлениях 0,5 и 1,0 МПа.
18. Сравнить расчетные и экспериментальные значения напряжений; дать краткое объяснение результатов работы.
19. Оформить отчет в соответствии с требованиями.
20. Привести в порядок рабочее место.

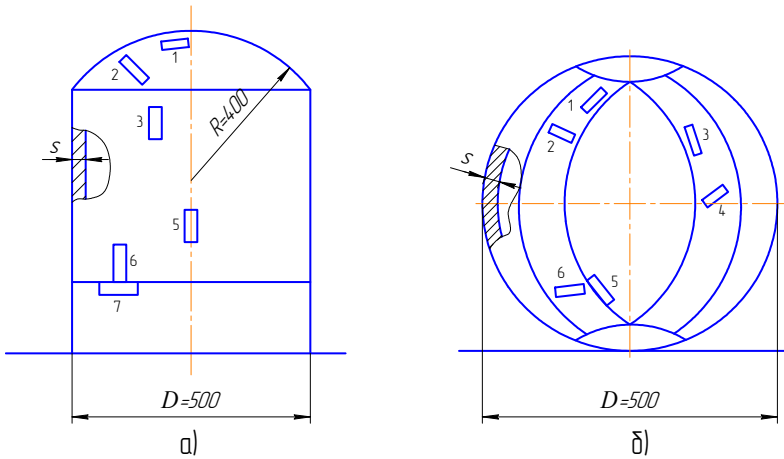


Рис. 7.35. Геометрические характеристики сосудов:
 а – цилиндрического; б – сферического

Краткое описание прибора для измерения деформаций ИД-70

Существуют различные методы преобразования изменения сопротивления датчика ΔR в электрический сигнал. В простейшей измерительной схеме, представляющей собой мост Уитстона (рис. 7.36), изменение сопротивления датчика преобразуется в изменение электрического тока.

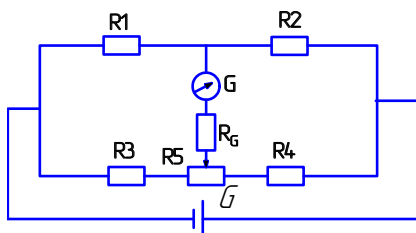


Рис. 7.36. Измерительная схема (мост Уитстона)

Сопротивления R_1 и R_2 (рис. 7.36) – проволочные тензодатчики (рабочий и компенсационный) образуют так называемый внешний полумост. Сопротивления R_3 и R_4 – переменные сопротивления – образуют внутренний полумост. Сопротивление R_5 в виде реохорда служит для балансировки моста. В измерительную диагональ подключен гальванометр G с сопротивлением R_G , к другой подключен источник постоянного напряжения.

Если $R_1 = R_2$ и $R_3 = R_4$ (либо $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$), то в этом случае мост сбалансирован и ток в измерительной диагонали отсутствует. Если же сопротивление рабочего датчика в связи с удлинением объекта, на который он приклеен, изменится на некоторую величину ΔR , то через гальванометр потечет ток силой I_G .

В процессе исследования неизбежно меняется температура датчика, что приводит к изменению его сопротивления. Таким образом, измененное значение ΔR вызвано не только деформированием объекта ΔR_ϵ , но и изменением температуры ΔR_t . Для исключения этой погрешности датчик R_2 (поэтому и названный компенсационным) помещают рядом с рабочим датчиком.

Прибор ИД-70 с питанием от сети предназначен для измерения статических деформаций.

Прибор работает с группами по 9 активных и компенсационных датчиков с поочередным включением их через штепсельный разъем и переключатель.

Предел измерений прибора ИД-70 охватывает упругую и пластическую области деформации различных материалов и складывается из 10 диапазонов переключателя П-2 по 1000 мкм/м, 10 диапазонов переключателя П-3 по 10000 мкм/м и реохорда – 2000 мкм/м, что в сумме составляет около 110000 мкм/м или $\varepsilon = 10\%$ (1 микрон/метр соответствует деформации $\varepsilon = 1 \cdot 10^6$).

Разрешающей способностью прибора следует считать 0,5 деления, что соответствует 5 мкм/м. Для стали с модулем упругости $\varepsilon = 2,1 \cdot 10^6$ кг/см² такая деформация соответствует напряжению 10,5 кгс/см².

Содержание отчета

1. Цель лабораторной работы.
2. Программа работы.
3. Описание стенда для проведения исследований и краткая характеристика прибора ИД-70.
4. Методика и результаты исследований (необходимо также привести рисунки и таблицы опытных и расчетных данных).
5. Выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Как распределяются механические напряжения в цилиндрическом и сферическом сосудах давления?
2. Какие факторы определяют величину механических напряжений в сварных сосудах давления?
3. Конструктивное оформление проволочного тензодатчика.
4. Что такое балка равного сопротивления?
5. Как определяется напряжение при плоском напряженном состоянии?
6. Последовательность работы с прибором ИД-70.
7. Измерительная схема прибора.
8. Назначение компенсационного датчика.

Лабораторная работа 7.8

Оценка местной устойчивости тонких пластин элементов сварных конструкций

Цель работы — изучение методики расчётно-экспериментальной оценки местной устойчивости тонких пластин под действием сварочных напряжений, расширение представлений об особенностях расчёта напряжений и величины выпучин элементов, выполненных ручной дуговой сваркой.

Расчёт местной устойчивости тонких пластин

В состав сечения отдельных элементов сварных конструкций часто входят тонкие листы и пластинки, которые под действием напряжений сжатия, превосходящих критические напряжения $\sigma_{кр}$, могут потерять устойчивость и выпучиться. Потеря местной устойчивости пластинок может произойти не только под действием внешней нагрузки, но и под действием внутренних сил, вызванных процессом сварки.

Расчёт местной устойчивости тонких пластин должен производиться с учётом напряжений сжатия, возникающих при сварке. Для того чтобы в процессе сварки пластина не потеряла устойчивости, должно быть выполнено следующее условие:

$$\sigma_{св} \leq \sigma_{кр}, \quad (7.29)$$

где $\sigma_{св}$ — напряжения сжатия, вызванные сваркой; $\sigma_{кр}$ — критические напряжения, зависящие от соотношения размеров пластины и характера закрепления её кромок.

Напряжения сжатия, вызванные приваркой к пластине ребер жесткости (рис. 7.37), могут быть определены по формуле

$$\sigma_{св} = E\mu q_n \left(\frac{1}{F} + \frac{zz'}{J} \right), \quad (7.30)$$

где E — модуль упругости материала; μ — коэффициент, зависящий от теплофизических свойств свариваемого материала, для малоуглеродистой стали $\mu = -3,53 \cdot 10^{-6}$; $q_n = \frac{0,24 \cdot I \cdot U \cdot \eta}{V}$ — погонная энергия сварки, при выполнении угловых швов $q_n \approx D \cdot K^2$, где $D = 7250$ при автоматической сварке; $D = 9500$ при ручной сварке; K — катет углового шва; F — полная площадь поперечного сечения; z' — рас-

стояние от центра тяжести швов до центра тяжести сечения; z – расстояние от центра тяжести сечения до рассматриваемого волокна; J – момент инерции поперечного сечения.

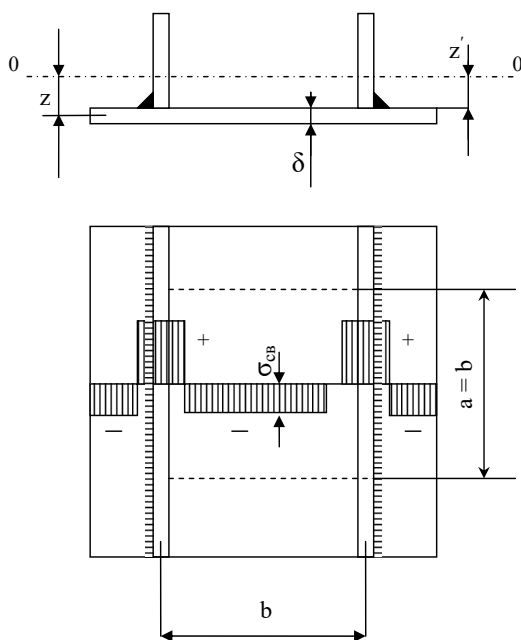


Рис. 7.37. Эпюра сварочных напряжений в пластине от приварки рёбер

Критические напряжения выражаются известной формулой

$$\sigma_{кр} = \frac{k \cdot \pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{s}{b}\right)^2 = A \cdot E \left(\frac{s}{b}\right)^2, \quad (7.31)$$

где k – коэффициент, учитывающий соотношения размеров пластины и характер закрепления её кромок (табл. 7.7); $\mu = 0,3$ – коэффициент Пуассона; s – толщина пластины; b – ширина пластины.

Значения коэффициента A для различных условий закрепления (рис. 7.38) на опорах пластины приведены в табл. 7.7 и 7.8.

Если условие (7.29) не удовлетворено и $\sigma_{св} > \sigma_{кр}$, то пластина теряет устойчивость и выпучивается. Стрелка выпучины может быть выражена формулой

$$f = 424 \cdot 10^{-6} a \sqrt{\sigma_{CB} - \sigma_{KP}}, \quad (7.32)$$

где a – длина пластины (рис. 7.38).

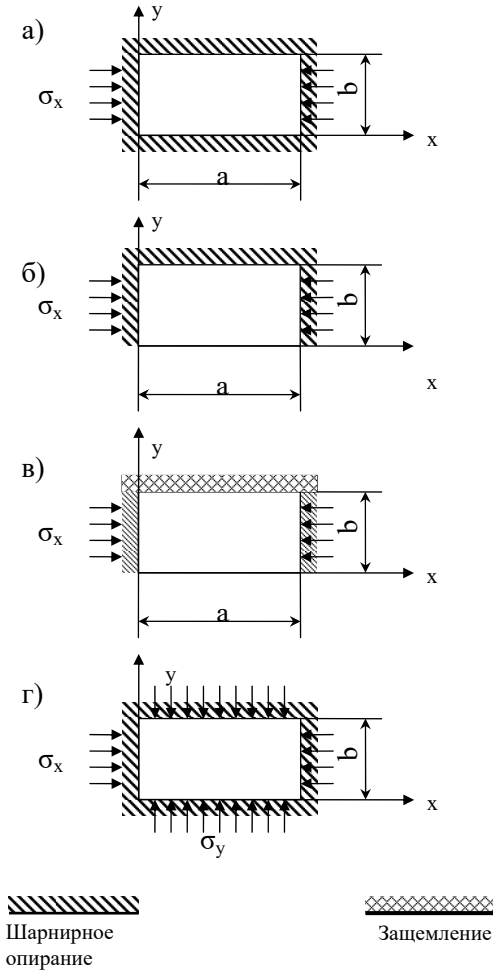


Рис. 7.38. Пластины с различным опиранием на опоры: a – свободное опирание по четырём сторонам; b – свободное опирание по трём сторонам; $в$ – свободное опирание по двум сторонам при одной защемленной стороне; $г$ – свободное опирание по четырём сторонам при продольных и поперечных напряжениях

В процессе эксплуатации в пластинке возникают дополнительные напряжения $\sigma_{\text{ВН}}$ от внешних нагрузок, которые, суммируясь с остаточными сварочными напряжениями, снижают устойчивость пластинки. Для того чтобы пластинка и в этом случае была устойчивой, необходимо:

$$\sigma_{\text{св}} + \sigma_{\text{ВН}} \leq \sigma_{\text{кр}}. \quad (7.33)$$

В противном случае появится выпучина, стрелка которой составит:

$$f = 424 \cdot 10^{-6} a \sqrt{\sigma_{\text{св}} + \sigma_{\text{ВН}} - \sigma_{\text{кр}}}. \quad (7.34)$$

Приведённые зависимости (7.30) – (7.34) позволяют расчётом оценить местную устойчивость с учётом тех напряжений, которые возникают при сварке и в процессе эксплуатации.

В работе необходимо оценить величину выпучин в листе, подкреплённом двумя продольными рёбрами (рис. 7.39).

