

ОТЗЫВ

Официального оппонента Родионовой Ирины Гавриловны
на диссертационную работу Малахова Андрея Юрьевича
«Плакирование взрывом длинномерных цилиндрических изделий
функциональными покрытиями», представленную на соискание
ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.16.09 – Материаловедение (металлургия)

Диссертационная работа Малахова А.Ю. направлена на решение актуальной задачи прикладного материаловедения - создание биметаллического материала в виде трубы или стержня, у которого на рабочую поверхность нанесен функциональный коррозионно- или эрозионностойкий слой. Изделия цилиндрической формы (трубы, стержни) широко используются в нефтедобыче, нефтехимическом машиностроении, электроэнергетике, металлургии и т.д. При этом их рабочие поверхности могут подвергаться коррозионно-эрозионному разрушению. Это относится, в частности, к насосно-компрессорным трубам (НКТ), к элементам электролизной ванны, в частности, токоподводам, которые служат для подвода постоянного тока к электролизёрам, внутренним поверхностям стволов в гладкоствольных артиллерийских системах. Проблема защиты рабочих поверхностей таких изделий от коррозионного и/или эрозионного износа является актуальной задачей. И одним из возможных способов решения данной проблемы является использование двухслойного материала, в котором рабочий слой должен быть изготовлен из материала со специальными свойствами – коррозионной и/или эрозионной стойкостью, жаропрочностью и т.д. В качестве основного слоя во многих случаях может быть использована конструкционная высокопрочная сталь. В токоподводах основным слоем является медь. Поэтому актуальной задачей современной цветной металлургии является создание медно-титановых токоподводов для электролизных ванн с минимальным количеством хрупких интерметаллидов на границе соединения и прочным сцеплением слоев.

Учитывая многообразие востребованного сортамента многослойных изделий цилиндрической формы с сочетанием слоев из материалов с резко

различающимися свойствами, для их получения перспективно использовать сварку взрывом, либо применять комплексную технологию, сочетающую в себе сварку взрывом и прокатку. В то же время, несмотря на очевидные достоинства технологии, получение этим способом биметаллов цилиндрической формы сопряжено с необходимостью решения ряда задач, без которого невозможно получение изделий с качественным соединением слоев. Так, при плакировании длинномерных цилиндрических заготовок (когда длина изделия превышает 10 наружных диаметров) возникает проблема снижения прочностных свойств соединения по мере удаления от точки инициирования процесса сварки. Импульсный характер нагружения свариваемых металлов требует жесткого соблюдения всех режимных параметров процесса сварки. В противном случае имеет место появление трещин и даже разрушение металла. Также существуют трудности при получении сваркой взрывом биметаллических трубных заготовок с сочетанием слоев титан+сталь вследствие образования хрупких интерметаллидных соединений на границе соединения слоев.

Сказанным определяется актуальность диссертационной работы Малахова А.Ю., цель которой состояла в исследовании особенностей формирования соединения слоев в процессе сварки взрывом изделий цилиндрической формы, разработке и внедрении технологических основ их производства в промышленную технологию изготовления биметаллических длинномерных стержней, а также в изготовлении опытных партий биметаллических труб и переходников.

Диссертация Малахова А.Ю. состоит из введения, пяти глав и выводов. Работа изложена на 171 странице машинописного текста, содержит 85 рисунков, 17 таблиц и список литературы из 112 наименований.

Во введении приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, изложены основные положения, выносимые на защиту, сформулированы научная новизна и практическая значимость.

Научная новизна диссертационной работы определяется, прежде всего, установлением отличительных особенностей технологии сварки взрывом, позволяющей получать равнопрочное бездефектное соединение жаропрочных сплавов с высокопрочной оружейной сталью 0ХНЗМ по сравнению со сваркой взрывом материалов с сочетанием слоев «углеродистая сталь + аустенитная сталь». Основной особенностью такой технологии является увеличенная в 3-7 раз удельная кинетическая энергия метаемого элемента из жаропрочного сплава.

Важным научным результатом работы является установление отличий в формировании соединения слоев при получении сваркой взрывом цилиндрических двухслойных изделий «высокопрочная сталь + жаропрочный сплав» от плоских. Основным отличием является формирование большого объема литых включений из-за воздействия на свариваемые поверхности ударно-сжатого газа, движущегося с гиперзвуковой скоростью в сварочном зазоре, при отсутствии его бокового истечения.

