

1570682

На правах рукописи

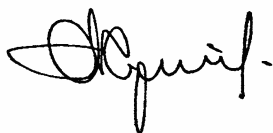
УДК 621.791.762

ЖУЧКОВ Игорь Иванович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ
КОНТАКТНОЙ КОНДЕНСАТОРНОЙ СВАРКИ ВОЛЬФРАМА СО
СТАЛЬЮ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПЕЧАТАЮЩИХ ИГЛ**

Специальность 05.03.06 – Технологии и машины сварочного
производства

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва - 2001 г.

КФ МЗТУ

Работа выполнена в филиале Московского Государственного технического университета им. Н.Э. Баумана в г. Калуге

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Г.Ф. КОНДАКОВ

Официальные оппоненты : доктор технических наук, профессор
В.М.ЯМПОЛЬСКИЙ

кандидат технических наук, доцент
А.П. ИСАЕВ

Ведущее предприятие - АО «Восход»- КРЛЗ

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1570682

Жучков И.И. Разработка тех

Защита состоится « 12 » апреля 2001г. на заседании
диссертационного Совета Д 212.141.01 в Московском государственном
техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу -
107005, г.Москва

Ваш от
сим высь

изации, про-

С диссерт
тел. 267-01

Н.Э.Баумана

Авторефер

157068

Ученый се
диссертаци
Д 212.141.
к.т.н. , доц

КОНОВАЛОВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Актуальность работы На современном этапе научно-технической революции наблюдается устойчивая тенденция к широкому внедрению в различных сферах деятельности вычислительной техники, а также увеличению скорости регистрации и передачи различных данных. Одной из разновидностей устройств, обеспечивающих такую регистрацию, являются мозаичные (матричные) печатающие устройства (ПУ). Печатающим органом такого ПУ является мозаичная печатающая головка (МПГ), в состав которой входят иглы, перемещающиеся в соответствующих направляющих при помощи электромагнитов и якорей, смонтированных в одном корпусе. Общим недостатком известных конструкций игл, изготавливаемых из различных марок сталей, является низкая износостойкость их боковых поверхностей, негативно влияющая на качество печати. Анализ аналогичных зарубежных конструкций игл показал, что в качестве материала игл часто используется вольфрамовая проволока. Однако информация о технологии их производства и марках применяемых материалов отсутствует. Учитывая все это, поставлена задача - повысить ресурс работы МПГ, разработав такую конструкцию иглы и технологию ее изготовления, которая была бы лишена указанных недостатков и обеспечивала работоспособность печатающей головки на уровне не хуже, чем зарубежные образцы.

С этой целью предложено заменить стальную проволоку, из которой изготавливалась игла, на вольфрамовую. В качестве утолщения для последующей опрессовки пластмассовой головки иглы предложено использовать шар подшипников качения $\varnothing 0,8 \pm 0,005 \text{ мм}$, изготовленный из стали либо ШХ15-ШД ГОСТ 21022-78, либо 110Х18М-ШД ГОСТ 5632-78. Встает вопрос - как соединить металлы, обладающие значительно отличающимися температурами плавления, коэффициентами теплопроводности, теплоемкости и линейного расширения, а также удельной электропроводностью. Анализ литературных источников, в которых затрагивается данная проблема, показал, что информация об этом, сосредоточенная в отдельных технических журналах, не носит фундаментального, обобщающего характера. В этих работах не даются рекомендации по возможному способу решения поставленной задачи, не указываются конкретные значения необходимых параметров режимов сварки и степень их влияния на свойства такого сварного соединения, а приведены лишь общие пожелания и рекомендации.

Поэтому разработка методов и средств получения надежного сварного соединения деталей из указанных материалов, является актуальной задачей и отвечает насущным нуждам современности.

Целью настоящей работы является выявление методов, условий и средств обеспечения высококачественного сварного соединения игл МПГ, изготовленных из вольфрамовой проволоки, с высокоуглеродистыми сталями и внедрение результатов исследований в производство.



Методы исследований. Основные задачи работы решались экспериментальными и расчетным путями. Влияние термомодеформационного цикла сварки на свойства такого соединения, а также механизм его образования, выявлялись с помощью определения механических его характеристик, а также путем металлографического и микрорентгеноспектрального анализов. Магнитной дефектоскопией определялось качество исходной вольфрамовой проволоки. Прочность сварных соединений оценивалась по результатам механических испытаний с определением усилия отрыва и угла загиба свариваемых деталей, а также измерением их микротвердости. Определение электрических параметров процесса производилось с помощью осциллографирования. Для качественной оценки распределения температурных полей в зоне сварки использовано математическое моделирование тепловых процессов с помощью численных методов на ЭВМ.