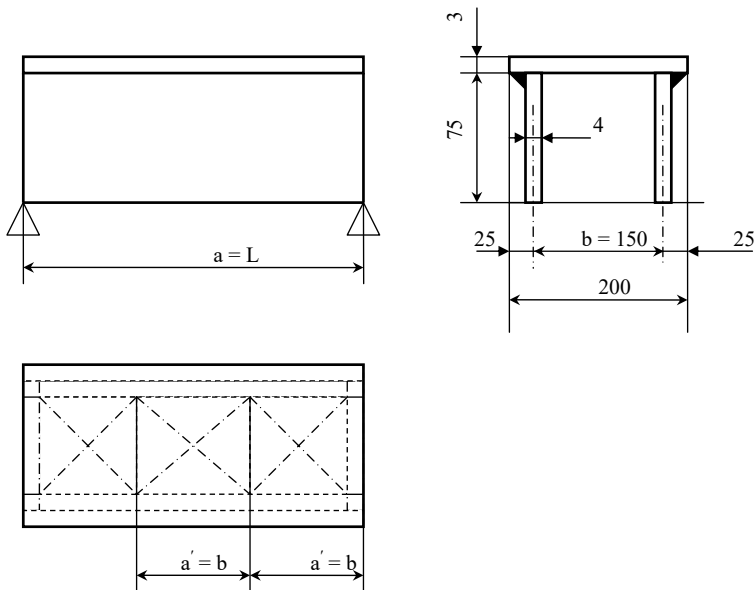


Рис. 7.39. Балочка П-образного сечения

Критические напряжения для пластинки принятых размеров определяются по формуле (7.31). Значения коэффициента A , входящего в указанную формулу, принимают по табл. 7.7 как для квадратной пластинки, учитывая, что длинная прямоугольная пластинка при потере устойчивости как бы расчленяется на ряд квадратных пластинок, для которых $A = 3,6$.

Для определения напряжений сжатия $\sigma_{св}$, вызванных продольным укорочением упруго-пластической околошовной зоны, необходимо знать величину погонной энергии, входящую в выражение (7.30). Погонная энергия при выполнении двух двусторонних угловых швов при катете, равном K , определяется как:

$$q_{п} = 2 \cdot D \cdot K^2,$$

где $D = 7250$ при автоматической сварке; $D = 9500$ при ручной дуговой сварке; K – катет углового шва, см.

Подставив значения погонной энергии и геометрические характеристики сечения (табл. 7.9) в выражение (7.30), находим величину сварочных напряжений $\sigma_{св}$.

Таблица 7.7

Коэффициенты k и A в выражении $\sigma_{кр}$ пластины, сжатой в одном (продольном) направлении

Случай	Граничные условия	Коэффициенты	Отношения сторон пластины a/b									
			0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	3,0	∞
1	Все края шарнирно оперты (рис. 7.38, а)	k	5,14	4,20	4,0	4,13	4,47	4,20	4,05	4,00	—	4,00
		A	4,63	3,78	3,60	3,72	4,02	3,78	3,64	3,60	—	3,60
2	Все края защемлены	k	—	—	9,40	9,30	8,80	8,50	8,50	8,20	7,80	7,00
		A	A	—	8,46	8,37	7,92	7,65	7,65	7,38	7,02	6,30
3	Края $x = 0$ и $x = a$ шарнирно оперты; края $y = 0$ и $y = b$ защемлены	k	7,05	7,29	7,69	7,15	7,04	7,20	7,05	7,00	7,15	7,00
		A	6,35	6,56	6,92	6,44	6,34	6,48	6,35	6,30	6,44	6,30

Случай	Граничные условия	Коэффициенты	Отношения сторон пластины a/b									
			0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	3,0	∞
4	Края $x = 0$ и $x = a$ защемлены; края $y = 0$ и $y = b$ шарнирно опёрты	k	13,38	8,73	6,74	5,14	5,45	5,34	5,18	4,85	4,41	4,00
		A	12,04	7,86	6,07	5,26	4,90	4,81	4,66	4,36	3,96	3,60
5	Края $x = 0$ и $x = a$ шарнирно опёрты; край $y = b$ защемлён; край $y = 0$ свободен (рис. 7.38, в)	k	—	2,70	1,70	1,47	1,36	1,33	1,34	1,38	1,36	1,33
		A	—	2,43	1,53	1,32	1,22	1,20	1,21	1,24	1,22	1,20
6	Края $x = 0$, $x = a$ и $y = b$ шарнирно опёрты, край $y = 0$ свободен (рис. 7.38, б)	k	3,65	2,15	1,44	1,14	0,95	0,84	0,76	0,70	0,56	0,46
		A	3,10	1,93	1,30	1,03	0,85	0,76	0,68	0,63	0,50	0,41

Таблица 7.8

Коэффициенты k и A в выражении $\sigma_{кр}$ пластины, сжатой в двух направлениях

№ точки	Коэффициенты k и A	Значения k и A при σ_y/σ_x					
		0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	2,0
1	k	3,36	2,85	2,50	2,22	2,00	1,33
	A	3,03	2,56	2,25	2,00	1,80	1,20
2	k	3,36	2,40	1,84	1,49	1,25	0,69
	A	3,03	2,16	1,66	1,34	1,12	0,62
3	k	3,24	3,42	1,74	1,36	1,11	0,58
	A	2,90	2,17	1,56	1,22	1,00	0,52
∞	k	3,20	2,40	1,67	1,25	1,00	0,50
	A	2,88	2,16	1,50	1,12	0,90	0,45

Таблица 7.9

Эскиз сечения	Размеры элементов сечения	F , см ²	Расстояние от оси а-а, z' , см	$S_{aa'}$, см ³	$I_{aa'}$, см ⁴	$I_{xx'}$, см ⁴
	2×75×4					—
	г.л. 200×3					—
	—	Σ	Σ	Σ	Σ	

Если определенные выше критические напряжения значительно меньше сварочных, то выпучины возникнут уже при сварке.

Величина стрелки выпучин, возникающих при сварке, определяется по выражению (7.32).

Указания к выполнению работы

1. Установить образец (рис. 7.39) на опорную плитку 1 (рис. 7.40).
2. Установить стойку 4 с индикаторной головкой 3 на опорную плитку.
3. Определить стрелки выпучин на поверхности образца 2 согласно схеме, представленной на рис. 7.40, б.
4. Результаты измерений занести в табл. 7.10.
5. По формулам (7.32) и (7.34) определить расчётные значения стрелки выпучины f_p . Результаты расчёта занести в табл. 7.10.
6. Сравнить максимальные экспериментальные и расчётные значения стрелки выпучины.
7. Оценить ошибку измерений.
8. Оформить отчёт в соответствии с требованиями.
9. Привести в порядок рабочее место.

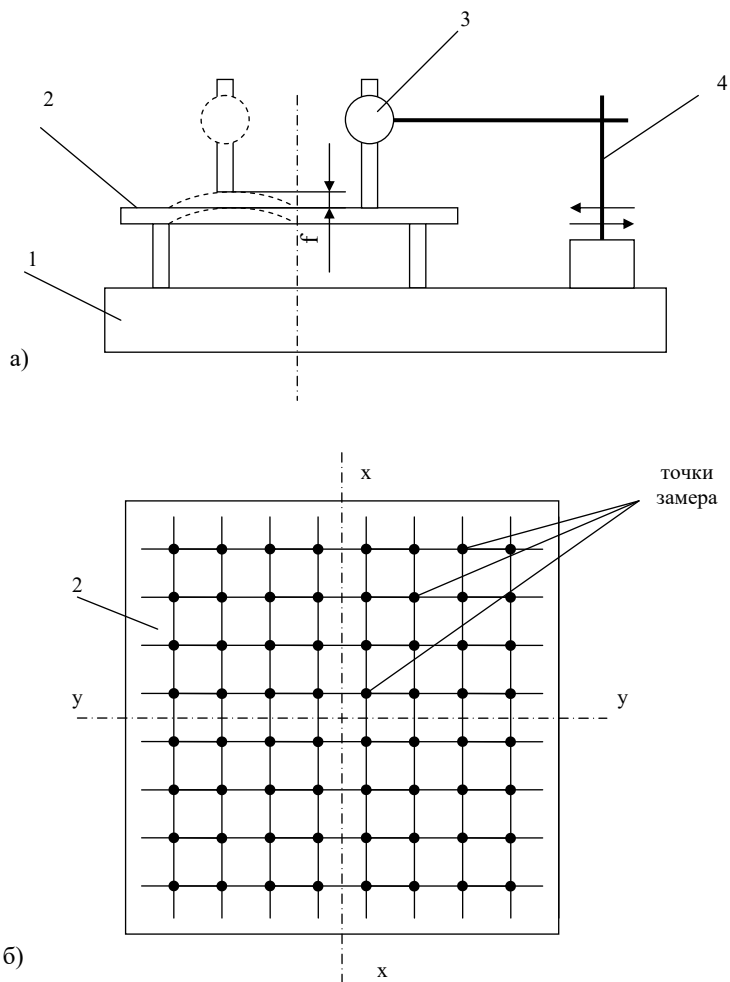


Рис. 7.40. Схема измерения выпучин:
a – измерительное приспособление; *б* – схема измерения;
 1 – плита опорная; 2 – образец; 3 – головка индикаторная;
 4 – стойка

Таблица 7.10

Схема измерения	№ точки замера	Стрелка выпучины f , мм	
		экспериментальная	расчётная
	1	$f_1^э$	$f_1^р$
	2	$f_2^э$	$f_2^р$
	3	.	.
	4	.	.
	:	.	.
	:	.	.
	:	.	.
	:	.	.
	25	.	.
	26	.	.
	27	.	.
	28	.	.
	29	.	.
	30	.	.
	31	.	.
	32	.	.
	33	.	.
	34	.	.
	:	.	.
	35	$f_{35}^э$	$f_{35}^р$
	36	$f_{36}^э$	$f_{36}^р$

Содержание отчёта

1. Цель лабораторной работы.
2. Программа работы.
3. Описание схемы проведения экспериментов и методики расчётов.
4. Анализ результатов исследований.
5. Выводы.

При описании методики и результатов расчётов необходимо приводить соответствующие формулы, рисунки и таблицы.

Вопросы для самоконтроля

1. Понятие «местная устойчивость пластин».
2. Условие обеспечения местной устойчивости.
3. Схема определения стрелки выпучины.

Лабораторная работа 7.9

Определение механической неоднородности сварных соединений

Цель работы – приобретение навыков экспериментального исследования неоднородности механических характеристик сварных соединений, закрепление теоретических знаний о свойствах металла различных зон сварного соединения.

Особенности распределения неоднородности механических свойств соединений, выполненных сваркой плавлением

Технологические операции, применяемые в процессе изготовления сварных конструкций, могут существенно снижать начальную термодинамическую устойчивость свариваемого металла в связи с дополнительной гетерогенностью, обусловленной появлением различных неоднородностей.

Основными видами неоднородности сварного соединения являются:

- структурно-химическая макро- и микронеоднородности металла, связанные с наличием литого металла шва, зоны термического влияния и основного металла (макронеоднородность), с наличием зерен, границ зерен, фаз, включений и т. д. в пределах каждой зоны сварного соединения (микронеоднородность);
- неоднородность упругопластического напряженного состояния, вызванная неравномерным распределением остаточных напряжений и деформаций в сварном соединении;
- геометрическая неоднородность, связанная с наличием дефектов сварного шва, конструктивных концентраторов, зависящих от типа сварного шва.

Эти основные виды неоднородности определяют механическую, физическую и электрохимическую неоднородности, которые являются интегральными характеристиками свойств сварного соединения.

Наиболее характерной особенностью соединений, выполненных сваркой плавлением, является наличие зон с различными механическими свойствами.

Сварное стыковое соединение в поперечном сечении имеет несколько участков, которые могут существенно различаться между собой по механическим свойствам (рис. 7.41). Это шов *1*, околошовная зона *2*, материал которой у ряда сталей претерпевает структурные превращения и может иметь повышенные твердость и прочность, зона высокого отпуска *3*, в которой у термически обработанных сталей прочность и твердость понижены в результате сварочного нагрева. Далее следует зона *4*, нагревавшаяся до более низких температур.