Разработаны способы минимизации содержания литых включений в цилиндрических изделиях различного сортамента, получаемых сваркой взрывом. Так, для трубных заготовок титана со сталью – это создание в сварочном зазоре атмосферы разреженного аргона, а для сварки взрывом по «обратной» схеме – использование дисперсного твердо-жидкого опорного наполнителя с акустическим сопротивлением, близким к импедансу коррозионностойкой трубы.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанные технологические основы производства длинномерных цилиндрических изделий позволили создать технологии изготовления сваркой взрывом широкой номенклатуры различного назначения с тонкими наружными или внутренними слоями для защиты от агрессивной среды: насосно-компрессорные трубы, артиллерийские стволы, цилиндрические переходники и токоподводы. И такие технологии были освоены на предприятиях ООО «Битруб» и ООО «Битруб Интернэшнл». По ним были

выпущены партии металлопродукции, соответствующие требованиям технических условий, для конкретных потребителей.

В первой главе проведен аналитический обзор литературы, подтверждающий актуальность выбранной темы диссертации. Хорошо составленный, структурированный литературный обзор показывает, что диссертант хорошо изучил существующие подходы к изучаемой им проблеме. Проведен детальный анализ различных способов получения биметаллической продукции, их преимуществ и недостатков. Убедительно показаны преимущества сварки взрывом с точки зрения возможности получения любых композиций биметалла, в том числе тех, которые невозможно получить по другим технологиям. Отмечено, что точный механизм, описывающий процесс образования соединения при сварке взрывом, до настоящего времени не установлен. Но это не мешает получать по данной технологии многие виды биметаллической продукции. Однако проблема получения сваркой взрывом длинномерных изделий цилиндрической формы на сегодняшний день до конца не решена. Рассмотрены проблемы, возникающие при плакировании сваркой взрывом таких изделий, которые должны быть решены для обеспечения требуемого качества. Проведен подробный анализ материалов, которые могут быть использованы для защиты от коррозионного и эрозионного разрушения.

Проведенный анализ позволил сформулировать цель и задачи диссертационной работы. Комплекс решаемых задач охватывает большую группу материалов, используемых для основного и плакирующего слоев, а также различные области применения осваиваемых биметаллов.

Во второй главе подробно описаны все материалы для основного и плакирующего слоев, а также используемые для получения биметаллов взрывчатые вещества. До описания конкретных методов исследования есть раздел, который называется «Разработка общей методики исследований», присутствие которого облегчает понимание структуры работы. Комплекс использованных методик включал как стандартные методики, так и

методики, специально разработанные или адаптированные для решения задач данной работы.

В третьей главе представлены результаты исследования особенностей получения сваркой взрывом двухслойных цилиндрических изделий. Особый интерес представляет изучение особенностей сварки взрывом жаропрочных сплавов с высокопрочной оружейной сталью на модельных плоских и трубчатых образцах. При разработке технологических режимов сварки исходили из того, что для образования надежного соединения материалов необходимо экспериментально подобрать такие режимы, которые позволили бы активировать межатомные связи в поверхностном слое и очистить поверхности до начала схватывания свариваемых материалов. При этом учитывали отсутствие в литературе опубликованных данных по сварке в твердой фазе жаропрочных сплавов с высокопрочными сталями. Режимы сварки определяли, исходя из опыта промышленного производства биметаллических листов с плакирующим слоем из нержавеющей стали типа 08X18H10T, оценке физико-механических свойств свариваемых сплавов и количественной оценке удельной кинетической энергии соударения свариваемых материалов. Эксперименты проводили для двух вариантов жаропрочных сплавов на ниобиевой и никель-кобальтовой основах Н65В2МЦ и ЭК102, соответственно. В качестве основного слоя использовали высокопрочную оружейную сталь 0ХНЗМ. Основной особенностью такой технологии по сравнению со сваркой взрывом материалов с сочетанием слоев «углеродистая сталь + аустенитная сталь» является увеличенная в три раза удельная кинетическая энергия метаемой пластины из ниобиевого сплава и в семь раз для успешной сварки никель-кобальтового сплава путем повышения скорости детонации. Прочность соединения слоёв для биметалла, содержащего ниобиевый сплав, составляет 250-300 МПа, а для биметалла, содержащего сплав ЭК102, достигает 950-1000 МПа. Таким образом, для сварки взрывом жаропрочных ниобиевых и никель-кобальтовых сплавов с высокопрочной оружейной сталью следует

повысить удельную кинетическую энергию метаемой пластины с 1,17 до 4,16 и 6,9 Мдж/м², соответственно.