Научная новизна. Проведенными исследованиями установлено что:

1. наиболее важным условием достижения высоких эксплуатационных свойств сварных соединений вольфрама со сталью является соблюдение таких термомодеформационных воздействий при сварке, при которых в вольфраме отсутствуют или имеют минимальные размеры зоны рекристаллизации, значительно снижающие его прочность. Этого можно достичь применением контактной конденсаторной сварки (ККС);
2. высокий уровень механических свойств при ККС достигается за счет образования диффузионных зон, состоящих из твердых растворов на основе W-Fe-Cr в стали и W-Fe в вольфраме, и отсутствия заметных интерметаллических включений в стыковой области соединяемых металлов, а также хорошей смачиваемости вольфрама выдавленной из зоны стыка расплавленной сталью. При этом, увеличение термомодеформационного воздействия способствует:
 - с одной стороны, улучшению растекания стали по вольфраму и развитию гетеродиффузии этих металлов в стыковой зоне и, как следствие, повышению прочности соединения;
 - с другой стороны, зарождению областей начала и полной первичной рекристаллизации в вольфраме вдали от зоны стыка и, как следствие, значительному снижению общей прочности;
3. тепловая энергия и деформация свариваемых металлов, действуя одновременно, тесно связаны между собой. Поэтому предложено рассматривать их комплексное воздействие на прочность и пластичность соединения, для чего введено понятие термомеханического импульса энергии активации A_{tm} , имеющего размерность (Дж·Н/мм²·с). Определены характер влияния, а также интервал значений A_{tm} , при которых прочность и пластичность соединения наибольшие. Превышение этих значений приводит к рекристаллизации и охрупчиванию вольфрама, а уменьшение - к недостаточному количеству расплавленной и выдавленной из зоны соединения стали и, как следствие, невысокой прочности такого соединения.

Практическая ценность. В результате исследований выявлены условия и пути получения надежного соединения вольфрама с высокоуглеродистыми сталями при помощи ККС. Разработан и внедрен в УНПК «Промит» совместно с НПКП «Маквис» не имеющий аналогов в России технологический процесс изготовления игл МПГ, в котором одной из основных операций является конденсаторная сварка вольфрамовой иглы со стальным шаром, а также спроектировано и изготовлено оборудование для такого соединения и получено свидетельство на его полезную модель. Внедрение разработанной технологии значительно повысило надежность работы МПГ, срок службы которой составил $5 \cdot 10^8$ печатных символов. В настоящее время изготовлено и реализовано потребителю более 3, 6 млн таких игл.

Апробация работы Основные положения работы докладывались на Всероссийских научно-технических конференциях «Социально-экономические проблемы управления производством, создание прогрессивных технологических конструкций и систем в условиях рынка» (г.Калуга, 1995 и 1996гг) и «Первой Российской конференции молодых ученых по математическому моделированию» (г.Москва, 2000г); на региональных «Первые молодежные научные чтения памяти А.И.Чижевского» (Калуга, 1991г.), «Создание прогрессивных технологий конструкций и систем» (г.Калуга, 1998г.) и «Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении» (г.Калуга, 1999г.); на научных семинарах кафедр «Оборудование и технология сварочного производства» КФ МГТУ им.Н.Э.Баумана (Калуга, 1999г.) и «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э.Баумана (Москва, 2000г). Работа рекомендована к защите.

Публикации По теме диссертации опубликовано 13 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения с выводами по работе. Содержит 16 таблиц, 46 рисунков, приложения и 96 наименований использованных литературных источников, изложена на 164 страницах машинописного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определен объект исследований и дано обоснование актуальности работы. Кратко сформулированы основные проблемы и задачи исследований, а также дается общее представление о работе.

Первая глава посвящена объекту исследования, свойствам и особенностям материалов, из которых он изготавливается, анализу известных способов соединения этих металлов, а также постановке цели и задач работы.

В конструкциях, обеспечивающих высокую износостойкость, контактную прочность и формоустойчивость, все чаще находят применение сварные соединения тугоплавких металлов с нержавеющей стали. Вариантом использования такого соединения является игла мозаичной (матричной) печатающей головки (МПГ). При работе в составе МПГ игла подвергается контактному трению боковой поверхностью с несколькими направляющими, в том числе и из рубина, испытывает изгиб при соударении с бумагой и

опорным валом ПУ, а также воспринимает значительные ударные нагрузки со стороны якоря. Частота таких ударов достигает 200 и более в секунду. При этом температура внутри МПГ может достигать до 100°C, а ресурс работы игл, входящих в её состав, должен составлять не менее $2 \cdot 10^8$ печатных символов. Поэтому значительная деформация свариваемых деталей, малая зона соединений, а также наличие выплесков, раковин и других дефектов, снижающих прочностные характеристики такого соединения, являются недопустимым браком.

В качестве материала иглы была выбрана вольфрамовая проволока $\varnothing 0,3 \pm 0,005$ мм марки ВА ГОСТ 19671-78, полученная методом порошковой металлургии. При сварке такой проволоки со сталью необходимо учитывать, что технология ее изготовления предопределяет наличие многочисленных трещин, нарушений сплошности, а также задилов, сколов и заусенцев, которые являются недопустимыми для игл МПГ.

С учетом свойств соединяемых металлов необходимо выбрать наиболее рациональный способ сварки, который бы учитывал не только сами свойства, но и особенности и характер производства игл, а также условия их работы в составе МПГ. Для этого рассмотрим два основных возможных способа сварки: сварку плавлением и сварку в твердой фазе.

При сварке плавлением таких разнородных металлов как вольфрам и сталь возникают затруднения не только вследствие высокой химической активности вольфрама с газами при повышенных температурах, но и чувствительности к примесям внедрения, приводящим к резкому снижению пластичности этого металла. При сварке в зоне контакта вольфрама со сталью, как правило, образуются хрупкие химические соединения и возникают значительные сварочные напряжения, вызванные воздействием термического цикла сварки и резким различием теплофизических и механических свойств соединяемых металлов. Последнее приводит к возникновению значительного количества трещин, которые становятся активными концентраторами тепла, приводящими к локальным перегревам свариваемых деталей и снижению их долговременной прочности. Это является недопустимым для таких изделий, как иглы МПГ, работающие в условиях значительных ударных нагрузок.