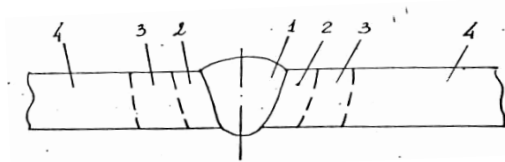


Рис. 7.41. Стыковое сварное соединение
(обозначения в тексте)

В той или иной мере для всех сварных соединений характерно различие механических свойств металла в разных участках, соизмеримых с размерами соединения, называемое механической неоднородностью. Например, металл шва имеет литую структуру, его свойства зависят от химического состава металла, скорости охлаждения, характера кристаллизации и других факторов. К шву примыкает ряд зон, свойства и протяженность которых зависят от исходного структурного состояния, теплового режима сварки, длительности пребывания металла при высоких температурах и скорости его охлаждения.

Сварные конструкции выполняют из различных сплавов, влияние термического эффекта сварки этих сплавов вызывает появление (в зависимости от исходного состояния) закалочных структур, т. е. твердых прослоек, или же зон с пониженной твердостью, т. е. мягких прослоек. Работоспособность сварных соединений зависит от протяженности твердых или мягких прослоек, т. е. от характера распределения твердости в сварном соединении.

Простейший случай неоднородности имеет место при сварке наклепанных термически не упрочняемых сталей и сплавов, например аустенитных сталей или алюминиевых сплавов, которые упрочнены холодной прокаткой.

В качестве примера на рис. 7.42 показано распределение твердости в сварном соединении из сплава АМгб. Твердость шва и околошовной зоны близки к твердости отожженного металла. Предел прочности и предел текучести оказываются заметно ниже, чем у основного металла, а пластичность повышается. Таким образом, шов и околошовная зона являются мягкими прослойками.



Рис. 7.42. Распределение твердости по Вickers в сварном соединении из сплава АМг6 ($s = 2,8$ мм)

Механическая неоднородность приводит к неравномерному распределению в сварном соединении таких механических свойств металла, как предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, твердость и др. Твердость материала зависит от его кристаллической структуры и связана со многими механическими и физическими характеристиками, с пределами текучести, прочности, усталости, ползучести и длительной прочности. Неоднородность макроструктуры металла приводит к тому, что размеры отпечатков индентора при оценке твердости при прочих равных условиях будут получаться разными.

Описание прибора для определения твердости

Прибор модели ТК-14-250 (ГОСТ 13407–87) предназначен для измерения твердости металлов и сплавов по методу Роквелла. В соответствии со своим назначением прибор состоит из следующих основных узлов:

- система нагружения;
- подвеска грузовая;
- привод;
- винт подъемный.

Все основные узлы прибора смонтированы в чугунном литом корпусе закрытого типа.

Система нагружения предназначена для воспроизведения предварительной и общей нагрузок на испытательный наконечник (индентор), а также для визуального отсчета показаний твердости. Система нагружения включает шпиндельную группу, измерительную и рычажную системы. Шпиндельная группа состоит из наконечника 4 (рис. 7.43), пружины, ограничителя 3, шпинделя, призмы и втулок.

В измерительную систему входят ручка 2, индикатор 1 и другие узлы.

Винт подъемный служит для подвода испытуемой детали к наконечнику, отвода ее после окончания испытания и способствует приложению предварительной нагрузки. Стол 6 поднимают, вращая маховик 7, при этом винт получает поступательное движение вверх или вниз в зависимости от направления вращения маховика.

При включенном в сеть приборе, вращая маховик (рис. 7.43) по часовой стрелке, стол 6 с испытуемым образцом поднимают к ограничителю 3.

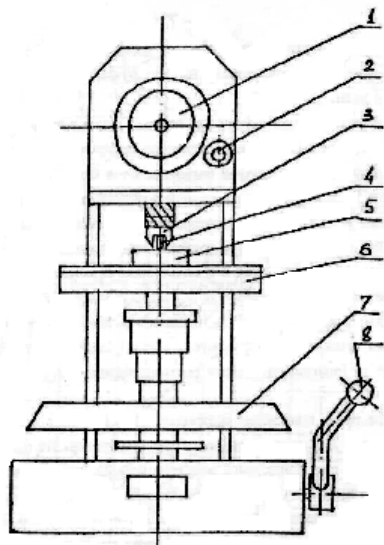


Рис. 7.43. Прибор для измерения твердости металлов и сплавов по методу Роквелла: 1 – индикатор; 2 – ручка; 3 – ограничитель; 4 – наконечник; 5 – образец; 6 – стол; 7 – маховик; 8 – рукоятка

При этом образец сначала соприкасается с наконечником 4 и через шпindel поднимает рычаги, размещенные в корпусе прибора. Масса рычагов, масса шпindelной группы и усилие от индикатора создают предварительную нагрузку, равную 10 кгс.

За время приложения предварительной нагрузки большая стрелка индикатора должна сделать от 2,5 до 3 оборотов. По окончании приложения предварительной нагрузки большая стрелка индикатора устанавливается на нуль (вертикально вверх), а малая стрелка — на красную черту. Допускается смещение большой стрелки относительно нулевого штриха шкалы индикатора на ± 5 делений. Точную установку большой стрелки на нуль осуществляют поворотом ручки 2 (рис. 7.43).

Перемещением рукоятки 8 в верхнее положение до упора снимают основную нагрузку и производят отсчет твердости со шкалы индикатора.

Вращая маховик 7 против часовой стрелки, стол 6 с испытуемым образцом 5 отводят от наконечника. На этом цикл испытания считается законченным.

При измерении твердости материалов по Роквеллу наконечник стандартного типа — стальной шарик — вдавливается в поверхность испытуемого образца под действием двух последовательно прилагаемых нагрузок — предварительной P_0 и общей P , которая равна сумме предварительной P_0 и основной P_1 нагрузок:

$$P = P_0 + P_1.$$

Испытуемый образец должен располагаться на столе прибора устойчиво, в противном случае образец может сместиться во время проведения измерений. При измерении твердости должна быть обеспечена перпендикулярность приложения действующего усилия и поверхности образца. Недопустимы случаи контакта наконечника с поверхностью опорного стола.

Расстояние между центрами двух соседних отпечатков или расстояние от центра какого-либо отпечатка до края образца должно быть не менее 3 мм.

Указания к выполнению работы

1. Ознакомиться с особенностями работы на твердомере.
2. Выполнить разметку поверхности образцов путем нанесения точек измерения твердости с одной стороны (рис. 7.44).
3. Подсоединить прибор к сети переменного тока напряжением 220 В.
4. Выполнить измерения твердости:

1) установить на стол прибора испытуемый образец и с помощью маховика 7 (рис. 7.43) прижать его к наконечнику, пока большая стрелка индикатора не расположится на отметке «нуль» черной шкалы, а малая – на красной черте.

При работе без ограничителя допускается смещение большой стрелки относительно вертикально расположенного нулевого штриха шкалы индикатора на ± 5 делений. Точную установку нуля шкалы производить вращением рукоятки 2 (рис. 7.43).

При работе с ограничителем, когда большая стрелка индикатора расположена точно на нуле, опустить ограничитель 3 до контакта с исследуемой поверхностью и закрепить гайкой.

Если при прижатии образца к наконечнику большая стрелка отклонилась более чем на 5 делений относительно нуля шкалы, прекратить испытание в обычном порядке, при этом результат измерения не учитывать;

- 2) воспроизвести при помощи рукоятки 8 (рис. 7.43) испытательную нагрузку, переместив рукоятку в нижнее положение до упора. Окончание процесса внедрения индентора в материал образца определяется по замедленному движению большой стрелки индикатора (при испытании пластичных материалов) или по полной остановке большой стрелки индикатора (при испытании прочных материалов);
- 3) снять основную нагрузку возвратом рукоятки 8 в исходное положение;
- 4) определить твердость материала в данной точке измерения по шкале индикатора;
- 5) отвести испытуемый образец от наконечника, вращая маховик прибора против часовой стрелки, и снять образец со стола.

5. После окончания испытаний выключить прибор и привести в порядок рабочее место.

6. Результаты измерений представить в табл. 7.11.

7. Построить для каждого образца графики распределения твердости в поперечном сечении по средним значениям для каждой точки образца.

Таблица 7.11

№ образца	Основной металл	Способ сварки	Твердость (HRC) в точках образца														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9						
1	1X18H10T	Автоматич.															
2	Сплав 1201	Механизир.															

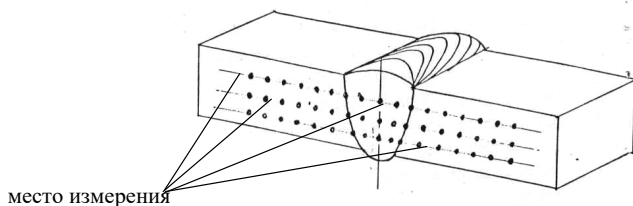


Рис. 7.44. Схема разметки поверхности образца

Содержание отчета

1. Цель и задачи работы.
2. Схема измерения твердости.
3. Результаты измерений в виде таблиц.
4. Графики распределения твердости по поверхности сварного образца.
5. Анализ полученных результатов и краткие выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Понятие «неоднородность свойств сварных соединений».
2. Характерные виды неоднородности сварных соединений.
3. Причины возникновения мягких и твердых прослоек в соединениях.
4. Способы оценки твердости металлических сплавов.

Лабораторная работа 7.10

Исследование коррозии сварных соединений алюминиевых сплавов

Цель работы — освоение навыков экспериментального исследования коррозии соединений, выполненных сваркой плавлением, углубление и закрепление теоретических знаний о процессах разрушения соединений в агрессивных средах.

Задачи работы:

- 1) изучение элементов методики коррозионных испытаний;
- 2) изучение испытательного оборудования и измерительной аппаратуры, которые используются для проведения исследований;
- 3) овладение техникой подготовки и проведения эксперимента;
- 4) приобретение навыков научного обобщения и оформления результатов эксперимента.

Указания для самостоятельной работы

Проблемы определения коррозионной стойкости сварных соединений, выполненных из алюминиевых сплавов, становятся все более актуальными. Это объясняется тем, что существенно расширилось применение сварных конструкций и алюминиевых сплавов в различных отраслях промышленности, повысились требования к качеству соединений и узлов.

Потеря эксплуатационной надежности сварных конструкций в значительной степени определяется видом разрушений металла под действием внешней агрессивной среды, протекающих самопроизвольно, то есть процессами коррозии.

Коррозия бывает сплошной, или общей, распространяющейся по всей поверхности конструкций, и местной, проявляющейся только на отдельных участках сварных соединений (рис. 7.45).

Наиболее характерной для сварных соединений является неравномерная коррозия, которая наблюдается после нескольких часов, недель или лет эксплуатации (в зависимости от агрессивности среды). При неравномерной коррозии возможна местная концентрация напряжений. Язвенная и точечная коррозия характерны для сварных соединений алюминиевых сплавов, работающих в морской воде.

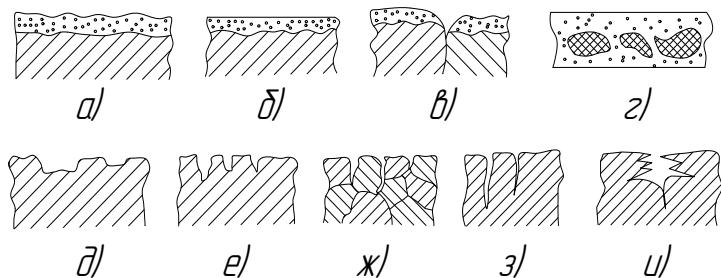


Рис. 7.45. Виды коррозии: *а* – равномерная коррозия; *б* – неравномерная коррозия; *в* – избирательная коррозия; *г* – коррозия пятнами; *д* – коррозия язвами; *е* – точечная коррозия; *ж* – межкристаллитная коррозия; *з* – коррозионное растрескивание; *и* – подповерхностная коррозия

Основными показателями, характеризующими скорость процесса разрушения, являются:

- глубина разрушения металла за определенное время (глубинный показатель коррозии, мм/год);
- изменение массы образца металла в результате его коррозии, отнесенное к единице поверхности металла и к единице времени (весовой показатель коррозии, $\text{г}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$);
- изменение какого-либо показателя механических свойств образца в течение действия агрессивной среды (%);
- время, прошедшее от начала эксплуатации до появления определенного количества очагов коррозии.

