

СВАРКА ТИТАНА СО СТАЛЬЮ В ТВЕРДОЙ ФАЗЕ (Обзор)

Л. С. КИРЕЕВ, В. Н. ЗАМКОВ, доктора техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены способы сварки титана со сталью без расплавления с различной интенсивностью силового воздействия: диффузионная сварка, холодная сварка, инерционная сварка трением, клинопрессовая, прессовая сварка в вакууме, сварка взрывом, ударная сварка в вакууме, магнитно-импульсная сварка. Показаны пути получения качественных сварных соединений.

Ключевые слова: разнородные соединения, диффузионная сварка, холодная сварка, инерционная сварка трением, клинопрессовая сварка, сварка прокаткой, биметалл титан-сталь, сварка взрывом, ударная сварка в вакууме

Пластическая деформация всех металлов в зоне соединения и титана со сталью, в частности, является необходимым условием образования соединения при любом способе сварки без расплавления. Скорость деформации определяет интенсивность процессов, контролирующих образование сварного соединения. Поэтому все способы сварки без расплавления по интенсивности силового воздействия условно можно разделить на три группы [1].

К первой группе относят способы сварки с низкоинтенсивным силовым воздействием (например, диффузионная сварка, при которой скорость деформации свариваемых заготовок составляет $10^{-4} \dots 10^{-6} \text{ с}^{-1}$). Эти способы сварки, как правило, осуществляют в условиях ползучести, когда скорость деформации зависит от технологических параметров процесса и сопротивления деформации свариваемых заготовок.

Ко второй группе относят способы сварки со среднеинтенсивным силовым воздействием. Такие способы сварки имеют вынужденный характер пластического деформирования и осуществляются за небольшой промежуток времени (часто с предварительным подогревом сварочных материалов), скорость деформации заготовок $10^{-1} \dots 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Эти способы являются наиболее перспективными среди всех способов сварки без расплавления, так как при изменении температурно-силовых условий деформирования появляется возможность получать качественные сварные соединения из многих сочетаний материалов.

К третьей группе относятся способы сварки с высокоинтенсивным силовым воздействием (сварка взрывом, ударная сварка в вакууме, магнитно-импульсная). Эти способы отличаются высокой скоростью деформации (до 10 с^{-1}), малой длительностью процесса (действия импульса силы) и осуществляются, как правило, без подогрева свариваемых материалов. Соединения обычно имеют низкую ударную вязкость и пластичность, так как непродолжительное силовое воздействие ограничивает возможность развития в зоне соединения необходимых процессов. Однако малая длитель-

ность силового воздействия становится положительным фактором при сварке разнородных металлов, образующих между собой хрупкие фазы, когда необходимо ограничить или вообще предотвратить развитие в зоне соединения диффузионных процессов.

Сварка с низкоинтенсивным силовым воздействием. Диффузионная сварка металлов осуществляется при температуре $T \approx 0,7T_{\text{пл}}$ ($T_{\text{пл}}$ — температура плавления металла) [2]. Это соотношение оптимально не только для случая сварки технически чистых однородных металлов или однородных сплавов, но и для разнородных металлов и сплавов.

Первые исследования по диффузионной сварке титана со сталью выполнены в работе [3]. Кинетика изменения сопротивления отрыву слоев и удлинения при разрыве цилиндрических образцов диаметром 6 мм из титана ВТ1-1 и армо-железа описана в работе [4]. В ней авторы осуществляли сварку на режимах, приведенных в табл. 1.

Увеличение времени сварки (более 10 мин) при 1273 К (режим 6) сопровождается резким уменьшением прочности и пластичности соединения. При испытании на растяжение все образцы разрушались по переходной зоне, причем после сварки при 1023 и 1173 К разрыв локализовался на поверхности контакта интерметаллида с α -твердым раствором и частично в α -фазе. При наличии переобогащенного твердого раствора или полосы эвтектоида $\alpha + \text{TiFe}$ разрушение происходило по этому слою. Наибольшей прочности соединения соответствует ширина слоя интерметаллида 3...5 мкм.

При сварке титанового сплава ОТ4 со сталями 12Х18Н10Т и 08Х22Н6Т влияние технологических параметров режима сварки на механические свойства соединений во многом напоминает зависимости для чистых металлов (технического титана и армо-железа). Установлена возможность получения диффузионных соединений сплава ОТ4 с 12Х18Н10Т

Таблица 1. Режимы сварки цилиндрических образцов, выполненных из титана ВТ1-1 и армо-железа

№ режима	Температура, К	Давление, МПа	№ режима	Температура, К	Давление, МПа
1	1023	20	4	1173	5
2	1073	15	5	1223	2,5
3	1123	10	6	1273	1

и ОТ4 с 08X22Н6Т соответственно с пределом прочности 420 и 550...600 МПа на режимах $T = 1123$ К, $P = 10...15$ МПа и $\tau = 15$ мин [3]. Опробование сварки сплава ВТ5-1 (системы Ti-Al-Sn) с 12X18Н10Т показало возможность получения соединений с пределом прочности 280...330 МПа при режиме сварки $T = 1173$ К, $P = 15$ МПа и $\tau = 15$ мин.