Вторым возможным способом соединения вольфрама со сталью является сварка в твердой фазе. Анализ такого соединения, выполненного с помощью диффузионной сварки и осаждением вольфрама из паровой фазы в вакууме, подтвердил их непригодность для производства игл МПГ из-за значительной длительности самого процесса соединения. С учетом этого особого внимания заслуживает контактная сварка, одной из разновидностей которой является контактная конденсаторная сварка.

Одной из особенностей, определяющей характер формирования рассматриваемого соединения и протекающие при этом процессы, является то, что один из свариваемых металлов (вольфрам) при ККС не плавится. При

этом неразъемное сварное соединение образуется за счет межатомных сил сцепления и процессов взаимной диффузии соединяемых металлов. Следовательно, для получения его высокой надежности, важно установить и подробно исследовать такое термдеформационное воздействие, при котором бы эти силы и диффузия были бы достаточными, а также не происходило образование заметных интерметаллидов и рекристаллизации вольфрама, существенно снижающих прочность такого соединения. Таким образом, литературный анализ и выполненные предварительные эксперименты позволили сформулировать цель и задачи проводимых исследований.

Целью настоящей работы является выявление методов, условий и средств обеспечения высококачественного сварного соединения вольфрамовой проволоки, полученной методом порошковой металлургии, с высокоуглеродистыми сталями и внедрение результатов исследований в производство игл МПГ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

- выполнить анализ существующих путей формирования сварного соединения вольфрамовой проволоки со сталью и разработать рекомендации по возможному способу решения поставленной задачи;
- установить механизм образования сварного соединения исследуемых металлов при ККС;
- исследовать характер влияния свойств и качества подготовки свариваемых материалов на механические характеристики такого соединения;
- выявить степень влияния режимов ККС на прочность и пластичность соединения;
- разработать технологическое оборудование и оснастку для производства игл МПГ и результаты проведенных исследований внедрить в производство;

Вторая глава посвящена установлению общих закономерностей формирования сварного соединения вольфрама со сталью и исследованию его природы, а также выявлению факторов, определяющих характер и свойства такого соединения.

Предварительными экспериментами по сварке вольфрамовых игл со стальными шариками установлено, что сварное соединение формируется по сложной схеме и состоит из нескольких основных зон и участков. Анализ микрошлифов (рис.1) показал, что к последним относятся: контактная зона, где соединение, вероятно, образуется в твердой фазе, периферийная зона с расплавленным металлом, где соединение может образоваться по типу сварки-пайкой, а также зоны термического влияния (ЗТВ) с измененной структурой в стали и в вольфраме. Вероятно, что прочность и пластичность сварного соединения будут определяться характером металлических связей в каждой из указанных зон. Однако предварительный анализ микрошлифов позволяет выдвинуть рабочую гипотезу о том, что в основном прочность сварного соединения определяется характером металлических связей, установившихся в контактной зоне. Для оценки качества соединения вольфрама со сталью, а, следовательно, и их свариваемости, важно выявить природу формирования

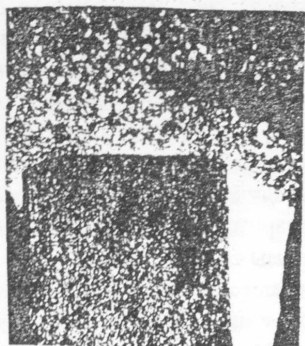


Рис.1 Образец после сварки

такого соединения, а также определить условия того взаимодействия между металлами, при которых происходит установление между ними металлической связи. С этой целью были проведены металлографические исследования зон сварного соединения с помощью микроскопов МИМ-10 и НЕОРНОТ-21 при увеличениях от 200X до 500X, а также установлены их микротвердости на приборе ПМТ-3.

Металлографический анализ образцов подтвердил, что на всех режимах сварки расплавление вольфрама не происходит.

Между сталью и вольфрамом наблюдается четкая граница шириной от 2 до 4 мкм. В приконтактной области в стали обнаружен целый ряд ЗТВ шириной от 20 до 70 мкм, состоящих из скрытоигольчатого мартенсита и очень мелких (до 2 мкм) равномерно распределенных карбидов вольфрама и хрома. На различном расстоянии от стыка микротвердость ЗТВ изменяется от 9000 до 5600 МПа при исходной 7500-8000 МПа. В вольфраме микроструктура также неоднородна. В приконтактной области на всех режимах она имеет мелковолокнистую и деформированную форму с мелкими включениями и микротвердостью около 6200 МПа. Ближе к зоне оплавления наблюдаются трещины протяженностью от 200 до 700 мкм. У ряда образцов, сваренных на повышенных тепловых режимах, наблюдаются зоны как с признаками начала первичной рекристаллизации и микротвердостью 5700 МПа, так и с полной первичной рекристаллизацией и микротвердостью 5200 МПа. Результаты измерения микротвердости подтверждают отсутствие интерметаллидов Fe_2W и Fe_3W_2 , твердость которых, по литературным источникам, колеблется от 13000 до 18000 МПа. Несмотря на это можно предположить, что зоны с рекристаллизованной структурой в вольфраме, являясь разупрочняющими, окажут существенное негативное влияние на механические свойства сварного соединения. Испытания образцов на прочность и пластичность подтвердили это предположение. Большинство их разрушалось вдали от места стыка, именно в этих областях.

