На правах рукописи

Typy

КРУТИКОВ ВАСИЛИЙ ИВАНОВИЧ

СВАРКА СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ И ПРЕССОВАНИЕ ИРИДИЕВЫХ НАНОПОРОШКОВ ПОСРЕДСТВОМ СЖАТИЯ ПРОВОДЯЩИХ ОБОЛОЧЕК В ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Специальность 01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Екатеринбург – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН)

Научный ИВАНОВ Виктор Владимирович,

руководитель: доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, директор Физтех-школы электроники, фотоники и молекулярной физики МФТИ, г. Долгопрудный

Научный ПАРАНИН Сергей Николаевич,

консультант: кандидат физико-математических наук, заведующий Лабораторией прикладной электродинамики ИЭФ УрО РАН, г. Екатеринбург

Официальные КРИВОШЕЕВ Сергей Иванович,

оппоненты: доктор технических наук, профессор Высшей школы высоковольтной энергетики, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург;

ТЕРЕЩЕНКО Наталья Адольфовна,

кандидат технических наук, старший научный сотрудник Лаборатории физического металловедения, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург

Ведущая Федеральное государственное бюджетное учреждение организация: Науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук (ИСМАН), г. Черноголовка

Защита состоится 15 декабря 2020 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 004.024.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук по адресу:

620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106, ИЭФ УрО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться В библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии сайте наук И на http://www.iep.uran.ru/diss/zased/

Автореферат разослан «____» ____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета доктор физико-математических наук

Mesbe geb

Медведев М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В мире постоянно разрабатывают новые материалы, которые обладают уникальными свойствами. И часто к ним не удаётся применить традиционные технологии обработки. В некоторых случаях к хорошим результатам приводят динамические методы с высокой концентрацией энергии. Так в настоящей работе радиальное сжатие проводящей оболочки импульсным магнитным полем было применено для ударной сварки трубчатых деталей из специальных сталей взамен традиционной жидкофазной сварки. Этот же метод был применен для формования тонкостенной трубы из наноразмерного порошка иридия вместо традиционной технологии изготовления сварной шовной трубы.

Сварка стальных деталей актуальна в области атомной энергетики. Атомная энергетика на сегодня является одним из основных источников электроэнергии для человечества: её доля в 2019 г составила 16% от общей генерируемой мощности в мире, 18% в России, 20% в США, 71% во Франции. В этой области актуальны переход к замкнутому ядерному топливному циклу и разработка альтернативных материалов на замену циркониевых сплавов для оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов). В замкнутом ядерном топливном цикле будет целесообразно использовать топливо из смеси оксидов делящихся материалов в реакторах на быстрых нейтронах, оболочки ТВЭЛов которых будут изготовлены из специальных сталей.

Ферритно-мартенситные (ФМ) и дисперсионно-упрочнённые (ДУО) стали, перспективные для применения в качестве оболочек ТВЭЛов ядерного реактора на быстрых нейтронах, к сожалению, не свариваются жидкофазными способами. Без дополнительной термообработки у первых при охлаждении после сварки происходит фазовый переход, приводящий к появлению микротрещин в области шва, у вторых после расплавления нарушается однородность распределения упрочняющих частиц, что в итоге снижает механическую прочность сварного шва. Существуют работы по контактной сварке таких сталей под давлением¹, однако этот способ соединения сопровождается образованием зоны термического влияния, и детали требуют последующей термообработки.

Перспективным способом соединения таких материалов является сварка высокоскоростным ударом, которая может быть реализована по твердофазному механизму за счет совместной термопластической деформации приконтактных объемов свариваемых материалов. Наряду с известной сваркой взрывом, промышленно применяемой более 40 лет², для соединения в условиях высокоскоростного удара деталей малых размеров актуальной является магнитно-импульсная сварка³ (МИС), обычно применяемая для сварки деталей

¹ Pressurized resistance welding technology development in 9Cr-ODS martensitic steels / M. Seki, K. Hirako, S. Kono [et al.] // J. Nucl. Mater. – 2004. – Vol. 329–333., N 1-3 PART B. – P. 1534–1538.

² Физика упрочнения и сварки взрывом / А.А. Дерибас. – Новосибирск : Наука, 1972. - 188 с.

³ Дудин А.А. Магнитно-импульсная сварка металлов. Москва, Металлургия, 1979. 128 с.

из алюминиевых, медных сплавов и мягких сталей. В этой технологии для разгона перед ударом одной или обеих деталей применяют сильное импульсное магнитное поле. Сложность магнитно-импульсной сварки в применении к прочным сталям заключается в необходимости создания сильных импульсных магнитных полей амплитудой на уровне 40 Тл и выше, что требует применять специальные прочные соленоиды, стойкие к импульсным термомеханическим нагрузкам.

Соединение в твёрдой фазе может быть применимо и к деталям из стали с покрытием. Так, традиционная жидкофазная сварка деталей из оцинкованной стали представляет известные трудности, связанные с интенсивным кипением и окислением цинка во время сварки. Особую сложность представляет повторное нанесение цинкового покрытия в труднодоступных для этого местах, таких, как внутренние полости труб и радиаторов отопления. Применение магнитно-импульсной сварки за счет кратковременности процесса позволяет существенно ограничить по времени тепловое воздействие на материал. И это, наряду с реализуемой нахлёсточной геометрией соединения, позволяет сваривать детали без повторного нанесения цинкового покрытия на сварной шов.

Иридий высоко ценят как материал тиглей, контейнеров, держателей затравки при выращивании кристаллов, благодаря его высокой температуре плавления и химической стойкости. Порошковая технология изготовления трубчатых тонкостенных изделий ИЗ иридия актуальна, поскольку традиционный маршрут изделий изготовления таких включает многоступенчатую очистку заготовок и их последующую механическую обработку в горячем виде. Кроме того, иридий лучше поддается механической обработке, если имеет тонкозернистую структуру.

Степень разработанности темы исследования

Первые известные исследования магнитно-импульсной сварки коррозионно-стойких жаропрочных сталей, пригодных для оболочек ТВЭЛов, описали W.F. Brown и коллеги⁴. Результаты их работы показали прекрасную применимость магнитно-импульсной сварки для соединения этих материалов: соединение оказалось прочнее, чем исходная труба, утечек гелия не было 10^{-10} мбар·л/с. чувствительностью масс-спектрометром обнаружено с Дисперсионно-упрочнённую сталь в этой лаборатории не сваривали, вероятно, ввиду того, что лаборатория перестала разрабатывать данную тематику до попыток внедрения этой стали.

К соединению ферритно-мартенситных и дисперсионно-упрочнённых сталей магнитно-импульсной сваркой впервые подошёл коллектив J. McGinley⁵ и коллег. Они успешно соединили детали из ферритно-мартенситных сталей Gr. 91 между собой: гелиевый масс-спектрометр не зарегистрировал утечек при

⁴ Brown W.F., Bandas J., Olson N.T. Magnetic Welding of Breeder Reactor Fuel Pin End Closures // Welding Journal. 1978. P. 22-26.

⁵ McGinley J. Electromagnetic Pulse Technology as a Means of Joining Generation IV Cladding Materials // Proceedings of the 17th International Conference on Nuclear Engineering ICONE17 July 12-16, 2009, Brussels, Belgium. ASME, 2010. P. 627–632.

пределе чувствительности 10^{-9} мбар·л/с. Детали же из дисперсионноупрочнённой стали PM 2000 ODS были соединены ими с натеканием гелия $7,0\cdot10^{-9}-1,1\cdot10^{-8}$ мбар·л/с. Эти значения близки к идеалу, однако, ещё показывают небольшую утечку.