Диффузионная сварка титана со сталью рассматривалась и в работах [5-7 и др]. Было показано, что при непосредственной сварке технически чистого титана со сталью 12X18Н10Т прочность соединений не превышает 50 % прочности нержавеющей стали (250...270 МПа). Металлографическим и электронографическим методами в зоне контакта этих соединений обнаружены интерметаллиды. При сварке через жидкую фазу [8] ($T = 1358$ К) сопротивление отрыву достигало 300 МПа, что соответствует прочности закристаллизовавшейся эвтектики и практически не зависит от марки титанового сплава и стали. Такие соединения характеризуются большим разбросом прочностных характеристик и низкой пластичностью. Авторы работы [3] считают, что диффузионной сваркой в вакууме невозможно получить соединение с прочностью и пластичностью основного металла при наличии слоя интерметаллида по линии контакта, так как в этом случае нет его прочной связи с основным металлом, а сам интерметаллид тверд и хрупок. Очевидно, более перспективна диффузионная сварка титана со сталью с использованием промежуточных прослоек из других материалов.

В ИЭС им. Е. О. Патона Г. К. Харченко с сотрудниками исследовали диффузионную сварку в вакууме титана со сталью через прослойки из ванадия, который образует непрерывный ряд твердых растворов с титаном и железом [9]. Прослойки, которые изготавливали из фольги толщиной не более 0,2 мм, помещали между цилиндрическими образцами диаметром 12 и высотой 30 мм. Сварку осуществляли на режимах: $T = 1173...1273$ К, $\tau = 5...10$ мин, $P = 2...3$ МПа. Результаты механических испытаний сваренных образцов на статический разрыв приведены в табл. 2.

Во всех случаях при испытании разрушение соединения происходило хрупко по границе железа (стали) с ванадием, на которой присутствовали карбиды ванадия. Их образование возможно уже при температуре 823 К. Исследование зоны контакта после диффузионной сварки и отжига соединения Fe+V+Ti показало, что и со стороны титана возможно образование карбида титана с микротвердостью $14,6 \cdot 10^3$ МПа [7, 9]. Прослойка

ванадия проницаема для хрома, образующего с титаном соединение $TiCr_2$ [4].

Таким образом, одна прослойка ванадия не решает задачу диффузионной сварки титана со сталью. Эту задачу позволяет решить добавочный слой из меди, установленный между ванадием и сталью [7]. Коэффициент диффузии углерода в меди невысок, и в системе ванадий-медь интерметаллидные соединения не образуются. Растворимость меди в ванадии при комнатной температуре составляет около 6 %, а при 1800 К — около 8 % [10]. Прочность меди ($\sigma_B = 200...220$ МПа) и технического ванадия ($\sigma_B = 380...420$ МПа) значительно ниже прочности стали 12X18Н10Т ($\sigma_B = 550...600$ МПа) или титанового сплава, например, ВТ5-1 ($\sigma_B = 800...900$ МПа). Однако при реализации эффекта контактного упрочнения, наблюдаемого при сварке через мягкие прослойки [11-13], прочность сварного соединения может быть значительно выше прочности промежуточных слоев.

В работах [5, 6, 14] была показана перспективность использования ванадиево-медных прослоек при диффузионной сварке титана со сталью. Применение слоев ванадия и меди оптимальной толщины, обеспечивающей эффект контактного упрочнения, позволяет получить сварное соединение, обладающее достаточной прочностью при удовлетворительной вязкости и пластичности (табл. 3). При этом ударная вязкость соединений приближается к нижнему пределу ударной вязкости однофазных титановых сплавов. Угол загиба плоских образцов толщиной 2 мм, вырезанных из сварных стержней, достигает $50...60^\circ$. Сварка осуществлялась на режимах: $T = 1273$ К, $P = 3...6$ МПа, $\tau = 5...15$ мин. Наличие слоя меди ограничивает температуру сварки, а удельное давление и время сварки выбираются из условия минимальной деформации титановой части соединения.

Для повышения технологичности соединений предложена диффузионная сварка титана со сталью не через два отдельных слоя ванадия и меди, а с использованием одной компактной многослойной вставки [5-7]. Такие вставки изготавливали прокаткой на вакуумном стане. Во избежание налипания меди на валки стана и получения минимальной толщины слоя медь размещали внутри вставки (с двух сторон ее закрывали другими металлами: со стороны титана — ванадием, а со стороны стали — никелем). Вставка представляла собой чередование слоев ванадий-медь-никель. Прокатку пакета осуществляли при температуре 1200 К и де-

Таблица 2. Предел прочности σ_B диффузионно-сварных соединений титана с железом (сталью) через прослойку из ванадия

Свариваемые металлы	σ_B , МПа	Содержание углерода в железе (стали), мас. %
08X17Т+V+Ti	300	0,08
12X18Н10Т+V+Ti	100	0,12

Таблица 3. Механические свойства диффузионно-сварных соединений сплава ВТ5-1 со сталью 12X18Н10Т (с ванадиево-медной прослойкой)

Относительная толщина слоев*		$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	Место разрушения
Cu	V					
0,02	0,05	296	570	8,4	14	По стали
0,03	0,1	310	530	6,7	9,8	По меди
0,03	0,2	320	490	5,3	6,8	»»
0,02	0,7	310	440	5,4	10,5	По ванадию

*Отношение толщины слоя к диаметру образца.

