



ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ВЗРЫВОМ СТАЛИ С ТИТАНОМ В ЗАЩИТНОЙ АТМОСФЕРЕ

О. Л. ПЕРВУХИНА, канд. техн. наук, **Л. Б. ПЕРВУХИН**, д-р техн. наук
(Ин-т структур. макрокинетики и пробл. материаловедения РАН, г. Черноголовка, РФ),

А. А. БЕРДЫЧЕНКО, канд. техн. наук (Алтайский гос. техн. ун-т, г. Барнаул, РФ),
Л. Д. ДОБРУШИН, **В. Г. ПЕТУШКОВ**, доктора техн. наук, **Ю. И. ФАДЕЕНКО**, канд. физ.-мат. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

С помощью исследований установлено, что для получения сваркой взрывом качественного соединения стали с титаном на крупногабаритных заготовках необходимо вести этот процесс в среде защитного газа. Использование метода ловушек позволило установить, что при сварке взрывом на воздухе из-за горения частиц и поверхности титана в ударно-сжатом газе в сварочном зазоре впереди точки контакта происходит преимущественный нагрев поверхности титана вследствие его низкой теплопроводности. Это приводит к неодинаковому изменению твердости свариваемых материалов впереди точки контакта и смене механизма высокоскоростного соударения из состояния твердый–твердый в мягкий–твердый. Введение в сварочный зазор инертного газа исключает горение титана и обеспечивает качественную сварку на неограниченных поверхностях. Приведены свойства изготовляемого биметалла сталь–титан в среде аргона.

Ключевые слова: сварка взрывом, сталь, титан, инертный газ, интерметаллиды, сварочный зазор, точка контакта, горение частиц

При применении сварки взрывом для производства крупногабаритных листов биметалла с плакирующим слоем из титана имеет место снижение качества сварного соединения по мере удаления от начала процесса сварки — точки инициирования заряда [1]. На расстоянии более 1 м от этой точки отмечается снижение механических свойств сварного соединения и даже разрушение плакирующего слоя. Эти изменения сопровождаются увеличением размера вихревых зон вплоть до образования сплошной прослойки оплавленного металла. Как следует из работы [2], одной из причин выявленной нестабильности является образование интерметаллида Fe–Ti на контактной поверхности. Улучшение качества обработки свариваемых поверхностей и изменение режима сварки несколько улучшали положение, но полностью устранить масштабный эффект не удалось.

В работе [3] на основании экспериментальных данных, полученных при сварке взрывом пластин титана с титаном, показана теоретическая возможность воспламенения и горения мелкодисперсных частиц титана за счет взаимодействия с кислородом и азотом воздуха. В этой зоне создаются высокие температуры, давление и происходят сложные физико-химические процессы, непосредственное наблюдение за которыми затруднено из-за наличия воздушной ударной волны и продуктов детонации. В этом случае основная роль при исследовании процессов, происходящих в свароч-

ном зазоре, отводится косвенным методам, т. е. изучению конечных продуктов реакции.

Для исследования процессов, происходящих впереди точки контакта, в работе [4] применен метод ловушек, позволяющий зафиксировать на поверхности ловушки продукты, которые выносятся ударно-сжатым газом из сварочного зазора.

В настоящих исследованиях использован модернизированный вариант ловушек (рис. 1), который позволил устанавливать их при сварке взрывом крупногабаритных листов, не нарушая технологию производства биметалла, и изменять атмосферу в сварочном зазоре. Листы 1 (плакирующий слой — титан, основной слой — сталь) располагали с зазором h на опоре из песка. По длинным сторонам свариваемых пластин зазор герметизировали приваркой пластин 6; с торца, противоположного точке инициирования заряда, устанавливали ловушку 5, состоящую из сваренных под углом пластин. На верхней пластине располагали заряд взрывчатого вещества (ВВ) 3 заданным слоем и детонатор 2. Ловушка от прямого действия продуктов детонации была защищена слоем песка 4. При необходимости сварочный за-

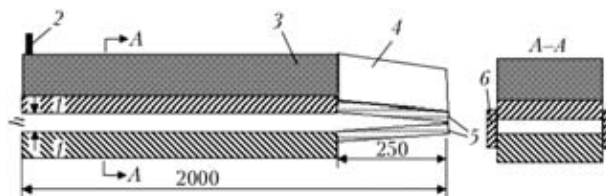


Рис. 1. Схема сварки взрывом с ловушкой: 1 — свариваемые листы из стали и титана; 2 — детонатор; 3 — заряд ВВ; 4 — песок; 5 — ловушка; 6 — боковые пластины