Скорость коррозии металлов изменяется во времени. Для сварных соединений алюминиевых сплавов, подвергающихся действию морской воды, характерным является уменьшение скорости коррозии со временем вследствие защитного действия продуктов коррозии. Поэтому для получения точной характеристики коррозионной стойкости соединений необходимо при испытаниях определять зависимости скорости коррозии от времени.

В основе электрохимической коррозии лежит тесная связь между химическими и электрическими явлениями. Применительно к коррозии металлов эта связь видна из следующего эксперимента.

Если подвергнуть действию электролита (морской воды) поверхность сварного соединения, то начнется процесс его коррозии,

протекающий с некоторой скоростью, характерной для данного соединения и электролита. При действии на корродирующий металл электрического тока скорость коррозии существенно изменяется в зависимости от его силы и направления (рис. 7.46).

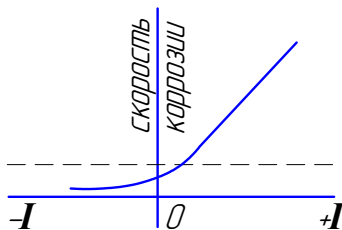


Рис. 7.46. Зависимость скорости коррозии от тока

Количество металла K (г), растворившегося под действием положительно направленного электрического тока (ток идет из поверхности металла в электролит), определяется законом Фарадея:

$$K = \frac{A \cdot I \tau}{n \cdot F} = K_0 \cdot I \tau, \quad (7.35)$$

где I — сила тока, вызывающего изменение массы вещества, А; τ — время действия тока, ч; A — атомная масса вещества; n — валентность вещества в данном процессе; F — постоянная Фарадея (количество электричества, необходимое для электрохимического изменения эквивалента вещества), равная $26,8 \text{ А} \cdot \text{ч}$; K_0 — электрохимический эквивалент, $\text{г}/\text{А} \cdot \text{ч}$.

Для глубинного показателя коррозии этот закон может быть представлен в виде:

$$\Pi = \Pi_0 \cdot i_a, \quad (7.36)$$

где Π — глубинный показатель, мм/год; Π_0 — электрохимический эквивалент при плотности тока $I \text{ А}/\text{м}^2$, мм/год (для алюминия $\Pi_0 = 1,06 \text{ мм}/\text{год}$); i_a — анодная плотность тока, $\text{А}/\text{м}^2$.

Ток, обуславливающий коррозию металла, часто называют коррозионным током. Металл, с поверхности которого ток переходит в электролит, называется анодом.

Наиболее широко в настоящее время используются алюминиевые сплавы систем Al · Mg и Al · Zn · Mg. Алюминиевые сплавы имеют высокую коррозионную стойкость в морской воде. В движущейся морской воде, где облегчен доступ кислорода к поверхности металла, процессы коррозии алюминиевых сплавов протекают более интенсивно.

Сварные соединения алюминиевомагниевого сплава имеют практически одинаковую коррозионную стойкость с основным металлом.

Сплавы системы Al · Mg · Zn относятся к группе термически упрочняемых и поставляются в термообработанном состоянии. Поэтому при сварке этих сплавов в результате нагрева в зоне термического влияния происходят структурные изменения, приводящие к разной коррозионной активности металла отдельных зон соединений. В результате эти сплавы в зоне термического влияния при воздействии морской воды подвергаются интенсивной коррозии. В отдельных случаях после термического воздействия при сварке в интервале температур 150...200 °С сварные соединения сплавов Al · Mg могут оказаться чувствительными к межкристаллитной коррозии.

Условия эксплуатации сварных конструкций разнообразны, и выбор металла с целью коррозионных испытаний является важным для правильной оценки коррозионной стойкости соединений. Описываемый в данном пособии метод коррозионных испытаний применим к сварным узлам и конструкциям, эксплуатирующимся в морских условиях.

Для количественной оценки коррозионной стойкости сварных соединений требуется длительное время. В связи с этим ускоренные коррозионные испытания имеют большое практическое значение. Пользуясь ускоренными коррозионными испытаниями, можно за короткое время получить качественную и количественную оценку коррозионной стойкости сварного соединения и выбрать наиболее оптимальные варианты (марку свариваемого материала, присадочную проволоку, режим сварки, способ подготовки под сварку и др.).

Ускорение процессов коррозии соединений в морской воде может быть обеспечено за счет увеличения диффузии кислорода к поверхности металла. Поэтому при выборе ускоренных коррози-

онных испытаний целесообразно увеличение скорости потока электролита, а также увеличение насыщенности его кислородом за счет обмена среды с окружающим воздухом. Кроме того, повышение температуры также увеличивает скорость электродных процессов, протекающих при коррозии металлов, следовательно, этот фактор необходимо учитывать при интенсификации коррозионных испытаний.

Учитывая, что процессы коррозии металлических сварных соединений в морской воде имеют электрохимическую природу, определение основных электрохимических характеристик (электродного потенциала и тока коррозии) может быть использовано как ускоренный метод оценки коррозионной стойкости соединений.

Габариты и форма сварного образца выбираются с учетом сохранения схемы остаточных напряжений, характерной для реального сварного узла.

Сварные образцы испытываются на специальном стенде.

Стенд для коррозионных испытаний

Стенд предназначен для оценки в лабораторных условиях коррозионной стойкости основного металла, а также сварных и паяных соединений.

Основные технические характеристики стенда

Количество испытываемых образцов.....	4
Максимальное избыточное давление в ячейке, МПа.....	9
Максимальная скорость потока электролита, м/с	5
Температура электролита, °С.....	18...80

Стенд состоит из трех основных блоков – измерительного, насосного и управляющего и комплектуется специальным устройством для коррозионных испытаний образцов.

Принцип действия стенда основан на испытании плоских образцов 1 (рис.7.47) в специальной ячейке 2, полость которой выполнена в виде кольцевой канавки с агрессивной средой. В этом стенде отсутствуют детали, вызывающие контактную коррозию, что повышает достоверность испытаний; размещенные в ячейке электроды 3 вместе с измерительным блоком 4 позволяют непрерывно определять электрохимические характеристики процессов разрушения образцов непосредственно в потоке агрессивной среды. Испытания

проводятся в потоке морской воды, которая циркулирует из емкости в измерительную ячейку с образцом с помощью лопастного насоса. Температура воды в процессе испытаний поддерживается постоянной с точностью 2 °С при помощи соответствующего терморегулирующего устройства. В крышке емкости с целью насыщения среды кислородом предусмотрены специальные отверстия для подсоса воздуха. Одновременно на установке можно испытывать 4 образца $\varnothing 90$ мм.

Измерение силы тока коррозии производится по специальной схеме, предусматривающей параллельное включение измерительных ячеек.

Для измерения тока коррозии сварных соединений в данной работе используется вольтамперметр электронный цифровой ВК2-20.

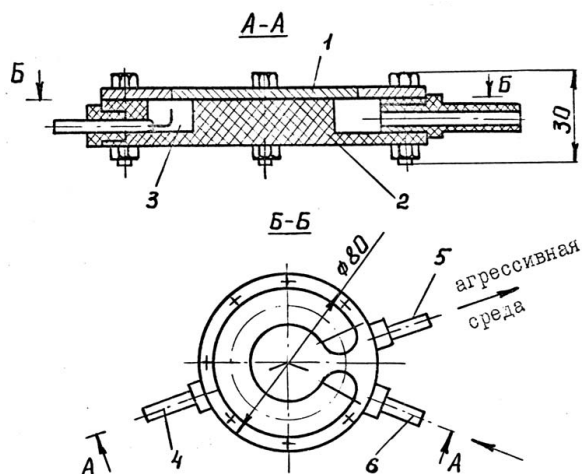


Рис. 7.47. Схема коррозионных испытаний:

- 1 – образец дисковый с круговым сварным швом;
- 2 – ячейка коррозионная; 3 – каналы для прохождения агрессивной среды; 4 – электрод измерительный; 5, 6 – штуцеры

Указания к выполнению работы

1. Проверив соответствие напряжения питающей сети 220 В (отклонения не более $\pm 10\%$), включить тумблер «СЕТЬ» вольтамперметра ВК2-20.

2. Переключатель рода работы перевести в положение «УСТ. НУЛЯ».

3. После 15-минутного прогрева провести корректировку нуля регуляторами, расположенными на передней панели, следующим образом. С помощью потенциометра «БАЛАНС А», выведенного под шлиц, необходимо добиться, чтобы показание табло не изменялось при переключении переключателя пределов измерения напряжений из положения «I» в положение «I×1,0». При этом в положении «I×0,1» переключателя пределов измерений возможно равномерное появление показаний, отличающихся от устанавливаемых на ± 2 единицы младшего разряда, причем вероятность их появления должна быть меньше вероятности появления устанавливаемых показаний. Далее переключатель пределов измерения напряжения ставится в положение «I», и с помощью потенциометра «БАЛАНС Б» необходимо добиться, чтобы показание табло не изменялось при переключении рода работ из положения «ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЙ» в положение «УСТ. НУЛЯ».

Далее с помощью потенциометра «УСТ. НУЛЯ» устанавливают на табло точку смены показаний +0000 и +0001 (или точку, в которой эти показания при последовательных отчетах появляются с одинаковой вероятностью). В случае недостаточности пределов этого регулятора следует воспользоваться дополнительной регулировкой «БАЛАНС В».

4. Установку нуля следует производить по смене показаний +0000 и +0001 при замкнутом разъеме «ВХОД U» на пределах измерения напряжения и при разомкнутом разъеме «ВХОД I» на пределах измерения токов.

5. Для калибровки прибора необходимо поставить переключатель рода работы в положение «ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЙ», а переключатель пределов измерения напряжений в положение «КАЛИБР». С помощью регулятора «КАЛИБР», расположенного на передней панели прибора, устанавливают точку смены показаний +2000 и +2001.

При операциях установки нуля и калибровки переключатель режима запуска табло необходимо поставить в положение «ВНУТР».

6. После корректировки нуля и калибровки прибор готов к работе.

В зависимости от измеряемого параметра (ток или напряжение) последний подключают на «ВХОД I» или «ВХОД U», при этом переключатели пределов измерений ставятся в положение, соответствующее нужному пределу измерений тока или напряжения.

7. Включить насосный блок стенда, поставив тумблер «НАСОС» в положение «ВКЛ.».

8. Произвести измерение силы тока или потенциала 1, 2, 5, 10, 15, 30, 60 мин.

Отчет показаний прибора производится по следующему правилу. Выбрав определенный предел измерения, представляем его в виде четырехзначного числа, например 20 В = 20,00 В. Показания четырех цифровых индикаторных ламп, например 1673, расшифровываем, подставляя запятую на положенное место. Принимая во внимание полярность, фиксируем результат, например +16,73 В.

9. Отключить стенд в следующей последовательности:

- поставить тумблер «НАСОС» в положение «ОТКЛ.»;
- отключить вольтамперметр ВК2-20;
- отключить стенд от сети питания.

Обработка экспериментальных данных

По окончании измерений для каждого образца определяется среднее значение силы тока и высчитывается анодная плотность тока по формуле

$$i_a = \frac{I}{S}, \text{ А/см}^2, \quad (7.37)$$

где I – сила тока, А; S – площадь образца, омываемая средой, см².

Расчет скорости коррозии (г/см² · ч) производится по следующей формуле:

$$K = \frac{i_a \cdot A}{26,8 \cdot 10^{-4} \cdot n}, \quad (7.38)$$

где i_a – анодная плотность тока, А/см²; A – атомный вес корродирующего металла; n – валентность корродирующего металла; 26,8 – число Фарадея, А·ч.

Пересчет на глубинный показатель коррозии (при условии равномерного утонения металла) производится по формуле

$$\Pi = \frac{K \cdot 8,76}{d}, \quad (7.39)$$

где K – линейная скорость коррозии (проницаемость), мм/год; d – удельный вес металла образца; 8,76 – коэффициент пересчета.