формации до 60...80 %. Толщины слоев готовой вставки составляли: ванадия — 0,1...0,4; меди — 0,01...0,02 и никеля 0,01...0,05 мм. Диффузионная сварка титанового сплава BT5-1 со сталью 12X18H10T через такую вставку обеспечивает достаточно высокое качество соединения ($\sigma_B = 430...560$ МПа, $\delta = 5,5...8,6$ %, $\psi = 9,8...32,1$ %), разрушение при испытании на статический разрыв происходило по никелю или меди.

В тех случаях, когда по условиям работы изделий из разнородных металлов не может быть использована в качестве прослойки медь, предложено заменить ее слоем палладия или хрома [7, 15]. Более перспективно использовать прослойки ванадий-палладий, так как последний образует твердые растворы с ванадием, железом, никелем и хромом, не образует карбидов, имеет высокую пластичность. Температура сварки составляет 1373...1473 К. Прочность сварных соединений в основном определяется степенью упрочнения слоя палладия (наиболее мягкий слой в соединении) и находится на уровне прочности стали 12X18H10T ($\sigma_B = 480...580$ МПа) при удельной пластичности (12...24 %).

Разработанная технология диффузионной сварки титана со сталью через промежуточные прослойки наиболее широко применяется при изготовлении биметаллических узлов (переходников) трубопроводов различного назначения.

Сварка со среднеинтенсивным силовым воздействием. К способам сварки со среднеинтенсивным силовым воздействием можно отнести холодную сварку, сварку трением, низкотемпературную диффузионную, сварку прокаткой и др.

Вопросы холодной сварки металлов (в том числе титана со сталью) достаточно подробно рассмотрены в работах [7, 16–18 и др.]. Поэтому отметим только основные технологические характеристики этого процесса.

Сварные соединения стержней диаметром 3 мм из титана BT1 и стали 12X18H10T, выполненные с тремя осадками (на осадку уходит до 80 % титана), имели следующие показатели: $\sigma_B = 500...600$ МПа; $\delta = 8...15$ %; угол загиба $\alpha = 60^\circ$. В стыке после сварки обнаруживается фаза TiFe, появление которой обусловлено с локальным повышением температуры в тонких слоях металла в зоне стыка в процессе пластической деформации. Соединения титана со сталью, полученные холодной сваркой, не могут работать даже кратковременно при повышенных температурах. Так, при температуре 1073 К уже после 10...20 с механические свойства соединений резко снижаются и соединение становится неработоспособным.

Таблица 4. Оптимальные режимы сварки трением титана со сталью

Свариваемые металлы	Материал прослойки	Частота вращения, с ⁻¹	Усилие сжатия, кН		Осадка, мм
			начальное	конечное	
BT1-0 — сталь 20	Медь	29	17	40	4...5
BT1-0 — 12X18H10T	Ниобий-железо	27	12	37	5

В ИЭС им. Е. О. Патона проведены исследования процесса инерционной сварки трением со сталью [19]. Основным отличием инерционной сварки от обычной является осуществление нагрева места сварки при спадающей скорости вращения шпинделя, что предопределяет технологические особенности этого процесса. При формировании соединения температура в стыке не превышает температуру плавления основного металла. Соединение образуется в твердой фазе, в зоне стыка происходит развитие диффузионных процессов и имеет место механическое перемешивание контактирующих объемов металла [20]. Образцы диаметром 14 мм из титана BT1-0 и сплавов BT6 (системы Ti-Al-V), BT16 (системы Ti-Mo-Al-V) сваривали со сталями 12X18H10T и 20 [19]. Сварку вели на воздухе или в аргоне, однако механические свойства соединений в обоих случаях идентичны, так как испытывали центральную часть соединения, которая не окислялась при сварке. Осадка в основном осуществлялась за счет пластической деформации титана. В табл. 4 приведены оптимальные режимы инерционной сварки трением титана со сталью, а в табл. 5 — прочностные характеристики сварных соединений.

Из табл. 5 следует, что наиболее высокое качество соединения достигается при использовании тонких прослоек, наносимых на сталь гальваническим способом. Аналогичная картина наблюдалась и при сварке титана BT1-0 со сталью марки 20 [7]. Очевидно, при достижении в стыке температуры, превышающей температуру образования эвтектики титан-медь (1143 К) или титан-никель (1228 К), в контакте появляется слой жидкой фазы, процесс образования и разрыва новых связей прекращается, температура в стыке устанавливается на уровне температуры эвтектики. Жидкий слой выдавливается при осадке, а интерметаллиды не успевают образоваться за время охлаждения сварного соединения [18]. Следует отметить, что образование эвтектики происходит и при сварке без прослойки титана с железом (сталью 12X18H10T), однако механические свойства сварных соединений значительно ниже (табл. 4). В этом случае в соединении присутствуют остатки металла эвтектического состава, которые и являются причиной хрупкого разрушения соединения при $\sigma_B = 300...440$ МПа. При сварке через ниобиевые прокладки в зонах перемешивания стали с ниобием обнаруживаются микротрещины, возникшие на стадии охлаждения из-за значительного различия