По результатам экспериментов установлено, что режимы ККС влияют не только на микротвердость и протяженность ЗТВ, но и на величину диффузии основных компонентов, входящих в состав соединяемых металлов. Для того, чтобы это установить, а также выявить степень влияния термодиффузионного воздействия на эти процессы, был проведен микрорентгеноспектральный анализ на анализаторе MS-46 фирмы "Cameca".

Анализ кривых распределения химических элементов в сварном соединении подтверждает протекание диффузионных процессов в стыковой области.

С увеличением термдеформационного воздействия увеличиваются как протяженность распространения диффузионных зон, так и концентрации диффундируемых элементов (рис.2). Во всех образцах из стали 110Х18М-ШД установлено падение концентрации хрома с 17,5-18% (исходное состояние) до 10-12% в стыковой области. В то же время в зонах расплавления стали концентрация этого элемента составила 21,5-25%, а вольфрама колеблется от 4,2 до 9,8%. Такое значительное изменение содержания этих металлов объясняется, по-видимому, ускоренной их гетеродиффузией из твердых фаз в жидкую при расплавлении стали с последующим вытеснением ее в боковые зоны сплавления. Данными исследованиями еще раз подтверждено отсутствие интметаллидов, причиной которого могут служить небольшой объем расплавленного металла и высокая скорость его кристаллизации. На основании полученных данных концентрационных кривых и литературных источников определен примерный состав твердых растворов, составляющих основу диффузионных зон в металлах.

Кроме рассмотренной стыковой зоны, где соединение образуется в твердой фазе, на характер соединения влияет и зона, образованная расплавленной сталью, вытесненной из стыковой области, и твердым вольфрамом. При этом процесс соединения в этой области по своим свойствам и закономерностям, возможно, близок к пайке или сварке-пайкой. Взаимодействие припоя (стали) с твердым металлом (вольфрамом) достигается только в том случае, когда происходит хорошее смачивание жидкой стали поверхности вольфрама.

Анализ литературных данных по распространению жидких металлов по твердой поверхности показывает, что основными факторами, влияющими на этот процесс, являются соотношение между поверхностными энергиями твердого и жидкого металлов и на их межфазной границе, характер среды, в которой находятся контактирующие металлы, температура и состояние пове-

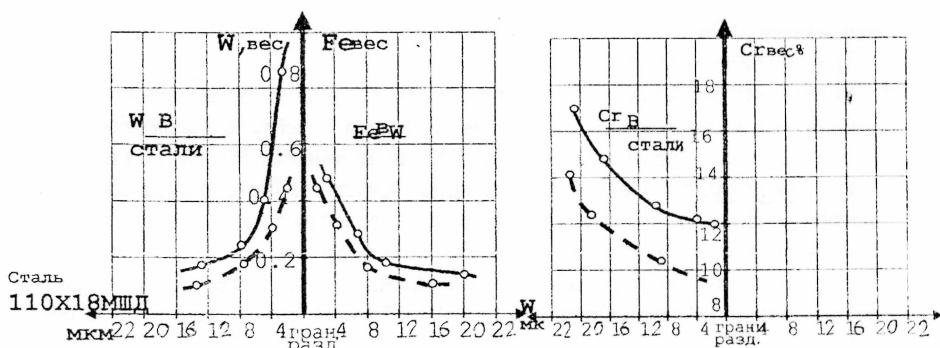


Рис.2 Распределение железа, вольфрама и хрома в диффузионной зоне сварного соединения при $U_c=230$ В, $C=1000$ мкФ, $F_c=178$ МПа (—) и 70 МПа (---);

рхности твердого металла, растворимость жидкого металла в твердом и скорость объемной диффузии атомов расплава в твердый металл, а также энергия активации поверхностной диффузии и другие факторы.

Неизотермические процессы растекания и смачивания, происходящие при сварке, в настоящее время изучены недостаточно, что существенно затрудняет выбор оптимальных условий реализации технологического процесса соединения разнородных материалов. Для выявления связи смачиваемости вольфрама расплавом стали с механическими свойствами такого соединения были проведены эксперименты, по результатам которых установлено, что увеличение вводимой в зону сварки энергии приводит к увеличению площади растекания стали по вольфраму и снижению краевого угла смачивания θ . В обоих случаях влияние указанных параметров на прочность соединения имеет максимум. Исследовано также влияние шероховатости вольфрама и газовой среды на растекаемость стали по вольфраму и прочность такого соединения. Можно отметить, что величина шероховатости вольфрама оказывает заметное влияние на θ при невысоких значениях вводимой энергии. С увеличением последней эта разница становится незначительной (то же касается и прочности соединения). Использование аргона в качестве среды, в которой осуществлялась ККС, улучшает растекаемость стали (θ - уменьшается почти в 2,5 раза, а площадь растекания увеличивается более, чем в 10 раз). Однако прочность соединения при этом снижается на 8-9%. Объяснением хорошей смачиваемости служит то, что аргон препятствует образованию окисных пленок на вольфраме, ухудшающих растекание, а уменьшение прочности может быть вызвано тем, что ускорение растекаемости стали способствует снижению скорости объемной диффузии атомов расплава (стали) в твердый металл (вольфрам).

