

## РАЗДЕЛ 5. МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.791.12:621.7.044.2

### СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ БИМЕТАЛЛА СТАЛЬ-ТИТАН. ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР

А. А. Бердыченко

*Современное машиностроение требует применения металлических материалов, объединяющих в себе свойства различных металлов. Одним из таких материалов являются биметаллы – вид металлических слоистых композиционных материалов, состоящих из двух и более слоёв металлов, соединённых между собой прочной неразъёмной металлической связью. Маркетинговые исследования показали наличие большого спроса на международном рынке на биметалл сталь-титан, объединяющий в себе высокую коррозионную стойкость титана с высокими прочностными и технологическими свойствами сталей. Эти свойства делают его востребованным в химическом и энергетическом машиностроении. Сдерживающим фактором производства биметалла сталь-титан являются трудности, возникающие при его изготовлении, связанные со сложностью получения качественного неразъёмное соединение между титаном и сталью. Целью проведённого исследования является анализ существующих способов производства биметалла сталь-титан.*

*Ключевые слова: сталь, титан, биметалл сталь-титан, интерметаллид, совместная прокатка, горячая совместная прокатка, холодная совместная прокатка, прокатка герметизированных пакетов на обычных станах, режимы прокатки, сварка взрывом, сварка взрывом в среде защитных газов, прочность сцепления слоёв.*

Проблеме рационального способа получения стали, плакированной титаном, и исследованию её свойств посвящено много работ как отечественных, так и зарубежных авторов. Это объясняется, с одной стороны, острой потребностью различных отраслей современного машиностроения таком биметалле, а с другой стороны, трудностью его получения, связанной со специфическими свойствами титана.

Растворимость железа в  $\alpha$ -Ti, крайне мала и при комнатной температуре составляет 0,05-0,10 %. При концентрации железа более 0,1% в сплаве образуются интерметаллические соединения TiFe и TiFe<sub>2</sub>. Появление интерметаллидов в сплаве Ti-Fe значительно повышает прочность, но резко снижает пластичность биметалла. Например, твёрдость сплава с 0,14 % HV 199, а с 2,2 % Fe не менее HV 450. Удлинение при разрыве составляет соответственно 18,5 и 2,5 % [1].

При дуговой сварке титана с железом не удается получить сварной шов с содержанием железа в пределах растворимости его в титане. Сварка титана с углеродистыми сталями сопровождается выделением в шве карбидов титана, которые также являются причиной образования хрупких трещин.

Хрупкие химические соединения образуются при взаимодействии титана с большинством металлов. Удовлетворительной пластичностью обладают только соединения

Ti + Nb, Ti + Hf, в которых титан образует ряд твёрдых растворов. Но удовлетворительной свариваемостью со сталью обладает только ванадий и, отчасти, ниобий, что используется при сварке титана со сталью через промежуточный материал.

Кроме того, при сварке возникают затруднения из-за насыщения титана кислородом, азотом и водородом при нагреве до температур, превышающих 400 °С. Это также понижает пластичность сварного соединения.

Отмеченные особенности позволяют считать перспективной сварку титана со сталью в твердом состоянии с минимальным перемешиванием соединяемых металлов и защитой от окисления. В настоящее время существует несколько способов сварки титана со сталью в твёрдой фазе, позволяющих получить соединения с достаточно высокой прочностью сцепления слоёв. К их числу относятся диффузионная сварка в вакууме, холодная сварка, пакетная прокатка в вакууме, прокатка герметизированных пакетов на обычных станах и сварка взрывом. В связи с тем, что диффузионная сварка в вакууме и холодная сварка не позволяют получать соединения на достаточно большой площади, экономическая эффективность применения этих способов для получения биметалла вызывает сомнение. Поэтому в дальнейшем рассматриваются способы получения биметалла прокаткой в вакууме, на обычных

станах и сваркой взрывом, как наиболее перспективные.

Исследованиями [2, 25] установлено, что несмотря на высокую температуру плавления каждого из металлов в отдельности, при нагреве в пакете между пластинами этих металлов образуется эвтектика с температурой плавления 1080 °С. Жидкая фаза по результатам химического анализа содержит 33,2 % Fe и около 66 % Ti. После затвердевания это соединение обладает высокой твёрдостью и хрупкостью, что резко снижает прочность соединения. При прокатке пакетов может произойти выброс жидкого металла под большим давлением. Поэтому оптимальной температурой начала прокатки считают 1000–1050 °С. Прокатка при этой температуре обеспечивает наиболее высокую прочность сцепления слоёв [3].