В литературе значительное внимание уделяют соединению деталей из стали с различными покрытиями⁶. Толщина покрытия в приведённой работе не превышала 10 мкм, при этом соединение происходило в основном с покрытием на стальных деталях, а не со стальной основой. Оцинкованные стальные детали с покрытием толщиной до 10 мкм были успешно соединены, однако интерес для практического применения, например, в радиаторах отопления, представляют детали с большей толщиной покрытия, порядка 100 мкм.

Трубчатые изделия из иридия могут быть применены в качестве газовых сопел и насадков при производстве огнеупорных керамических волокон. Не так много работ посвящено изготовлению таких изделий. Обычно иридиевые тонкостенные трубы изготавливают из слитков после их электронно-лучевой плавки или дуговой переплавки в вакууме. Затем их прокатывают в горячем виде, формуют и дуговой сваркой сшивают трубы. Технологии, включающие плавление иридия, достаточно дороги. Дело осложняется тем, что иридий хрупок, если он содержит более 0,2% примесей по массе⁷, а при температуре плавления иридия многие материалы становятся летучими и загрязняют его. Однако уже очищенный иридий можно прокатывать в горячем виде и даже пластически деформировать при комнатной температуре. Кроме того, мелкозернистое состояние улучшает его способность к механической обработке.

Порошковая технология, в отличие от литья, позволяет обрабатывать чистый иридий и его сплавы сразу в мелкозернистом виде. Пока только появляются одиночные публикации, посвящённые прессованию и спеканию нанопорошков иридия⁸, однако в будущем эта область исследований должна будет развиваться, поскольку потребление иридия в мире растёт от года к году. Динамические методы обладают высоком потенциалом при уплотнении нанопорошков. Кроме того, из нанопорошков можно получить материал с субмикронным размером зерна, благодаря их способности к низкотемпературному спеканию.

На основании вышеизложенного были сформулированы цель и задачи работы.

⁶ Avettand-Fènoël M.N. et al. Effect of Steel Galvanization on the Microstructure and Mechanical Performances of Planar Magnetic Pulse Welds of Aluminum and Steel // Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci. 2018. Vol. 49, № 7. P. 2721–2738

⁷ Ermakov A. V. Naboichenko S. S. Iridium: Production, consumption, and prospects // Russ. J. Non-Ferrous Met. – 2012. – Vol. 53, № 4. – P. 292–301.

⁸ Способ получения изделий из металлического иридия пат. 2633203 Рос. Федерация. № 2015152955; заявл. 09.12.2015 опубл. 11.10.2017 бюл. № 29. 6 с.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью работы является развитие технологических принципов магнитноимпульсной обработки для получения неразъемных соединений оцинкованных и ограниченно свариваемых сталей, в частности, коррозионностойких, ферритно-мартенситных и дисперсионно-упрочнённых сталей, и для получения цельных тонкостенных трубчатых изделий из иридиевых нанопорошков.

Цель была достигнута решением следующих задач:

- разработка одновитковых индукторов для магнитно-импульсной сварки труб, конструкция которых, в частности, обеспечивает существенное снижение эрозионного разрушения контактов разъемного подключения индуктора к генератору импульсных токов;
- 2) экспериментальное исследование процессов магнитно-импульсной сварки коррозионностойких (STS 410), ферритно-мартенситных (Gr. 91) и дисперсионно-упрочнённых (9Cr-ODS) сталей в геометрии труба-заглушка;
- 3) исследование процессов магнитно-импульсной сварки деталей из стали 20 с цинковым покрытием в геометрии телескопической пары труб;
- 4) исследование процессов получения тонкостенных труб из наноразмерного порошка иридия радиальным магнитно-импульсным прессованием и спеканием.

Научная новизна

необходимые условия работе определены магнитно-импульсной В обработки и установлены параметры соударения, при которых формируются сварные соединения нового материала – дисперсионно-упрочнённой стали, пригодной к использованию в качестве оболочки тепловыделяющего элемента реактора. Благодаря установленным параметрам обработки, ядерного полученные соединения превосходят известные В мире аналоги по герметичности.

Разработан оригинальный магнитно-импульсный способ, позволяющий одновременно соединять детали из оцинкованной стали и закрывать шов цинком с целью повышения стойкости соединения к коррозии.

Радиальное магнитно-импульсное прессование с низкотемпературным спеканием успешно применено к нанопорошку иридия, что позволило впервые получить плотный спечённый чистый иридий с субмикронным размером зерна.

Теоретическая значимость

Теоретическая значимость работы состоит в расширении знаний о поведении материалов при высокоскоростном соударении в сильных электромагнитных полях.

Практическая значимость

В процессе исследований был разработан силовой магнитно-импульсный инструмент – индукторы различной конфигурации для многократной генерации импульсов магнитного поля с индукцией до 50 Тл микросекундного диапазона

длительностей, которые могут быть использованы для решения широкого спектра технических и исследовательских задач.

Магнитно-импульсным способом получено герметичное И прочное соединение сталей, разработанных для применения в реакторах на быстрых нейтронах. Данный метод позволяет проводить удалённую роботизированную непосредственного леталей ТВЭЛов без участия сварку В процессе Внедрение ТВЭЛов из ДУО квалифицированного персонала. сталей с увеличенным ресурсом позволит повысить степень использования ядерного топлива и, соответственно, снизить расходы на само топливо и его утилизацию.

магнитно-импульсной Благодаря сварке появляется возможность предварительно оцинкованные детали месте, когда соединять на нет возможности наносить покрытие на сварной шов, либо нанесение покрытия затруднено (например, покрытие внутренних поверхностей полостей, длинных труб). Это расширяет возможности металлообрабатывающих производств. Магнитно-импульсная сварка не требует термообработки деталей и защитной среды.

Значимость работы по уплотнению нанопорошка иридия состоит в расширении возможностей и удешевлении технологии получения тонкостенных изделий в цилиндрической симметрии из этого материала.

Методы диссертационного исследования

Для решения поставленных задач проведены экспериментальные исследования процесса магнитно-импульсной сварки деталей из ограниченно свариваемых сталей в геометрии «труба-заглушка» и «труба-труба», а также экспериментальное исследование радиального магнитно-импульсного прессования нанодисперсного порошка иридия. В работе были использованы аппаратура современные методики И для измерения параметров быстропротекающих процессов и решения материаловедческих задач.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработана технологичная в изготовлении конструкция одновиткового индуктора, которая обеспечивает снижение в два раза линейной плотности тока на сильноточных контактах разъемного подключения к генератору импульсных токов, вследствие чего значительно уменьшается эрозионное разрушение контактирующих поверхностей.