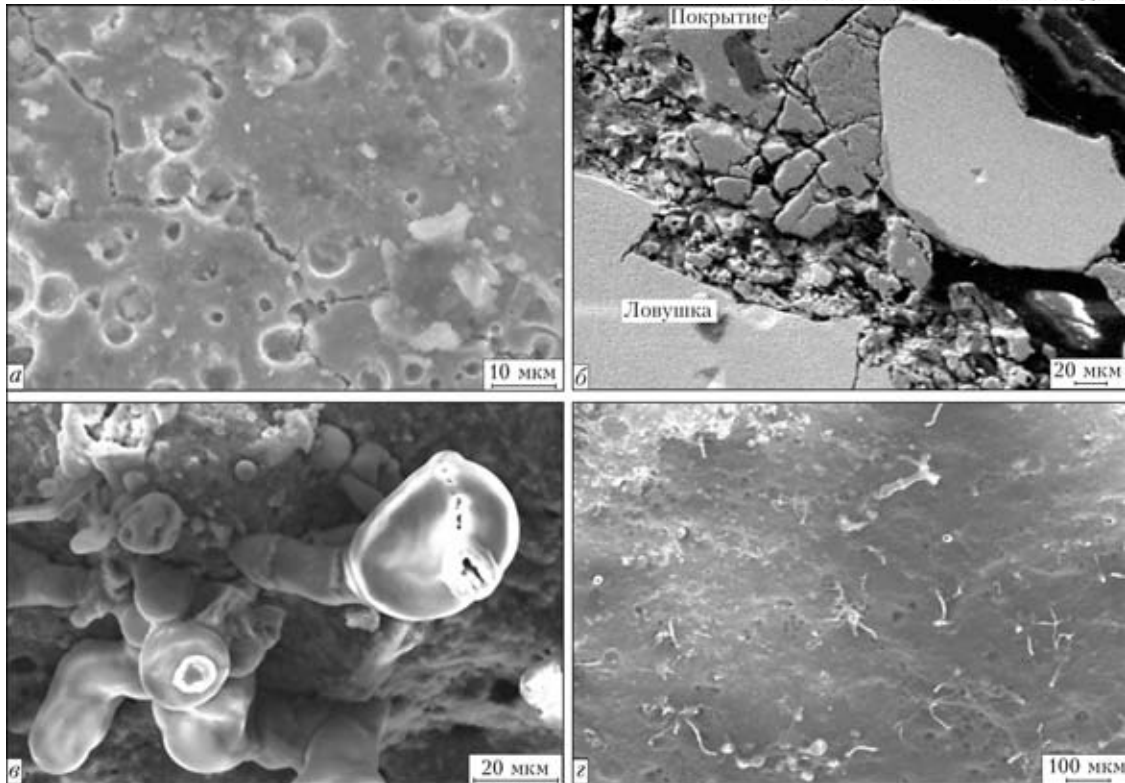


Рис. 2. Характерная поверхность ловушки (а, в), то же с отдельными включениями в виде струй и глобул (б) и микроструктура поперечного сечения границы раздела (г) в образцах сталь–титан, полученных сваркой взрывом в атмосфере воздуха

зор заполняли аргоном. Наличие пластин б исключает разгрузку в боковые стороны пластины и вылет продуктов реакции из сварочного зазора. Длинная ловушка позволяет не только ловить вылетающие из зазора частицы, но и проследить динамику их осаждения на поверхность ловушки.

При соударении пластин в режиме сварки взрывом в сварочном зазоре впереди точки контакта образуется ударно-сжатый газ, насыщенный мелкодисперсными частицами, которые удаляются с поверхности соударяющихся материалов.

На пластинах ловушки после взрыва замеряли толщину напыленного слоя, фиксировали его конфигурацию, затем вырезали образцы, на которых с помощью оптической и электронной микроскопии, микрорентгеноспектрального анализа и измерений микротвердости определяли состав и структуру продуктов на поверхности ловушек, а также структуру соединения листов.