Влияние глубины вакуума и степени деформации на свойства соединения VT1-1 + Ст.3 исследовано в работах [3, 26]. Пакет стали толщиной 9 мм и титана 3 мм нагревали до 1000 °С и деформировали за один проход на 8–30 % в вакууме с остаточным давлением 0,006–2,000 Па. При испытании прочности соединения на срез установлено, что после обжатия 13 % в вакууме  $1,3 \times (10^{-3} - 10^{-2})$  Па прочность соединения составила 157–215 МПа. В том же вакууме после 8 %-ного обжатия и в вакууме порядка 0,13–1,33 Па – 30–157 МПа. Часть полос, прокатанных в низком вакууме, разрушилось при вырезке образцов для испытаний. В работе [4] показано, что прокатку пакетов необходимо производить в вакууме не ниже 0,053 Па.

Исследования влияния степени деформации на прочность соединения показывают, что при нагреве и прокатке в вакууме уже при обжатии 15–20 % за один пропуск обеспечивается высокая прочность соединения слоёв. Увеличение обжатий до 50 % повышает прочность соединения до 245 МПа, однако дальнейшее их увеличение практически не влияет на прочность сцепления. Показано также благоприятное влияние дробности деформации на прочность соединения [4].

Сравнение результатов вакуумной прокатки титана VT1-1 с армко-железом, сталями Ст.3, Ст.5, 09Г2 и X18Н10Т обнаруживает отрицательное влияние углерода на прочность соединения. Так, например, увеличение содержания углерода в стали с 0,028–0,450 % приводит к значительному снижению прочности сцепления от 255 до 137 МПа. Это связано с тем, что углерод при нагреве диффундирует на границу раздела с титаном и образует карбиды TiC, которые способствуют

охрупчиванию зоны соединения.

При прокатке биметалла в аргоне [4] получены более низкие значения прочности соединения вследствие появления на поверхности титана окисной пленки, которая образуется в результате загрязнения аргона активными газами, выделяющимися при нагреве металла и попадающими в камеру при посадке пакета. Необходимо применять аргон повышенной чистоты и обеспечивать его постоянную очистку в процессе работы стана. Авторы [4] делают вывод о предпочтительном применении вакуума при плакировании титаном. Однако сведения о промышленном применении вакуумной прокатки биметалла сталь-титан как в зарубежной, так и в отечественной литературе отсутствуют.

В связи с дефицитностью вакуумных прокатных станов, а также малой их мощностью [28], не позволяющей прокатывать крупногабаритные листы стали с плакирующим слоем из титана, в Советском Союзе и за рубежом исследовалась прокатка биметалла сталь-титан пакетным способом на обычных станах.

Для защиты титана от окисления и насыщения азотом и водородом собранный пакет герметизируют и продувают инертным газом или вакуумируют во время нагрева. Существует и другой способ защиты поверхности титана от газового насыщения (пат. США 2998642, 3015885, 11025531), по которому для связывания кислорода и азота, оставшихся внутри герметизированного пакета, в него закладывают пирофорные материалы.

Одно из первых исследований по сварке титана со сталью при горячей прокатке выполнено Астровым Е. И. [5], при этом суммарная деформация пакета составляла 80–90 % при температуре 1000–1100°, т. е. сварка происходила через жидкую эвтектику. Комплексное исследование сварки при горячей прокатке титана VT1-1 с армко-железом и углеродистой сталью выполнено Бринзой В. Л. и Павловым И. М. [7–9]. Они при прокатке герметизировали пакеты сваркой по периметру или нанесением спецобмазки. Для уменьшения окисления в пакет помещали магниевую стружку. Авторами исследовано влияние степени деформации, скорости прокатки, температуры, давления, толщины слоя титана на прочность соединения. Экспериментально установлено, что с увеличением температуры от 70 до 1000 °С и степени деформации от 40 до 80 % прочность сцепления слоёв биметалла VT1-1 и стали Ст.2 возрастает с 163 до 483 МПа удельное давление

на валки при этом составило 170 и 150 МПа соответственно.

Прочность сцепления с повышением скорости прокатки до 0,4 м/сек несколько понижается, после чего остается практически на одном уровне, а с уменьшением толщины слоя титана увеличивается с 232 при толщине 10 мм до 368 МПа при толщине титанового слоя 2 мм. Наилучшими условиями для прокатки является температура в интервале 900–1000 °С и степень деформации в первом пропуске не менее 35–40 %. Дальнейшую прокатку до заданного размера следует проводить в максимально возможное число пропусков, в связи с положительным влиянием дробности деформации на прочность соединения.