Установлено, что хорошая смачиваемость расплавленной стали ($\theta \approx 15^\circ - 20^\circ$) обусловлена тем, что поверхностная энергия компонентов, входящих в состав этого металла, значительно ниже, чем поверхностная энергия твердого вольфрама. Например, при $T=1808\text{K}$: $\sigma_{23\text{Fe}}=1722(\text{эрг/см}^2)$, $\sigma_{23\text{Cr}}=792(\text{эрг/см}^2)$, а $\sigma_{12\text{W}}=3680(\text{эрг/см}^2)$.

Определив особенности, условия работы и природу образования сварного соединения вольфрама со сталью, необходимо перейти к рассмотрению вопроса о степени влияния параметров ККС на прочность такого соединения.

Третья глава посвящена исследованию характера и степени влияния параметров режима ККС и качества исходного вольфрама на прочность и пластичность сварного соединения, установлению роли термомеханического импульса энергии активации в обеспечении прочности, а также определению расчетных значений температурных полей в областях сплавления и ЗТВ соединяемых металлов.

Из анализа литературных источников следует, что основными факторами, влияющими на свариваемость вольфрама с другими металлами, являются температура нагрева, усилие сжатия свариваемых изделий, а также время пребывания этого металла в области температур начала рекристаллизации. Для

того, чтобы иметь полное представление о прочности соединения вольфрама со сталью и способах ее регулирования, необходимо определить параметры процесса, в наибольшей степени оказывающие на нее влияние.

Сложные условия работы иглы и ее ответственность за безотказную работу МПГ предъявляют особые требования к качеству материала, из которого она изготавливается. Для определения влияния его качества на прочность сварного соединения исследовалась на вихретоковом дефектоскопе ВД - 23П вольфрамовая проволока марки ВА-1 двух типов: группы Б- с нерегламентированной по ТУ протяженностью нарушений сплошности (расслоя), и группы АДБ- повышенной технологичности, имеющей по ТУ суммарную величину расслоя не более 10% от общей длины. Установлено, что с увеличением вводимой в зону сварки энергии разница в значениях прочности у проволок групп Б и АДБ заметно увеличивается: с 6,2% на режимах с энергией в зоне сварки $W_c = 1,98$ Дж до 19,8% при $W_c = 3,04$ Дж.

На механические свойства сварного соединения влияет не только качество проволоки, но и используемые режимы ККС: напряжение зарядки U_c и величина емкости C_p конденсаторной батареи, усилие сжатия F_c и вылет L свариваемых деталей, а также величина коэффициента трансформации K и др. Для установления характера этого влияния был проведен ряд экспериментов с записью осциллограмм тока разрядной цепи.

Регулирование значений энергии при ККС может производиться изменением напряжения зарядки конденсаторов U_c и их емкости C_p . В ходе выполнения работ установлено, что указанные параметры, влияя на величину разрывного усилия σ_v и предельный угол загиба α , имеют оптимальные значения: $U_c = 230 \dots 260$ В, а $C_p = 1000$ мкФ. Отклонение их от этих величин обуславливает уменьшение прочности и пластичности сварного соединения, появление выплесков и зон рекристаллизации (при увеличении U_c и C_p) и непроваров (при снижении U_c и C_p). При определении характера влияния силы сжатия F_c на механические свойства соединения установлены ее оптимальные значения ($F_c = 150 \dots 180$ МПа). Использование меньших величин не обеспечивает удовлетворительного формирования сварного шва, зоны оплавления мелкие, напоминающие начальный выплеск, при больших значениях происходит неравномерное растекание расплавленного металла, деформация и потеря устойчивости вольфрама. Также определены характеры влияния на прочность сварного соединения величины коэффициента трансформации и способов подготовки вольфрама под сварку.

Помимо уже упоминавшихся параметров ККС исследовалось влияние вылета и шероховатости свариваемых деталей. Анализируя полученные зависимости, можно предположить, что с увеличением вылета вольфрамовой проволоки увеличивается как ее собственное, так и индуктивное сопротивление. И то, и другое приводит к снижению сварочного тока и потере прочности соединения. Исходя из этого, можно подтвердить, что сварку целесообразнее проводить при $U_c = 230$ или 260 В, так как вылет при таких напряжениях не

является критичным в диапазоне изменения от 0,4 до 1,0 мм и в меньшей степени оказывает влияние на прочность сварного соединения. Шероховатость свариваемых поверхностей оказывает заметное влияние на величину прочности только при невысоких значениях энергии в зоне сварки. С их ростом это влияние практически исчезает.

Проведенные исследования подтвердили, что рассматриваемые параметры ККС оказывают влияние не только на прочность, но и на пластичность сварного соединения. Последняя оценивалась предельным углом-загиба свариваемых деталей. Эти испытания подтвердили общие закономерности результатов испытаний на отрыв, полученные ранее. При этом, на одних и тех же режимах сварки наибольшие значения прочности на отрыв соответствуют наибольшим значениям для предельного угла загиба.

