

На правах рукописи



СЛОБОДЯН Михаил Степанович

**СТАБИЛИЗАЦИЯ КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЙ  
ПРИ КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ МИКРОСВАРКЕ  
ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА Э110**

Специальность 05.03.06 – Технологии и машины сварочного производства

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание ученой степени кандидата

технических наук

Барнаул – 2009

Работа выполнена на кафедре «Оборудование и технология сварочного производства» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Томский политехнический университет» (ГОУ ВПО ТПУ)

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
Киселев Алексей Сергеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Козловский Сергей Никифорович

кандидат технических наук, доцент  
Тимошенко Владимир Петрович

Ведущая организация: ОАО НПЦ «Полюс» (г. Томск)

Защита состоится «27» марта 2009 г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.01 в Алтайском государственном техническом университете им. И. И. Ползунова по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова.

Отзывы в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью организации, просьба направлять по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

Факс: (3852)36-79-03, e-mail: [yuoshevtsov@mail.ru](mailto:yuoshevtsov@mail.ru).

Автореферат разослан «\_\_» февраля 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Шевцов Ю. О.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Одной из задач, стоящих перед предприятиями Федерального агентства по атомной энергии (Росатома), является создание и производство таких компонентов реакторов атомных электро- и тепловых станций, которые минимизируют вероятность возникновения аварийных ситуаций в процессе их эксплуатации. Особые требования предъявляют к сварным конструкциям тепловыделяющих сборок (ТВС), в частности, к дистанционирующим решеткам (ДР), основой которых являются соединенные между собой точечной контактной сваркой тонкостенные ячейки.

Конструкция элементов активной зоны атомных реакторов (АР) и их материалы должны обеспечивать надежную прочность всех узлов при рабочих условиях эксплуатации (переменные термические напряжения, статические, динамические и вибрационные внешние нагрузки) в течение трех лет и более. Для изготовления элементов ТВС наиболее широко применяют циркониевые сплавы. Например, детали ДР изготавливают из сплава Э110 ( $Zr-1\% Nb$ ), что объясняется небольшим сечением захвата нейтронов ниобием. Кроме того, 1% ниобия стабилизирует коррозионную стойкость сплава, устраняет вредное влияние малых долей примесей и эффективно снижает количество поглощаемого сплавом водорода.

К числу существующих проблем точечной контактной сварки деталей из циркониевого сплава при производстве ТВС относится необходимость стабилизации качества соединений. Одним из перспективных направлений решения этой проблемы является применение источников питания с программным управлением, позволяющих формировать импульс тока с необходимыми амплитудно-временными параметрами (АВП). Это открывает новые возможности управления свойствами сварных соединений, которые в значительной степени зависят от состояния поверхностей соединяемых деталей и величины износа электродов. Однако применительно к точечной контактной сварке тонкостенных деталей (микросварке) из циркониевых сплавов не определена закономерность влияния АВП импульса тока на свойства соединения, что не позволяет в полной мере реализовывать широкие технологические возможности современных источников питания.

В связи с этим исследование влияния АВП импульса тока на свойства соединений тонкостенных деталей, выполняемых контактной точечной сваркой, является необходимым условием для решения проблемы повышения качества производимых конструкций, что особо актуально при изготовлении изделий ответственного назначения.

**Целью работы** является повышение стабильности качества соединений деталей из циркониевого сплава Э110 при контактной точечной микросварке посредством разработки алгоритма амплитудной модуляции тока.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Оценить влияние дестабилизирующих факторов на формирование сварного соединения.
2. Определить АВП импульса тока на этапе подогрева, обеспечивающие нормирование и стабилизацию значений контактных сопротивлений на участке электрод-электрод.

3. Установить закономерность влияния АВП импульса тока на стабильность качества сварных соединений.

**Методы исследований.** Исследования проводили с использованием источников питания *ИПТКМ-5* и *Д-8*, обеспечивающих программное задание АВП импульса тока. Измерение тока и напряжения осуществляли с использованием измерительной платы «*NI DAQCard-6062E*» и регистратора технологических процессов *P-3704*. Сопротивление участка электрод-электрод определяли путем обработки измеренных параметров сварочного тока и напряжения между электродами в конкретный момент времени (аппроксимация с последующим вычислением по закону Ома). Оценку влияния дестабилизирующих факторов на стабильность формирования соединений при точечной микросварке осуществляли с использованием программы *MATHCAD* и специально разработанного в среде *DELPHI* программного обеспечения. Параметры шероховатости и профилограммы поверхностей измеряли с использованием профилографа-профилометра *Talysurf-5*. Микротвердость металла определяли на приборе *ПМТ-3*. Прочность исследуемых соединений при растяжении проводили на установке *ИНСТРОН-1185*, стальная пробка-захват соответствовала внутреннему профилю ячейки. После разрушения сварных соединений производили замер размера вырванного ядра точки на бинокулярном микроскопе типа *МБС*. Структурные исследования проводили методом металлографии с помощью оптического микроскопа *AXIOVERT 25CA* с цифровой камерой и растрового электронного микроскопа *РЭМ-100У*. Контроль фазового состава исходного материала и литого ядра осуществляли с помощью рентгеноструктурного анализа на рентгеновском дифрактометре *ДРОН-УМ1*.

**Научная новизна работы** заключается в установлении закономерности влияния амплитудно-временных параметров импульса сварочного тока на структуру и механические свойства соединений деталей из циркониевого сплава Э110, выполненных контактной точечной микросваркой.

1. Установлено, что для эффективной стабилизации и нормирования значений сопротивления участка электрод-электрод, в значительной степени определяющего начальные условия формирования соединения, необходимо осуществлять подогрев зоны сварки посредством дискретного двухступенчатого повышения тока.
2. Определена взаимосвязь характера изменения тока на завершающем этапе сварки с прочностными свойствами соединения.
3. Обоснованы амплитудно-временные параметры импульса тока, обеспечивающие стабильно высокие прочностные свойства соединений.

**Практическая значимость.** Результаты исследований внедрены в ОАО «Новосибирский завод химических концентратов» (г. Новосибирск) – ожидаемый экономический эффект составляет 3,2 млн. рублей, ФГУП «Сибирский химический комбинат» (ЗАО Северск Томской обл.), а также в учебной работе ГОУ ВПО «Томский государственный архитектурно-строительный университет» (г. Томск).

**Апробация работы.** Основные положения диссертации изложены, обсуждены и получили одобрение специалистов на следующих научных конференциях и семинарах: на областной школе-семинаре «Новые материалы. Создание, структура, свойства – 2003»

(г. Томск, 2003 г.), на 4-й Всесоюзной конференции “Компьютерные технологии в соединении материалов” (г. Тула, 2003 г.), на X международной конференции «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2004 г.), на Всероссийской конференции «Сварка и контроль – 2004» (г. Пермь, 2004 г.), областной школе-семинаре “Новые материалы. Создание, структура, свойства – 2004” (г. Томск, 2004 г.), на XI международной конференции «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2005 г.), на Всероссийской конференции «Сварка и контроль – 2005» (г. Челябинск, 2005 г.) и ряде других совещаний и научных семинаров.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе одна монография, 3 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ, 7 тезисов докладов и публикаций в трудах и сборниках трудов конференций и школ–семинаров.