- 2. Установлены диапазоны скорости соударения v_i свариваемых поверхностей и скорости движения фронта контакта v_c (соответственно, 250-500 м/с и 3магнитно-импульсная 6 км/с), В которых реализуется сварка коррозионностойких, ферритно-мартенситных и дисперсионно-упрочнённых сталей в геометрии труба-заглушка. Оптимальные значения для начала сварки $v_i = 290 \pm 20$ м/с и $v_c = 3,2 \pm 0,2$ км/с для испытанных стальных трубок диаметром 7 мм и толщиной 0,6 мм достигаются в импульсном магнитном поле амплитудой 38 Тл и длительностью полупериода 14 мкс. При таких сварной характеризуется параметрах соединения ШОВ однородной микроструктурой, волнообразованием, высокой механической прочностью и газовой плотностью.
- 3. Сварное нахлесточное соединение оцинкованных стальных деталей магнитно-импульсным способом реализуется путем предварительного частичного удаления (не нанесения) цинкового покрытия в средней части перекрытия свариваемых деталей, что обеспечивает сварку деталей по стали и защиту сварного шва от коррозии цинком, остающимся в краевых зонах соединения.
- 4. Радиальное магнитно-импульсное прессование при магнитном давлении амплитудой 80–120 МПа и длительности импульса около 100 мкс с последующим спеканием в водороде при 1000°С обеспечивает получение трубчатых тонкостенных изделий из поликристаллического иридия чистотой 99,99% с субмикронной структурой с масштабом 0,3 мкм и относительной плотностью до 99%.

Степень достоверности полученных результатов

Обоснованность и достоверность результатов исследования определяется использованием современных аттестованных методик измерения. Полученные в работе результаты демонстрируют хорошее согласие с результатами экспериментов других исследователей и не противоречат теоретическим представлениям.

Апробация работы

Результаты работы обсуждались на следующих конференциях:

- 1. Конференциях молодых учёных ИЭФ УрО РАН, (дипломы за лучшие доклады в 2014, 2017 и 2018 годах), Екатеринбург;
- Международной конференции «6th International conference on high-speed forming – 2014 (ICHSF-2014)», Тэджон, Республика Корея, 2014;
- 3. Международной конференции «XII International Symposium on Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations (EPNM-2014)», Краков, Польша, 2014;
- 4. Международной конференции «International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2014)», (доклад отмечен дипломом Организационного комитета – премия за вклад в развитие импульсной техники), Томск, 2014;

- 5. 21-й Всероссийской научной конференции студентов-физиков, Омск, 2015;
- 6. Всероссийской молодёжной научной конференции, посвящённой 95-летию основания Уральского университета, Екатеринбург, 2015;
- 7. III конференции молодых ученых РУСНЦ РАРАН «Молодежь. Наука. Инновации в оборонно-промышленном комплексе» (доклад отмечен дипломом Организационного комитета за лучшую работу), Екатеринбург, 2016;
- 8. Международной конференции «International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2016)» (доклад отмечен дипломом Организационного комитета за высокий научный уровень), Томск, 2016;
- 9. Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов (DFMN-2017)», Москва, 2017;
- 10.Международной конференции «7th Euro-Asian Pulsed Power Conference (EAPPC&BEAMS 2018)», Чанша, КНР, 2018.
- 11.XX Юбилейной Всероссийской школе-семинаре по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-20), Екатеринбург, 2019.

Публикации

Результаты работы опубликованы в 16 печатных работах, из них 4 статьи в рецензируемых журналах, 1 патент и 1 заявка на патент на изобретение и 10 тезисов докладов Всероссийских и международных конференций.

Личный вклад автора

Личный вклад в работу автора, Крутикова В.И., состоит в создании магнитно-импульсного оборудования, экспериментального силового исследовании влияния параметров магнитно-импульсной обработки на качество и структуру соединения деталей, проведение электродинамических измерений, обработке результатов, а также в непосредственном участии в выполнении всех остальных этапов работы. Определение целей и задач исследований, обсуждение полученных результатов, их анализ и обобщение, редакция основных выводов и научных положений проводились совместно с научным руководителем д. ф.-м. н. чл.-корр. РАН В. В. Ивановым и научным консультантом к. ф.-м. н. С. Н. Параниным.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объём работы составляет 120 страниц, 73 рисунка и 28 таблиц. Список литературы содержит 107 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы и определено направление исследований, сформулированы цель и задачи исследований, а также положения, выносимые на защиту. Приведены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, личный вклад автора, структура диссертации.

В первой главе приведены данные о ферритно-мартенситных и дисперсионно-упрочнённых сталях как о перспективных материалах оболочек ТВЭЛов и о способах соединения таких сталей в мировой практике. Определены требования, предъявляемые к соединению трубы и заглушки из таких материалов, главное из которых состоит в уменьшении термического влияния на материал в месте соединения деталей.

Магнитно-импульсная сварка (МИС) рассмотрена как способ твердофазного соединения материалов. Приведён опыт других исследователей по соединению ограниченно свариваемых и оцинкованных сталей методом МИС. Дано описание возможных конструкций одновитковых индукторов, необходимых для МИС миниатюрных деталей, таких, как оболочки ТВЭЛов. Рассмотрены особенности соударения при такой сварке, описаны основные параметры в процессе столкновения: нормальная скорость соударения v_i и скорость фронта контакта (или точки контакта) v_c . Описан вид границы материалов после МИС с характерным волнообразованием. На основании данных из литературных источников сформулированы цель и задачи работы.

В этой же главе дан обзор методов получения тонкостенной трубы из иридия. Магнитно-импульсное прессование нанопорошка рассмотрено как конкурентный способ в сравнении с горячим изостатическим прессованием механической обработкой со сшиванием трубы.

Во второй главе описано оборудование и методы исследования, применённые в настоящей работе. Сварку деталей и прессование порошка проводили на генераторе импульсных токов PCG-135 (ГИТ), нагруженном на одновитковый индуктор. Методы, помимо экспериментов по сварке и прессованию включают в себя численную оценку динамики стенки оболочки при сжатии, расчёт и аттестацию одновитковых индукторов, измерение импульсных токов и магнитных полей, а также эксперимент по контактной регистрации столкновения деталей.

Генератор импульсных токов представляет собой емкостной накопитель энергии, ёмкостью 425 мкФ и максимальным зарядным напряжением 25 кВ. Коммутация батареи на нагрузку организована с использованием вакуумных разрядников. Собственные индуктивность и сопротивление генератора равны 15 нГн и 1,5 мОм, соответственно. Максимальный ток в режиме короткого замыкания может составлять 1,8 МА, при этом полупериод тока составляет 12 мкс, что соответствует частоте 42 кГц.

Из обзора литературы следует, что необходимая амплитуда магнитного поля в индукторе для сварки составляет 37–40 Тл. Под имеющийся генератор и

необходимую амплитуду магнитного поля были рассчитаны параметры разряда батареи на одновитковые индукторы из различных материалов: термообработанных бериллиевой бронзы БрБ2 и стали 30ХГСА.

Эксперименты по сварке проводили в индукторах традиционной конструкции. По результатам использования индукторов сильного поля в данной главе была предложена новая конструкция индуктора. Техническая задача состояла в том, чтобы избавить индукторы традиционной конструкции от части их недостатков, главным образом – снизить эрозию в контактах.

Поставленная задача решалась благодаря выполнению разъемного одновиткового индуктора из двух или из трёх прямоугольных пластинтокопроводов. Предложенный вариант индуктора из трёх токопроводов показан на рисунке 1. Он состоит из потенциального *1* и двух нулевых токопроводов 2, являющихся зеркальными по отношению друг другу. Между пластинами за счёт совмещения выполненных в них полуцилиндрических пазов формируется рабочий канал 3. С одной стороны 4 токопроводы соединяются между собой, а с другой 5 – с токовыводыми генератора тока.