Следует отметить, неравномерность деформации слоев титана и стали в первых пропусках. Так при общем обжатии 20,8 % обжатие титанового слоя составляет 38,4 %, а стального – 15 % [8]. Разница в относительных обжатиях слоев тем больше, чем меньше общая степень деформации пакета. Поэтому при небольших степенях деформации в первых пропусках (5–20 %) наступает расслоение пакета как результат неравномерности деформации, тогда как при вакуумной прокатке в интервале этих обжатий расслоение биметалла не происходит, что связывают с окислением титана [9].

В работе [10] делается сообщение о прокатке биметаллических листов сталь-титан толщиной 6–30 мм и размером до 2×3 м. Толщина слоя титана 1,5–3,0 мм. Биметалл имеет удовлетворительные прочностные и пластические свойства.

Авторы работы [11] изготовили опытную партию биметаллических листов прокаткой симметричного вакуумированного пакета при температуре 900 °С. После прокатки биметалл отжигали 2–5 ч при температуре 680–850 °С. Материал хорошо выдерживал загиб на 180° и штамповался с вытяжкой после 15-минутного нагрева при 600–800 °С.

По данным работы [10] горячая прокатка пакетов с пиррофорным материалом позволила получить листовой биметалл, хорошо выдерживающий вибрацию и ударные нагрузки, для плакировки применялся конструкционный титан St-60 (менее 0,07 % азота, менее 0,01 % углерода, 0,3 % железа), а в качестве основного слоя использовали конструкционную или котельную сталь. По расчетам автора, изготовить биметалл с толщиной стального слоя менее 6 мм экономически нецелесообразно. Экономический эффект достигается в случае изготовления плакированных листов

с толщиной стали более 60 мм и с толщиной титана 1,5–3,0 мм.

Сообщение о горячей прокатке (800–850 °С) симметричных пакетов титан-сталь делается в работе [36]. Сопротивление срезу слоев биметалла после прокатки при степени обжатия более 40 % и отжига в течении 0,5 часа при температуре 650 °С составило 150 МПа.

В ЦНИИЧЕРМЕТе [12] разработана технология и изготовлена опытная партия биметаллической ленты из армко-железа, плакированного титаном ВТ1-1 для приборостроения. Кованые сутунки армко-железа и пластины титана собирали в симметричный пакет, добавляли магниевую стружку и герметизировали по периметру. Толщина пакетов составляла (5+1+1+5) мм или (10+2+2+10) мм, ширина 110–170 мм длина 220–320 мм.

Для выравнивания послойных деформаций оказалось целесообразным нагревать пакеты до 850 °С и подстуживать перед прокаткой до 700–750 °С, чтобы получить температуру титана 800 °С, а наружных слоев 700–750 °С. Пакеты толщиной 12 мм прокатывали по режиму 12→7→4,5→3 мм, а пакеты толщиной 24 мм – за шесть проходов с суммарным обжатием примерно 90 %. Качество сварки горячекатаных полос проверяли загибом на угол 180° при диаметре оправки, равном толщине биметалла, и скручиванием полосы шириной 20–30 мм. Расслоенный при этом не обнаружилось. После отжига в течении 0,5 ч при температуре 600 °С, показали биметалл имел временное сопротивление 333–253 МПа, предел текучести 196–245 МПа, предельное относительное удлинение 16–25 %. Расслоений при растяжении не появилось.

После горячей прокатки биметалл протравили, разрезали на полосы шириной 80–90 мм и подвергли холодной прокатке. Материал оказался очень чувствительным к неравномерности распределения обжатый по ширине полосы в первых пропусках. Поэтому для предупреждения расслоения пришлось в первом и втором пропусках давать 30–65 %-ное обжатие. Окончательная толщина ленты составила 0,2–0,3 мм.

Опытами установлено, что рабочие валки стана холодной прокатки должны быть цилиндрическими или вогнутыми. Бочкообразность валков приводит к тому, что в первом пропуске середина полосы тянется сильнее, чем кромки, и титановый слой отделяется полностью, как бы хорошо он не был приварен при горячей прокатке.

В этой же работе показана возможность получения ленты толщиной 0,1–0,3 мм только холодной прокаткой. Для качественной сварки необходимо при получении биметалла холодной прокаткой необходимо:

- 1) обжатие в первом проходе на 60–65 % после обезжиривания и зачистки щетками;
- 2) уменьшение содержания кислорода в титане до 0,07 %, водорода до 0,0084 % и азота до 0,044 %;
- 3) равномерное обжатие обоих слоёв, для чего армко-железо следует отжигать при температуре 600–650 °С.