**Личный вклад автора.** Результаты, изложенные в диссертации, получены лично автором или при его непосредственном участии. Автор формулировал цели и задачи исследований, разработал методики проведения измерений, проводил математические расчеты и натурные эксперименты, выполнял обработку экспериментальных данных, обобщал результаты и делал выводы. Расчетная оценка влияния дестабилизирующих факторов на стабильность формирования соединения тонкостенных деталей из циркониевого сплава Э110 была реализована автором единолично.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, основных выводов, списка использованной литературы из 172 наименований и приложений, в которых приведены копии документов, подтверждающих практическую значимость работы. Общий объем диссертации 154 страницы, содержит 50 рисунков и 13 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель работы и основные задачи исследований, показана научная новизна и практическая значимость работы, изложены выносимые на защиту положения.

**В первом разделе** представлен анализ особенностей формирования литого ядра при точечной микросварке, путей повышения стабильности качества соединений на основе экспериментальных и теоретических работ отечественных и зарубежных авторов. Рассмотрены особенности сварки материалов, используемых при изготовлении деталей активной зоны атомных реакторов, а также расчетные методы оценки факторов, влияющих на качество точечных сварных соединений. На основании проведенного анализа научно-технической литературы был сделан вывод, что при точечной контактной микросварке циркониевых сплавов наиболее актуальны следующие проблемы.

1. Большой разброс первоначальных значений контактных сопротивлений деталь-деталь и электрод-деталь, что обусловлено физическими свойствами металла соединяемых деталей и электродов, а также состоянием их поверхности, конструкцией соединяемых деталей, степенью износа электродов и скорости их

сжатия. Эти факторы приводят к нестабильности выделения тепла при протекании сварочного тока и, соответственно, качества выполняемых соединений.

2. Существенная зависимость прочностных и коррозионных свойств соединений от режима сварки.

3. Отсутствуют методы автоматического регулирования процесса формирования соединений и неразрушающего контроля, что предъявляет еще более высокие требования к стабильности качества сварки ответственных конструкций.

Анализ путей решения перечисленных проблем, предложенных в литературных источниках, показал, что авторами освещена технология формирования соединений на конденсаторных машинах, а какие-либо рекомендации по использованию машин с современными источниками питания, позволяющими формировать импульс тока с заданными АВП, отсутствуют. На основании этого был сделан вывод об актуальности проведения исследований влияния АВП импульса тока на свойства соединений тонкостенных деталей, выполняемых контактной точечной сваркой.

**Второй раздел** посвящен описанию свойств циркониевого сплава Э110, методов исследований, а также технических характеристик применяемого сварочного оборудования.

**В третьем разделе** приведены результаты исследований влияния изменений в электродах, происходящих по мере их износа, на механические свойства сварных соединений при изготовлении ДР из ячеек толщиной 0,25 мм. Исследования проводили с использованием электродов из бронзы Бр.ХЦр со сферической рабочей поверхностью радиусом 4 мм. Усилие сжатия электродов  $F$ , задавали равным  $300^{+40}$  Н. Алгоритмом амплитудной модуляции сварочного тока предусматривали два этапа формирования соединений: подогрев и сварка.

В частности, была проведена оценка влияния количества выполненных точек на деформацию сферы и площадь деформированной поверхности (рис. 1), шероховатость, структуру и микротвердость металла рабочей части электродов, а также на площадь литого ядра и прочность соединений, выполняемых с их использованием. Одновременно

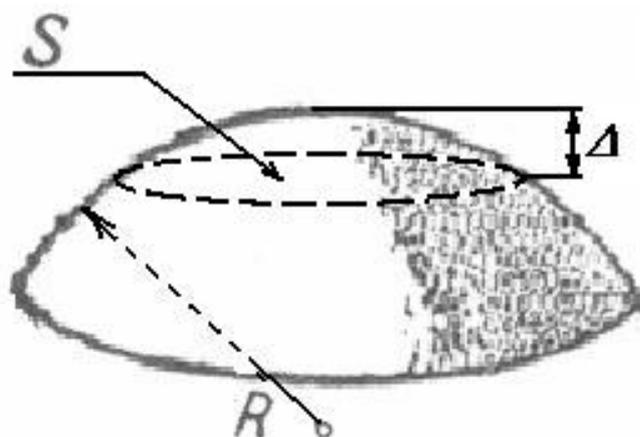


Рис. 1. Изменения рабочей части электрода в процессе эксплуатации ( $R$  – радиус,  $D$  – деформация сферы,  $S$  – площадь деформированной поверхности)

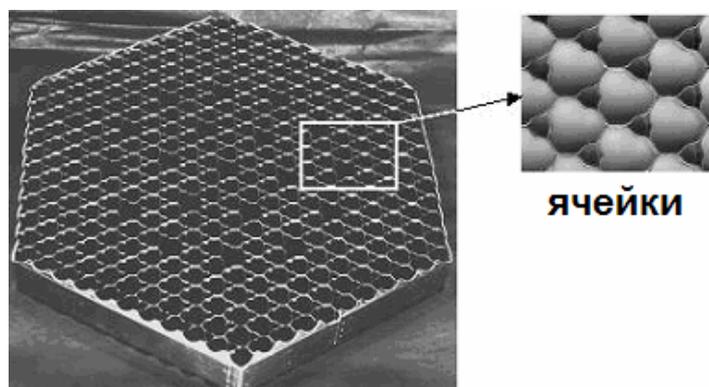


Рис. 2. Внешний вид дистанционирующей решетки

определяли возможность контроля качества выполняемых соединений (площади литого ядра и прочности на отрыв) по изменению сопротивления участка электрод-электрод при формировании литого ядра по мере износа электродов путем статистической обработки экспериментально определенных значений. Исследуемые параметры оценивали отдельно для каждой изготовленной ДР в связи с особенностью ее конструкции (рис. 2), так как в процессе сварки ячеек между собой образуются жесткие контуры, что негативно влияет на стабильность начальных условий и качественные показатели каждой последующей точки (общее количество точек при производстве ДР составляет 1632 шт.). С целью компенсации уменьшения плотности тока в связи с износом рабочей части электродов его амплитуду на этапе сварки увеличивали после изготовления первой ДР (1632 точки) с 2750 А до 3000 А, после изготовления следующих шести ДР (9792 точки) – с 3000 А до 3250 А. Ресурс электродов составляет 15000 сварных точек.

Было выявлено (рис. 3), что после изготовления 11000 точек шероховатость рабочей поверхности электродов уменьшается до значений, присущих поверхности ячеек ДР ( $Ra = 0,1$  мкм) и при сварке последующих 4500 точек не изменяется. Деформация сферы рабочей поверхности электродов и рост площади ее деформированной части наиболее значительно происходит в начальный период их эксплуатации (1500÷2000 точек), когда поверхности прирабатываются. При сварке следующих 10000 точек, рабочая поверхность деформируется незначительно. После сварки 12000 точек деформация электродов происходит более интенсивно.