Таблица 5. Результаты механических испытаний сварных соединений титана BT1-0 со сталью 12X18H10T

Материал прослойки	Толщина прослойки, мм		σ_B , МПа	Место разрушения
	до сварки	после сварки		
Ниобий	4...6	3...4	340...360	Стык
Железо	3...5	1...2	300...410	»»
Никель	0,01	—	480...520	Основной металл
Медь	0,01	—	480...520	То же
Ниобий-железо	4...8	2...5	460...520	»

в коэффициентах линейного расширения ниобия и стали. Прочность такого соединения составляет 340...360 МПа и разрушение при испытании образцов происходит в зоне стыка.

Наиболее перспективными при сварке трением титана со сталью являются двойные прослойки: ниобий со стороны титана и железо со стороны стали 12X18H10T, имеющие средние значения коэффициентов линейного расширения по сравнению с основными металлами [19].

К сварке со среднеинтенсивным силовым воздействием следует отнести и клинопрессовую сварку [21]. При этом способе сварка стали 12X18H10T с титаном выполняется через прослойку из алюминия или меди толщиной 0,1...0,2 мм. Конец стальной заготовки затачивается на конус (15...20°), а в титановой выполняется гнездо аналогичной формы. Сварка выполняется в аргоне с нагревом заготовок до 673...723 К при использовании алюминиевой прослойки или до 1023...1123 К при использовании медной прослойки. Биметаллические переходники, изготовленные по этой технологии, имеют прочность сварного соединения выше прочности стальной части, что обусловлено развитой площадью контакта.

В работах [22–24] обоснована возможность непосредственного (без промежуточных прослоек) соединения титана со сталью за счет осуществления процесса диффузионной сварки в области относительно низких температур и высоких сварочных давлений. Для практической реализации была спроектирована и изготовлена вакуумная сварочная установка с радиационным нагревом и пневмогидравлическим способом передачи давления. Максимальное усилие сжатия свариваемых деталей 500 кН; максимальная температура нагрева 1373 К, рабочий вакуум — $133 \cdot 10^{-4}$ Па.

В работах [23, 24] показано, что при выборе рациональных режимов сварки необходимо учитывать некоторые особенности кинетики процессов, протекающих в зоне контакта титана со сталью. В начальный момент наибольшая скорость у процессов динамического возврата или рекристаллизации. После формирования физического контакта на них накладываются процессы атомной гетеродиффузии и лишь после некоторого латентного периода начинается реактивная диффузия. Длительность латентного периода так же, как скорость атомной гетеродиффузии и процессов динамического возврата, зависит от температуры. Величина температурного коэффициента наибольшая для латентного периода и наименьшая для процессов возврата и рекристаллизации. Поэтому за счет снижения температур сварки до 923 К удалось добиться того, что за оптимальное время сварки реактивная диффузия не имеет места, атомная гетеродиффузия только начинается, а наиболее опасные дефекты залечены. Было показано, что на кинетику рассматриваемых процессов оказывает влияние и скорость деформации при сварке. Так, увеличение скорости деформации при использовании схемы со «свободным деформированием» [25] существенно ускоряет процессы динамичес-

кого возврата и атомную гетеродиффузию и, в меньшей мере, реактивную диффузию.

В результате проведенных исследований были получены оптимальные режимы непосредственной сварки титана со сталями 20X13 и 12X18H10T. Сварные соединения равнопрочны менее прочному металлу — титану. По разработанной технологии были изготовлены переходники, которые использовали при производстве теплоэлектронагревателей (тэнов) с титановой оболочкой для подогрева морской воды. Они прошли полный комплекс испытаний и показали высокую надежность в работе.

Сварка прокаткой титана со сталью может осуществляться как на вакуумных, так и на обычных станах. Малая мощность вакуумных прокатных станов не всегда позволяет сваривать (плакировать) крупногабаритные заготовки. При сварке в обычных прокатных станах для защиты металлов от окисления и насыщения азотом и водородом свариваемые листы помещают внутрь герметичного пакета, который продувают инертным газом или вакуумируют во время нагрева. Для связывания кислорода и азота в пакет иногда закладывают пиррофорные материалы. Согласно данным, приведенным в работе [4], сопротивление срезу соединений из стали толщиной 9 мм и титана 3 мм (полученных прокаткой при температуре 1273 К в вакууме $10^{-2} \dots 10^{-3}$ Па) возрастает от 30 до 220 МПа при увеличении деформации от 8 до 30 % за один проход. Полосы, прокатанные в низком вакууме ($\approx 1,5$ МПа), имели невысокую прочность и разрушались при вырезке образцов для испытаний.