Метод ловушек позволил исследовать состав напыленного слоя на поверхности пластин ловушек, определяемый процессом лавинообразного горения дисперсных частиц титана в сварочном зазоре, который приводит к нарушению термодинамического равновесия и процесса образования соединения. Введение инертного газа в сварочный зазор исключает процесс горения частиц титана, что обеспечивает стабильные условия сварки по всей поверхности соединяемых пластин.

При сварке взрывом на воздухе на поверхности обеих пластин ловушки выявили наличие сплошного матового пористого покрытия с сеткой мик-

ротрещин (рис. 2, а, в) шириной 40...50 мкм, переходящего в отдельные струи. Толщина этого покрытия неравномерна и составляет 20...50 мкм. Граница раздела между покрытием и материалом ловушки четкая, структура ее пористая (рис. 2, б). Материал покрытия имеет микротвердость 5000...7000 МПа (микротвердость титана — HV 1800 МПа, стали — HV 1200 МПа).

Химический и микрорентгеноспектральный анализы состава покрытия показали, что оно состоит из различных оксидов титана TiO , Ti_2O_3 , Ti_2O (рис. 3, а). На поверхности покрытия наблюдаются отдельные включения в виде застывших струй из карбооксидов железа и глобул, состоящих из оксидов титана (рис. 2, а, в). Наличие фаз чистого железа и титана, их твердых растворов и соединений в структуре покрытия не выявлено.

Исследование механических свойств полученного сварного соединения показало, что с удалением от точки инициирования заряда ВВ прочность биметалла на отрыв падает с 300 до 1 МПа, возрастают амплитуда волн и количество оплавленных участков в зоне соединения. Кроме того, имеются хаотично расположенные участки-непровары, имеющие вид вздутий, а также повреждения плакирующего слоя в виде разрывов и свищей. В микроструктуре сварного шва образуются прослойки интерметаллида.

При сварке взрывом листов сталь–титан в среде аргона при визуальном осмотре поверхности ловушек изменений не выявили. При металлург-

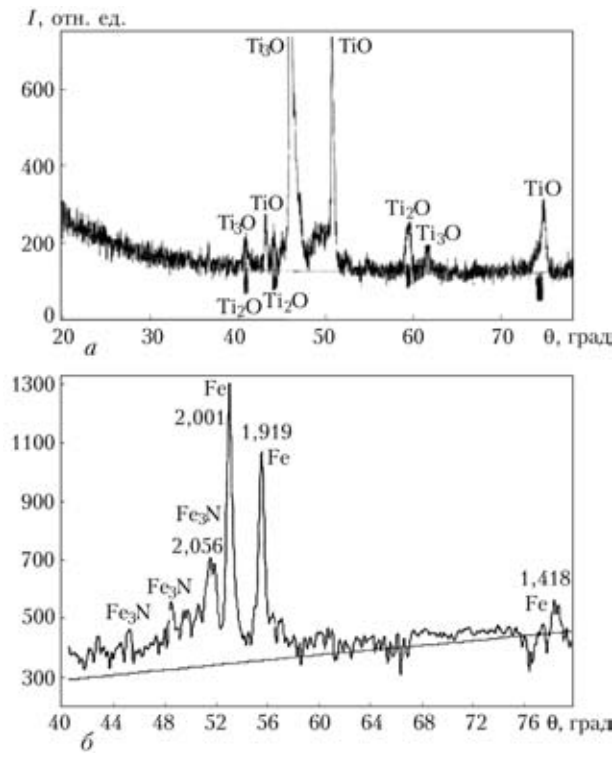


Рис. 3. Рентгенограмма поверхности ловушки после сварки титана со сталью в атмосфере воздуха (а) и в среде аргона (б)

рафическом исследовании обнаружены только следы исходной механической обработки (рис. 4, а). Химический анализ также не выявил наличие поверхностного слоя с составом, отличающимся от состава металла ловушки. Микрорентгеноспектральным анализом на поверхности ловушек зафиксированы железо и его соединения с азотом Fe₃N (рис. 3, б). Прочность соединения на срез составляет 190...250 МПа, на отрыв 250...350 МПа. В структуре соединения на начальных и конечных участках листа не выявлено интерметаллидных фаз, включений оксидов и нитридов титана (рис. 4, б).