Наклёп биметаллической ленты рекомендуется снимать вакуумным отжигом в течении одного часа при 600–700 °С. Вакуум при отжиге должен быть не менее  $1,3 \times 10^{-2}$  МПа для сохранения геттерирующей способности титана; в вакууме глубиной 1,3 МПа ( $10^{-2}$  мм рт. ст.) титановое покрытие сильно темнеет, поглощая газы и теряя пластичность.

В промышленных условиях прокатка вакуумированных пакетов осуществлена Б. С. Смирновым, О. Ф. Данилевским и др. [14]. Для прокатки на стане 4000 собирали несимметричные пакеты из стальной плиты (Ст.3) толщиной 220 мм, титана ВТ1-1 толщиной 28 мм и крышки из Ст.3 толщиной 45 мм. В качестве разделительного слоя между титаном и крышкой из Ст.3 применяли окись магния. Размеры пакета в плане 900×1000 мм. После обварки по периметру пакет вакуумировали до 6,7–0,1 МПа через патрубок, который затем был заварен. Нагрев пакетов осуществляли в камерных мазутных печах при 1030–1050 °С в течении 6 часов и затем перекачивали до размеров 45×1300×3500 мм. Толщина титана в листе составляла 15 %, расслоений по данным ультразвуковой дефектоскопии не было, сопротивление срезу составляло 147–196 МПа. Биметалл выдерживал загиб на угол 180° в обе стороны.

В работе [15] опробован комбинированный метод изготовления листов титан+сталь 10Г2Б и титан+Ст.3, состоящий из сварки слоев пакета вакуумной прокаткой и дальнейшей раскатки на воздухе.

Влияние повторных нагревов на свойства соединения стали с титаном исследовано Бринзой В. Н. и Лепекиным В. С. [7]. Ими показано, что повторные нагревы биметалла при температурах 750, 900 и 1000 °С приводят к значительным изменениям структуры переходной зоны и, как следствие этого, к резкому понижению пластичности соединения. Поэтому для улучшения свойств биметалла в переходной зоне рекомендуется про-

водить отжиг при температуре 450–500 °С. Так, шестикратный отжиг при температуре 400 °С снизил исходную микротвёрдость на линии соединения с HV 760 до HV 520 при одновременном снижении твёрдости титана и стали.

Авторами [16] разработана обмазка для защиты титановых сплавов от окисления следующего состава: 31–35 % талька, 16–18 % порошка рутила, 8–10 % буры, 12–14 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 0,3 %  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , 17 % белой глины и 28–30 % воды. Исследования показывают, что свойство титановых сплавов, покрытым слоем обмазки, после нагрева при температуре 900–1200 °С в обычных нагревательных устройствах существенно не отличаются от свойств титана после нагрева в вакуумной печи.

В заключении анализа способов получения биметалла сталь-титан прокаткой следует отметить, что в отечественной литературе нет единого мнения о рациональном способе получения такого биметалла прокаткой. Сторонники вакуумной прокатки [9], ссылаясь на результаты работы [12], где при получении опытной партии биметалла прокаткой герметизированных пакетов в 30–55 % случаях имело место расслоение биметалла, и на аналогичные нестабильные результаты при прокатке пакетов сталь-титан на Коммунарском металлургическом заводе, высказывают сомнения в возможности организации массового производства биметалла титан-сталь способом пакетной прокатки на воздухе. В свою очередь сторонники пикетной прокатки [14] на основании своих исследований делают выводы о том, что для получения такого биметалла вакуумные станы не требуют.

В работе [17] сообщается, что еще в начале 60-х годов в США начат промышленный выпуск листового биметалла сталь-титан прокаткой симметричных пакетов с продувкой аргоном.

Как уже указывалось выше, в зарубежной литературе не имеется данных о промышленном применении вакуумных станов для прокатки биметалла сталь-титан, что, по видимому, связано с высокой стоимостью их проектирования и изготовления [9].

За последние годы появилось много сообщений о применении сварки взрывом для плакирования стали титаном и о её промышленном применении за рубежом [28, 29]. При этом отмечается высокое качество соединений, полученных сваркой взрывом. Сравнительные испытания биметаллов, полученных методом пакетной прокатки и сваркой взрывом, выявили явные преимущества послед-

него [18]. В работе [19] указывается на нетехнологичность пакетной прокатки стали с титаном и на высокую эффективность взрывного метода получения биметалла с последующей прокаткой.