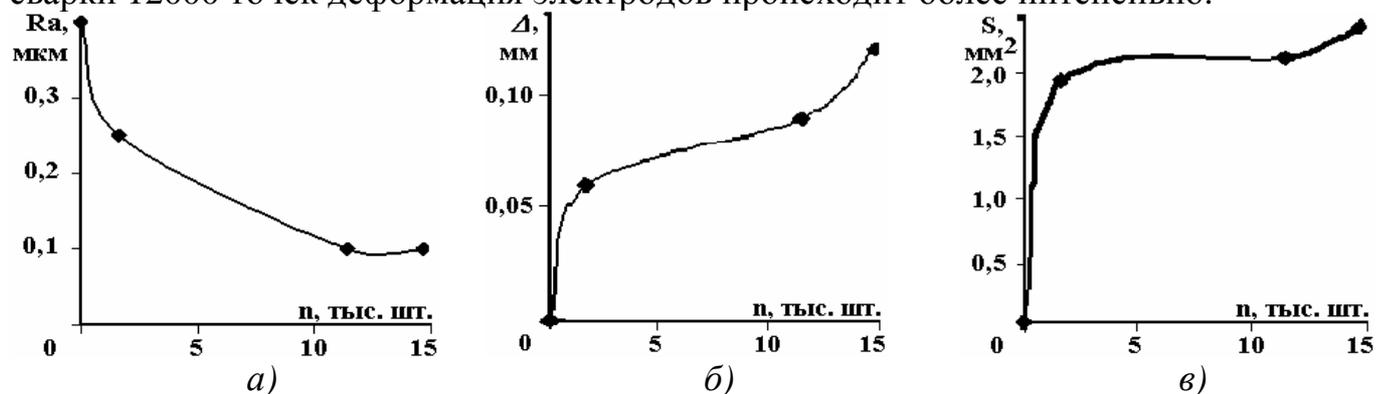


Рис. 3. Зависимость параметров рабочей поверхности электродов от количества сваренных точек: а) шероховатость; б) деформация сферы; в) площадь деформированной поверхности

При исследуемых параметрах режима сварки по мере износа электродов площадь литого ядра и прочность выполненных соединений уменьшаются (рис. 4). Увеличение амплитуды основного импульса тока с 2750 А до 3250 А по мере износа электродов не компенсирует в полной мере снижение качества соединений. Статистическая обработка изменения значения сопротивления участка электрод-электрод  $R_{ээ}$ , в процессе формирования литого ядра, показала их значительный разброс, а также отсутствие характерной зависимости от степени износа электродов, с одновременным снижением стабильности качества сварных соединений. В связи с этим был сделан вывод, что для исследованных режимов по изменению  $R_{ээ}$  оценить качество сварного соединения не представляется возможным.

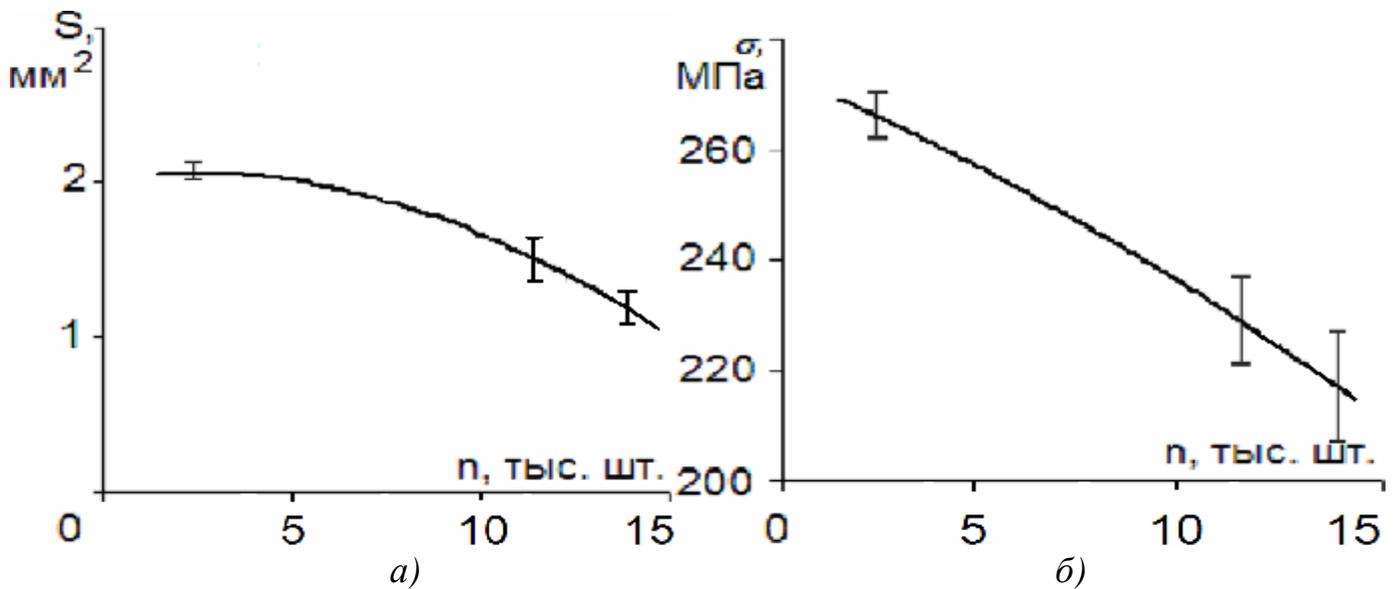


Рис. 4. Влияние количества сваренных точек на площадь литого ядра (а) и прочность соединения (б)

Была произведена расчетная оценка влияния основных факторов, нарушающих стабильность начальных условий формирования соединений, различными методами, приведенными в работах Орлова Б. Д., Моравского В. Э., Ерофеева В. А., Аксельрода Ф. А., Кочергина К. А. и др. Также, в связи с тем, что наиболее важную роль в стабилизации контактного сопротивления деталь-деталь играют параметры шероховатости поверхности и толщина окисной пленки, были произведены дополнительные расчеты сопротивления поверхностного слоя толщиной 3 мкм (наибольшая высота профиля шероховатости). Для этого провели разбивку зоны прохождения тока на конечные элементы (рис. 5), после чего в приконтактной зоне моделировали шероховатость с помощью генератора псевдослучайных чисел (рис. 6) и рассчитали контактное сопротивление деталь-деталь, представленное в виде эквивалентной электрической схемы (рис. 7). Шаг сетки во всех координатах составлял 0,05 мкм – экспериментально установленный средний шаг неровностей.

Сопротивление каждого конечного элемента  $R_{ij}$ , в соответствии с рис. 5, определяли по выражению

$$R_{ij} = r_{ij} \cdot \frac{\Delta Z}{\Delta S},$$

где  $r_{ij}$  – удельное сопротивление каждого конечного элемента,  $\Delta Z$  – шаг сетки по оси  $Z$ ,  $\Delta S$  – площадь сечения элемента.