В такой системе ток протекает по внутренним поверхностям токопроводов и при приближении к участкам с вырезами и выступами перетекает на их внутренние кромки – области щели и канала индуктора. Протекание тока по обеим сторонам потенциального токопровода и наличие двух нулевых токопроводов позволяют снизить линейную плотность тока в контактах в два раза, при том же габаритном размере, по сравнению С индуктором традиционной конструкции. Здесь и далее линейной плотностью тока названо отношение амплитуды тока к длине контактных площадок в направлении, перпендикулярном протеканию тока. То есть для подключения импульсного тока амплитудой 1 МА ширина такого индуктора может быть равна 100 мм для ограничения линейной плотности тока в контактах величиной 50 кА/см, экспериментально найденной в работе Б. Э. Фридмана и Р. Г. Рутберга⁹. Это максимальное значение, достигаемое при безыскровой работе контактов из меди и стали.

Изготовленный трёхпроводный образец индуктора (рисунок 2а) сравнили с традиционным одновитковым индуктором (рисунок 2б). Оба они были изготовлены из термообработанной стали ЗОХГСА. Канал индуктора новой конструкции был выполнен в виде отверстия в потенциальном токопроводе, что не меняет сути разъёмной конструкции. Традиционный индуктор представлял токарно-фрезерованную собой цельную деталь с полуфланцами лля подключения к генератору тока. Рабочий канал индукторов имел примерно одинаковые размеры (таблица 1). Индукторы тестировали при различных генератора, зарядных напряжениях В экспериментах регистрировали производную тока *di/dt* через индуктор с помощью пояса Роговского,

⁹ Fridman B.E., Rutberg P.G. Electrical contacts and conductors for megaamperes pulse currents // PPPS-2001 Pulsed Power Plasma Science 2001. 28th IEEE International Conference on Plasma Science and 13th IEEE International Pulsed Power Conference. Digest of Papers (Cat. No.01CH37251). IEEE, 2002. Vol. 1. P. 314–317.

производную магнитного поля *dB/dt* индуктивным датчиком в центре рабочего канала.



Рисунок 1 – Вариант конструкции одновиткового индуктора, выполненного из трех токопроводов: детали (а); индуктор в сборе и разрез в области канала индуктора (б):

1 _ потенциальный токопровод, 2 – нулевые токопроводы, 3 рабочий канал индуктора, 4 _ поверхность контакта между деталями, 5 – контактные области для подключения к выводам генератора тока, 6 _ изоляционный зазор.

Стрелками схематично показано направление протекания тока



Рисунок 2 – Внешний вид индуктора новой конструкции (а) и индуктора традиционной конструкции (б), подключенных к коллектору генератора тока PCG-135: 1 – потенциальный токопровод, 2 – нулевые токопроводы, 3 – рабочий канал индуктора, 6 – изоляционный зазор, 7 – технологические щели, 8 – переходной фланец для подключения внешних нулевых токопроводов к коллекторному узлу генератора тока коаксиального типа

Временные зависимости разрядного тока И магнитного поля (рисунок 3а, б) получали численным интегрированием. Индуктивность И сопротивление силового контура определяли из временных зависимостей тока по известной методике¹⁰. Частота колебаний тока для обоих индукторов практически не отличалась и составляла около 37 кГц, поскольку собственная индуктивность индукторов значительно меньше индуктивности остальных разрядного контура. Также незначительно отличается составляющих И сопротивление контура, что хорошо видно по затуханию колебаний тока.



Рисунок 3 – Типичные импульсы тока (а) и магнитной индукции (б) при разряде емкостного накопителя для индукторов двух конструкций: (1) – новый индуктор, (2) – индуктор традиционной конструкции

¹⁰ Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля: методы генерации и физические эффекты, связанные с созданием импульсных полей мегаэрстедного диапазона / Гейнц Кнопфель; [пер. с англ. Ф. А. Николаева и Ю. П. Свириденко]. – М.: Мир, 1972. 392 с.

В таблице 1 обобщены геометрические и электрические характеристики индукторов двух конструкций, измеренные при зарядном напряжении ГИТ 4,0 кВ.

Характеристика	Обознач.	Ед. измер.	Новый	Традиционный	
Габаритная длина индуктора	l _M	ММ	24*	30	
Длина рабочего канала	l_k	ММ	12	12	
Диаметр рабочего канала	d _ĸ	ММ	8,6	8,3	
Полупериод тока	T/2	мкс	13,2	13,0	
Геометрический фактор	B_m/I_m	Тл/МА	50,8	49,7	
Индуктивность контура	L	нГн	48	46	
Сопротивление контура	R	мОм	4,8	3,9	

Таблица 1 – Геометрические и электрические характеристики индукторов двух конструкций.

* – по краям нулевых пластин, без крепёжных болтов.

Таким образом, сравнение разработанного индуктора с индуктором традиционной конструкции показало идентичность их потребительских характеристик, таких как индуктивность разрядного контура в сборе с индуктором и эффективность преобразования электрической энергии емкостного накопителя в магнитную энергию (геометрический фактор B_m/I_m). При этом было достигнуто снижение линейной плотности тока в сильноточных контактах и улучшение их стойкости к эрозии. По новой конструкции подана патентная заявка на изобретение.

В третьей главе описан поиск оптимальных условий магнитнотруба-заглушка импульсной сварки В геометрии коррозионностойких, ферритно-мартенситных и дисперсионно-упрочнённых сталей, относящихся к классу ограниченно свариваемых. Исследовали влияние формы и размеров заглушки, параметров магнитно-импульсной обработки (ёмкости и зарядного напряжения батареи) на качество соединения, определяемое по длине сварного деталей, сваренных оптимальных шва. У В режимах, определяли микроструктуру сварного шва методами оптической и просвечивающей электронной микроскопии, распределение микротвёрдости вблизи сварного шва методом Виккерса, герметичность испытаниями на натекание гелия, прочность соединения гидравлическими испытаниями на разрыв.

Схема расположения деталей в индукторе, общая для всей серии экспериментов по сварке труб с заглушками, показана на рисунке 4. Был использован индуктор *1* традиционной конструкции длиной и диаметром канала соответственно 12 и 8,8 мм. Труба 2 была собрана с заглушкой *3* и медной оболочкой-спутником *4* на скользящей посадке.

Материалы труб были следующими:

- 1) Сталь STS 410, аналог 12Х13, коррозионностойкая, жаропрочная;
- 2) Сталь НТ-9, аналог ЭП450, ферритно-мартенситная, для оболочек ТВЭЛов;
- 3) Сталь 9Cr-ODS, дисперсионно-упрочнённая, для оболочек ТВЭЛов. Заглушки были выполнены из ферритно-мартенситной стали Gr. 91.



Рисунок 4 – Схематичное изображение деталей внутри индуктора (а) и их внешний вид (б): 1 – индуктор, 2 – труба, 3 – заглушка, 4 – оболочка-спутник

Трубы и заглушки были выточены из цельной заготовки, их поверхности после токарной обработки не полировали. Наружный диаметр стальной трубы составлял 7 мм, толщина стенки – 0,6 мм. Толщина стенки медного спутника во всех экспериментах была равной 0,5 мм.



Рисунок 5 – Эскиз заглушки

В результате оптимизирующего исследования, в котором изменяли длины частей заглушки L_C и L_T и угол конуса заглушек α (рисунок 5), а также условия магнитно-импульсной обработки, были найдены оптимальные условия соединения.

Наибольшая длина сварного шва *L* (см. рисунок 6), около 7 мм, была

достигнута на заглушках с $L_C = 9$ мм, $L_T = 10$ мм $\alpha = 5^{\circ}$ при обработке магнитным полем амплитудой 37–38 Тл (зарядное напряжение 8,5 кВ).