В последние годы разработана сварка взрывом стали с тонким слоем титана. Преимущества нового метода сварки большинство исследователей видят в возможности сварки больших поверхностей и малой продолжительности процесса, в течении которого происходит соединение двух металлов. Основной особенностью процесса является отсутствие взаимной диффузии и расплавления металлов [20] кроме отдельных литых включений на вершинах волн соединения.

Таким образом характер взаимодействия титана со сталью не отличается от холодной сварки, где появление хрупких прослоек в соединении невозможно. Однако Чарухин К. Е. и др. [21], анализируя ранние работы зарубежных авторов по сварке взрывом стали с титаном, приходят к выводу о неизбежности появления интерметаллидных прослоек в соединениях сталь-титан, полученных этим. Работы Волгоградского политехнического института [22, 23] подтверждают возможность получения биметалла сталь-титан сваркой взрывом без переходных диффузионных зон и дефектов с прочностью соединения 340–490 МПа.

Седых В. С. и Трыковым Ю. П. [53] исследовано влияние скорости детонации ВВ и сварочного зазора на прочность соединения. При оптимальной скорости детонации ВВ равной 1850 м/сек и сварочного зазора 3-4 мм получено соединение титана ВТ1-0 толщиной 2 мм и стали марки Ст.3 толщиной 10 мм, обладающее прочностью слоёв на отрыв около 540 МПа. Исследования микроструктуры соединения выявили линию соединения синусоидальной формы без завихрений и включений «белой фазы». В этой же работе отмечается, что в случае сварки по угловой схеме линия соединения имеет волны искаженной формы с завихрениями, которые содержат пустоты и загрязнения. Кроме этого, в зоне соединения со стороны титана видны локальные области «белой фазы» с более высокой твердостью, что, по видимому, является причиной пониженной прочности соединения (310 МПа).

К выводу о необходимости уменьшения скорости точки контакта приходит Дерибас А. А. [24]. В соединениях, полученных по угловой схеме титана со сталью также наблюдались участки «белой фазы», имеющие микротвердость HV 800-920. Исследования

на микрозонде показали, что на участке вихрей и в «белых» слоях средний состав концентраций соответствует соединению  $Fe_2Ti$ . Соединения с завихрениями вершин показывают прочность на отрыв 323–382 МПа. В то же время образцы с такой же формой волны, но без вихрей, 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 пластин на прочность соединения исследовано Н. Н. Казак и др. [22]. При увеличении скорости соударения сверх оптимального значения появляется хрупкая «белая фаза» (эвтектика  $\beta-Ti+TiFe$ ), увеличиваются параметры волн и площадь участков «белой фазы», в них возникают пустоты и трещины. Фактором, регулирующим появление «белой фазы» является не скорость пластины, а энергия, накопленная в ней перед соударением. При одинаковой скорости соударения и толщине титана 2 и 6 мм (т. е. разной энергии) толщина хрупкого слоя отличается в 1,5–2,0 раза. Состав и структура «белой фазы» не зависит от параметров соударения. Микротвердость равная HV 580–940, не изменяется в пределах каждого включения. Приведенный в работе [22] график влияния скорости соударения на относительную площадь интерметаллидных включений показывает, что при скорости детонации 1800 м/сек хрупкая прослойка в соединении появляется при скоростях соударения больших 800 м/сек. При скорости соударения 1500 м/сек относительная площадь интерметаллидных включений составляет 50 %, что в значительной мере сказалось на прочности соединения титана со сталью марки Ст.3, полученного в работе [23] ( $\sigma_{отр}=275$  МПа), где авторы делают о том, что оптимальная скорость соударения составляет 1470–1570 м/сек. Как уже упоминалось выше, в этой работе получено аналогичное соединение с высокой прочностью (540 МПа) при скорости соударения порядка 550 м/сек (ориентировочная оценка) что согласуется с данными работы [22].

В работах [25, 26] на основании исследований соединений стали с титаном и циркония со сталью X18H10T, образующего аналогичные интерметаллические соединения, делается более конкретный вывод о допустимых значениях энергии соударения, не влияющих на прочность соединений. Критическое значение удельной кинетической энергии соударения для пары сталь-титан

составляет  $15 \times 10^8$  эрг/см<sup>2</sup>, которой по данным работы [27] соответствует скорость соударения около 320 м/сек. Таким образом, оптимальным интервалом скоростей соударения для сварки титана со сталью можно считать скорость 300–500 м/сек в зависимости от толщины метаэлемента, с тем, чтобы удельная кинетическая энергия соударения не превышала своего критического значения.