Соответственно, общее сопротивление деталь-деталь  $R_{\partial\partial}$

$$R_{\partial\partial} = 2 \cdot \sum_{i=1}^k \left( \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_{ij}} \right)^{-1} = 2 \cdot \sum_{i=1}^k \left( \sum_{j=1}^n \frac{\Delta S}{\Delta Z \cdot r_{ij}} \right)^{-1} = 2 \cdot \sum_{i=1}^k \left( \frac{\Delta Z}{S_k} \left( \sum_{j=1}^n \frac{1}{r_{ij}} \right)^{-1} \right) = 2 \cdot \frac{Z_{\max}}{S_k} \sum_{i=1}^k \left( \sum_{j=1}^n \frac{1}{r_{ij}} \right)^{-1},$$

где  $k = \frac{Z_{\max}}{\Delta Z}$ ,  $n = \frac{S_k}{\Delta S}$ ,  $Z_{\max}$  – толщина приконтактного слоя,  $S_k$  – площадь контакта деталь-деталь.

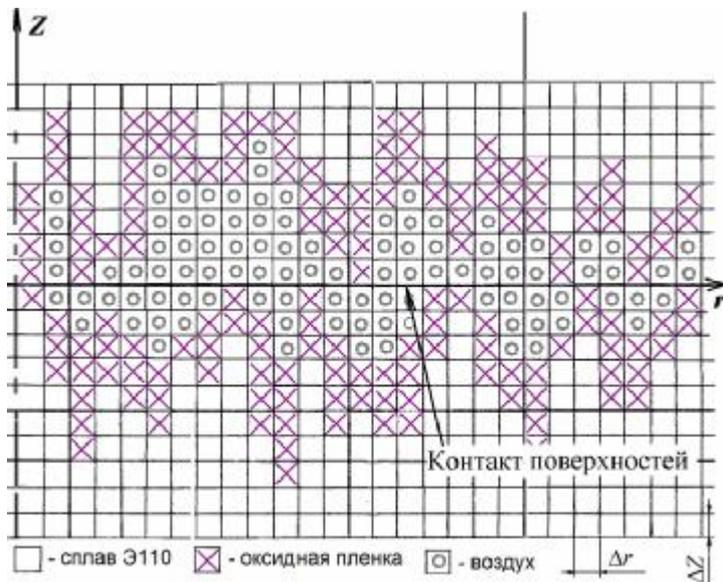


Рис. 5. Схема разбивки приконтактной области на элементы

Фактическая площадь контакта микрошероховатостей  $S_{k.факт}$ , полученных в результате моделирования поверхностей металлов составляет 1,5÷1,8% от  $S_k$ , что хорошо согласуется с данными работ Демкина Н. Б., Кабанова Н. С. и др., и, в зависимости от степени износа электродов, лежит в диапазоне  $(2,1÷428) \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2$ .

В результате проведенных расчетов были определены:

- диапазон изменения значений токопроводящего сечения деталей  $(0,14÷2,57 \text{ мм}^2)$ ;
- диапазон изменения сопротивления участка электрод-электрод  $(0,092÷1,756 \text{ мОм})$ ;
- диапазон изменения контактного сопротивления деталь-деталь  $(0,014÷1,071 \text{ мОм})$ .

На основе анализа полученных результатов был сделан вывод, что в связи с изменением токопроводящего сечения деталей по мере износа электродов, расхождением некоторых значений физико-механических свойств материалов, опубликованных в работах Демкина Н. Б., Займовского А. С., Бернштейна М. Л., Никулиной А. В., Плющева В. Е. и др., а также отличием методов расчетов, опубликованных различными авторами, при разработке режимов точечной контактной сварки необходимо экспериментальное подтверждение получаемых

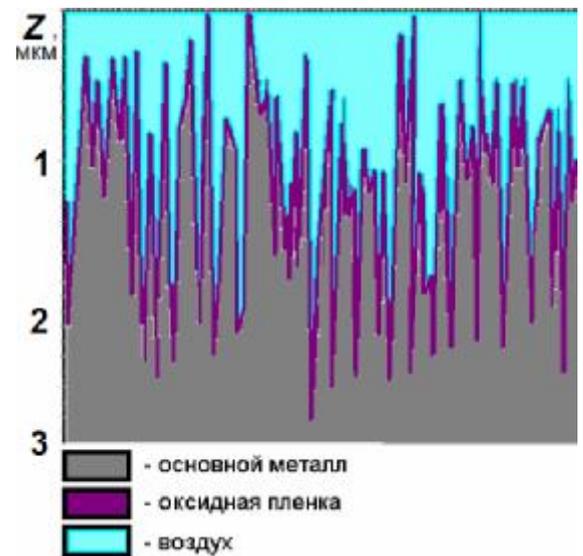


Рис. 6. Схема условно принятой шероховатости поверхности

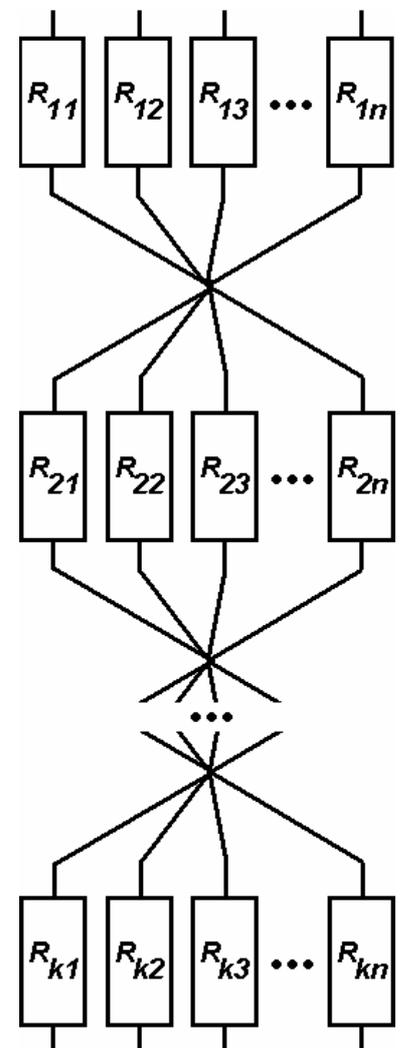


Рис. 7. Эквивалентная электрическая схема приконтактной области

расчетным путем значений сопротивлений электрод-электрод и деталь-деталь, так как они характеризуются существенным разбросом.

Учитывая значительное влияние контактных сопротивлений на стабильность формирования точечных сварных соединений, первоначально решали задачу по оценке роли сопротивления деталь-деталь  $R_{\partial\partial}$  в общем сопротивлении  $R_{\Sigma}$  и определении характера изменения  $R_{\Sigma}$  в процессе нагрева импульсом тока. Использовали пластины толщиной 0,25 мм; 0,3 мм; 0,5 мм; 0,8 мм и их комбинаций 0,25+0,25 мм; 0,3+0,3 мм; 0,3+0,5 мм; 0,5+0,5 мм; 0,8+0,8 мм; 0,3+0,3+0,3 мм; 0,5+0,5+0,5 мм (по 10 образцов каждой комбинации). Ток дискретно увеличивали на 125 А через каждые 2 мс (рис. 8). Чтобы избежать искажений результатов измерения из-за переходных процессов, происходящих во вторичном контуре при дискретном повышении тока, измерение напряжения между электродами осуществляли через 1 мс после очередного увеличения тока.