Сравнение результатов вакуумной прокатки титана ВТ1-1 с армо-железом и сталями марок Ст3, 5, 45, 09Г2С и 12X18H10T обнаруживает отрицательное влияние углерода на прочность соединения. Так, увеличение углерода с 0,028 до 0,45 % при прочих равных условиях снижает предел прочности при испытании на растяжение с 260 до 140 МПа. Очевидно, углерод, диффундируя к поверхности соединения, образует карбид титана (причем TiFe и TiFe₂ в этом случае могут отсутствовать) и пассивирует поверхность титана. Образование металлических связей между свариваемыми поверхностями не происходит. Использование при сварке прокладки из чистого ванадия (содержание углерода не более 0,02 %) повышает прочность соединения и при испытании на отрыв разрушение происходит по слою титана. Если в качестве прокладки использовать недостаточно чистый ванадий (содержащий до 0,3 % С и 0,6 % Zr), то в зоне соединения могут образовываться карбиды ванадия, по которым и происходит разрушение соединения. Вероятность их образования возрастает с повышением содержания углерода в стали. Ширина слоя карбидов ванадия в зоне соединения возрастает в 1,5...2 раза при увеличении степени обжатия от 20 до 80 %. Высокие механические свойства ($\sigma_b = 570$ МПа; $a_n = 3,0$ кДж/м²) соединения титанового сплава ВТ6С со сталью 12X18H10Б обеспечивает сварка прокаткой через ниобиево-медную прослойку при

температуре 1223 К с суммарным обжатием за три прохода 45...50 %.

Следует отметить, что отжиг в течение 1 ч при 1073 К биметалла титан–сталь, полученного сваркой прокаткой без промежуточных прокладок, приводит к снижению предела прочности при испытании на растяжение до 160...180 МПа, а микротвердость участков титан–переходная зона–сталь составляет 2500...5000...1000 МПа. При этом в зоне соединения присутствуют TiFe и TiC. Аналогичная термообработка биметалла с прослойкой ниобий–медь не снижает и несколько увеличивает твердость участка в зоне соединения со стороны титана.

В работе [4] сообщается о возможности получения биметаллических лент толщиной 0,1...0,3 мм холодной прокаткой. Для качественной сварки необходимо: обжатие в первом проходе на 60...65 % после обезжиривания и зачистки щетками; уменьшение содержания газов в титане до 0,07 % кислорода; 0,008 % водорода; 0,044 % азота; равномерное обжатие обоих слоев (железо следует отжигать при 873...923 К).

Сварка с высокоинтенсивным силовым воздействием. Наиболее характерным способом сварки с высокоинтенсивным силовым воздействием является сварка взрывом [26–28 и др.]. Этот способ позволяет получать биметаллические заготовки и изделия практически неограниченных размеров из разнообразных металлов и сплавов, в том числе из титана и стали. Преимуществом этого способа сварки многие исследователи считали импульсный характер взаимодействия химически активного титана со сталью. На основании этого, особенно в первых работах, указывалось на невозможность появления хрупких прослоек в соединениях, полученных сваркой взрывом, так как предполагали, что характер взаимодействия титана со сталью не должен отличаться от холодной сварки. Позже было установлено, что химическое взаимодействие и даже расплавление при соударении со сталью является скорее правилом, чем исключением. Результаты экспериментальных исследований показали, что при сварке взрывом титана со сталью имеется узкий диапазон параметров режима, при которых возможно образование прочного соединения. Выявлены соединения трех типов, получаемые при различных значениях основных параметров процесса [28].

Первый тип характеризуется образованием прямой или «синусоидальной границы» соединения без участков с кристаллизационной структурой. Этот тип характерен для мягких режимов сварки. Наиболее распространен второй тип соединений с ярко выраженным волнообразованием и наличием вихревых волн. В этих зонах обычно наблюдаются участки закристаллизовавшегося расплава с дендритной структурой и усадочными трещинами, несплошностями и пустотами. В вихревых зонах происходит перемешивание свариваемых металлов. При форсированных режимах (третий тип) зоны расплава расширяются до образования непрерывного слоя вдоль границы контактирования. Таким образом, с одной стороны, необходимо обеспечить

достаточные скорости соударения и давления для удаления поверхностного слоя и активации поверхностей стали и титана, с другой — режимы сварки должны быть достаточно мягкими, чтобы получить первый тип соединения (без значительных расплавов).

Возможно получение биметалла сталь–титан сваркой взрывом без переходных диффузионных зон и дефектов с прочностью соединения при испытании на статическое растяжение 350...500 МПа. При оптимальной скорости детонации взрывчатого вещества (ВВ), равной 1850 м/с, и сварочном зазоре 3...4 мм получено соединение листов из титана ВТ1-0 толщиной 2 мм и стали Ст3 толщиной 10 мм, имеющие прочность около 550 МПа [26]. Граница соединения при этом была синусоидальной формы без литых участков. В этой же работе отмечается, что в случае сварки по угловой схеме граница имеет искаженную волнообразную форму с литыми участками, которые содержат пустоты и загрязнения. Кроме того, в зоне соединения со стороны титана видны локальные литые участки с более высокой твердостью, что, по-видимому, является причиной понижения прочности соединения до 320 МПа.