Графические результаты измерений должны быть представлены в виде кривых $i_a = f(\tau)$.

Интерпретация показаний, превышающих предел, сопряжена с риском грубой ошибки. Примерно до 2300 шкала прибора ВК2-20 сохраняет линейность при обеих полярностях. Если показания больше, рекомендуется сменить предел.

Формула, выражающая погрешность измерения, позволяет определить всю погрешность в процентах от измеряемого напряжения (тока) или в абсолютном выражении (вольтах, амперах) в любой части шкалы прибора. После установки нуля и калибровки прибор обеспечивает измерение с погрешностью:

- а) $\pm(0,3 \% A_x + 0,1 \% A_k)$ при измерении напряжений и токов на пределах 2 мВ и 0,2; 2 мА;
- б) $\pm(0,2 \% A_x + 0,05 \% A_k)$ при измерении напряжений и токов на всех остальных пределах.

Здесь A_x – измеренное значение напряжения или тока на соответствующем пределе; A_k – максимальное (предельное) значение измеряемой величины на соответствующем пределе.

Характеристики коррозионной стойкости металлических материалов являются случайными величинами, характеризующимися выборочными средними значениями и рассеянием.

В качестве единых статистических показателей коррозии сварных соединений приняты:

1. \bar{X} – среднее значение показателя коррозионной стойкости (ток коррозии, максимальная глубина повреждения):

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X}{n}, \quad (7.40)$$

где X – отдельное числовое значение показателя; n – общее число отдельных значений показателя (общее число образцов в совокупности).

2. S^2 – дисперсия числовых значений показателя коррозионной стойкости:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X - \bar{X})^2}{n-1}. \quad (7.41)$$

3. S – среднеквадратичное отклонение числового значения показателя коррозионной стойкости:

$$S = \sqrt{S^2}.$$

4. V – коэффициент вариации:

$$V = \frac{S}{\bar{X}} \cdot 100\%. \quad (7.42)$$

Содержание отчета

1. Цели и задачи работы.
2. Описание методики проведения работы.
3. Описание эксперимента и полученных в его ходе данных.
4. Анализ полученных результатов.
5. Выводы.

Графические зависимости обязательно вычерчиваются с масштабной сеткой. Стрелки по осям графика не ставятся. Обозначение единиц измерения по осям не должно выходить за поле графика.

Каждый график должен сопровождаться содержательной надписью.

Цифровой материал, полученный в ходе эксперимента, оформляется в виде таблиц. Каждая таблица может иметь содержательный заголовок, который помещается под словом «таблица».

Вопросы для самоконтроля

1. Понятие «коррозия металлов».
2. Виды коррозионных разрушений.
3. Особенности коррозии сварных соединений.
4. Показатели, характеризующие коррозионную стойкость сварных соединений.
5. Особенности коррозии сварных соединений из алюминиевых сплавов.
6. Факторы, ускоряющие процесс коррозии.
7. Статистические показатели коррозии сварных соединений.

Лабораторная работа 7.11

Оценка коррозионной активности поверхности сварных соединений

Цель работы — изучение методики определения электродных потенциалов поверхности сварных соединений под каплей электролита, углубление теоретических знаний об особенностях коррозии соединений, выполненных различными способами сварки.

Особенности электрохимического метода оценки коррозионной активности поверхности

Коррозией называют самопроизвольное разрушение металлов и сплавов под воздействием внешней среды.

Большинство разрушений сварных соединений в агрессивных средах имеют электрохимическую природу. Поэтому изучение электрохимических характеристик этих соединений имеет большое значение для оценки скорости коррозии и склонности к коррозионному разрушению.

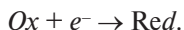
Возникновение коррозионных (гальванических) элементов связано с дифференциацией поверхности сварного соединения на участки с более низким потенциалом и более высоким положительным потенциалом. Первые становятся благодаря этому анодными, вторые — катодными, и коррозия протекает с определенной локализацией активного развития коррозионных поражений.

В связи с таким распределением поверхности на анодные и катодные зоны схему коррозионного процесса можно представить в следующем виде:

- анодная зона:



- катодная зона:



Поверхность сварного соединения, помещенного в агрессивную среду, можно уподобить совокупности большого количества отдельных гальванических пар, замкнутых накоротко.

Различие в химическом составе, структуре и напряженном состоянии отдельных зон обуславливает высокую степень электро-

химической неоднородности поверхности сварных соединений, что в условиях агрессивной среды может явиться причиной ускорения процессов разрушения. Так как сварные соединения являются сложной неоднородной системой, характеризующейся наличием зон металла с различной стойкостью к разрушениям в агрессивных средах, то, очевидно, зная электрохимические характеристики поверхности, можно определить наименее стойкую к коррозии зону соединения.

При погружении сварного соединения в электролит в результате взаимодействия поверхности металла с раствором возникает разность электрических потенциалов, которую называют электродным потенциалом. Электродный потенциал ϕ позволяет судить о термодинамической устойчивости металла в данном электролите, степени пассивного состояния поверхности, зависимости коррозионной стойкости соединения от свойств среды и др.

Электродный потенциал любого отдельного i -го участка сварного соединения может быть представлен в виде функционала:

$$\phi_i = F[f_1(\Phi_{\text{ВНЕШ}}); f_2(\Phi_{\text{ВНУТР}})]$$

где $\Phi_{\text{ВНЕШ}} = \sum_{i=1}^n k_i \cdot \Phi_i$; $\Phi_{\text{ВНУТР}} = \sum_{j=1}^n k_j \cdot \Phi_j$ — функциональные зависимости, характеризующие суммарное влияние на электродный потенциал ϕ соответственно внешних и внутренних факторов.

Достаточно четкое представление об ожидаемом поведении сварных соединений в заданных эксплуатационных условиях можно получить, используя электрохимические методы исследования коррозии. Они сводятся к нахождению электродных потенциалов участков соединений. В связи с наличием различного вида неоднородностей (металла, поверхности, напряженного состояния и др.), вызванных воздействием процесса сварки, соединения характеризуются повышенной по сравнению с основным металлом электрохимической неоднородностью; при этом возможны различные соотношения между электродными потенциалами различных зон и, следовательно, различная стойкость против коррозионных разрушений.

Для определения величины местного электродного потенциала на электрохимически неоднородной поверхности соединения применяют капельный метод определения электродных потенциалов. Измеренные капельным методом потенциалы различных участков

сварного соединения позволяют выделить анодные участки и определить тем самым ожидаемые зоны разрушения.

Капля раствора диаметром от 1 до 3 мм наносится на исследуемый участок поверхности, и после выдержки ее до установления более или менее стабильного значения потенциала производится его измерение в соответствии со схемой, приведенной на рис. 7.48. Время выдержки капли коррозионного раствора до установления стабильных значений определяется опытным путем. Например, установлено, что для алюминиевых сплавов оптимальное время выдержки капли 3 %-го водного раствора NaCl составляет 10...15 мин, а для сталей – 15...20 мин. С целью сопоставления полученных результатов для соединений одной и той же группы сплавов время выдержки под каплей раствора должно быть одно и то же. При измерениях электродных потенциалов в качестве электрохимического щупа, с помощью которого сканируют поверхность сварного соединения, широко используют хлорсеребряный электрод, обладающий постоянным и хорошо воспроизводимым потенциалом. При измерениях хлорсеребряный электрод помещают в специальный стакан и с помощью манипулятора помещают носик электрода относительно поверхности образца (рис. 7.49).

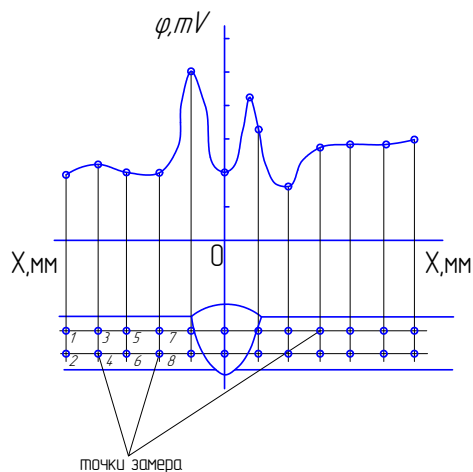


Рис. 7.48. Схема измерения электродных потенциалов

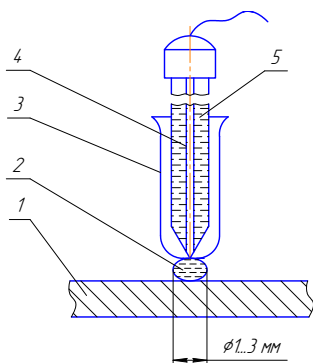


Рис. 7.49. Схема электрохимического шупа:
 1 – образец; 2 – капля раствора; 3 – стакан; 4 – электрод хлорсеребряный;
 5 – 3 %-ный раствор NaCl

Указания к выполнению работы

1. Ознакомьтесь с конструкцией и особенностями работы установки для измерения электродных потенциалов (рис. 7.50).

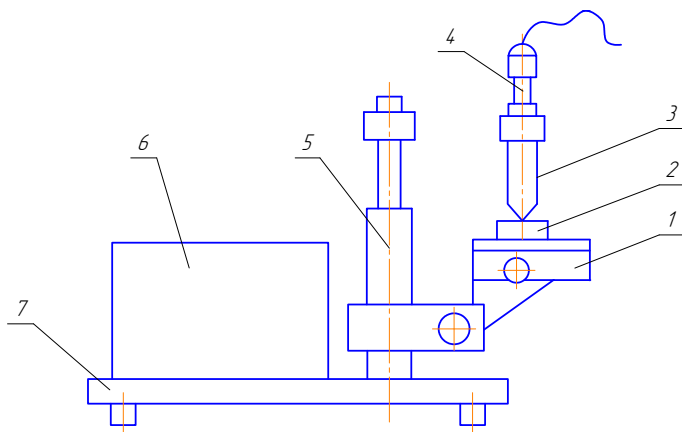


Рис. 7.50. Схема установки для измерения электродных потенциалов: 1 – манипулятор; 2 – образец; 3 – стакан; 4 – электрод хлорсеребряный; 5 – стойка; 6 – вольтметр универсальный В7-15; 7 – станина

2. Ознакомиться с устройством, органами управления и работой вольтметра универсального В7-15 (см. текст после п. 15 настоящих указаний).
3. Подготовить прибор к измерениям (см. там же).
4. Ознакомиться с особенностями образца и определить характерные зоны соединения.
5. Поставить образец на столик установки.
6. Подвести кончик хлорсеребряного электрода к исследуемой зоне соединения и осуществить контакт электрода с поверхностью образца (рис. 7.49).
7. После выдержки участка поверхности под каплей раствора в течение 3 мин произвести отсчет показаний по шкале стрелочного индикатора вольтметра.
8. Занести результат измерения в таблицу (ее составляет студент).
9. Поднять хлорсеребряный электрод при помощи манипулятора.
10. Осушить поверхность измерения фильтровальной бумагой.
11. Определить следующую зону измерения и повторить п. 6...10.
12. Построить эпюры распределения электродных потенциалов в характерных зонах соединения (рис. 7.48).
13. Определить зоны соединения, наименее стойкие в коррозионных средах, объяснить причины возникновения этих зон.
14. Оформить отчет в соответствии с требованиями.
15. Привести в порядок рабочее место.

Краткое техническое описание вольтметра универсального В7-15

Вольтметр универсальный В7-15 предназначен для измерения напряжения постоянного тока.

Отсчет измеряемого напряжения производится непосредственно по стрелочному прибору, шкала которого проградуирована в вольтах.

Техническая характеристика:

- диапазон измеряемых напряжений постоянного тока при измерении через входные клеммы — от 0,03 до 1000 В на пределах 0,3; 1; 3; 10; 30; 100; 300 и 1000 В;
- питание от сети переменного тока напряжением 220 ± 20 В, частота $50 \pm 0,5$ Гц;

- основная погрешность при измерении напряжения постоянного тока (погрешность в нормальных условиях) не превышает $\pm 2,5\%$;
- активное входное сопротивление вольтметра при измерении напряжения постоянного тока до 1000 В не менее 15 МОм;
- мощность, потребляемая прибором от сети, не превышает 25 Вт;
- прибор обеспечивает нормальную работу через 15 минут после включения и сохраняет свои параметры в течение 24 часов непрерывной работы.