Стабилизация значений происходит после прохождения импульса тока в течение 6 мс ( $I = 500$  А).

Нагрев комбинаций деталей 0,3+0,3+0,3 мм и 0,5+0,5+0,5 мм импульсом тока менее эффективно стабилизирует сопротивления  $R_{\text{ж}}$ , чем в предыдущих случаях. Для комбинации 0,5+0,5+0,5 мм значения сопротивления  $R_{\text{ж}}$  стабилизируются только после прохождения тока ( $I = 625$  А,  $t = 8$  мс), а для комбинации 0,3+0,3+0,3 мм значительный разброс значений сопротивления  $R_{\text{ж}}$  остается на протяжении всего времени прохождения импульса тока.

Средние значения сопротивления  $R_{\text{ж}}$  комбинации деталей толщиной 0,25+0,25 мм практически идентичны значениям  $R_{\text{ж}}$  одной детали 0,5 мм, как при начальном этапе включения тока ( $I = 125$  А,  $t = 1$  мс), так и при завершении нагрева ( $I = 1000$  А,  $t = 13$  мс). С увеличением толщины деталей (0,8 мм и 0,3+0,5 мм) значение контактного сопротивления деталь-деталь увеличивается, но при нагреве стремится к нулевому значению.

Сравнение значений сопротивления  $R_{\text{ж}}$  в каждый момент времени для одной, двух и трех деталей толщиной 0,3 мм позволяет сделать вывод, что по мере нагрева контактные сопротивления деталь-деталь уменьшаются до 3 мОм. После прохождения тока ( $I = 500$  А,  $t = 6$  мс) изменение значений сопротивления  $R_{\text{ж}}$  во всех случаях происходит с одинаковой скоростью. Такая же закономерность наблюдается для одной, двух и трех деталей до 0,5 мм и комбинаций 0,25+0,25 мм; 0,3+0,3 мм; 0,5+0,3 мм; 0,5+0,5 мм и 0,8+0,8 мм, а также 0,3+0,3+0,3 мм и 0,5+0,5+0,5 мм.

После нагрева металла деталей и переходных контактов импульсом тока зависимость между толщиной деталей и сопротивлением  $R_{\text{ж}}$  линейна. О значительной стабилизации контактных сопротивлений в процессе нагрева протекающим током также можно судить по скорости изменения сопротивления  $DR_{\text{ж}}/Dt$ , которая для всех комбинаций толщин уменьшается до значения  $-0,2$  Ом/с.

С учетом полученных результатов были проведены исследования влияния АВП импульса тока на характер изменения сопротивления  $R_{\text{ж}}$ . В качестве образцов использовали ячейки ДР толщиной 0,25 мм из двух партий поставки с различным состоянием поверхностей (табл. 1).

Начальное значение сопротивления  $R_{\text{ж}}$  определяли при протекании тока минимальной величины (125 А) в течение 1 мс. Контролировали сплавление микропирамид шероховатостей после прохождения импульса тока путем профилографирования контактирующих поверхностей деталей.

Таблица 1. Параметры шероховатости поверхностей ячеек ДР

№ партии поставки	Среднее арифметическое отклонение профиля $R_a$ , мкм	Средний шаг местных выступов профиля $S$ , мкм	Средний шаг неровностей, $S_{ml}$ , мкм	Наибольшая высота профиля $R_{max}$ , мкм
1	0,092	0,1	0,05	2,955
2	0,123			1,207

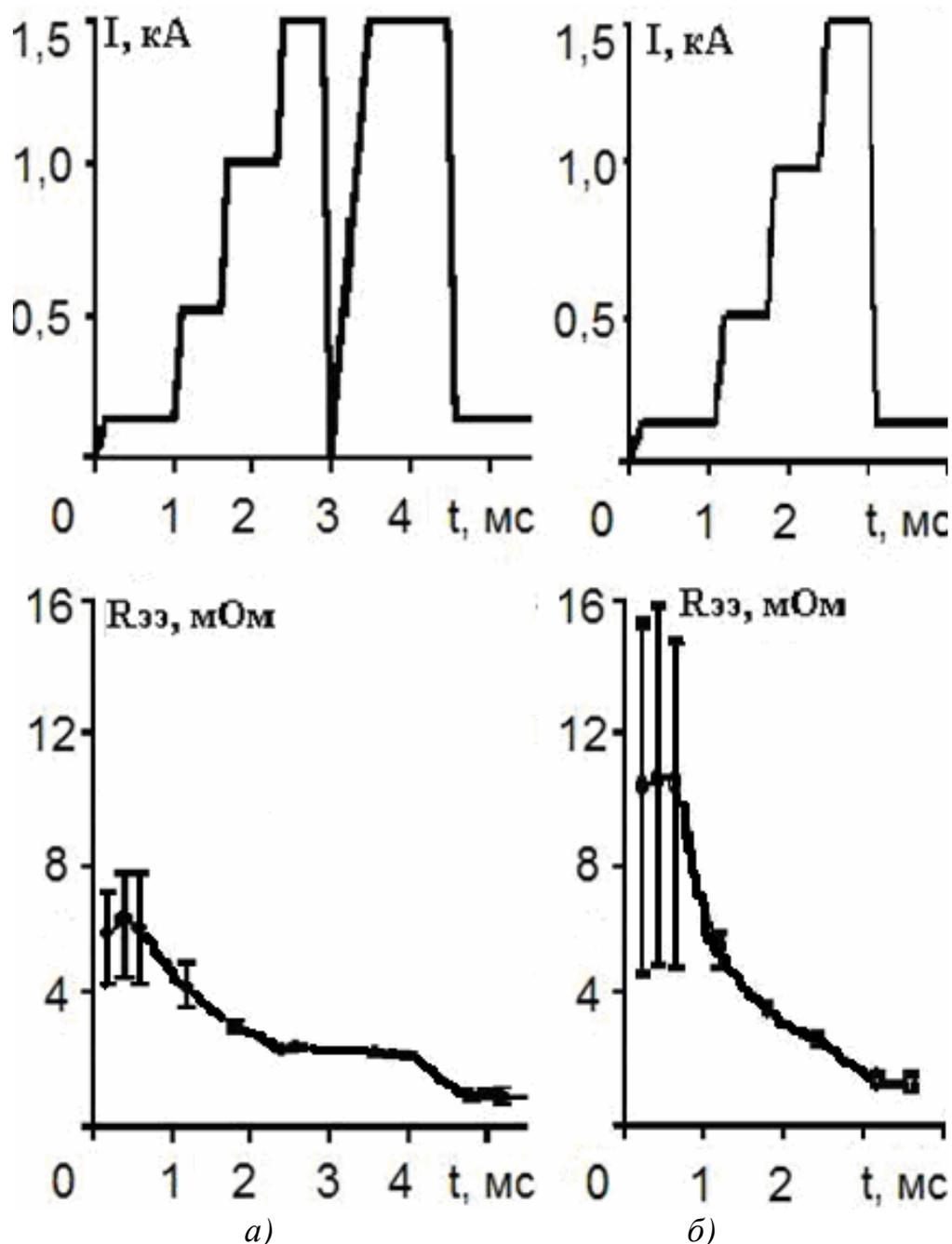


Рис. 9. Влияние АВП импульса тока на стабилизацию сопротивления участка электрод-электрод: *а)* партия поставки №1; *б)* партия поставки №2