К выводу о необходимости уменьшения скорости движения точки контакта приходят в работе [27]. В соединениях титана со сталью, полученных по угловой схеме, также наблюдались литые участки включений, имеющих твердость HV 8000...9200 МПа. Микроспектральный анализ показал, что состав литых участков соответствует составу соединения TiFe₂. Соединения с литыми включениями на вершинах волн имеют прочность на отрыв 330...390 МПа. В то же время образцы с волнообразной формой зоны соединения, но без литых включений показали прочность на отрыв 40...100 МПа при полном отсутствии видимых интерметаллидов. Таким образом, прямой зависимости между количеством интерметаллидов и прочностью соединения в этой работе не установлено.

Влияние скорости и энергии соударения пластины на прочность соединения исследовалось в работе [26]. При увеличении скорости соударения сверх оптимального значения появляется хрупкая «белая фаза» (эвтектика TiFe₂), увеличиваются параметры волн, при дальнейшем ее росте площадь участков «белой фазы» увеличивается, в них возникают пустоты и трещины. Фактором, влияющим на появление «белой фазы», является не скорость пластины, а энергия, накопленная в ней перед соударением [29]. При одинаковой скорости соударения и толщине листа из титана 2 и 6 мм (т. е. разной энергии) толщина хрупкого слоя отличается в 1,5...2 раза. Состав и структура «белой фазы» не зависят от параметров соударения. Микротвердость в пределах каждого включения не изменяется и составляет 8800...9400 МПа. Проведенные экспериментальные исследования показали, что при распространении фронта детонации со скоростью 1800 м/с хрупкая прослойка в соединении появляется при скоростях соударения, больших 800 м/с [26]. При скорости соударения 1500 м/с относительная площадь интерметаллид-

ных включений составляет 50 %, что в значительной мере сказывается на прочностных характеристиках соединений титана ВТ1-0 со сталью Ст3 ($\sigma_B = 280$ МПа). В работе [27] описано получение аналогичного соединения с высокой прочностью ($\sigma_B = 550$ МПа) при скорости соударения порядка 550 м/с.

В работах [29–31] на основании исследований соединений стали с титаном и циркония со сталью 08X18H10T (образующего аналогичные интерметаллидные соединения) делается более конкретный вывод о допустимых значениях энергии соударения, не влияющих на прочность соединений. Критическое значение удельной кинетической энергии соударений для пары сталь–титан составляет 1500 кДж/м², которому соответствует скорость соударения около 320 м/с [32].

Таким образом, для сварки взрывом титана со сталью оптимальной можно считать скорость соударения 300...500 м/с в зависимости от толщины метаемого элемента (с тем, чтобы удельная кинетическая энергия соударения не превышала своего критического значения) [33].

На свойства биметалла титан–сталь, полученного сваркой взрывом, существенное влияние оказывает последующая термообработка [28]. При температурах нагрева от 373 до 873 К прочность на отрыв соединения титана ВТ1-0 со сталями Ст3 и 12X18H10T практически не изменяется по сравнению с его прочностью после сварки взрывом. При температуре нагрева от 873 до 1273 К прочность биметаллического соединения резко снижается до 10...40 МПа. Исследования сварного соединения показали повышенную твердость (HV 3000 МПа) титана на глубине до 0,1...0,3 мм и стали на глубине до 0,1 мм, что свидетельствует о наклепе металлов в зоне соединения. Отпуск при температуре 573 К в течение 1 ч снижает твердость до HV 2500...2000 МПа, однако характер микроструктуры зоны соединения при этом существенно не меняется. Нагрев до температуры 1123 К с выдержкой в течение 1 ч приводит к появлению в зоне соединения титан–сталь светлой прослойки повышенной твердости (HV 3700...4200 МПа), с повышением температуры отжига толщина прослойки увеличивается.

Исследования, проведенные разными авторами, дают основание считать, что соединения, полученные сваркой взрывом титана со сталью (без промежуточных прослоек), хотя и разрушаются в стороне от зоны стыка по основному металлу при испытании на статическое растяжение, но могут надежно работать только при температурах не более 773 К. В зависимости от назначения сварных узлов при сварке взрывом возможно применение одной или двух прослоек. Одинарные прослойки изготавливают из серебра, никеля, меди, ванадия, ниобия, железа и сплавов железа с тугоплавкими металлами. С целью снижения вероятности образования хрупких соединений на границе раздела рекомендуется слой железа выбирать с содержанием углерода не более 0,02 % [7]. Наиболее часто при сварке взрывом используют два промежуточных слоя — из ниобия и меди. Ниобий,

медь или медные сплавы применяют в виде готовой композиционной прослойки, полученной прокаткой. Закономерность изменения механических свойств композиционного материала титановый сплав ОТ4–ниобий–медный сплав–сталь 12X18H10T в зависимости от толщины прослойки из медного сплава исследована в работе [34]. Результаты испытаний показали, что с уменьшением толщины этого слоя прочность соединения возрастает и достигает максимального значения при толщине слоя меди менее 0,1 мм. Нагрев полученного сварного соединения до 1073 К не изменяет характера разрушения, но снижает прочность, так как полностью снимает упрочнение металлов, которое возникает в результате взрывного нагружения при сварке.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработан способ сварки с высокоинтенсивным силовым воздействием [35]. Суть этого способа заключается в том, что на свариваемые поверхности, предварительно локально нагретые до температуры более $0,5T_{пл}$, передается одиночный импульс силы ударником, движущимся со скоростью от 1 до 30 м/с. Происходит соударение нагретых поверхностей в вакууме, их локальная деформация и образование сварного соединения за сотые и даже тысячные доли секунды. Это способствует созданию благоприятных условий для соединения разнородных металлов и снижает вероятность образования интерметаллидов. В литературе этот способ сварки описывается как ударная сварка в вакууме [36–38 и др.].