Конструкция прибора

Выполнен в виде настольного переносного прибора.

На передней панели прибора расположены измерительный стрелочный прибор, кнопки переключателя рода работ, ручка переключателя пределов измерения, входные клеммы, клемма заземления, гнездо для пробника, держатель предохранителя, сигнальная лампа, кабель питания, потенциометр под шлиц (закрыт заглушкой) для предварительной установки электрического нуля при измерении напряжения постоянного тока, ручки потенциометров установки электрического нуля при измерениях.

Проведение измерений

Для подготовки прибора к работе при необходимости установить механический нуль стрелочного прибора.

На кнопочном переключателе нажать кнопку переключателя рода работ (включение прибора). О включении свидетельствует свечение сигнальной лампы.

После прогрева прибора сбалансировать усилитель постоянного тока, для чего переключатель пределов измерения поставить в положение «0,3 V», нажать кнопку «U⁺» или «U⁻» в соответствии с полярностью измеряемого напряжения и при закороченных входных клеммах «0,3–10 V» ручкой «O» установить стрелку микроамперметра на нулевую отметку шкалы « $\cong V$ », после чего прибор готов к измерению.

Содержание отчета

1. Цель лабораторной работы.
2. Программа работы.
3. Описание установки для проведения исследований, краткая техническая характеристика блока измерений.

4. Особенности методики и результаты исследований.

5. Выводы.

При описании методики и результатов исследований необходимо приводить рисунки и таблицы опытных данных.

Вопросы для самоконтроля

1. Схема процесса электрической коррозии соединений.
2. Что такое «электродный потенциал»?
3. Характерные зоны сварного соединения.

Лабораторная работа 7.12

Определение влияния внешних растягивающих напряжений на коррозионную активность поверхности паяных соединений

Цель работы – приобретение навыков экспериментального определения электродных потенциалов поверхности паяных соединений, углубление теоретических знаний об особенностях коррозии различных типов соединений.

Особенности электрохимической коррозии металлических материалов

Как показано Г.В. Акимовым, скорость коррозии (сила тока коррозионного элемента) определяется по формуле

$$I = \frac{\varphi_K - \varphi_A}{R} = \frac{\Delta\varphi}{R},$$

где φ_A – потенциал анода при отсутствии тока; φ_K – потенциал катода при отсутствии тока; R – общее сопротивление процесса разрушения.

Величина числителя в этом уравнении является характеристикой термодинамической нестабильности данного коррозионного элемента (паяного соединения) и определяется видом неоднородностей этого элемента.

Роль растягивающих напряжений сводится прежде всего к созданию между отдельными микроучастками поверхности металла разности потенциалов $\Delta\varphi$, способствующих образованию коррозионных элементов «катод – анод». Эту разность потенциалов $\Delta\varphi$

можно рассматривать как электрохимический показатель склонности металлических материалов и соединений к коррозионному разрушению. Образование разности потенциалов при приложении растягивающих напряжений может происходить за счет выпадения новой фазы, разрушения защитной пленки и др. Некоторые исследователи считают, что смещение электродного потенциала φ в отрицательную сторону при приложении растягивающих напряжений связано с увеличением свободной энергии металла.

Н.Д. Томашов отмечает, что наличие в металле механических напряжений (внешних или внутренних) приводит к изменению электрохимических характеристик (в том числе электродного потенциала φ) и скорости коррозии.

Ряд исследователей считает, что растягивающие напряжения способствуют смещению электродного потенциала φ в отрицательную сторону. С течением времени потенциал напряженного металла становится более отрицательным, чем ненапряженного, причем с увеличением растягивающих напряжений (не превышающих предела текучести $\sigma_{0,2}$ материала) смещение φ в отрицательную сторону увеличивается.

В ряде работ отмечается, что растягивающие напряжения оказывают незначительное влияние на интенсивность коррозии.

По данным Э.М. Гутмана, изменение равновесного электродного потенциала при приложении механических напряжений зависит от абсолютной величины гидростатической части тензора напряжений (сжатия или растяжения):

$$\Delta\varphi_0 = -\frac{\Delta P \cdot V_A}{n \cdot F} = \frac{\Delta\mu}{n \cdot F}, \quad (7.43)$$

где $\Delta\varphi_0$ — изменение стандартного электродного потенциала; V_A — объем грамм-атома металла; n — валентность металла; F — число Фарадея; ΔP — избыточное гидростатическое давление; $\Delta\mu$ — изменение химического потенциала.

В соответствии с уравнением (7.43) смещение электродного потенциала в отрицательную сторону и, следовательно, облегчение процесса коррозионного разрушения связаны с увеличением химического потенциала. В области упругой деформации химический потенциал атомов металла увеличивается при приложении растяги-

вающих и сжимающих напряжений. Отсюда следует, что скорость коррозии металла (и паяных соединений) также должна увеличиваться при приложении механических напряжений.

Технологически наиболее простым является способ, при котором контакт металла с электролитом обеспечивается через каплю электролита. Так как капля покрывает множество зерен металла, их границ, различных включений, дефектов кристаллической решетки и т. п., то измеренная величина электродного потенциала ϕ оказывается усредненной, относящейся к макроскопическому участку, соответствующему размеру капли. Обычно диаметр капли электролита рекомендуют выдерживать в пределах от 1 до 3 мм.

Капельный метод особенно удобен в тех случаях, когда необходимо определить величину местного стационарного потенциала ϕ на электрохимически неоднородной поверхности. Капля электролита наносится на исследуемый участок поверхности и после выдержки до установления более или менее стабильного значения потенциала производится его измерение ϕ . Время выдержки капли коррозионного раствора до установления стабильных значений потенциалов определяется опытным путем. Не следует излишне увеличивать это время, так как происходит испарение воды и в связи с этим изменение концентрации электролита.

Электродный потенциал любого i -го участка соединения может быть представлен в виде функционала:

$$\phi_i = F[f_1(\Phi_{\text{ВНЕШ}}); f_2(\Phi_{\text{ВНУТР}})]$$

где $\Phi_{\text{ВНЕШ}} = \sum_{i=1}^n k_i \cdot \Phi_i$; $\Phi_{\text{ВНУТР}} = \sum_{i=1}^n k_i \cdot \Phi_i$ — функциональные зависимости, характеризующие суммарное влияние на электродный потенциал ϕ соответственно внешних и внутренних факторов.

Для создания растягивающих напряжений при испытаниях на изгиб нагрузка прикладывается в двух точках на одинаковом расстоянии от опор (рис. 7.51).

Такая схема «чистого изгиба» во многих случаях обеспечивает достаточно надежные результаты, поскольку максимальный изгибающий момент в этом случае возникает на определенном участке длины образца, а не в одном сечении.

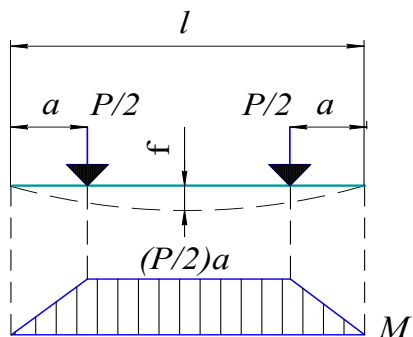


Рис. 7.51. Схема нагружения образца

В широких образцах (с отношением ширины к высоте сечения более трех) создается двухосное напряженное состояние из-за затруднения поперечной деформации. Нижняя часть образца оказывается растянутой, верхняя – сжатой. Максимальные напряжения возникают вблизи поверхности.

При работе металла в упругой стадии можно вычислить возникающие в нем напряжения и деформации по обычным формулам сопротивления материалов. Для определения нормальных напряжений в крайних точках сечения пользуются формулой:

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{M}{W_{\text{и}}},$$

где $\sigma_{\text{и}}$ – нормальные напряжения от изгиба в точке, наиболее удаленной от центральной оси сечения; $W_{\text{и}}$ – момент сопротивления сечения; для прямоугольного сечения:

$$W_{\text{и}} = \frac{a \cdot h^2}{6},$$

где a – ширина, h – высота сечения образца.

Стрела прогиба f (рис. 7.51) связана с относительным удлинением δ крайнего растянутого волокна в изогнутом образце зависимостью:

$$f = \frac{l^2 \cdot \delta}{b \cdot h}. \quad (7.44)$$

На образцах в специальной скобе (рис. 7.52) можно создавать различные уровни напряжений, изменяя стрелу прогиба. Применение вкладыша позволяет создать более равномерное распределение

напряжений по рабочей длине образца. В этом случае нагрузка прикладывается к образцу в двух точках.

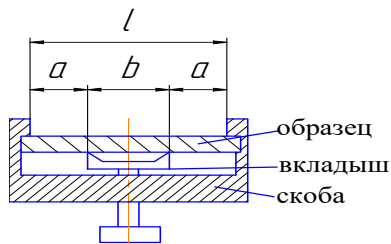


Рис. 7.52. Скоба нагружающая

Стрелу прогиба определяют экспериментально при помощи измерительной головки часового типа или расчетом:

$$f = \frac{\sigma_s^1 \cdot (l + 2b) \cdot a}{3E \cdot s}, \quad (7.45)$$

где E – модуль упругости; b – расстояние между внутренними опорами; $a = (l - b)/2$; l – расстояние между внешними точками опоры; $a = \frac{(l - b)}{2}$; $\sigma_s^1 = \frac{3}{2} \delta_s \left(1 - \frac{1}{3} a^2\right)$; $a = \frac{\sigma_s}{\sigma_s + \delta_s}$; $\delta_s = 0,002$; σ_s – предел текучести; s – толщина образца.

При нагружении по схеме чистого изгиба упругие растягивающие напряжения образца прямоугольного сечения рассчитывают по формуле

$$\sigma = \frac{3 \cdot E \cdot h \cdot f}{(l + 2b) \cdot a}. \quad (7.46)$$

Рабочие напряжения рассчитывают как часть предела текучести при изгибе σ_s^1 (0,90; 0,75; 0,50 и т. д.).

Указания к выполнению работы

1. Изучить конструкцию и особенности работы установки для измерения электродных потенциалов (рис. 7.53).
2. Ознакомиться с устройством, органами управления и работой вольтметра универсального В7-15.
3. Подготовить измерительный прибор.

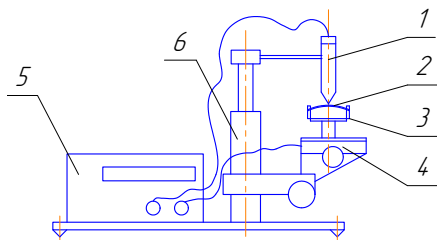


Рис. 7.53. Схема установки для измерения электродных потенциалов:
 1 – электрод хлорсеребряный; 2 – образец; 3 – скоба; 4 – манипулятор;
 5 – прибор измерительный; 6 – стойка

4. Подготовить поверхность изучаемого образца к проведению исследований.

5. Определить геометрические характеристики образца (рис. 7.54).
 Материал образца – сплав МНЖМц 30-0,8-1 (табл. 7.12).

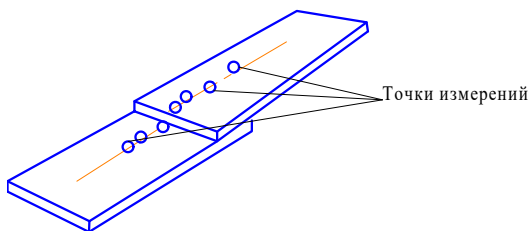


Рис. 7.54. Образец для испытаний

Таблица 7.12

Химический состав (в %) и механические свойства (в отожженном состоянии) медно-никелевого сплава МНЖМц 30-0,8-1

Ni	Fe	Mn	Cu	σ_{B^*} , кг/мм ²	$\sigma_{0,2^*}$, кг/мм ²	δ , %	$E \cdot 10^{-3}$, кг/см ² (20 °C)
29...33	0,6...1,0	0,8...1,3	ост.	35	14	38	1270

6. Поместить образец в нагружающее устройство (рис. 7.55).