Аналогичные результаты по влиянию скорости детонации и скорости соударения на прочность соединения стали с титаном получены в работах [28, 29].

В заключении анализа влияния параметров соударения на качество соединения стали с титаном следует отметить влияние на прочность соединения твердости стального слоя, показанное Седых В. С. и Трыковым Ю. П. в работе [25]. При увеличении твердости стали взаимодействие при сварке локализуется в более тонком слое, что увеличивает разогрев зоны сварки. При твердости HV 120 разогрев относительно мал и участки интерметаллида глобулярной формы занимают примерно 30 % поверхности сварки, при увеличении твердости вдвое форма хрупких включений становится иглообразной, а их относительная площадь достигает 48–50 %. При этом наблюдается уменьшение параметров волн.

В связи с возможностью использования биметаллических соединений стали с титаном в качестве заготовок для горячей прокатки, а также возможностью эксплуатации таких соединений при повышенных температурах представляет существенный интерес исследование изменений прочности биметалла после нагревов до различных температур. Такие исследования приведены в работах [22–24]. Полученные при этом данные по влиянию нагрева на прочность соединения не однозначны у различных авторов. Так исследование биметалла сталь марки МК 40+титан [23] показало, что после нагрева при температурах до 600 °С включительно с выдержкой 45 минут прочность соединения возрастает со средних значений от 196 до 314 МПа. Дальнейший нагрев образцов от 700 до 1000 °С вызывает резкое падение прочности до 50 МПа. Рост прочности соединения при нагреве до 600 °С авторы объясняют релаксацией внутренних напряжений, возникающих в нем при сварке. При нагреве выше 600 °С процессы диффузии приводят к образованию в зоне соединения хрупких интерметаллических прослоек, которые вызывают резкое понижение прочности. Исследования микроструктуры образцов после нагрева выявили в

зоне соединения рост участков с твердой и хрупкой фазой. Аналогичные исследования биметалла ВТ1-1+ Ст.3 [22] не показали роста прочности при нагреве до 600 °С, а при дальнейшем нагреве до 1000 °С выявили такое же резкое снижение прочности. При этом наблюдалась диффузия углерода в титан. Толщина хрупкой прослойки увеличивалась в сторону титана.

По данным работы [24] механические свойства соединения ВТ1+Ст.3 после отжига при 680, 750 и 950 °С остались практически без изменения. При нагреве 680 °С роста новых интерметаллидов не обнаружено. Ширина зоны перехода достигает 6–8 мкм при нагреве до температуры 750 °С и выдержке 2 часа. При отжиге 900 °С с выдержкой 1 час вдоль всего шва образовывается серая полоса, содержащая 20 % Fe. Участки «белой фазы» существенно не меняются. После отжига 1100 °С с выдержкой 2 часа прочность на отрыв падает до нуля. В стали зафиксировано образование обезуглероженной зоны. В титане появляется слоистая структура. Отмечено появление участков повышенной хрупкости (60 % Ti и 40 % Fe) с твердостью HV 2915.

Зависимость прочности соединения слоёв биметалла сталь-титан от нагрева, приведенная в работе [22], хорошо согласуется с данными работы [23]. При этом отмечается отрицательное влияние содержания углерода в стали на прочность сцепления слоев при нагреве, т. к. образующиеся карбиды титана способствуют охрупчиванию зоны соединения и более резкому снижению её прочности.

Таким образом, несмотря на противоречивость имеющихся данных о влиянии нагрева на прочность соединения стали с титаном, большинство исследователей делают вывод о недопустимости длительного нагрева готовых биметаллических изделий выше 600 °С.

Увеличение толщины слоя интерметаллидов при нагреве затрудняет последующую горячую обработку биметаллических пластин, полученных сваркой взрывом, в связи с чем возможность дальнейшей горячей прокатки такого биметалла ставилась под сомнение и изыскивались различные способы для предотвращения протекания диффузионных процессов на границе стали с титаном.

По мнению авторов работ [22, 27] из всех существующих способов получения биметалла сталь-титан сварка взрывом в сочетании с прокаткой является наиболее перспективной и экономически выгодной. Ими исследовалось поведение интерметаллидной прослойки, образующейся при нагреве под

обработку, под действием деформации. Опыты проводились на цилиндрических образцах, вырезанных из сваренного взрывом биметалла сталь-титан. Нагрев таких образцов в интервале температур 600–1000 °С, выдержка при этих температурах в течение 45 минут и обжатие их под прессом на 30 и 50 % показали, что с увеличением степени обжатия прочность сцепления слоев возрастает.