Основными технологическими параметрами ударной сварки в вакууме являются температура и энергия удара, обеспечивающая необходимую высокоскоростную деформацию приконтактных объемов свариваемых металлов. Нагрев свариваемых заготовок до температуры сварки $T_{св}$ осуществляется со скоростью около 20 К/с, чтобы обеспечить локальный нагрев в зоне контакта. Время изотермической выдержки выбирается с учетом равномерного прогрева свариваемых металлов по глубине в зоне контакта и из условия очистки металлов от оксидов и загрязнений. Время охлаждения зависит от режимов сварки, размеров изделий и принятой технологии. Исследование различных схем ударного механизма (пороховые копры, линейные двигатели и др.) показало, что наиболее технологичен вариант ударника в виде свободного или с принудительным ускорением падающего груза. Ударная сварка в вакууме успешно применяется для изготовления трубчатых переходников из разнородных материалов. Работоспособность трубчатого титано-стального переходника может обеспечить соединение двух труб, нагретых с помощью круговойковки при создании местного вакуума в стыке за счет специальной муфты [39]. При этом муфта проковывается вместе со свариваемыми кромками труб из титана и стали. С помощью микрозонда установлено, что в диффузионной переходной зоне толщиной до 8 мкм присутствуют интерметаллидные соединения TiFe, TiFe₂, Ti₂Ni, TiNi, TiCr₂. Титан слабо проникает в сталь через диффузионную зону, а железо, хром и никель диффундируют в титан на значительную глубину.

Аналогом рассмотренного способа может служить кузнечная сварка с той разницей, что в случае ударной сварки предварительно нагревают металл до $T_{св}$ только в зоне контакта. Кузнечная сварка имеет два существенных недостатка: значительная ширина слоя интерметаллидов приводит к формированию дефектов в стыке; для получения готового трубчатого переходника необходима механическая обработка для удаления стальной муфты после прокатки.