В настоящее время накоплен большой экспериментальный и теоретический материал по вопросу формирования соединения при сварке взры-

вом и образования характерного волнообразного соединения. В зоне соударения при сварке взрывом развивается высокое давление, происходит интенсивная пластическая деформация, которая сопровождается значительным повышением температуры металлов в зоне соударения.

С целью анализа полученных экспериментальных данных рассмотрим процессы, которые происходят при сварке взрывом. Схватывание металлов рассматривается как частный случай топомеханических реакций при сварке давлением, для которых характерна трехстадийность процесса формирования прочных связей между атомами соединяемых металлов: образование физического контакта; активация контактных поверхностей; объемное развитие взаимодействия. В образовании соединения при сварке взрывом можно выделить три характерные зоны (рис. 5): I — зона точки контакта; II — расположенная впереди точки контакта; III — зона формирования соединения за точкой контакта.

Наиболее важной с точки зрения получения прочного соединения является II зона. Источниками тепла здесь являются сжатие газов в зазоре при метании плакирующего листа q_1 , аэродинамическое торможение частиц в ударно-сжатом газе q_2 , а также горение дисперсных частиц и поверхностных слоев титана в ударно-сжатом газе q_3 . Оценка этих величин дана в работе [3]. Изменение прочности соединения по длине соединяемых листов указывает, что на некотором расстоянии от начала процесса сварки большинства пар металлов наступает термодинамическое равновесие, т. е. выделившееся тепло отводится из зоны соединения даже при сварке на очень жестких режимах. Одна часть тепла q_4 уносится из зоны соединения ударно-сжатым газом, насыщенным дисперсными частицами металла, а другая часть тепла q_5 переходит в соединение в виде литых включений или вихревых зон. Оценить q_4 и q_5 в первом приближении возможно по данным работы [5] для заданного режима сварки. Тепло от ударно-сжатого газа q_6 , расходуемое на нагрев по-

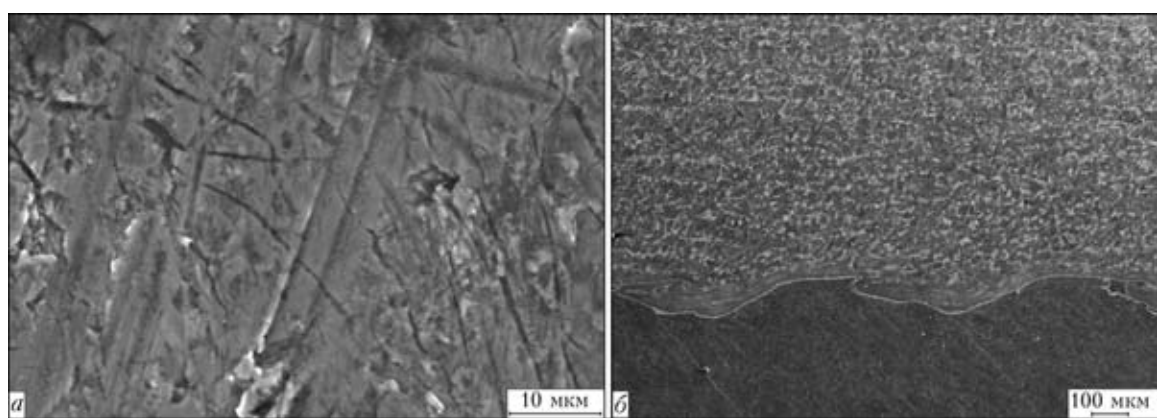


Рис. 4. Микроструктура поверхности ловушки (а) и соединения стали с титаном (б) (сварка в среде аргона)



верхностей впереди точки контакта, уходит в свариваемые материалы.

Таким образом, для обеспечения процесса сварки необходимо наличие термодинамического равновесия впереди точки контакта, т. е. во II зоне:

$$q_1 + q_2 + q_3 - q_4 - q_5 - q_6 = 0.$$

При сварке титана это равновесие нарушается из-за резкого возрастания значения q_3 за счет горения частиц и поверхности титана в ударно-сжатом газе. Увеличение жесткости режима увеличивает поток тепла со знаком +, но одновременно, согласно [5], возрастает q_4 , т. е. отвод тепла за счет увеличения количества литых включений в соединении, что и обеспечивает стабильность процесса на больших площадях свариваемых пластин.