Исследование микроструктуры зоны соединения образцов показывают, что горячая деформация биметалла сопровождается дроблением хрупких прослоек, образовавшихся при нагреве и их растеканием вместе с деформирующимся металлом по зоне соединения. При этом с увеличением степени деформации частицы раздробленных прослоек разделяются все большими вновь образующимися участками соединения титана со сталью без интерметаллидов, а ввиду малого времени охлаждения образцов после деформации новые прослойки образоваться не успевают, что подтверждается температурно-временными условиями образования интерметаллидной фазы между титаном и сталью, приведёнными в работе [51].

Биметалл, прокатанный из сутонок размером 13×250×500 мм на листовом стане с обжатием 50 % выдержал все испытания на изгиб 180° и кручение (360 и 720°) без расслоения и трещин. Средняя прочность на отрыв слоев составила 265–353 МПа. Исходное соотношение слоев в прокатанном биметалле сохранилось. Данных по режимам отжига прокатанных биметаллических листов не приводится.

Томсинский В. С. и Шишкина М. И. [30] рекомендуют после прокатки нагревать биметалл до температуры не выше 400 °С для улучшения свойств во избежание образования новых хрупких фаз в диффузионной зоне, а также применять для основного слоя сталь с содержанием углерода не более 0,1 %.

Одним из основных преимуществ технологии сварки взрывом является то, что с её помощью можно не только плакировать плоские листы и заготовки для дальнейшей переработки на прокатных станах, но и непосредственно плакировать различные крупногабаритные детали. Однако было выявлено, что с ростом размеров свариваемых заготовок с удалением от начала процесса сварки (точки инициирования заряда взрывчатого вещества) происходит заметное увеличение параметров волн сварного соединения и вместе с тем увеличение размеров вихревых зон, размер которых оказывает влияние на качество сварного соединения [31]. Несмотря на то,

что при сварке экспериментальных образцов стали с титаном длиной 200–300 мм без труда можно было получить качественное равнопрочное сварное соединение с минимальным содержанием вихревых зон, при сварке заготовок длиной несколько метров на расстоянии 1,5–2,0 м происходило резкое ухудшение качества сварки вплоть до разрушения плакирующего титанового слоя [31]. Исследование причин этого явления показало, что на процесс образования сварного соединения при сварке взрывом в той или иной мере оказывает влияние газ, находящийся в объёме между свариваемыми поверхностями (сварочном зазоре) [32, 33].

Соударяющиеся пластины выталкивают газ из сварочного зазора со скоростью порядка 2000–4000 м/с, что порождает в нём ударную волну, фронт которой имеет скорость большую скорости точки контакта. Между фронтом ударной волны и линией соударения свариваемых пластин возникает область ударно-сжатого газа, размер которой, а следовательно, и время действия её на свариваемые поверхности увеличивается с удалением от начала процесса сварки. По имеющимся экспериментальным и теоретическим оценкам температура в этой области достигает 3000–5000 °С, а давление 5–20 МПа МПа [32]. Такое явление не может не сказываться на условиях образования сварного соединения. Ряд исследователей считает, что ударно-сжатый газ поднимает метаемую пластину перед областью соударения, что вызывает нарушение стационарности режима сварки, одним из основных технологических параметров которой является величина сварочного зазора между метаемой и неподвижной пластиной [34]. Это должно приводить к увеличению важнейших кинематических параметров угла соударения пластин и скорости метания. В то же время ударно-сжатый газ, нагретый до высоких температур, может прогреть свариваемые поверхности перед актом образования сварного соединения. Оба эти фактора должны с удалением от начала процесса сварки увеличивать энергию, затрачиваемую на образование сварного соединения, относительно необходимой.