1. Диффузионная сварка титана / Э. С. Каракозов, Л. М. Орлова, В. В. Пешков, В. И. Григорьевский. — М.: Металлургия, 1977. — 272 с.
2. Казаков Н. Ф. Диффузионная сварка материалов. — М.: Машиностроение, 1976. — 312 с.
3. Гарухина К. Е., Казаков Н. Ф. Диффузионная сварка в вакууме разнородных металлов. — Л.: Изд-во ЛДНТП, 1964. — 24 с.
4. Биметаллические соединения / К. Е. Чарухина, С. А. Голованенко, В. А. Мастеров, Н. Ф. Казаков. — М.: Металлургия, 1970. — 278 с.
5. Гуревич С. М., Харченко Г. К. Диффузионная сварка сплавов титана с нержавеющей сталью // Авиац. промышленность. — 1967. — № 10. — С. 85–88.
6. Харченко Г. К. Вопросы диффузионной сварки разнородных металлов // Автомат. сварка. — 1969. — № 4. — С. 29–32.
7. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / Под ред. В. Н. Замкова. 2-е изд., доп. и перераб. — Киев: Наук. думка, 1986. — 240 с.
8. Харченко Г. К. Эвтектическое соединение титана со сталью // Автомат. сварка. — 1965. — № 11. — С. 78.
9. Харченко Г. К., Гордонная А. А. Диффузионная сварка титана со сталью через прослойку ванадия // Там же. — 1966. — № 6. — С. 74–75.
10. Диаграмма состояния ванадий–медь / Е. М. Савицкий, В. Б. Барон, У. К. Дуйсемалиев и др. // Вестн. АН Казах. ССР. — 1964. — № 7. — С. 37–44.
11. Бакиш О. А., Шрон Р. З. К вопросу об оценке прочности сварных соединений с мягкой прослойкой // Свароч. пр-во. — 1962. — № 9. — С. 11–14.
12. Бакиш О. А., Шатов А. А. О напряженном состоянии и деформации твердого материала в сварных соединениях с твердой и мягкой прослойками // Там же. — 1966. — № 5. — С. 7–10.
13. Бакиш О. А., Шрон Р. З. О расчетной оценке прочности сварных соединений с мягкой прослойкой // Там же. — 1971. — № 3. — С. 3–5.
14. Харченко Г. К., Игнатенко А. И. Прочность соединений с тонкой мягкой прослойкой // Автомат. сварка. — 1968. — № 5. — С. 31–33.
15. Кочергин А. К., Шестаков А. И., Харченко Г. К. Сварка давлением уплотненных поверхностей арматуры. — Л.: ЛДНТП, 1972. — 16 с.
16. Сахацкий Г. П. Технология сварки металлов в холодном состоянии. — Киев: Наук. думка, 1979. — 295 с.
17. Аайбиндер С. Б. Холодная сварка металлов. — Рига: Изд-во АН Латв. ССР, 1957. — 162 с.
18. Харченко Г. К., Гурский П. И., Гордонная А. А. Холодная сварка титана со сталью // Автомат. сварка. — 1965. — № 9. — С. 39–41.
19. Харченко Г. К., Продав С. К. Инерционная сварка трением титана со сталью // Там же. — 1983. — № 4. — С. 70.
20. Исследование с помощью радиоактивных изотопов строения переходного слоя при сварке трением / А. Г. Селезнев, А. И. Христофоров, М. В. Можаров, Г. Н. Бугаев // Там же. — 1970. — № 1. — С. 21–24.
21. Колесниченко В. А., Шнырев Г. Д., Алексин В. П. Клинопровессовая сварка разнородных металлов, резко отличающихся и близких по твердости // Лекции по сварке разнородных и разноименных металлов. — М.: МДНТП. — Ч. 1. — 1973. — С. 68–71.
22. Киреев Л. С. Сварка давлением в вакууме технического титана со сталями 2Х13 и 12Х18Н10Т // Автомат. сварка. — 1985. — № 3. — С. 56–57.
23. Причины снижения прочности сварных соединений титана со сталью / Л. Н. Лариков, М. Н. Белякова, А. А. Бибикин, В. Н. Вашков, Л. С. Киреев // Там же. — 1984. — № 4. — С. 17–19.
24. Диффузионные процессы при сварке давлением в вакууме титана с нержавеющей сталью / В. Н. Замков, Л. Н. Лариков, М. Н. Белякова, Л. С. Киреев // Там же. — 1986. — № 3. — С. 21–23.
25. Особенности деформации и напряженного состояния в соединениях разнородных металлов при диффузионной сварке / Л. Н. Лариков, М. Н. Белякова, Л. С. Киреев и др. // Там же. — 1982. — № 12. — С. 13–17.
26. Седых В. С., Казак Н. Н. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. — М.: Машиностроение, 1971. — 71 с.
27. Карпиер С. Сварка металлов взрывом. — Минск: Беларусь, 1976. — 42 с.
28. Кудинюс В. М., Коротеев А. Я. Сварка взрывом в металлургии. — М.: Металлургия, 1978. — 168 с.
29. Лысак В. И., Седых В. С., Трыков Ю. П. Влияние массы свариваемых взрывом элементов на структуру и свойства получаемых соединений // Свароч. пр-во. — 1981. — № 6. — С. 15–17.
30. Лысак В. И., Седых В. С., Трыков Ю. П. Закономерность формирования соединения при сварке взрывом слоистых композиционных материалов // Там же. — 1983. — № 3. — С. 4–6.
31. Трыков Ю. П., Шморгул В. Г., Епишин Е. Ю. Структура и свойства сваренного взрывом биметалла титан–сталь после горячей прокатки // Изв. вузов. Черн. металлург. — 2001. — № 7. — С. 67.
32. Лысак В. И., Седых В. С., Трыков Ю. П. Определение критических границ процессов сварки взрывом // Свароч. пр-во. — 1984. — № 5. — С. 6–8.
33. Конон Ю. А., Первухин Л. Б., Чудновский А. Д. Сварка взрывом. — М.: Машиностроение, 1987. — 216 с.
34. Белоусов В. П., Седых В. С., Трыков Ю. П. Механические свойства титано-стальных соединений с промежуточными слоями, сваренных взрывом // Свароч. пр-во. — 1971. — № 9. — С. 19–21.
35. А. с. 404588 СССР, МКИ В 23 К 19/00. Способ сварки давлением / Г. К. Харченко, А. И. Игнатенко. — Опубл. 1974, Бюл. № 44.
36. Гуревич С. М., Харченко Г. К., Игнатенко А. И. Ударная сварка в вакууме — новый способ соединения металлов в твердом состоянии // Докл. 4 Всесоюз. семинара по сварке туполапких металлов и сплавов. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1974. — С. 40–41.
37. Интенсификация процесса сварки давлением / С. М. Гуревич, Г. К. Харченко, А. И. Игнатенко и др. // Тез. 8 науч.-техн. конф. по диффузионному соединению металлических и неметаллических материалов. — М.: ПНИЛДСВ, 1977. — С. 17.
38. Гуревич С. М., Харченко Г. К., Игнатенко А. И. Новый способ сварки давлением разнородных материалов // Материалы 8 Всесоюз. совещания по сварке разнородных, композиционных и многослойных материалов. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1983. — С. 35–37.
39. Pat. 1450315, France. Volta G., Perona G. De soudure par martelage. — Опубл. 19.10.65.

The paper deals with the processes of welding titanium to steel without melting with different intensity of the impact, namely diffusion welding, cold welding, inertia friction welding, wedge-pressure welding, pressure welding in vacuum, explosion welding, percussion welding in vacuum and magnetic pulse welding. Methods to produce sound welded joints are indicated.

Поступила в редакцию 07.11.2001