С целью получения математической модели зависимости прочности сварного соединения вольфрама со сталью от параметров режима ККС, а также ее прогнозирования при возможных изменениях последних, был выполнен полный трехфакторный эксперимент. Управляемыми факторами являлись: напряжение зарядки конденсаторов U_c , усилие сжатия и величина вылета свариваемых деталей F_c и L . В результате получены уравнения регрессии как в кодированном, так и в натуральном масштабах. Помимо регрессионного анализа был выполнен и анализ дисперсионный. В частности, последний показал, что 68,1% вариации отклика (σ_B) вызвано фактором U_c , 18,1% - фактором L и 10,9% - фактором F_c .

Одним из достоинств и преимуществ ККС является возможность одновременного независимого регулирования как нагрева, так и осадки соединяемых металлов. Однако раздельное их регулирование не означает, что изменение по величине одного из них не вызывает изменения другого. Напротив, как тепловая энергия, так и деформация свариваемых металлов, действуя одновременно, тесно связаны между собой. Поэтому в работе предложено рассматривать их комплексное воздействие на механические свойства соединения. Для этого введено понятие термомеханического импульса энергии активации A_{TM} . Очевидно, что при конденсаторной сварке, когда тепловая энергия вводится импульсно в зону сварки, а само соединение образуется за счет диффузионного взаимодействия соединяемых металлов при их сжатии (см. гл.2), A_{TM} будет определяться по формуле:

$$A_{TM} = \frac{W \cdot F_c}{S \cdot t} \quad [\text{Дж} \cdot \text{Н} / \text{мм}^2 \cdot \text{с}],$$

где W – тепловая энергия (Дж); F_c – усилие сжатия свариваемых деталей (Н); S – площадь свариваемых поверхностей (мм^2); t – время сварки (с).

Зависимость прочности соединения вольфрама со сталью от величины A_{TM} представлена на (рис. 3). Зона оптимальных значений A_{TM} , соответствующих наибольшей прочности, находится в пределах $[50 - 110] \cdot 10^3$ ($\text{Дж} \cdot \text{Н} / \text{мм}^2 \cdot \text{с}$).

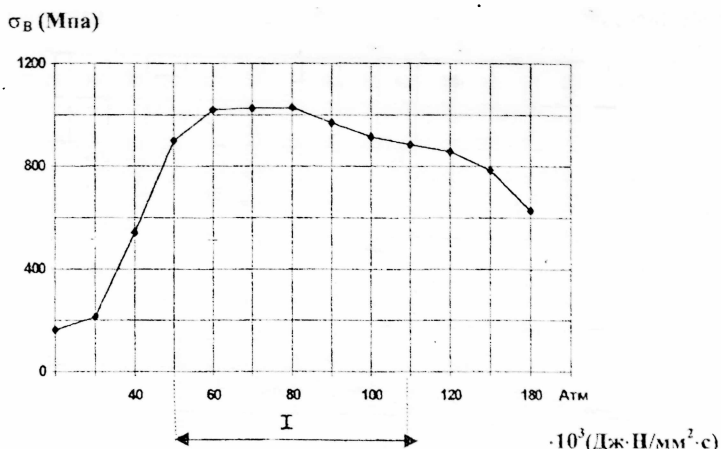


Рис.3 Зависимость прочности сварного соединения от величины A_{TM} :
I.- область оптимальных значений

Формирование структуры металла шва и ЗТВ в значительной степени определяется параметрами температурного поля в зоне сварки. Управление ими позволяет целенаправленно воздействовать на физико-механические свойства сварных соединений, обеспечивать их высокую работоспособность в наиболее неблагоприятных условиях эксплуатации.

Вследствие соизмеримости размеров спая термодпары с размерами объекта исследования экспериментальный путь установления термических циклов в стали и вольфраме затруднен. Поэтому основная часть тепла может быть рассчитана на основе условного распределения температуры в зоне сварки. При этом учитывается, что с ростом температуры в зоне соединения удельная электропроводность вольфрама увеличивается от 5,49 мкОм·см при температуре 20⁰С до 50,95 мкОм·см при 1527⁰С, а теплопроводность этого металла в указанном температурном интервале снижается почти в 1,5 раза (от 132 до 90 ккал/м·ч·град). Для установления характера распространения тепловых потоков в исследуемых материалах и решения задач теплопроводности в них был применен конечно-разностный метод. Нахождение разностного решения выполнялось методом прогонки.

Установлено, что на одном и том же расстоянии от места стыка температура в вольфраме значительно выше, чем в стали. Например, при $A_{TM}=21,3 \cdot 10^3$ (Дж·Н/мм²·с) на расстоянии 0,025см от места соединения в стали за время 0,004с она достигает 950⁰С, а в вольфраме около 1220⁰С. При этом зона разупрочнения в вольфраме, где зарождается его рекристаллизация, имеет протяженность до 300 мкм от стыка. Именно в этой области на этих режимах сварки происходило разрушение образцов при их испытании на отрыв и изгибную прочность.