Продольные разрезы сварного шва до и после химического травления изучали на металлографическом микроскопе Olympus BX41. Сварной шов на нетравленых снимках выглядит как слияние деталей (рисунок 6). Диаметры конусной части заглушки, соответствующие началу и концу сварки, обозначены d_{hc} и $d_{\kappa c}$. Перемещения стенки по достижении d_{hc} и $d_{\kappa c}$ совместно с результатами оценки динамики оболочки позволили найти радиальные скорости внутренней стенки трубы v_i во время её столкновения с заглушкой. Суть оценки состоит в решении уравнения движения элемента трубы под действием давления магнитного поля, экранируемого трубой, за вычетом сопротивления трубы. Диффузия магнитного поля, изменение прочности при динамической деформации деталей и нагрев не учитывались.



Рисунок 7 – Основные параметры для сваренных образцов: радиальная скорость стенки трубы *v_i* и скорость точки контакта *v_c*



Рисунок 6 – Внешний вид образца сразу после сварки и после удаления лайнера продольный разрез (a): образца, «сшитый» ИЗ нескольких микрофотографий Схематичное (б); изображение к обработке микроснимков (в)

Скорость точки контакта v_{C} вычисляли по формуле:

 $v_C = v_i / \sin \alpha$

где v_i – радиальная скорость внутненней стенки трубы, а α – угол конуса заглушки (см. рисунок 5).

Диапазонпараметровсоударениявкоординатах $\langle v_C - v_i \rangle$ дляобразцов,сваренныхвоптимальнойгеометриизаглушки $(L_C = 9 \text{ мм}, L_T = 10 \text{ мм})$

 $\alpha = 5^{\circ}$), приведен на рисунке 7. Сварка происходила при радиальных скоростях v_i от 250 до 500 м/с, что соответствует диапазону скоростей точки контакта v_c от 3 до 6 км/с.

Положительные результаты с ФМ сталью HT-9, послужили отправной точкой для сварки труб из ДУО стали 9Cr-ODS с заглушками из ФМ стали Gr. 91. Детали обрабатывали с небольшими изменениями в сравнении с условиями, оптимальными для трубы из стали HT-9: диаметр заглушки уменьшили до внутреннего диаметра трубы 5,7 мм, а зарядное напряжение увеличили до 9,0 кВ, принимая в расчёт более высокую прочность данной трубы из ДУО стали.



Рисунок 8 – Микрофотография области соединения для трубы из 9Cr-ODS стали

Граница между трубой из стали 9Cr-ODS и заглушкой из Gr. 91 в области соединения выглядит как слабо различимая волнистая линия на металлографических снимках после травления (рисунок 8). До травления граница материалов была незаметна.

Образование соединения В твёрдой фазе было подтверждено с помощью данных просвечивающей электронной микроскопии c элементным анализом. Этому способсововало наличие вольфрама

только в материале труб и молибдена только в материале заглушек. Вольфрам и молибден были обнаружены по разным сторонам от границы шириной не более 500 нм.

Утечку гелия через соединения, полученные в оптимальных условиях, регистрировали масс-спектрометром Agilent VS PR02 с порогом чувствительности $1,0\cdot10^{-9}$ мбар·л/с. Течи менее порога чувствительности у образцов, сваренных в оптимальных режимах, что показывает лучшие результаты в сравнении с теми, что были получены коллективом J. McGinley¹¹.



Рисунок 9 – Внешний вид сборки с трубой из стали 9Cr-ODS после гидравлических испытаний на разрыв

Прочность соединений труб из 9Cr-ODS с заглушками из Gr. 91 проверяли тестом на разрыв внутренним давлением газа при комнатной повышенной И (650 °C) температуре (рисунок 9). Трубы разрушались при тангенциальном напряжении 875 МПа при комнатной температуре и 410 МПа при

повышенной, что соответствует давлениям газа 163 и 76 МПа. Картина разрушения показывает сравнимую или большую прочность соединения по отношению к прочности исходной трубы.

В четвёртой главе описана магнитно-импульсная сварка телескопических пар труб из стали 20 с цинковым покрытием толщиной около 0,1 мм. Для более эффективного ускорения наружной трубы использовали медную оболочку-

¹¹ McGinley J. Electromagnetic Pulse Technology as a Means of Joining Generation IV Cladding Materials // Proceedings of the 17th International Conference on Nuclear Engineering ICONE17 July 12-16, 2009, Brussels, Belgium. ASME, 2010. P. 627–632.

спутник. Размеры наружной трубы: внешний диаметр 27 мм, толщина стенки 0,9 мм; внутренней трубы: внешний диаметр 23 мм, толщина стенки 1,6 мм; медного спутника: внешний диаметр 28 мм, толщина стенки 0,5 мм. Магнитное поле создавали в стальном одновитковом индукторе с каналом диаметром 29 мм и длиной 12 мм, подключенном к тому же генератору PCG-135.



Рисунок 10 – Расположение труб из оцинкованной стали индукторе в цилиндрической (а) и конусной (б) схемах: 1 – внутренняя труба; 2 – наружная труба; 3 – медный спутник; 4 – индуктор, 5 – внутренняя оправка; 6 – центрующая оправка; *L* – рабочая зона индуктора; *L1* – перекрытие между трубами; *L2* – перекрытие между индуктором и наружной трубой; *d* – разгонный зазор; α – угол конуса внутренней трубы

Детали сваривали в двух вариантах расположения: цилиндрическом и отличающихся направлением конусном, движения фронта контакта (рисунок 10). В цилиндрической схеме (рисунок 10а) детали помещали в аксиально-неоднородное магнитное поле, индукция которого максимальна вблизи торца наружной трубы. Таким образом, торец наружной трубы первым касается внутренней, и точка контакта движется от него в направлении торца внутренней трубы. Разгонный зазор *d* здесь составлял 1,3-1,4 мм во всей области соударения. Трубы перекрывались с рабочей зоной индуктора на $L_2 = 6$ мм вдоль оси. Такое перекрытие, на половину рабочей зоны индуктора, обеспечивало соударение с одним фронтом контакта. Трубы были установлены внахлёст на 12 мм вдоль оси, длина медного спутника была равна 13 мм.

В конусной схеме (рисунок 10б) внутреннюю трубу предварительно формовали магнитно-импульсным способом без медного спутника. Угол её конуса к оси составлял 4°. Наружная труба сжималась приблизительно однородно вдоль оси. Фронт контакта, таким образом, двигался от торца внутренней трубы к торцу наружной. Здесь начальный разгонный зазор d (рисунок 10б) вблизи торца внутренней трубы составлял 1,6-1,7 мм, а конечный в узкой части конуса – 2,2 мм. Пересечение труб между собой L1 и индуктора с наружной трубой здесь было равно длине рабочей зоны индуктора L, 12 мм, длина медного спутника также была равна 13 мм.

Магнитно-импульсная обработка труб с сохранением всего цинкового покрытия приводила к их соединению по цинку (рисунок 11a, б), прочность которого на разрыв значительно меньше прочности стали. Такое соединение сочли непригодным для трубопроводов. Однако по виду очищенной шероховатой полосы на поверхности деталей (рисунок 11a) можно было сказать об области, где происходило волнообразное возмущение и удаление материала с поверхностей.



Рисунок 11. Внешний вид пары труб в цилиндрической оснастке с сохранением цинкового покрытия (а) и поперечный разрез обжатых труб (б)

На очищенных в этой области стальных деталях (рисунок 12а) в последующих экспериментах было получено соединение труб по стали с цинковыми краями, полностью скрывающими область сварки (рисунок 12б). Импульс магнитного поля, достаточный для стабильного соединения, имел амплитуду 40 Тл и полупериод 14 мкс. Длина сварного шва у цилиндрических образцов была больше, чем у конусных, и достигала 5,5–8,5 мм, что в несколько раз больше толщины стенок свариваемых труб.