7. Поместить нагружающее устройство с образцом на столик установки (рис. 7.55).

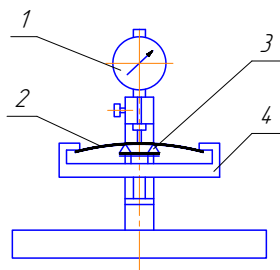


Рис. 7.55. Нагружающее устройство: 1 – головка измерительная часового типа; 2 – образец; 3 – вкладыш; 4 – скоба

8. Подвести хлорсеребряный электрод к исследуемой зоне соединения и осуществить контакт электрода с поверхностью образца (рис. 7.56).

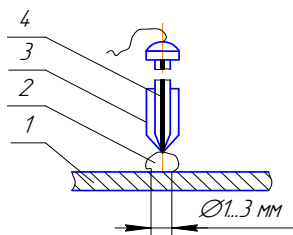


Рис. 7.56. Схема измерительного электрода: 1 – образец; 2 – капля раствора; 3 – чехол защитный; 4 – электрод хлорсеребряный

9. Определить время установления стационарного значения электродного потенциала φ ; представить результаты измерений в координатах $\varphi-t$ (t – продолжительность измерений) (рис. 7.57). Количество измерений не менее пяти.

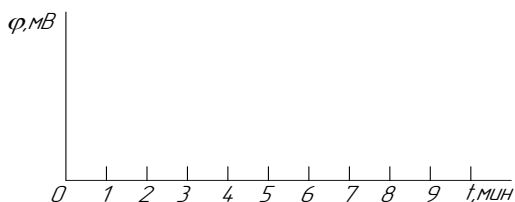


Рис. 7.57. Продолжительность установления стационарного электродного потенциала

10. Поднять измерительный электрод с помощью манипулятора (рис. 7.53).

11. Осушить поверхность измерения фильтровальной бумагой.

12. Снять нагружающее устройство со столика измерительной установки.

13. Используя зависимости (7.45) и (7.46), определить величину прогиба f образца, соответствующую механическим растягивающим напряжениям величиной $0,7$ от предела текучести материала образца.

14. С учетом п. 13 создать в поверхностных объемах образца механические напряжения при помощи нагружающего устройства (рис. 7.55).

15. Поместить нагружающее устройство с образцом на столик измерительной установки.

16. Определить величины электродного потенциала φ в соответствующих характерных зонах образца (рис. 7.54) (продолжительность измерения выбирать с учетом предварительно полученных результатов (п. 9 и рис. 7.57)).

17. Результаты измерений представить в виде таблицы (ее составляет студент).

18. Снять нагружающее устройство со столика измерительной установки.

19. Очистить поверхность образца от загрязнений.

20. Создать в поверхностных слоях образца растягивающие напряжения величиной $1,2$ от предела текучести материала образца.

21. Повторить пункты 15...19 программы работ.

22. Разгрузить образец в нагружающем устройстве и снять его с приспособления.

23. Привести в порядок рабочее место.

24. Построить эпюры распределения электродных потенциалов в характерных зонах соединения при различных уровнях механических напряжений $\sigma = 0$; $\sigma = 0,7\sigma_s^1$ и $1,2\sigma_s^1$ (σ_s^1 – предел текучести при изгибе материала образца).

25. Определить зоны соединения, наименее стойкие в коррозионных средах; объяснить причины возникновения этих зон.

26. Оформить отчет в соответствии с требованиями.

Содержание отчета

1. Цель лабораторной работы.
2. Программа работы.
3. Описание установки для проведения исследований, краткая техническая характеристика блока измерений.
4. Особенности методики и результаты исследований.
5. Выводы.

При описании методики и результатов исследований необходимо приводить рисунки и таблицы опытных данных.

Вопросы для самоконтроля

1. Особенности процесса электрохимической коррозии соединений.
2. Что такое «электродный потенциал»?
3. Характерные зоны паяного соединения.

Рекомендуемая литература

1. Николаев, Г.А. Сварные конструкции / Г.А. Николаев. – М. : Машгиз, 1962.
2. Окерблом, Н.О. Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций / Н.О. Окерблом. – М.–Л. : Машгиз, 1964.
3. Майзель, В.С. Сварные конструкции / В.С. Майзель, Д.И. Навроцкий. – М.–Л. : Машиностроение, 1965.
4. Николаев, Г.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций : учеб. пособие / Г.А. Николаев, С.А. Куркин, В.А. Винокуров. – М. : Высшая школа, 1982.
5. Винокуров, В.А. Сварочные деформации и напряжения / В.А. Винокуров. – М. : Машиностроение, 1968.
6. Окерблом, Н.О. Сварочные деформации и напряжения / Н.О. Окерблом. – М.–Л. : Машгиз, 1948.
7. Трочун, И.П. Внутренние усилия и деформации при сварке / И.П. Трочун. – М. : Машгиз, 1964.
8. Николаев, Г.А. Расчет и проектирование сварных конструкций / Г.А. Николаев, С.А. Куркин, В.А. Винокуров. – М. : Высшая школа, 1971.

9. Майзель, В.С. Сварные конструкции / В.С. Майзель, Д.И. Навроцкий. — М.—Л. : Машиностроение, 1973.
10. Лессиг, Е.Н. Листовые металлические конструкции / Е.Н. Лессиг, А.Ф. Лилеев, А.Г. Соколов. — М. : Стройиздат, 1970.
11. Николаев, Г.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций : учеб. пособие / Г.А. Николаев, С.А. Куркин, В.А. Винокуров. — М. : Высшая школа, 1962.
12. Жуковец, И.И. Механические испытания металлов : учеб. пособие / И.И. Жуковец. — М. : Высшая школа, 1986.
13. Скорчеллетти, В.В. Теоретические основы коррозии металлов / В.В. Скорчеллетти. — Л. : Химия, 1973.
14. Стеклов, О.И. Прочность сварных конструкций в агрессивных средах / О.И. Стеклов. — М. : Машиностроение, 1976.
15. Зайдель, А.Н. Ошибки измерения физических величин / А.Н. Зайдель. — Л. : Наука, 1974.
16. Жук, Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов / Н.П. Жук. — М. : Metallurgia, 1976.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет
Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением
и родственные процессы»

ОТЧЕТ
о лабораторной работе

Студент: Иванов И.И.
Группа: МСбд-1201
Преподаватель: Моторин К.В.

Тольятти 2016

**Программа в среде Mathcad
для выполнения лабораторной работы 1.6**

Задача 1. Определить распределение 2-х источников тепла

Исходные данные

(коэффициенты указывают № источника)

Эффективная мощность дуги, Вт

$$q := 1500$$

Диаметр пятна нагрева, см

$$D1 := 0,5$$

$$D2 := 2$$

Рассчитаем

Коэффициент сосредоточенности дуги, см⁻²:

$$K1 := \frac{3,46}{\sqrt{D1}}$$

$$K2 := \frac{3,46}{\sqrt{D2}}$$

$$K1 = 4,893$$

$$K2 = 2,447$$

Нормальное распределение поверхностного источника теплоты:

$$q1(r) := q \cdot e^{-K1 \cdot r^2}$$

$$q2(r) := q \cdot e^{-K2 \cdot r^2}$$

Границы построения графика, см

$$r := -1, -0,95 \dots 1$$

Задача 2. Определить влияние гипотезы постоянства осевого теплового потока

Рассчитаем максимальный тепловой поток для 1-го источника:

$$q_0 := q \cdot \frac{K1}{\pi}$$

$$q_0 = 2,336 \cdot 10^3$$

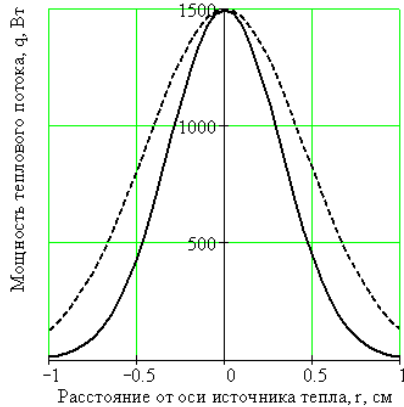


Рис. 1. Распределение мощности от оси источника тепла для различных коэффициентов сосредоточенности:
 — — Источник 1;
 - - - - - Источник 2

Установим значение мощности источника тепла, Вт

$$q := 630$$

Источник 1 – без влияния гипотезы постоянства осевого теплового потока.

Источник 2 – при влиянии гипотезы.

При изменении мощности источника тепла рассчитаем значение сосредоточенности второго источника:

$$K2 := q_0 \cdot \frac{\pi}{q}$$

$$K2 = 11,65$$

$$D2 := \frac{3,46^2}{K2^2}$$

$$D2 = 0,088$$

$$q1(r) := q \cdot e^{-K1 \cdot r^2}$$

$$q2(r) := q \cdot e^{-K2 \cdot r^2}$$

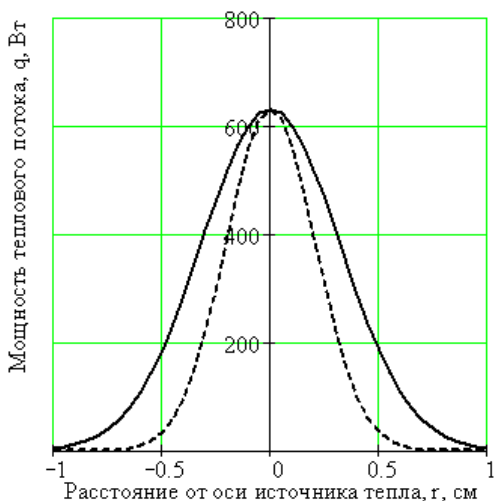


Рис. 2. Распределение мощности при удалении от оси источника тепла:

— — Источник 1; ---- — Источник 2

1 — при постоянстве коэффициента распределения;

2 — при постоянстве сосредоточенности

Продолжение программы в среде Mathcad для выполнения лабораторной работы 1.7.

Исходные данные

Толщина металла, см

$$\delta := 0,2$$

Теплофизические свойства металла

Алюминий

– температуропроводность

– объемная теплоемкость

– температура плавления

$$a := 0,5$$

$$c\gamma := 2,7$$

$$TP := 660$$

Сталь

– температуропроводность

– объемная теплоемкость

– температура плавления

$$a := 0,08$$

$$c\gamma := 5,23$$

$$TP := 1450$$

Скорость сварки, см/с

$$V := 0,3$$

Сосредоточенность дуги, с

$$t_0 := \frac{1}{4 \cdot a \cdot K^2}$$

$$t_0 = 0,268$$

Задача 1. Определить размеры сварочной ванны в продольном сечении металла

Задайте время от начала сварки, с

$$t := 17$$

Границы построения графика

$$x := -0,1, -0,09...0,55$$

```

Z2(s) := for x ∈ s
  y ← 0
  k ←  $\frac{2 \cdot q}{c \gamma \cdot (4 \cdot \pi \cdot a)^{1.5}}$ 
  z ←  $\frac{\delta}{2}$ 
  dz ←  $\frac{\delta}{4}$ 
  while dz > 0.001
    T ← k ·  $\sum_{n=-15}^{15} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t \cdot (t_0 + t)}} \cdot e^{-\left[ \frac{(z-2 \cdot n \cdot \delta)^2}{4 \cdot a \cdot t} + \frac{[x-v \cdot (t_0+t)]^2 + y^2}{4a \cdot (t_0+t)} \right]} dt$ 
    z ← z + dz if T > TP
    z ← z - dz if T < TP
    dz ←  $\frac{dz}{2}$ 
  z