Металлографические исследования зоны соединения в модельных трубных заготовках с сочетанием слоев «сталь + жаропрочный сплав» позволили обнаружить следующие особенности структурообразования. В образцах с плакирующим слоем из ниобиевого сплава Н65В2МЦ на конечных участках зона соединения представляет практически сплошную прослойку литого включения толщиной до 250-300 мкм, состоящую из интерметаллида ниобия и железа типа FeNb и Fe₂Nb с микротвердостью 1100-1200 НВ. В литом включении имеются дефекты кристаллизационного характера, такие как микротрещины и поры, не выходящие за его пределы. Граница соединения в биметалле с плакирующим слоем из никель-кобальтового сплава ЭК102 представляет собой линию с нерегулярным профилем с наличием локальных литых включений, не образующих сплошную прослойку. Сравнение структуры соединений при сварке взрывом плоских и цилиндрических изделий тех же композиций показало, что при близких режимах сварки в цилиндрических изделиях количество литых включений значительно увеличено. Это, по-видимому, связано с увеличением удельной кинетической энергии метаемых труб по сравнению с плоскими образцами и влиянием движущегося с гиперзвуковой скоростью ударно-сжатого газа в сварочном зазоре, который, не имея бокового истечения, гораздо интенсивнее воздействует на свариваемые поверхности, чем в случае с плоскими образцами. В то же время, механические испытания на сплющивание биметаллических кольцевых образцов показали, что получены прочные двухслойные изделия цилиндрической формы с заданным сочетанием слоев «жаропрочный сплав ЭК102 и высокопрочная сталь ОХНЗМ». Для пары материалов сталь ОХНЗМ и ниобиевый сплав Н65В2МЦ необходима корректировка режимов в сторону уменьшения скорости детонации, что позволит не допустить появления сплошных прослоек расплавов.

Автором проведен анализ опубликованных данных по сварке взрывом титана со сталью, проведен оценочный расчет глубины проплавления свариваемых цилиндрических поверхностей по известным зависимостям и показано, что минимальное расплавление достигается при создании в сварочном зазоре разряжения. Проведены эксперименты по сварке взрывом труб из стали и титана с заполнением сварочного зазора воздухом, аргоном и разряженной воздушной атмосферой. В результате исследований структуры полученных соединений установлено, что для получения соединения с минимальным содержанием литых включений в трубных заготовках в сварочном зазоре необходимо создать атмосферу разреженного аргона. Это позволит снизить термодинамические параметры ударно-сжатого газа и исключить возгорание титана.

Четвертая глава посвящена разработке технологических основ производства сваркой взрывом двухслойных длинномерных цилиндрических изделий на примере коррозионностойких насосно-компрессорных труб и медно-титановых токоподводов. Автором использована «обратная» схема плакирования стальной длинномерной трубы тонким слоем из нержавеющей стали, то есть, труба с толщиной стенки 12 мм метается на трубу с толщиной стенки 2 мм. Установлено, что для получения сваркой взрывом качественных цилиндрических изделий по обратной схеме необходимо отвести энергию ударных волн от зоны соединения за счет применения дисперсного твердого жидкого наполнителя и одновременно обеспечить деформацию биметаллической трубной заготовки на заданном уровне.

В результате исследований структуры соединения выявлена неравномерность распределения расплавов по толщине в конечных участках биметаллических трубных заготовок. Автор связывает это с прохождением в сварочном зазоре, впереди точки контакта, турбулентных течений ударно-сжатого газа как в осевом, так в радиальных направлениях, которые приводят, вследствие разного сварочного зазора по диаметру и длине трубных заготовок, к неравномерному аэродинамическому прогреву свариваемых

поверхностей. При этом показано, что усредненная толщина расплавов на границе соединения в конечных участках биметаллических трубных образцов с применением дисперсного твердо-жидкого опорного наполнителя колеблется от 20 до 31 мкм, а с применением стального стержня с акустически изолирующим слоем из поваренной соли NaCl находится в пределах от 20 до 270 мкм; в среднем, в 4 раза больше.

Разработана технология плакирования взрывом медного стержня из меди М1 слоем титана ВТ1-0 толщиной 2 мм, с минимально допустимым зазором между стержнем и наружной титановой трубой и пластиковой защитой наружной поверхности биметаллического стержня от механического воздействия продуктов детонации. Методом реперных точек показано, что с увеличением скорости детонации ВВ удлинение титановой трубы снижается в процессе сварки взрывом, а на режиме 3500 м/с удлинение полностью отсутствует. Однако, рост скорости детонации приводит к образованию сплошных прослоек интерметаллида типа TiCu толщиной от 200 до 500 мкм, что заметно ухудшает прочностные и эксплуатационные свойства готового изделия при проведении многоциклового термической обработки.