Рассмотрение тепловых процессов впереди точки контакта показывает, что при установившемся режиме сварки взрывом в контакт (I зона) вступают поверхности, нагретые до определенной температуры (около 500...700 °С для стали [6]). Этот факт необходимо учитывать при сварке различных пар металлов. Следует отметить, что уровень деформации в зоне соединения, который оценивается по структуре его металла, по-видимому, не влияет на процесс схватывания, а влияет на формирование соединения.

Сравнивая полученные результаты с результатами, полученными при сварке титана с титаном [7], можно ожидать снижения отрицательного влияния горения мелкодисперсных частиц в сварочном зазоре впереди точки контакта, поскольку замена одной из свариваемых титановых пластин стальной должна привести к уменьшению в 2 раза содержания титана в ударно-сжатом газе. Однако характер покрытия, химический состав и количественные характеристики покрытия ловушек оказались идентичными покрытию, полученному при сварке титана с титаном [7]. Объясняется это тем, что поверхностный слой титана, участвующий в образовании соединения, характеризуется значительно меньшей теплопроводностью по сравнению со сталью и прогревается до значительно большей температуры, чем сталь. Оценка по методике [6] прогрева металла за фронтом ударно-сжатого газа, в котором происходит горение мелкодисперсных частиц титана, показала, что слой стали толщиной 10 мкм на расстоянии 1 м от начала процесса сварки при скорости точки контакта 2500 м/с может прогреться примерно до температуры 500 °С, титана — до 900 °С. С учетом тепла от горения мелкодисперсных частиц титана в сварочном зазоре температура поверхности титана может достигать температуры плавления титана, что приводит к снижению твердости и прочности титана, а также его плавлению. По-

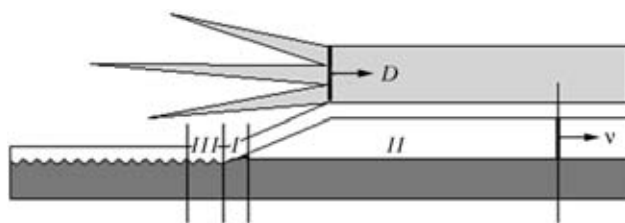


Рис. 5. Схема образования соединения при сварке взрывом: I–III — см. в тексте; D — скорость детонации ВВ; v — скорость ударной волны

вышение содержания титана в области ударно-сжатого газа приводит к его лавинообразному горению. В связи с этим на поверхности ловушки при сварке взрывом в атмосфере воздуха формируется сплошное покрытие из оксида титана (см. рис. 2, а, б), имеют место лишь отдельные включения соединений железа (см. рис. 2, в, г). Интерметаллиды и дисперсная смесь титана с железом на поверхности ловушки отсутствуют.

Таким образом, при сварке взрывом титана со сталью с удалением от начала процесса сварки происходит изменение механизма сварки (условий в области образования сварного соединения). Если на начальных участках процесс можно охарактеризовать как сварку взрывом двух «твердых» металлов, то по мере продвижения процесса вследствие горения частиц титана, попавших в область ударно-сжатого газа, в результате кумулятивного эффекта происходит увеличение температуры ударно-сжатого газа и температуры нагрева свариваемых поверхностей впереди точки контакта вплоть до оплавления. Более интенсивный нагрев титана приводит к значительному снижению его твердости, и дальнейший процесс сварки взрывом можно рассматривать уже как соединение мягкого и твердого металла [8]. При этом образуется жидкая фаза титана, что еще больше увеличивает концентрацию мелкодисперсных частиц титана в области ударно-сжатого газа, повышает его температуру и тепловыделение. Такое развитие процесса сварки приводит к еще большему прогреву металла впереди точки контакта, его значительному оплавлению и нарушению условий сварки.