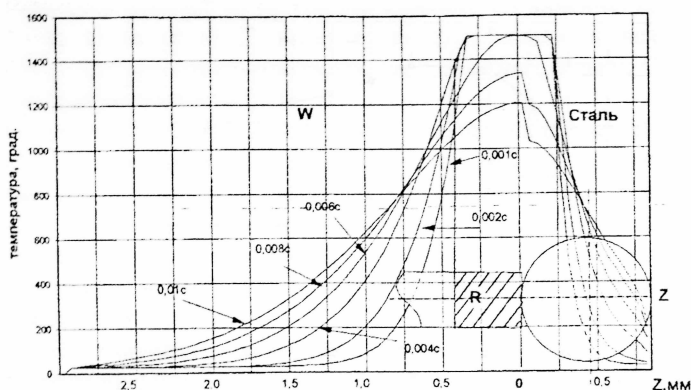


Рис. 4 Распределение температур по оси сварного соединения при $A_{TM}=124 \cdot 10^3$ (Дж·Н/мм²·с) (R- зона разупрочнения в вольфраме)

С увеличением вводимой энергии при $A_{TM}=124 \cdot 10^3$ (Дж·Н/мм²·с) заметно возрастает скорость нагрева металла шва и околошовной зоны (рис.4). Так, за время 0,004с температура в стальном шарике на расстоянии 0,25 мм составляет около 1230°С, а в вольфрамовой игле уже не менее 1500°С. Зона разупрочнения увеличивается более чем в 1,5 раза и имеет размеры до 450-500мкм от стыка. Именно на таком расстоянии в вольфраме, как показал металлографический анализ, наблюдается зона рекристаллизации и происходило разрушение образцов при их испытаниях.

Четвертая глава посвящена общему анализу известных конструкций контактных конденсаторных машин и разработке оборудования для сварки вольфрамовых игл МПГ со стальным шаром.

Производство игл МПГ было освоено УНПК «ПРОМИТ» при Калужском Филиале Московского Государственного Технического Университета им. Н.Э.Баумана совместно с НПКП «МАКВИС».

Особенностью производства таких игл является его массовый характер. В этих условиях для увеличения производительности, улучшения условий труда, а также обеспечения стабильности качества соединения большое значение имеет автоматизация и механизация процессов сварки. При этом многое зависит от того, насколько правильно выбраны способ и режимы сварки, а также схема оборудования.

Для выполнения операции соединения вольфрамовой иглы со стальным шаром были спроектированы и изготовлены конденсаторные сварочные автоматы МСК-03. Несмотря на различие материалов и видов деталей, свариваемых на подобных автоматах, все они имеют ряд общих основных частей: силовую электрическую, механическую и аппаратуру управления. В разработанную конструкцию, защищенную свидетельством на полезную модель,

включены все эти элементы. Основными ее техническими характеристиками являются: производительность, составляющая 1200 циклов/ч при потребляемой мощности не более 0,5 кВА, емкость конденсаторной батареи в 1000 и 2000 мкФ, а также мощность сварочного импульса от 0,2 до 125 Вт/с. Диаметр свариваемой вольфрамовой проволоки составляет 0,2-0,4мм.

Внедрение в производство результатов, представленных в работе исследований, помогло установить оптимальные, с точки зрения прочности, параметры и режимы ККС. Это значительно увеличило выпуск качественной продукции за счет снижения брака на сварочной операции, а также позволило применять такие иглы в составе МПГ, работающих со скоростью печати 240 зн/с и более. До этого скорость составляла не более 140 - 160 зн/с.

Начиная с 1990г, и по настоящее время произведено и реализовано более 3,6 млн. игл, отвечающих всем необходимым параметрам, заложенным в ТУ на их изготовление. Получены положительные отзывы о качестве приобретенных вольфрамовых игл от заводов – потребителей.

ОЩИЕ ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Анализ литературных данных и предварительные эксперименты по контактной сварке вольфрама со сталью показали, что избежать образования интерметаллидов и зон рекристаллизации в вольфраме возможно, если использовать для соединения этих металлов контактную конденсаторную сварку, характеризующуюся кратковременностью и локальностью термомеханического воздействия на свариваемые металлы, что и было подтверждено результатами последующих исследований;
2. В результате металлографических исследований и механических испытаний сварного соединения, полученного ККС, установлено, что последнее состоит из двух основных зон : стыковой, в которой соединение образовано в твердой фазе, и периферийной, где соединение образуется по схеме сварки- пайкой;
3. Металлографическими и микрорентгеноспектральными исследованиями, а также измерением микротвердости этих зон выявлено :
 - в стыковой области соединение образуется за счет взаимной диффузии химических элементов, входящих в состав соединяемых металлов, с образованием различных по протяженности и составу твердых растворов на основе W-Fe-Cr в стали и W-Fe в вольфраме, обеспечивающих достаточную прочность. При этом подтверждено отсутствие заметных интерметаллидов, охрупчивающих соединение, однако обнаружены зоны начала и полной первичной рекристаллизации вольфрама, резко снижающие прочность и пластичность этого металла;
 - в периферийной зоне повышенное содержание хрома и вольфрама, что свидетельствует о растворении вольфрама в расплавленной стали и диффузии в нее хрома из твердой фазы. Тепловложение, а следовательно и

ожидаемые свойства сварного соединения в этой области, косвенно могут быть оценены краевым углом смачивания и площадью растекания жидкой стали по вольфраму;