Автором установлено, что наличие локальных непроваров и интерметаллидной прослойки между титановой трубой и медным стержнем не оказывает заметного влияния на падение напряжения по длине биметаллических токоподводов «медь М1 + титан ВТ1-0», полученных сваркой взрывом.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований структуры и свойств опытных образцов разработаны технологические основы производства длинномерных биметаллических материалов цилиндрической формы методом сварки взрывом, которые включают разработку экспериментальных схем и технологической оснастки.

Пятая глава посвящена разработке опытных технологий изготовления двухслойных трубных изделий и промышленной технологии производства стержней титан + медь для токоподводов. По разработанной

технологической схеме «сварка взрывом + холодная прокатка» изготовлены опытные партии двухслойных заготовок, которые были прокатаны на АО «ПНЗ» в биметаллические трубы размером 73×7,0 мм. Высокое качество труб подтверждено испытаниями в ФГУП «ЦНИИчермет им И.П. Бардина». По показателям прочностных характеристик биметаллические трубы 37Г2Ф+08Х18Н10Т соответствуют группе К по ГОСТ 633-80.

Следует особо отметить широкое промышленное внедрение импортозамещающей технологии сварки взрывом длинномерных цилиндрических изделий медно-титановых стержней длиной 1500 мм и диаметрами 20 и 32 мм. На предприятии ООО «Битруб» (г. Красноармейск) произведено свыше 25000 стержней, которыми оснащено свыше 18000 ячеек электролизёров никеля, успешно работающих на АО «Кольская ГМК».

Работа прошла достаточную апробацию: основные результаты опубликованы в журналах из перечня ВАК, доложены и обсуждены на международных и российских конференциях. Диссертация написана и оформлена в соответствии с требованиями ВАК. Автореферат и публикации достаточно полно отражают содержание диссертации.

К работе имеются следующие замечания.

1. В работе проведены интересные исследования структуры и свойств соединений высокопрочной стали ОХНЗМ с жаропрочным сплавом ЭК102, полученных сваркой взрывом. Из работы не ясно, проводились ли испытания цилиндрических изделий, приближённые к условиям эксплуатации, и каковы перспективы их применения?

2. В ряде работ [47, 51, 59, 60] по сварке взрывом стали с титаном с заполнением сварочного зазора воздухом или кислородом выявлено образование в литых включениях, наряду с интерметаллидами, оксидов титана. Не ясно, почему в работе при исследовании структуры соединения не выявлено образование в литых включениях оксидов титана?

3. При холодной прокатке двухслойных трубных заготовок, имеющих дефекты сплошности соединения, возможно образование отслоений и

появление разнотолщинности плакирующего слоя. Из работы не ясно, были ли в двухслойных заготовках дефекты сплошности по результатам УЗК, и что происходило с этими зонами при холодной прокатке и последующей термообработке?

4. Сварка взрывом обеспечивает соединение меди с титаном без наличия переходного сопротивления, следовательно, в процессе работы токоподвода поверхность контакта меди с титаном нагреваться не будет. Автором показано, что в конечных зонах двухслойного стержня обнаружены сплошные прослойки интерметаллида на границе соединения титана с медью различной толщины. Эти прослойки имеют электросопротивление, отличное от меди и титана, но как они влияют на работу токоподвода в работе не показано.

Сделанные замечания не изменяют общей положительной оценки диссертации А.Ю. Малахова, выполненной на высоком научном уровне.

Представленная работа полностью соответствует требованиям, сформулированным в п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, и предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, а сам автор заслуживает присуждения искомой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – Материаловедение (металлургия).

Заместитель директора НЦФХО
ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»
доктор технических наук

И.Г. Родионова
08.05.2019

И.Г. Родионова

Родионова Ирина Гавриловна, доктор технических наук, специальность 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов», старший научный сотрудник, заместитель директора научного центра физико-химических основ и технологий металлургии (НЦФХО).

Адрес: 105005, г. Москва, ул. Радио 23/9, стр. 2;

Тел.: +7 (903) 722 96 58

Email: igrodi@mail.ru

Подпись Родионовой И.Г. заверяю:
Ученый секретарь
ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»,
кандидат технических наук