Рисунок 12 – Схема частичного удаления цинкового покрытия в цилиндрической схеме соединения труб (а); края сварного соединения, защищённые прослойкой цинка (б)



Рисунок 13 – Характерный вид границы материалов после травления

Полученные соединения характеризовались волнистой границей материалов (рисунок 13). Измерение распределения микротвёрдости показало eë двукратное увеличение вблизи шва в области шириной около 30 мкм. В испытаниях на разрыв вдоль оси труб более высокую прочность показали образцы, сваренные в цилиндрической геометрии.

Отдельное внимание стоит уделить описанному в четвёртой главе эксперименту по регистрации моментов столкновения наружной трубы с установленной внутрь деталью. Этот эксперимент позволил проверить применимость проведённой оценки динамики оболочки и измерить скорость точки контакта между деталями.

Индуктор и наружная труба с оболочкой-спутником соответствовали деталям, использованным при сварке оцинкованных труб. Внутрь вместо привариваемой трубы помещали специально изготовленный контактный А. А. Дерибасом¹²: Датчик работает по принципу, описанному датчик. возникновение электрического контакта между соударяющимися металлическими деталями регистрируется при помощи осциллографа и набора RC-цепей с предварительно заряженными конденсаторами. Отличие датчика, применённого в настоящей работе, состоит в трубчатой геометрии, а также в том, что каждый из электродов на поверхности внутренней детали был подключен к отдельному каналу осциллографа. В качестве электродов на внутренней детали были равноудалённо расположены 7 медных колец толщиной 0,02 мм, изолированных друг от друга текстолитом толщиной Таким образом, регистрировали возникновение электрического 1,52 мм. контакта подвижной трубы с внутренней деталью в 7 различных точках (поясах) вдоль поверхности соударения.

При соприкосновении внутренней стенки подвижной трубы с каждым из колец происходил разряд конденсаторов ёмкостью 0,5 мкФ, предварительно заряженных до 20 В, на сопротивления R = 50 Ом. Импульсы напряжения на резисторах R регистрировались двумя 4-канальными осциллографами Tektronix TDS 3014B и TDS 3054B с разбросом времени запуска ±5 нс. Предварительную калибровку осциллографов проводили наложением раздвоенного сигнала.

Были исследованы три конфигурации, которые отличались формой датчика, положением деталей в концентраторе и разгонным зазором:

- 1) цилиндрический датчик с разгонным зазором 1 мм;
- 2) конусный датчик с начальным разгонным зазором 1 мм и углом 4,7°;
- 3) цилиндрические датчики с разгонным зазором 1,33 и 1,48 мм, установленные на половину длины индуктора.

Детали в первой и второй конфигурациях устанавливали на всю длину канала индуктора, в третьей – на половину его длины (см. рисунок 10). Первая конфигурация предназначалась для определения параллельности движения трубы, вторая и третья повторяют эксперименты по МИС оцинкованных деталей. Зарядное напряжение генератора составляло 10 кВ, амплитуда тока 800 кА, магнитного поля – около 40 Тл. Первичные результаты экспериментов представляли собой осциллограммы тока в разрядном контуре ГИТ и напряжения на каждом контактном кольце. На рисунке 14а приведён результат

¹² Дерибас А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1972. 188 с.

в виде набора осциллограмм для соударения цилиндрического датчика, установленного на половину длины индуктора, с разгонным зазором 1,33 мм.

Картина соударения, полученная в этом случае, проиллюстрирована на рисунке 146: первым возник контакт с кольцом К1, затем с кольцами К2–К5,



Рисунок 14 – Цилиндрический датчик с разгонным зазором 1,33 мм: ток в разрядном контуре ГИТ совместно с напряжением с контактных колец (а); схематичное изображение датчика после соударения (б) причём временные промежутки между замыканиями возрастали с отдалением от кольца К1. Это говорит о снижении скорости точки контакта в процессе соударения. С кольцами К6 и К7 контакта в этой конфигурации не возникло, как и в таком же расположении с увеличенным разгонным зазором (1,48 мм).

Скорости фронта контакта (таблица 2) были рассчитаны как и – h / A t

$$v_c = n/\Delta t_1$$
,
где $h = 1,54$ мм – осевое расстояние
между соседними контактными
кольцами, Δt_1 – временные
интервалы между замыканиями
соседних колец. Полученные
данные позволяют рассчитать
средние радиальные скорости:

 $\langle v_r \rangle = d/\Delta t_2$,

где d – величина разгонного зазора для каждого кольца, Δt_2 –

временной интервал между моментом включения тока и замыканием кольца с наружной трубой. Эти интервалы Δt_2 сравнивали с результатами оценки динамики оболочки.

Конфигурация	Величина	К1	К2	К3	К4	К5	К6	К7	Расч.
Цилиндр <i>d</i> =1 мм	< <i>vr</i> >, м/с	130±10	130±10	130±10	130±10	130±10	120±10	120±10	122
	<i>v</i> _c , км/с	30±6	н/о	50±15	н/о	50±20	9±1	5,0±0,3	Ι
Конус <i>d</i> =1 мм, α=4,7°	< <i>vr</i> >, м/с	129±6	142±6	151±6	160±5	167±5	178±5	188±5	110-164
	<i>v</i> _c , км/с	н/о	36±1,5	5,1 ±0,2	4,1 ±0,1	4,8 ±0,2	6,5 ±0,2	29±1	_
Цилиндр <i>d</i> =1,33 мм	< <i>vr</i> >, м/с	187±6	173±5	159±5*	139±4	110±3	н/о	н/о	145*
	<i>v</i> _c , км/с	н/о	2,66 ±0,06	2,28 ±0,05	1,29 ±0,03	0,61 ±0,01	н/о	н/о	_
Цилиндр <i>d</i> =1,48 мм	< <i>vr</i> >, м/с	198±5	190±5	177±4*	159±3	133±3	н/о	н/о	154*
	<i>v</i> _c , км/с	н/о	4,85 ±0,1	2,73 ±0,06	1,72 ±0,04	0,85 ±0,02	н/о	н/о	_

Таблица 2. Средние радиальные скорости стенки трубы и скорости точки контакта

Примечание к таблице: н/о – не определено; * – сравнение расчётной скорости со скоростью, зарегистрированной в середине приваренной области, на кольце КЗ.

Измеренные средние радиальные скорости и скорости точки контакта (таблица 2) были приведены в соответствие областям сварного шва в эксперимантах с оцинкованными трубами. Полужирным шрифтом выделены скорости v_c , соответствующие местам на образцах, где получался сварной шов. Образцы в цилиндрической геометрии, установленные на всю длину индуктора, не сваривались из-за «плоского» удара, при котором скорость фронта контакта слишком высока. На остальных образцах сварка реализовалась при скоростях в диапазоне от 0,6 до 6,5 км/с. Средняя скорость стенки при сжатии трубы отличалась от расчётной не более, чем на 15%. Проведённый эксперимент подтвердил применимость расчётной оценки скорости сжатия трубы.

В пятой главе описано получение трубчатых изделий радиальным магнитно-импульсным прессованием (РМИП) и спеканием нанопорошка металлического иридия. При РМИП медная оболочка, наполненная порошком, экранирует внешнее магнитное поле и сжимается в радиальном направлении. Приобретённая стенкой оболочки кинетическая энергия преобразуется в работу по уплотнению порошка.