Было выявлено, что наиболее эффективно стабилизирует значения сопротивления  $R_{эз}$  дискретное двухступенчатое (500 А; 0,5 мс) повышение тока до 1 кА (рис. 9, *а*). Из всех исследованных режимов разброс значений сопротивления  $R_{эз}$  (и соответственно  $R_{дд}$ ) оказался минимальным при максимальных абсолютных значениях, что благоприятно для концентрации тепловыделения в контакте деталь-деталь. Дальнейшее протекание тока уменьшает абсолютные значения сопротивления  $R_{эз}$  и не оказывает влияния на его стабилизацию.

С целью оптимизации параметров подогревающего импульса тока провели дополнительный эксперимент по изложенной выше методике. Эксперимент проводили на ячейках ДР из другой партии поставки после замены электродов. АВП

импульсов тока и соответствующие им изменения значений сопротивления  $R_{\text{св}}$  представлены на рис. 9, б. На режиме с дискретным двухступенчатым (500 А; 0,5 мс) повышением тока до 1 кА, были получены аналогичные результаты по стабилизации значений сопротивления  $R_{\text{св}}$ , хотя их первоначальный разброс различался более, чем в 2 раза.

**Четвертый раздел** посвящен исследованию влияния длительности импульса тока на этапе сварки, а также характера его спада, на структуру металла литого ядра и механические свойства соединения при контактной точечной микросварке ячеек ДР толщиной 0,25 мм из циркониевого сплава Э110. Исследования проводили с использованием электродов из бронзы Бр.ХЦр со сферической рабочей поверхностью радиусом 4 мм. Усилие сжатия электродов  $F$ , задавали равным  $300^{+40}$  Н.

Алгоритмом амплитудной модуляции сварочного тока предусматривали два этапа формирования соединений: подогрев и сварка. Амплитуда импульса тока на этапе сварки  $I_{\text{св}}$  составляла 3 кА. Варьируемым параметром служила длительность импульса тока на этапе сварки ( $t_{\text{св}}$ ), которую изменяли в пределах  $0 \div 2,5$  мс. Остальные параметры режима оставались неизменными.

Из полученных результатов следует, что литое ядро при сварке начинает формироваться при превышении  $t_{\text{св}}$  величины 0,2 мс (рис. 10). Характер изменения площади литого ядра находится в сложной зависимости от длительности основного импульса тока. При превышении  $t_{\text{св}}$  величины 1,5 мс рост площади литого ядра прекращается, что связано, по-видимому, с геометрическим фактором рабочей поверхности электродов. Дальнейшее увеличение длительности  $t_{\text{св}}$  приводит к росту объема литого ядра за счет увеличения глубины проплавления, что способствует огрублению литой дендритной структуры. Металлографический анализ циркониевого

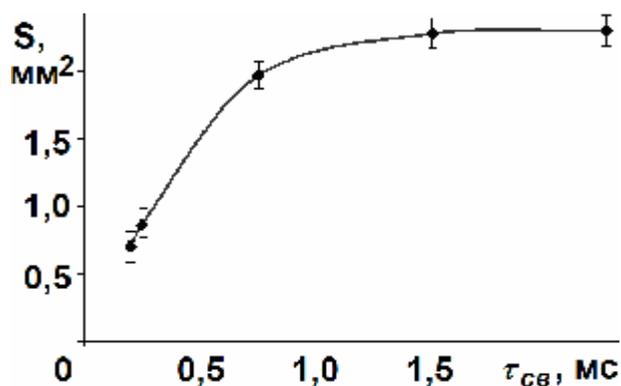


Рис. 10. Влияние длительности этапа сварки на площадь литого ядра

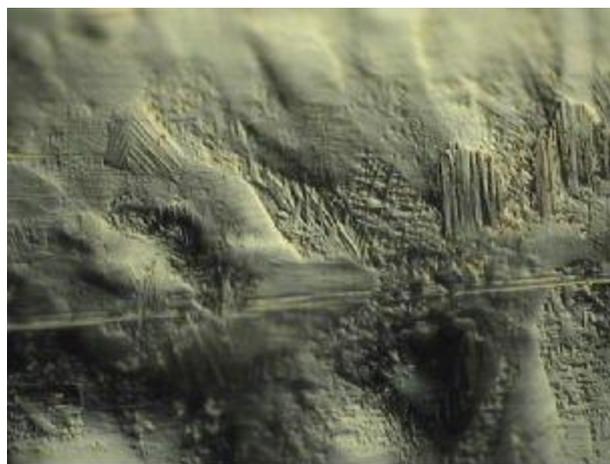


Рис. 11. Микроструктура металла литого ядра при  $t_{\text{св}} = 1,5$  мс ( $\times 500$ )

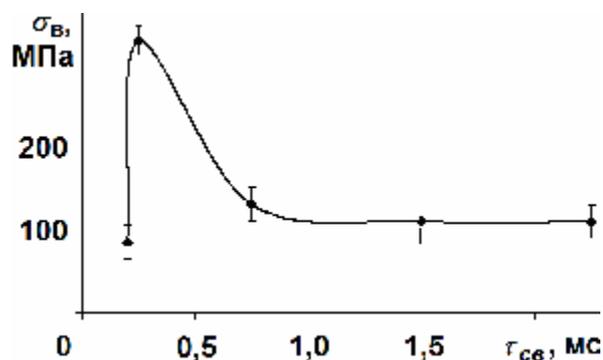


Рис. 12. Влияние длительности этапа сварки на прочность соединений

сплава Э110 свидетельствует о том, что размер дендритов в литом ядре на порядок превышает средний размер исходного зерна (рис. 11).

Предел прочности исследуемых сварных соединений в зависимости от  $t_{св}$  изменяется по кривой с максимумом (рис. 12). Восходящая часть кривой предела прочности обусловлена ростом площади физического контакта соединяемых изделий, а нисходящая – увеличением микронапряжений, образованием метастабильных фаз и огрублением литой структуры ядра.

