

ОТЗЫВ

официального оппонента,
доктора технических наук Кривошеева Сергея Ивановича

на диссертационную работу Крутикова Василия Ивановича
«Сварка стальных деталей и прессование иридиевых нанопорошков
посредством сжатия проводящих оболочек в импульсных магнитных полях»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки

Актуальность темы диссертационного исследования

Диссертационная работа Крутикова Василия Ивановича направлена на применение магнитно-импульсного метода к обработке новых материалов: ограниченно свариваемых сталей и наноразмерных порошков иридия. Тема исследований актуальна, поскольку методы высокоскоростного формования, в частности магнитно-импульсную обработку, в мире применяют в самых высокотехнологичных отраслях промышленности, таких как авиационная и автомобильная. Магнитно-импульсное оборудование, рассчитанное на работу с полями амплитудой порядка 20 Тл, уже хорошо изучено и его разработка не представляет особой сложности. В полях амплитудой около 20 Тл проводят формование листовых и трубчатых заготовок, прессование порошков в проводящих оболочках, сварку алюминиевых деталей. В случае сварки стальных деталей, таких, как оболочки тепловыделяющих элементов, требуется работа с полями амплитудой 40 Тл и выше.

Работа при таких амплитудах магнитного поля представляет трудности, связанные с высоким магнитным давлением и интенсивным разогревом поверхности инструмента и деталей. Давление импульсного магнитного поля на поверхность индукторов при таких полях составляет около 1 ГПа, что превышает предел текучести сталей без термической обработки. При этом температура поверхности рабочего канала индуктора повышается в течение одного импульса на 600–700 °С, что помимо нежелательной термообработки поверхности материала (закалки или отпуска) создаёт дополнительные механические напряжения из-за неоднородного разогрева материала по толщине. Поэтому исследования, проведённые в диссертационной работе в направлении разработки новых конструкций индукторов сильного магнитного поля, актуальны для дальнейшего развития магнитно-импульсных технологий.

Магнитно-импульсная сварка тонкостенных труб из ферритно-мартенситных и дисперсионно-упрочнённых сталей актуальна, поскольку может стать основой для технологии герметизации стальных оболочек тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. Этот метод, помимо наилучшего качества соединения, имеет высокий потенциал в отношении автоматизации и повышения производительности данной операции. Магнитно-импульсная сварка деталей из оцинкованной стали сохраняет

покрытие, что также повышает технологичность операции и стойкость полученных соединений к коррозии.

Магнитно-импульсное прессование нанопорошка иридия актуально, поскольку комбинирование способности наночастиц к низкотемпературному спеканию и высокой эффективности магнитно-импульсного метода в их уплотнении позволяет получить новый материал – чистый поликристаллический иридий с субмикронной структурой, отличающийся сниженной хрупкостью и пригодный для изготовления газовых сопел, электродов и тиглей для выращивания монокристаллов.

Общая характеристика диссертационной 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** магнитно-импульсная сварка рассмотрена как перспективный процесс для соединения деталей оболочек тепловыделяющих элементов из ферритно-мартенситных и дисперсионно-упрочнённых сталей, а также для соединения деталей из оцинкованных сталей. Такие возможности этого метода обусловлены малым тепловым воздействием на материал по сравнению с жидкофазной и контактной сваркой. **Во второй главе** описано оборудование и методы исследования, применённые в работе. Методы включают расчёт электрических характеристик одновитковых индукторов в условиях генерации сильного магнитного поля с учётом нагрева приповерхностного слоя материала рабочего канала индуктора и связанной с ним диффузии магнитного поля. Разработана конструкция индуктора, обеспечивающая снижение плотности тока в контактах разъёмного подключения индуктора к генератору импульсных токов. **Третья глава** посвящена поиску оптимальных условий магнитно-импульсной сварки деталей из коррозионностойких жаропрочных, ферритно-мартенситных и дисперсионно-упрочнённых сталей в геометрии труба-заглушка. Найдены условия соударения в виде соотношений радиальной скорости внутренней стенки трубы к моменту столкновения и скорости фронта контакта вдоль поверхности соединяемых деталей. У деталей, сваренных в оптимальных режимах, исследована микроструктура сварного шва методами оптической и просвечивающей электронной микроскопии, снято распределение микротвёрдости вблизи сварного шва методом Виккерса, проверена герметичность испытаниями на натекание гелия и прочность соединения гидравлическими испытаниями на разрыв. Испытания подтвердили высокое качество соединений деталей из коррозионностойких, ферритно-мартенситных и дисперсионно-упрочнённых сталей, превышающее известные в мире аналоги. **В четвёртой главе** представлены результаты магнитно-импульсной сварки телескопических пар труб из стали 20 с

цинковым покрытием толщиной 0,1 мм. Также в этой главе описана методика и приведены результаты эксперимента по регистрации моментов столкновения трубчатых деталей в результате магнитно-импульсной обработки. Получены соединения стали со сталью, закрытые цинком от окружающей среды с обеих сторон. Области сварного шва на деталях из оцинкованной стали приведены в соответствии с результатами регистрации столкновения деталей, что позволило определить скорости фронта контакта, достигаемые при магнитно-импульсной сварке. **В пятой главе** описано получение тонкостенных трубчатых изделий из иридия радиальным магнитно-импульсным прессованием и спеканием металлического нанопорошка. Получены цельные изделия из нового материала – поликристаллического иридия, характеризующиеся одновременно высокой чистотой и субмикронным размером зерна. **В заключении** перечислены основные результаты работы.