```

Рис. 3. Алгоритм расчета продольного сечения сварочной ванны

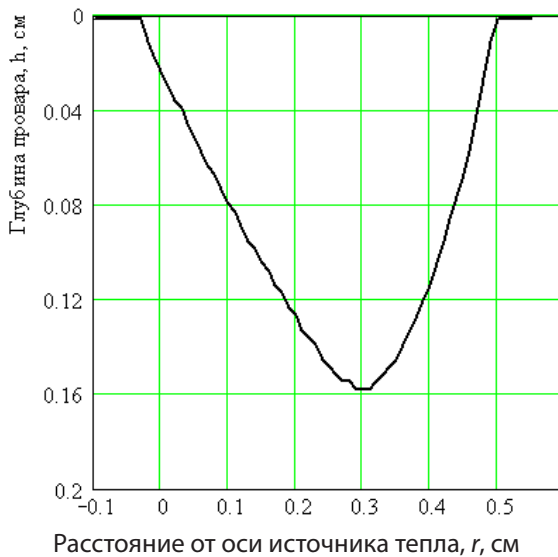


Рис. 4. Глубина проплавления в продольном сечении по оси шва

Задача 3. Определить время нарастания глубины проплавления и постоянную времени

```

X(t) := | dq ← 8
        | k ←  $\frac{2 \cdot q}{c_{\gamma} \cdot (4 \cdot \pi \cdot a)^{1.5}}$ 
        | for t ∈ t
        |   | y ← 0
        |   | while dq > 5
        |   |   | z1 ← 0
        |   |   | for x ∈ 0.2, 0.22 .. 0.4
        |   |   |   | z ←  $\frac{\delta}{2}$ 
        |   |   |   | dz ←  $\frac{\delta}{4}$ 
        |   |   |   | while dz > 0.0001
        |   |   |   |   | T ← k ·  $\sum_{n=-15}^{15} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t \cdot (t_0 + t)}} \cdot e^{-\left[ \frac{(z-2 \cdot n \cdot \delta)^2}{4 \cdot a \cdot t} + \frac{[x-v \cdot (t_0+t)]^2 + y^2}{4a \cdot (t_0+t)} \right]} dt$ 
        |   |   |   |   | z ← z + dz if T > TP
        |   |   |   |   | z ← z - dz if T < TP
        |   |   |   |   | dz ←  $\frac{dz}{2}$ 
        |   |   |   |   | break if z < z1
        |   |   |   |   | z1 ← z if z > z1
        |   |   |   | dq ←  $\frac{dq}{2}$ 
        |   |   | 1
        |   | z1
    
```

Рис. 7. Алгоритм расчета изменения глубины сварочной ванны

Параметры построения графика

$t := 0, 0,2 \dots 20$

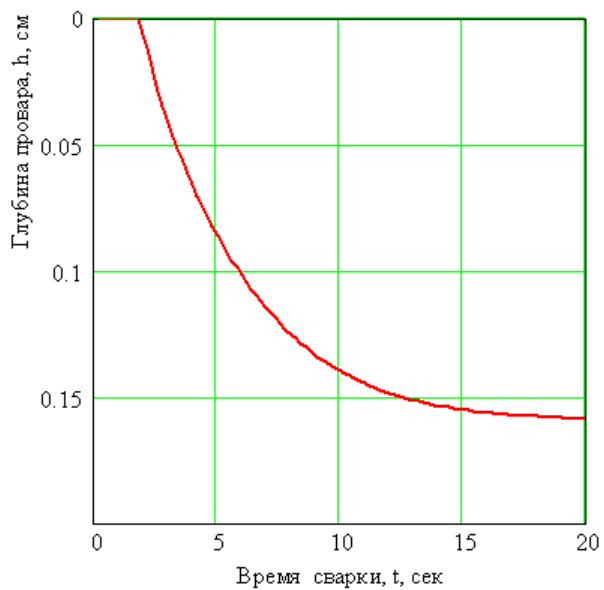


Рис. 8. Изменение глубины проплавления в функции времени

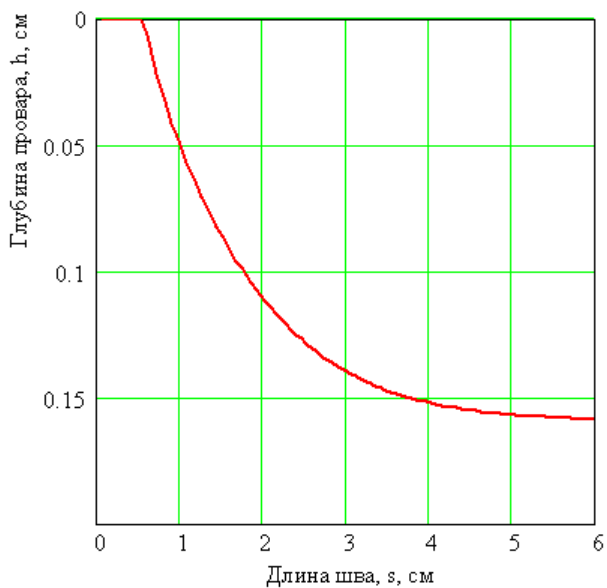


Рис. 9. Изменение глубины проплавления в функции расстояния

Продолжение программы в среде Mathcad для выполнения лабораторной работы 5.7.

Задача 1. Выявить влияние изменения мощности сварочного источника на изменение геометрических размеров сварочной ванны во времени.

```

Z(t) := y ← 0
k ←  $\frac{2 \cdot q}{c\gamma \cdot (4 \cdot \pi \cdot a)^{1.5}}$ 
k1 ←  $\frac{2 \cdot q \cdot \frac{PR}{100}}{c\gamma \cdot (4 \cdot \pi \cdot a)^{1.5}}$ 
for t ∈ t
  z1 ← 0
  P ← 0
  P1 ← 0
  for x ∈ 0.2, 0.22 .. 0.42
    z ←  $\frac{\delta}{2}$ 
    dz ←  $\frac{\delta}{4}$ 
    while dz > 0.0001
      T ← k ·  $\sum_{n=-15}^{15} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t \cdot (t_0 + t)}} \cdot e^{-\left[ \frac{(z-2 \cdot n \cdot \delta)^2}{4 \cdot a \cdot t} + \frac{[x-v \cdot (t_0+t)]^2 + y^2}{4a \cdot (t_0+t)} \right]} dt$ 
      p ← t - t1
      P ← k1 ·  $\sum_{n=-15}^{15} \int_0^p \frac{1}{\sqrt{p \cdot (t_0 + p)}} \cdot e^{-\left[ \frac{(z-2 \cdot n \cdot \delta)^2}{4 \cdot a \cdot p} + \frac{[x-v \cdot (t_0+p)]^2 + y^2}{4a \cdot (t_0+p)} \right]} dp$  if p ≥ 0
      T ← T + P
      z ← z + dz if T > TP
      z ← z - dz if T < TP
      dz ←  $\frac{dz}{2}$ 
    break if z < z1
  z1 ← z if z > z1
z1

```

Рис. 10. Алгоритм расчета изменения глубины сварочной ванны

Задайте величину и знак возмущения в %

$PR := -5$

Время начала возмущения

$t1 := 40$

Параметры построения графика

$t := 35,1, 36...50$

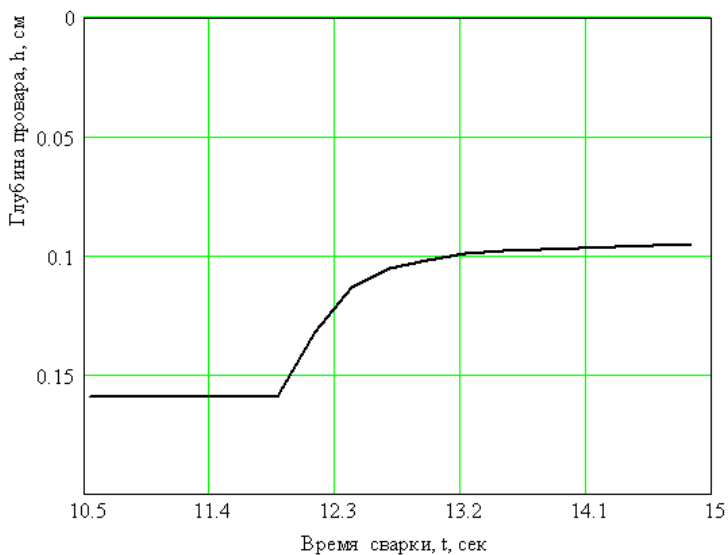


Рис. 11. Глубина проплавления при изменении мощности источника тепла

Задача 2. Выявить влияние изменения скорости сварки на изменение геометрических размеров сварочной ванны во времени.

Задайте величину и знак возмущения в %

$PR := 5$

Параметры построения графика

$t := 39, 39,225...55$

```

X1(t) := dq ← 8
k ←  $\frac{2 \cdot q}{c_{\gamma} \cdot (4 \cdot \pi \cdot a)^{1.5}}$ 
v1 ←  $v \cdot \left(1 + \frac{PR}{100}\right)$ 
for t ∈ t
  y ← 0
  while dq > 5
    z1 ← 0
    for x ∈ 0.2, 0.22.. 0.4
      z ←  $\frac{\delta}{2}$ 
      dz ←  $\frac{\delta}{4}$ 
      while dz > 0.0001
        T ←  $k \cdot \sum_{n=-15}^{15} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t \cdot (t_0 + t)}} \cdot e^{-\left[\frac{(z-2 \cdot n \cdot \delta)^2}{4 \cdot a \cdot t} + \frac{[x-v \cdot (t_0+t)]^2 + y^2}{4a \cdot (t_0+t)}\right]} dt$ 
        p ← t - t1
        P ←  $k \cdot \sum_{n=-15}^{15} \int_0^p \frac{1}{\sqrt{p \cdot (t_0 + p)}} \cdot e^{-\left[\frac{(z-2 \cdot n \cdot \delta)^2}{4 \cdot a \cdot p} + \frac{[x-v1 \cdot (t_0+p)]^2 + y^2}{4a \cdot (t_0+p)}\right]} dp$  if p ≥ 0
        P1 ←  $-k \cdot \sum_{n=-15}^{15} \int_0^p \frac{1}{\sqrt{p \cdot (t_0 + p)}} \cdot e^{-\left[\frac{(z-2 \cdot n \cdot \delta)^2}{4 \cdot a \cdot p} + \frac{[x-v \cdot (t_0+p)]^2 + y^2}{4a \cdot (t_0+p)}\right]} dp$  if p ≥ 0
        T ← T + P + P1
        z ← z + dz if T > TP
        z ← z - dz if T < TP
        dz ←  $\frac{dz}{2}$ 
      break if z < z1
      z1 ← z if z > z1
    dq ←  $\frac{dq}{2}$ 
  1
z1

```

Рис. 12. Алгоритм расчета изменения глубины сварочной ванны

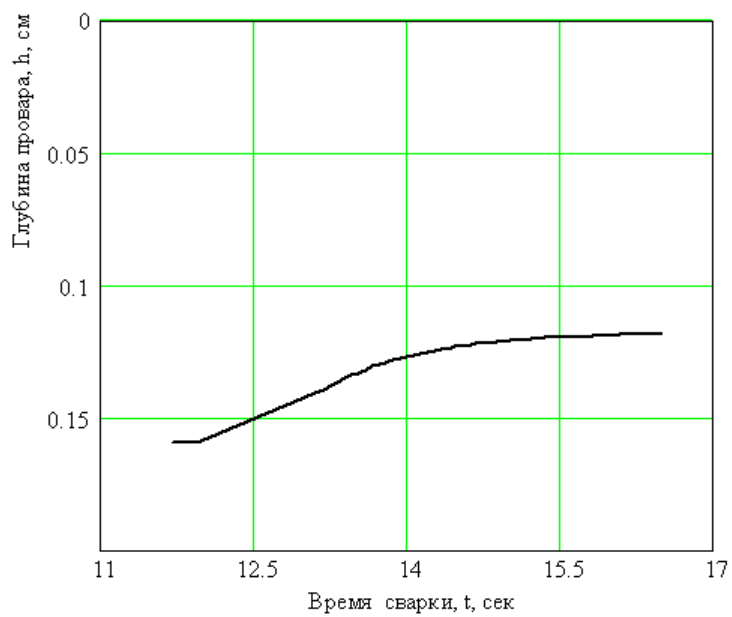


Рис. 13. Глубина проплавления при изменении скорости сварки