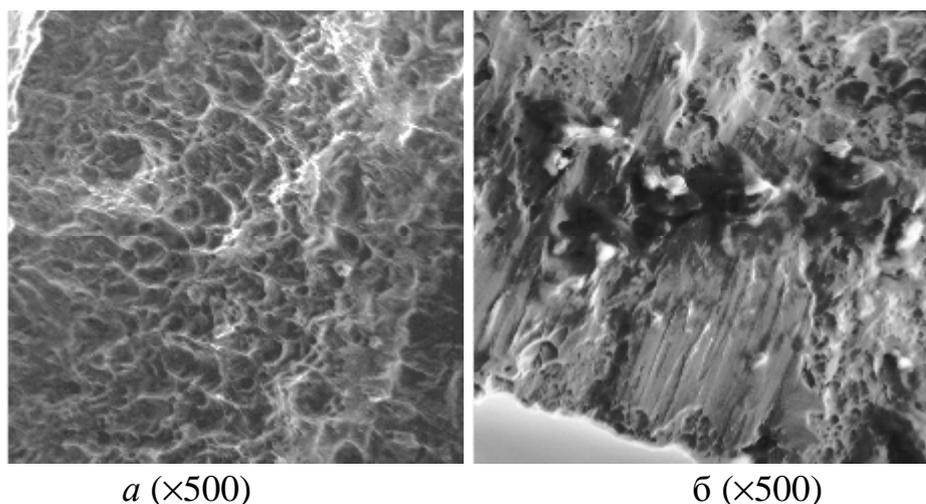


Рис. 13. Микрофрактография поверхности разрушения сварных образцов после испытаний соединений на растяжение: а)  $t_{св} = 0,25$  мс; б)  $t_{св} = 2,5$  мс

Анализ поверхности разрушения исследуемых образцов свидетельствует о том, что вырыв ядра происходит по зоне сплавления с основным объемом металла. При этом поверхность разрушения образцов, имеющих максимальные значения предела прочности при растяжении (рис. 12), имеет типично вязкий рельеф (рис. 13, а). Увеличение  $t_{св}$  приводит к формированию типично хрупкого излома. Микрофрактография поверхности разрушения соединения представляет собой участки хрупкого внутреннего транскристаллитного разрушения сколом (рис. 13, б).

В работах Гельмана А. С., Гуляева А. И., Чакалева А. А. и др., было предложено реализовывать частичную термообработку сварных соединений, повышающую стабильность их

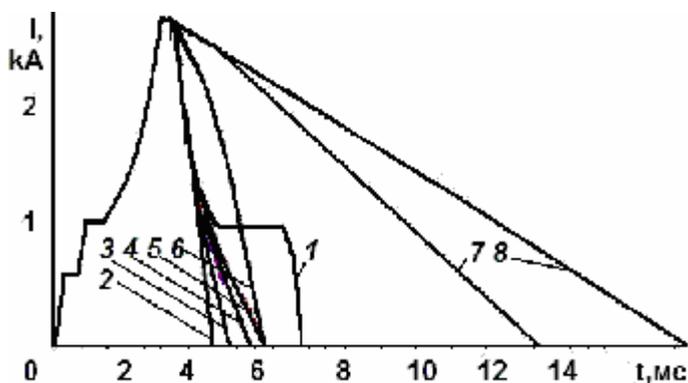


Рис. 14. АВП импульсов тока с разными длительностями его спада

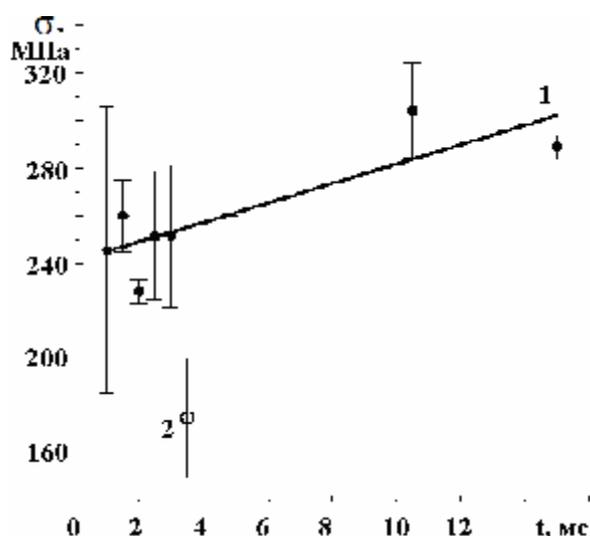


Рис. 15. Влияние длительности спада тока на прочность соединения:  
1) непрерывное уменьшение тока;  
2) ступенчатое уменьшение тока

прочностных свойств, посредством модуляции тока после завершения формирования зоны сплавления. Для микросварки, учитывая малую тепловую инерцию деталей, наиболее рациональным является увеличение длительности спада тока, в связи с чем были проведены исследования по определению ее влияния на структуру и свойства соединений. АВП импульсов тока приведены на рис. 14.

На рис. 15 (линия 1) представлена зависимость прочности соединений от длительности спада тока. Видно, что увеличение времени спада тока приводит к повышению прочности соединения и уменьшению разброса ее значений. Это объясняется формированием мелкодисперсной структуры металла литого ядра в процессе охлаждения (рис. 16, а), с одновременным снижением остаточных напряжений. При ступенчатом уменьшении тока (рис. 14, режим 1), происходит значительное снижение прочности (до 180 МПа, рис. 15, точка 2), что обусловлено крупнодисперсной структурой металла литого ядра (рис. 16, б) и повышением объемного содержания метастабильной мартенситной фазы.

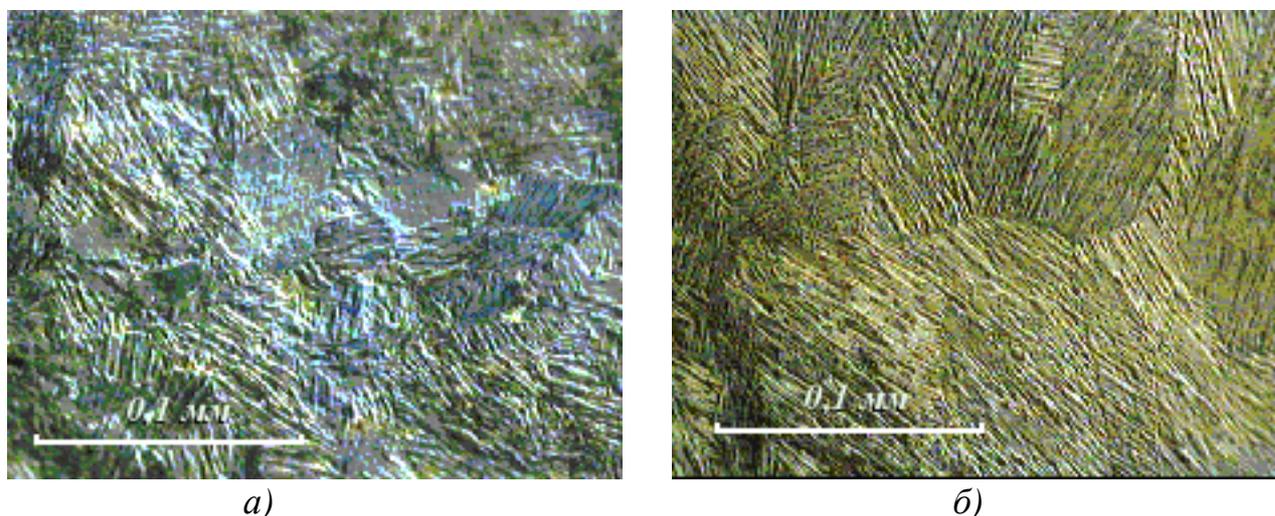


Рис. 16. Микроструктура металла литого ядра при различных скоростях спада тока (рис.14); а) режим №8; б) режим №2