Исходный порошок иридия был 000 изготовлен В «НПО «Металлы Урала» электролизом расплавленных солей на основе хлоридов щелочных металлов. Порошок состоял из огранённых частиц размерами от 15 до 50 нм. Низкая плотность порошка после виброукладки, около 7%, говорит о значительной агломерации частиц. Низкая насыпная плотность порошка способствует более высокому давлению на порошок, поскольку позволяет стенке трубы набрать большую кинетическую энергию на стадии ускорения. На этом основан инерционный эффект при РМИП.



Рисунок 15 – Схема радиального магнитноимпульсного прессования: 1 – порошковая засыпка, 2 – оболочка, 3 – стержень, 4 – торцевая заглушка, 5 – индуктор

Для РМИП иридия была специально разработана пресс-форма (рисунок 15). Порошок 1 засыпали в зазор между медной оболочкой 2 и медным сердечником 3 c использованием дополнительной Преимущество оправки. этой конструкции пресс-формы заключается В TOM, что торцы незафиксированные медной оболочки 2 при радиальном сжатии могут скользить по заглушкам из нержавеющей 4. стали чем

обеспечивается высокая однородность уплотнения порошка по длине трубы. Благодаря этому, порошок используется практически без потерь. Наружный диаметр оболочки был равен 12 мм, толщина ее стенки 0,9 мм. Диаметр сердечника был равен 6 мм. Таким образом, начальная толщина порошка была равна 2,1 мм. Загрузка порошка осуществлялась с помощью вибростола в течение 5 минут. Пресс-форму дегазировали, форвакуумным насосом до остаточного давления 10 Па, помещая её внутрь дополнительной тонкостенной трубы из нержавеющей стали (на рисунке не показана). Экранирование магнитного поля этой дополнительной трубой учтено в расчётах магнитных давлений. Перед экспериментами по РМИП на одноосном статическом прессе сняли кривую уплотнения порошка (рисунок 16а). Для достижения относительной плотности в 50% требовалось давление порядка 1 ГПа.

Прессование проводили на том же генераторе импульсных токов PCG-135, не прерывая откачки. Индуктор представлял собой цельноточенную стальную спираль с витками прямоугольгого сечения. Параметры индуктора по стальной спирали: внутренний диаметр 25,7 мм, наружный диаметр 80 мм, длина 140 мм, толщина витка 5,7 мм, шаг 6,7 мм, число витков 21. Импульс магнитного поля в этом индукторе при РМИП представлял собой одну полуволну затухающей синусоиды длительностью 110 мкс и амплитудой от 15 до 22 Тл, что соответствует магнитным давлениям $P_m = B_m^{-2}/(2\mu_0)$ от 85 до 190 МПа. Амплитуду импульса магнитного давления меняли путём изменения зарядного напряжения ГИТ соответственно от 10 до 15 кВ. После прохождения одной полуволны ток прерывается вследствие проявления вакуумными разрядниками РВУ-47 диодного эффекта. Зависимость плотности компактов от амплитуды импульса магнитного давления исследовали при фиксированных остальных параметрах. Плотность каждого компакта измеряли по плотности исходной засыпки порошка и изменению размеров оболочки в результате прессования.

травлением медной оболочки Компакты извлекали И сердечника разбавленной азотной кислотой до того момента, пока они не освобождали прессовку, а затем отмывали в дистиллированной воде. Просушенные образцы спекали в водороде при 1000°С с выдержкой 30 мин при максимальной скорости разогрева 3°С/мин. Спеченные изделия охлаждали в потоке аргона со скоростью 5°С/мин. Плотность спечённых образцов измеряли взвешиванием в воде. Относительная плотность компактов (рисунок 16б) составила 35-50% и медленно увеличивалась С ростом амплитуды магнитного давления. Достижение таких плотностей компактов при столь низких магнитных давлениях объясняется инерционным эффектом при РМИП.



Рисунок 16 – Кривая уплотнения порошка на статическом одноосном прессе (a); плотности компактов (круглые маркеры) и спечённых изделий (квадратные маркеры) (б): штриховой линией показана теоретическая плотность иридия



Рисунок 17. Внешний вид компакта в оболочке (а), извлечённого компакта (б), спечённых изделий, полученных при разных магнитных давлениях: 100 МПа (в); 140 МПа (г)

Наружный диаметр компактов (рисунок 17а, б) был равен 6,8 мм, толщина стенки 0,4 мм, длина 20 мм. Относительная плотность спечённых труб составляла 98-99% и не зависела от плотностей компактов в исследованном диапазоне (рисунок 16б). Цельные спечённые трубы были получены из спрессованных давлениями от 85 до 122 МПа компактов, магнитными (рисунок 17 в). Их размеры: внешний диаметр 4,9–5,2 мм, толщина стенки 0,35– 0,38 мм, длина 13-14 мм. Относительное отклонение от среднего диаметра (эллипсность) в середине и на концах трубок у лучших образцов не превышало 1%. Спечённые изделия, спрессованные магнитными давлениями выше 122 МПа, трескались с торцов и с наружной стороны стенки (рисунок 17 г). Растрескивание, вероятнее всего, связано с перепрессовкой: появлением избыточных внутренних напряжений в компактах и их высвобождением в виде трещин во время спекания.

Характеристики спечённого материала были следующими. Средний размер кристаллитов, полученный по растровой электронной микроскопии излома методом секущих, составил 0,3 мкм. По рентгеновской дифрактограмме материал был охарактеризован как однофазный кубический иридий (пространственная группа Fm-3m) с периодом решётки $0,38404 \pm 0,00005$ нм. Размер области когерентного рассеяния составил 180±15 нм. Количество примесей после прессования и спекания увеличилось до 88 ppm, из которых 57 составила медь, 15 кремний и по 8 серебро и цинк. Таким образом, путём РМИП и спекания были получены трубы из поликристаллического иридия чистотой 99,99% с субмикронной структурой с масштабом 0,3 мкм и относительной плотностью до 99%.

Применение радиального магнитно-импульсного прессования с удалением медной оболочки в кислоте позволяет формовать как трубы, так и другие изделия с цилиндрической симметрией с переменным диаметром и толщиной стенки, такие, как сопла. Удаление медной оболочки и стержня травлением в кислоте, безусловно, сдерживает развитие этой технологии, однако вполне может быть оправдано в случае работы с драгоценными металлами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показана перспективность магнитно-импульсного метода сварки ограниченно свариваемых сталей, пригодных для оболочек тепловыделяющих элементов, и оцинкованных сталей, а также формирования трубчатых изделий из иридиевых нанопорошков. В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие основные результаты.