4. Многочисленные испытания соединений, сваренных на различных режимах, позволили установить, что агрегатная прочность соединения определяется в первую очередь прочностью и пластичностью в зонах начала и полной первичной рекристаллизации вольфрама. Следовательно, для обеспечения максимальных его прочностных свойств необходимо минимизировать размеры этих зон. Этого можно достичь оптимизацией параметров термомеханического воздействия;
5. С целью оптимизации параметров такого воздействия при ККС проведены эксперименты, позволяющие определить характеры и степени влияния режимов ККС (напряжения и емкости зарядки конденсаторов, усилия сжатия, вылета и шероховатости свариваемых деталей и др) на агрегатную прочность и пластичность сварного соединения, а также построить математическую модель, позволяющую вычислять ожидаемую прочность соединения для любых промежуточных значений исследуемых режимов ККС;
6. На основе анализа влияния тепловой энергии и осадки свариваемой пары металлов предложено рассматривать их комплексное воздействие на прочностные характеристики формируемого соединения. Для этого введено понятие термомеханического импульса энергии активации A_{TM} , имеющего размерность [Дж·Н/мм²·с]. Установлено, что сварное соединение, отвечающее эксплуатационным требованиям к игле МПГ, образуется на режимах, соответствующих $A_{TM} = (50 \dots 110) \cdot 10^3$ [Дж·Н/мм²·с]. Превышение этих значений приводит к рекристаллизации и охрупчиванию вольфрама, потере механической устойчивости иглы, а уменьшение - к недостаточному количеству расплавленной и выдавленной из зоны сплавления стали и, как следствие, невысокой прочности соединения;
7. Теоретические расчеты температурных полей в контактной области и ЗТВ соединяемых металлов, полученные численными методами, показали, что вольфрам нагревается интенсивнее и в большей степени, чем сталь. С увеличением A_{TM} заметно возрастает скорость нагрева обоих металлов. Адекватность теоретических расчетов в определении расположения и размеров областей высоких температур в вольфраме, в которых выявлены зоны начала и полной первичной рекристаллизации ($t \approx 1500^\circ\text{C}$), снижающих его прочность, подтверждается металлографическими исследованиями и измерением микротвердости на этих участках;
8. Результатом проведенных исследований явились разработка технологии изготовления и конструкции автомата для ККС вольфрамовых игл МПГ, не имеющих аналогов в России, позволяющих значительно увеличить скорость печати и повысить надежность работы МПГ и ПУ в целом.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Жучков И.И., Куриленко А.Г., Капранов А.В. Особенности знаковсинтезирующих печатающих головок и технологии их производства// Первые молодежные научные чтения памяти А.Л.Чижевского: Тезисы докл. региональной научно-технической конференции.- Калуга, 1991.-С.91.
2. Жучков И.И. Технологическая особенность электрохимической обработки вольфрамовых игл высокоскоростных знаковсинтезирующих печатающих головок принтеров ПЭВМ и кассовых аппаратов// Социально-экономические проблемы управления производством, создание прогрессивных технологических конструкций и систем в условиях рынка: Тезисы докл. Всероссийской научно-технической конференции.-Калуга, 1995.- С.151.
3. Жучков И.И., Перевозчиков С.Г. Конструкторско-технологические решения по обеспечению качества игл мозаичных печатающих головок // Социально- экономические проблемы управления производством, создание прогрессивных технологических конструкций и систем в условиях рынка : Тезисы докл. Всероссийской научно-технической конференции.- Калуга, 1996.- С.118.
4. Жучков И.И., Бысов С.А., Перевозчиков С.Г. Анализ и особенности конструкций мозаичных печатающих головок и их ударных элементов// Труды МГТУ. -1997.- № 569.- С.106-111.
5. Жучков И.И., Бысов С.А. Исследование поверхностных дефектов заготовок игл печатающих головок принтеров ПЭВМ // Там же.- 1997.-№569 С.103-105
6. Кондаков Г.Ф., Жучков И.И. Анализ особенностей сварки вольфрама с нержавеющей и шарикоподшипниковой сталями//Технологические методы повышения качества сварных конструкций:Сб.- Калуга:Облиздат,1998.- С.48-53.
7. Кондаков Г.Ф., Жучков И.И. Исследования свойств и структуры сварного соединения вольфрама с нержавеющей и шарикоподшипниковой сталями// Создание прогрессивных технологий конструкций и систем и социально-экономические проблемы производства :Тезисы докл. Региональной науч.тех.конф.- Калуга, 1998.- С.69.
8. Кондаков Г.Ф., Жучков И.И. Технология контактной конденсаторной микросварки вольфрама со сталями // Сварочное производство.- 1999.-№7.- С.16-20.
9. Кондаков Г.Ф., Жучков И.И. Зависимость прочности соединения и его структуры от смачиваемости при сварке вольфрама со сталью// Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении: Тезисы докл. региональной науч.тех.конференции.- Калуга, 1999.- С.31.
10. А.С. на полезную модель RU 10628 U1 МКИ В23К 37/04. Автомат для сварки изделий / Жучков И.И.// Б.И.- 1999.-№8.

11. Кондаков Г.Ф., Жучков И.И. Структура переходной зоны сварного соединения вольфрама с нержавеющей сталью после конденсаторной сварки// Первая Российская конференция молодых ученых по математическому моделированию : Тезисы докл.- Москва, 2000.- С.186-188.
12. Кондаков Г.Ф., Жучков И.И. Влияние режима сварки на прочность соединения вольфрама с коррозионно-стойкой сталью// Технология металлов.- 2000.- №1.- С.8-10.
13. Kondakov G.F., Zhuchkov I.I. Technology of condenser discharge resistance microwelding tungsten to steel// Welding International.- 2000.-Vol.14.- №1.- P.56-59.