Проведенные исследования позволили сформулировать требования к амплитудно-временным параметрам импульса тока, применительно к сварке тонкостенных деталей из циркониевого сплава Э110. В частности, для эффективной стабилизации значений контактных сопротивлений участка электрод-электрод необходимо применять на этапе подогрева импульс тока с дискретным двухступенчатым (500 А; 0,5 мс) повышением тока до 1 кА, после чего на этапе сварки увеличить ток до 3 кА за 1 мс и после 0,25 мс последующее его равномерное уменьшение до нулевого значения в течение 14 мс.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Определены закономерности изменения параметров рабочих поверхностей электродов от количества сваренных с их использованием точек. Установлено, что по мере износа электродов площадь литого ядра и прочность

получаемых сварных точек уменьшаются, а увеличение амплитуды сварочного тока не позволяет компенсировать ухудшение качества соединений.

2. Показано, что необходимо экспериментальное подтверждение расчетных значений дестабилизирующих факторов, оказывающих влияние на качество сварных соединений, так как они характеризуются существенным разбросом.

3. Установлено, что при контактной точечной микросварке деталей толщиной 0,25 мм из циркониевого сплава Э110 начальные условия формирования соединения стабилизируются ( $R_{\text{св}}=3,2\pm 0,3$  мОм) на этапе подогрева, для реализации которого необходимо дискретное двухступенчатое (500 А; 0,5 мс) повышение тока до 1 кА. В случае увеличения длительности этапа подогрева, а также скорости нарастания тока или его амплитуды, сопротивление участка электрод-электрод уменьшается.

4. Экспериментальные исследования влияния длительности импульса тока с амплитудным значением 3 кА (на этапе сварки) на свойства соединения деталей толщиной 0,25 мм из циркониевого сплава Э110 позволили выявить, что общая зона сплавления начинает формироваться по истечении 0,2 мс. Дальнейшее увеличение длительности импульса тока приводит к улучшению прочностных показателей соединения за счет увеличения глубины проплавления. При длительности импульса тока более 1,5 мс рост объема расплавленного металла прекращается, а структура металла литого ядра становится крупнодисперсной и характеризуется наличием хрупких метастабильных фаз, что снижает прочностные свойства соединения.

5. Увеличение времени спада тока с 1 мс до 14 мс (после формирования общей зоны сплавления) приводит к повышению прочности соединения в среднем на 18 % и уменьшению разброса ее значений до 3 %.

6. Результаты проведенных исследований подтверждают, что разработанные амплитудно-временные параметры униполярного импульса тока при сварке ячеек дистанционирующих решеток из циркониевого сплава Э110 толщиной 0,25 мм позволяют формировать соединения прочностью  $290\pm 10$  МПа.

#### **Основные публикации по теме диссертации:**

1. Слободян М. С. Управление свойствами соединений сплавов циркония: Монография. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 108 с.
2. Слободян М. С. Влияние энерговложения при точечной микросварке на формирование неразъемного соединения одноименных деталей из стали 12Х18Н10Т и циркониевого сплава Э110 / М. С. Слободян, А. С. Киселев, С. Ф. Гнусов // Новые материалы. Создание, структура, свойства – 2003: Труды рег. школы-семинара. – Томск: 2003. – С. 60–61.
3. Гнусов С. Ф. Управление параметрами режима при точечной микросварке / С. Ф. Гнусов, А. С. Киселев, М. С. Слободян, Б. Ф. Советченко //

Компьютерные технологии в соединении материалов: Тез. докл. 4-й Всеросс. НТК. – Тула, 2003. – С. 111–113.

4. Слободян М. С. Влияние скорости ввода энергии на формирование неразъемного соединения одноименных деталей из стали 12Х18Н10Т и циркониевого сплава Э110 / М. С. Слободян, А. С. Киселев, С. Ф. Гнусов // Современные техника и технологии: Труды X юбил. Междунар. конф. студентов и молодых ученых. – Томск: 2004. – С. 208–210.
5. Киселев А. С. Влияние амплитудно-временных параметров режима на формирование соединения при точечной микросварке / А. С. Киселев, М. С. Слободян, С. Ф. Гнусов, Б. Ф. Советченко, М. М. Нехода, А. В. Струков, П. М. Юрин // Сварка и контроль – 2004. Сб. докладов Всероссийской конф. Пермь, 2004. – Т. 1. – С. 258–262.
6. Слободян М. С. Стабильность контактного сопротивления при точечной микросварке циркониевого сплава Э110 / М. С. Слободян, А. С. Киселев, С. Ф. Гнусов // Новые материалы. Создание, структура, свойства – 2004: Труды регион. школы-семинара. – Томск: 2004. – С. 156–159.
7. Гнусов С. Ф. Влияние амплитудно-временных параметров импульса тока на свойства литого ядра при точечной микросварке / С. Ф. Гнусов, М. С. Слободян, А. С. Киселев, Б. Ф. Советченко // Сварка и контроль – 2005: Материалы докладов 24-й научно-технической конф. сварщиков Урала и Сибири. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – С. 133-137.
8. Слободян М. С. Стабилизация контактных сопротивлений подогревающим импульсом тока при точечной микросварке / М. С. Слободян, А. С. Киселев, С. Ф. Гнусов // Современные техника и технологии: Труды XI Междунар. научно-практ. конф. студентов и молодых ученых. – Томск: 2005. – С. 198-201.
9. Гнусов С. Ф. Формирование соединения при точечной микросварке / С. Ф. Гнусов, А. С. Киселев, М. С. Слободян, Б. Ф. Советченко, М. М. Нехода, А. В. Струков, П. М. Юрин // Сварочное производство. – 2005. – №4. – С. 37-41.
10. Гнусов С. Ф. Влияние параметров режима точечной микросварки на структуру и свойства соединений из сплава Э110 / С. Ф. Гнусов, А. С. Киселев, М. С. Слободян, Б. Ф. Советченко, М. М. Нехода, А. В. Струков, П. М. Юрин // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – №3. – С. 135-139.
11. Гнусов С. Ф. Влияние состояния рабочей поверхности электродов на стабильность качества соединений при точечной микросварке / С. Ф.

Гнюсов, А. С. Киселев, М. С. Слободян, Б. Ф. Советченко // Сварка в Сибири. – 2005. – № 1. – С. 60-62.

12. Gnyusov S. V. Formation of a joint in resistance spot microwelding / S. V. Gnyusov, A. S. Kiselev, M. S. Slobodyan, B. F. Sovetchenko // Welding International. – Cambridge England, 2005. – №9. – p. 737–741.

13. Гнюсов С. Ф. Стабилизация контактных сопротивлений при точечной микросварке / С. Ф. Гнюсов, А. С. Киселев, М. С. Слободян, Б. Ф. Советченко // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 312. – №1. – С. 130-133.