- 1. Создано экспериментальное оборудование магнитно-импульсное индукторы сильного магнитного поля. Разработана технологичная В изготовлении конструкция одновиткового индуктора, которая обеспечивает снижение в два раза линейной плотности тока на сильноточных контактах разъемного подключения к генератору импульсных токов, вследствие чего контактирующих значительно уменьшается эрозионное разрушение поверхностей.
- 2. Проведено оптимизирующее исследование процессов магнитно-импульсной сварки коррозионностойких (STS 410), ферритно-мартенситных (Gr. 91) и дисперсионно-упрочнённых (9Cr-ODS) сталей в геометрии труба-заглушка. Оптимальные условия для начала сварки при полупериоде тока 14 мкс: амплитуда магнитного поля 38 Тл, радиальные скорости соударения 290±20 м/с, скорости точки контакта 3,2±0,2 км/с. При таких условиях сварной шов характеризуется однородной микроструктурой, волнообразованием, высокой механической прочностью И газовой плотностью.
- 3. Проведено оптимизирующее исследование процессов магнитно-импульсной сварки деталей из стали 20 с цинковым покрытием в геометрии телескопической пары труб. Показано, что сварное нахлёсточное соединение оцинкованных стальных деталей магнитно-импульсным способом реализуется путем предварительного частичного удаления (не нанесения) цинкового покрытия в средней части перекрытия свариваемых деталей, что обеспечивает сварку деталей по стали и защиту сварного шва от коррозии цинком, остающимся в краевых зонах соединения.
- 4. Исследовано радиальное магнитно-импульсное прессование и спекание наноразмерного порошка иридия для получения тонкостенных трубчатых изделий. Показано, что РМИП при магнитном давлении амплитудой 80–120 МПа и длительности импульса около 100 мкс с последующим спеканием в водороде при 1000°С обеспечивает получение трубчатых тонкостенных изделий из поликристаллического иридия чистотой 99,99% с субмикронной структурой с масштабом 0,3 мкм и относительной плотностью до 99%.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах и патенты

- 1. Магнитно-импульсная сварка трубы с торцевой заглушкой из хромистой коррозионно-стойкой стали / В. И. Крутиков, С. Н. Паранин, Д. С. Колеух [и др.] // Известия ВУЗов. Физика. 2014. Т. 57, № 11/3. С. 264–268.
- End Closure Joining of Ferritic-Martensitic and Oxide-Dispersion Strengthened Steel Cladding Tubes by Magnetic Pulse Welding / J.-G. Lee, J.-J. Park, M.-K. Lee, C.-K. Rhee, T.-K. Kim, A. V. Spirin, V. I. Krutikov, S. N. Paranin // Metall. Mater. Trans. A. Springer US. – 2015. – Vol. 46, N 7. – P. 3132–3139.
- Galvanized steel pipe joining features under magnetic pulse welding / V. I. Krutikov, D. S. Koleukh, A. V Spirin [et al.] // Известия ВУЗов. Физика. – 2016. – Vol. 59, N 9/3. – С. 5–8.
- 4. Fabrication of thin-walled iridium tubular articles by radial magnetic pulsed compaction and sintering of nanopowder / V. I. Krutikov S. N. Paranin, A. V. Spirin [et al.] // Lett. Mater. 2019. Vol. 9, N 3. P. 334–338.
- 5. Патент № 2661496 Российская Федерация, МПК Н05В 6/36, Н01F 27/28. Плоский спиральный индуктор сильного магнитного поля (варианты) : № 2016147803 : заявл. 06.12.2016 : опубл. 17.07.2018, Бюл. № 20. / Спирин А.В., Паранин С.Н., Крутиков В.И., Иванов В.В. 16 с. : ил.
- 6. Заявка № 2020129695 Российская Федерация, МПК Н01F 27/28, Н01R 4/00, В21D 26/00. Одновитковый индуктор сильного аксиального магнитного поля (варианты) : приоритет 09.09.2020 / Паранин С.Н., Спирин А.В., Крутиков В.И., Иванов В.В. 13 с. : ил.

Материалы в сборниках трудов конференций

- Magnetic Pulse Welding of the "Tube Plug" Pair of STS410 Steel / V. I. Krutikov V, S. N. Paranin, V. V. Ivanov [et al.] // Proceedings of 6th International conference on high-speed forming – 2014, edited by H. Huh, A.E. Tekkaya. – Daejeon, Korea. 2014. – P. 207–214.
- Investigation of magnetic pulsed welding of corrosion-resistant chromium steel tubes with end-plugs / S. N. Paranin, V. I. Krutikov, V. V. Ivanov [et al.] // Proceedings of XII International Symposium on Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations (EPNM-2014), edited by A.A. Deribas, Yu. B Sheck, May 25-30, 2014. – Cracow, Poland, 2014. – P. 143–146.
- Magnetic pulse welding of chromium corrosion-resistant steel tube to end plug / V. I. Krutikov S. N. Paranin, D. S. Koleukh [et al.] // Abstracts of International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2014). – Tomsk, Russia, 2014. – P. 184.

- Металлография сварного соединения стали, полученной методом магнитноимпульсной сварки / Д.С. Колеух В. И. Крутиков, С. Н. Паранин [и др.] // Тезисы докладов XXV Всероссийской молодёжной научной конференции, посвящённой 95-летию основания Уральского университета. – Екатеринбург, 2015. – С. 355–356.
- 5. Металлографические исследования сварных соединений сталей, полученных методом магнитно-импульсной сварки / Д.С. Колеух В. И. Крутиков, С. Н. Паранин [и др.] // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции студентов-физиков. Омск, 2015. С. 526.
- 6. Крутиков В. И. Применение сильных импульсных магнитных полей для соединения материалов, не поддающихся сварке традиционными способами / В. И. Крутиков, А. В. Спирин, С. Н. Паранин // Ш конференция молодых ученых РУСНЦ РАРАН «Молодежь. Наука. Инновации в оборонно-промышленном комплексе. Екатеринбург, 2016. С. 117
- Galvanized steel pipe joining features under magnetic pulse welding / V.I. Krutikov D. S. Koleukh, A. V. Spirin [et al.] // Abstracts of International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE–2016). – Tomsk, Russia, 2016. – P. 157.
- Получение тонкостенных труб из иридия магнитно-импульсным прессованием нанодисперсного порошка с последующим спеканием / В.И. Крутиков, А. С. Казаков, С. Н. Паранин [и др.] // Сборник материалов VII Международной конференции "Деформация и разрушение материалов и наноматериалов" (DFMN-2017). – Москва, 2017. – С. 421–423.
- Krutikov V. I. Experimental registration of tubular parts collision under magnetic pulse acceleration / V. I. Krutikov, A. V. Spirin, S. N. Paranin // Proceedings of EAPPC & BAEMS 2018. – Changsha, China, Sept. 16–20, 2018. – P. 232–235.
- 10.Крутиков В.И. Одновитковые индукторы для магнитно-импульсной сварки миниатюрных деталей из трудносвариваемых сталей / В. И. Крутиков, С. Н. Паранин, А. В. Спирин // Тезисы докладов ХХ Юбилейной Всероссийской школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-20). Екатеринбург, 2019. С. 192.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю чл.кор. РАН, д.ф.-м.н. В. В. Иванову, научному консультанту к.ф.-м.н. С. Н. Паранину, рецензентам д.ф.-м.н. Г. Ш. Болтачеву И д.ф.-м.н. Н. Б. Волкову, коллегам из лаборатории Прикладной электродинамики: к.т.н. Спирину А. В., м.н.с. Колеух Д. С., инженеру Зайцеву Е. Ю. к.т.н. Никонову А. В., к.ф.-м.н. Кайгородову А. С., к.ф.-м.н. Хрустову В. Р., м.н.с. Заяцу С. В., инженерам П. А. Русских, С. Ю. Ивину, А. В. Валенцеву и Е. В. Дубининой за эксперименты, плодотворные обсуждения, конструктивные совместные предложения и помощь в работе. Автор благодарен директору ООО «НПО «Металлы Урала» А.С. Казакову за предоставление нанопорошка иридия, совместные эксперименты и консультации при публикации статьи.

Автор выражает особую признательность к.т.н. И. В. Крутиковой за веру и поддержку в процессе подготовки диссертационной работы.