Следует отметить, что нами не установлена роль азота в процессе горения частиц титана и железа в сварочном зазоре — соединения азота не выявлены в ловушках. Однако на поверхности покрытия ловушки и в соединении в литых включениях формируются округлые поры. Это может быть связано с тем, что при высоких температуре и давлении азот растворяется в металле. При спаде давления за точкой контакта и кристаллизации литых включений, когда растворимость азота снижается, происходит его выделение с появлением на поверхности покрытия округлых пор. Замена в сварочном зазоре активного газа инертным исключает прямое горение дисперсных частиц, что



Механические свойства биметалла сталь–титан

Марка биметалла (размеры, мм)	Прочность соединения, МПа		Угол испытания на изгиб/боковой изгиб, град
	на отрыв	на срез	
09Г2С+ВТ1-0 (35(30+5)×1000×2000)	390...490	155...215	130...135
12Х18Н10Т+ВТ1-0 (55(50+5)×1100×1750)	305...335	180...350	130...135
20+ВТ1-0 (38(30+8)×2700×2900)	250...350	190...250	Свыше 80
20+ВТ1-0 (48(40+8)×1800×3500)	250...350	190...250	Свыше 80

снижает их температуру и возможность инициирования горения за счет газов, растворенных в частице. В этом случае процесс сварки взрывом осуществляется в режиме сварки «твердых» металлов, что позволяет избежать дефектов в крупногабаритных листах биметалла титан–сталь.

На основании проведенных исследований разработана технология производства биметалла сталь–титан, разработаны и утверждены в установленном порядке технические условия ТУ 27.81.09.009–2005 «Заготовки двухслойные сталь–титан, полученные сваркой взрывом». Биметалл сталь–титан сертифицирован испытательным центром «ЦНИИТМАШ–Аналитика–Прочность» (сертификат соответствия № 16 от 01.03.2005). Результаты, полученные при производстве биметалла, показали, что используемая технология обеспечивает получение сплошности соединения по нулевому классу, т. е. отсутствуют дефекты сплошности соединения, площадь которых превышает 1 см². Качество биметалла соответствует требованиям международных стандартов и технических условий, в частности, AD Merkblatt W8, Juli 1987, спецификации 1264 (Германия), NC-501 (Франция). Сплошность соединения слоев составляет 100 % по нулевому классу. Прочность соединения, определенная в различных зонах листа,

на срез — не ниже 150 МПа, на отрыв — выше 250 МПа (таблица). Структура зоны соединения волнообразная без хрупких включений.

1. Кудинов В. М., Коротеев А. Я. Сварка взрывом в металлургии. — М.: Металлургия, 1978. — 168 с.
2. Дерибас А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. — Новосибирск: Наука, 1980. — 222 с.
3. О возможном возгорании выбрасываемых в зазор частиц металла при сварке титана взрывом / А. А. Бердыченко, Л. Б. Первухин, А. А. Штерцер, Б. С. Злобин // Физ. горения и взрыва. — 2003. — 39, № 2. — С. 128–136.
4. Влияние состава атмосферы на образование соединения титана со сталью при сварке взрывом / О. Л. Первухина, А. А. Бердыченко, Л. Б. Первухин, Д. В. Олейников // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. ст. — Волгоград: ВолГТУ, 2006. — С. 59–64.
5. Конон Ю. А., Первухин Л. Б., Чудновский А. Д. Сварка взрывом / Под ред. В. М. Кудинова. — М.: Машиностроение, 1987. — 216 с.
6. Ишуткин С. Н., Кирко В. И., Симонов В. А. Исследование теплового воздействия ударно-сжатого газа на поверхность соударяющихся пластин // Физ. горения и взрыва. — 1980. — 16, № 6. — С. 69–73.
7. Бердыченко А. А., Первухин Л. Б. Закономерности изменения структуры сварного соединения, полученного сваркой взрывом, с увеличением его габаритов на примере титана // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. тр. — Волгоград: ВолГТУ, 2000. — С. 102–114.
8. Добрушин Л. Д. Прецизионная сварка взрывом конструкций // Автомат. сварка. — 2003. — № 4. — С. 31–34.

As proved by investigations, to produce a sound joint between steel and titanium on large-size billets by explosion welding, it is necessary to perform this process in a shielding gas atmosphere. The use of the trap method made it possible to establish that, when performing explosion welding in air, burning of the particles and titanium surface in the shock-compressed welding gap ahead of the contact point causes preferential heating of the titanium surface, which is attributable to low thermal conductivity of titanium. This leads to non-uniform variations in hardness of the materials welded ahead of the contact point, as well as to a change of the high-velocity collision mechanism from the hard-hard state to the soft-hard one. Adding an inert gas into the welding gap prevents burning of titanium and provides quality welding on unlimited surfaces. Results of production of the steel-titanium bimetal in argon atmosphere are presented.

Поступила в редакцию 07.09.2009