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. Содержание автореферата достаточно полно отражает содержание диссертации.

Оценка научной новизны и достоверности результатов

Диссертационная работа В.И. Крутикова является целостным научным исследованием. К числу наиболее важных результатов, имеющих научную новизну, можно отнести следующие:

- конструкция индуктора сильного магнитного поля, обеспечивающая снижение плотности тока в контактах разъёмного подключения индуктора к источнику питания;
- параметры соударения тонкостенной трубы с заглушкой из ферретно-мартенситных и дисперсионно-упрочнённых сталей, обеспечивающие получение прочного герметичного соединения методом магнитно-импульсной сварки;
- получение методом магнитно-импульсной сварки соединения труб из оцинкованной стали, закрытого от окружающей среды цинковым покрытием;
- получение нового материала – чистого поликристаллического иридия, характеризующегося субмикронной структурой.

Достоверность полученных в работе данных и обоснованность научных положений и выводов диссертационной работы обусловлены использованием набора взаимодополняющих экспериментальных методов. В работе задействованы осциллографическая регистрация электромагнитных величин, исследования сварного шва с помощью металлографического, сканирующего и просвечивающего электронных микроскопов, измерение микротвёрдости, определение герметичности масс-спектрометрическим течеискателем,

гидравлические установки и разрывная машина при испытаниях на прочность.

Практическая значимость

Автором предложено несколько вполне практичных вариантов индукторов, которые можно применять для многократной обработки деталей магнитными полями амплитудой порядка 40 Тл, а также довольно простой способ оценки динамики оболочки при её сжатии в импульсном магнитном поле.

Результаты экспериментов по сварке труб из ферритно-мартенситных и дисперсионно-упрочнённых сталей могут быть использованы в автоматизированных технологиях герметизации оболочек тепловыделяющих элементов. Такие технологии улучшат качество соединения, стабильность параметров и при этом будут менее зависимы от квалификации персонала. Соединение деталей из оцинкованной стали магнитно-импульсным методом расширяет возможности металлообрабатывающих производств.

Благодаря применению радиального магнитно-импульсного прессования появляется возможность изготавливать за одну операцию заготовки тонкостенных трубчатых изделий из иридия. Таким образом, удаётся найти применение наноразмерному порошку иридия, являющемуся продуктом аффинажа отходов и довольно неудобному для традиционных порошковых технологий.

Вопросы и замечания по диссертационной работе

1. В качестве замечания следует отметить, что в материалах диссертации не представлено обоснование выбора ширины сварочного шва и, как следствие, не обоснован выбор размера зоны, занимаемой магнитным полем, под действием которого происходит процесс ускорения оболочки и сварки объектов. Хотелось бы более подробно узнать критерии или подходы, которыми руководствовался автор при выборе размеров индукторов и энергоёмкости источников питания.
2. Для используемых при генерации сильных импульсных магнитных полей одновитковых соленоидов характерно наличие токоподводящей щели, которая может существенно повлиять на пространственное распределение магнитного поля между стенкой соленоида и ускоряемой оболочкой. Исследовалось ли автором влияние этого фактора на характер и качество сварных соединений?
3. В пункте 2.3 сделан вывод о лучшей пригодности индукторов из стали 30ХГС для генерации полей в 40 Тл в сравнении с индукторами из бериллиевой бронзы БрБ2. При этом чаще всего в технологиях магнитно-импульсной обработки всё-таки применяют индукторы из высокопроводящих материалов, таких, как бериллиевая или

хромоциркониевая бронза. Хотелось бы уточнить, начиная с какой амплитуды магнитного поля целесообразно применять индукторы из стали вместо бронзовых?

4. Непонятно, зачем в пункте 2.5 описаны все индукторы, несовершенные с точки зрения конструкции и геометрии контактов.
5. В работе отмечается, что в процессе генерации магнитного поля имеет место нагрев индуктора, однако отсутствует анализ влияния нелинейной диффузии, особенно в зоне токоподводящей щели, на пространственное распределение индукции и давления на оболочку. Безусловно, такой анализ украсил бы работу и позволил сформулировать рекомендации по повышению ресурса магнитной системы более обоснованно.

Приведенные замечания и вопросы не снижают общего хорошего впечатления от работы и только подтверждают сложный комплексный характер взаимодействия сильных импульсных магнитных полей с проводником. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации, актуальность исследований и личный вклад автора не вызывает сомнений.

Заключение

Диссертационная работа В. И. Крутикова «Сварка стальных деталей и прессование иридиевых нанопорошков посредством сжатия проводящих оболочек в импульсных магнитных полях» соответствует критериям, установленным Положением о присуждении учёных степеней, а её автор заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки.

Официальный оппонент: доктор технических наук, диссертация защищена по специальности 01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки, профессор Высшей школы высоковольтной энергетики, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Кривошеев Сергей Иванович



Адрес официального оппонента

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

телефон: +7 (921)9151740

эл. почта: ksi.mgd@spbstu.ru



*ОТЗЫВ официального оппонента д.т.н. Кривошеева С. И.
на диссертационную работу Крутикова В. И.*