В работах [33] было исследовано влияние газа, находящегося в сварочном зазоре, на процесс образования сварного соединения титана со сталью и сделан вывод о том, что ударно-сжатый газ, движущийся впереди области соударения за фронтом ударной волны, прогревает свариваемые поверхности перед началом процесса образования сварного соединения, насыщает металл вихревых

зон и приводит к росту их размеров с удалением от начала процесса сварки. Мощность его, как теплового источника, зависит не только от физических, но и в большой мере от химических свойств газа. Энергия ударно-сжатого газа складывается их энергии адиабатического сжатия газа за фронтом ударной волны, энергии продуктов кумуляции и энергии химической реакции газов (кислород и азот) с мелкодисперсными частицами свариваемых металлов, возникающих из-за вырождения кумулятивной струи. Влияние ударно-сжатого газа на процесс сварки и качество сварного соединения растёт с удалением от начала процесса сварки. Наибольшее влияние воздух, заполняющий сварочный зазор, оказывает на качество сварки металлов, активно взаимодействующих с кислородом и азотом, например, титана. Заполнение объёма между свариваемыми поверхностями аргоном или гелием исключает экзотермическую химическую реакцию металла с кислородом и азотом воздуха. В связи с этим исчезает, наблюдаемое при сварке в воздухе, периодическое аномальное увеличение расплавленного металла в соединении, которое не только отрицательно сказывается на механических свойствах соединения, но и может привести и к его разрушению. Металл вихревых зон не насыщается кислородом и азотом.

Выводы, сделанные на основании исследований, проведённых в работах [32, 33], позволили разработать технологию сварки взрывом в среде защитных газов. Заполнение сварочного зазора аргоном или гелием при сварке биметалла сталь-титан позволило решить проблему сварки крупногабаритных листов этого биметалла со стабильно высоким качеством, удовлетворяющим существующим стандартам [35].

Таким образом, несмотря на то, что разработка технологии производства биметалла сталь-титан различными видами прокатки имела некоторый успех, широкого применения этот способ не получил, что до сих пор не даёт возможности производить тонколистовой биметалл сталь-титан.

Таким образом, анализ опубликованных, в том числе и патентных отечественных и зарубежных данных по получению биметалла сталь-титан показывает, что наибольшее развитие получил способ непосредственного плакирования взрывом сталей титаном в среде защитных газов [35].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерёменко В. Н. Титан и его сплавы // Киев: Издательство АН Украинской ССР. 1960. 499 с.
2. Астров Е. И. Плакированные многослойные металлы // М.: Металлургия. 1965. 239 с.
3. Довженко Ф. Е., Кривоносов Ю. И. Цветные металлы, 1964. № 6. С. 63.
4. Долженко Ф. Е. и др. Цветные металлы. 1966. № 6. С. 75.
5. Астров Е. И. Плакирование стали титаном // В сб. Металловедение и термическая обработка металлов. Горький. 1959.
6. Павлов И. М., Бринза В. Н. Цветные металлы. 1961. № 3.
7. Бринза В. Н., Лежкин В. С. Цветные металлы. 1964. № 3.
8. Павлов И. М., Бринза В. Н. В сб. Новые процессы прокатки металлов и сплавов, М.: Металлургия. 1966.
9. Долженко Ф. Е. и др. Сталь. 1967. № 1.
10. Motidzuki T. Titanium. Tokio. 1962. № 10. P. 273.
11. Plant and Process. Japan. 1962. № 4. P. 173.
12. Mizakami K. Spezial Steel. Japan. 1962. № 11. P. 35.
13. Смирнов В. С. И др. Сталь. 1966. № 11.
14. Долженко Ф. Е. Сталь. 1967. № 5.
15. Цветные металлы. 1965. № 12.
16. Сб. Производство биметаллов. (ЦНИИЧМ). М.: Металлургия. 1965. Вып. 42.
17. Бузланов, Г. Ф. Производство и применение биметаллов в промышленности: обзор заруб. Техники // М.: ГОСИНТИ, 1962. 76 с.
18. Sticha E. A. «Matez Protect». 1969. № 10. P. 1–15.
19. Меандров Л. В. Двухслойные коррозионно-стойкие стали за рубежом // М.: Металлургия. 1970. 232 с.
20. Дерибас А. А. и др. В сб. Высокопроизводительные методы сварки в химическом и нефтяном машиностроении. Сварка взрывом. Серия ХМ-9. – М.: Машиностроение. 1965.
21. Чарухин К. Е., Голованенко С. А. и др. Биметаллические соединения // М.: Металлургия, 1970. 280 с.
22. Седых В. С., Казак Н. Н. Влияние горячей обработки давлением на свойства соединений, сваренных взрывом из биметаллов, образующих интерметаллиды // В сб. Технология сварки взрывом различных металлов и свойства полученных сварных соединений. – М. 1970.
23. Седых В. С., Трыков Ю. П. Особенности сварки взрывом титана и его сплавов с конструкционными сталями // В сб. Технология сварки взрывом различных металлов и свойства полученных сварных соединений. – М. 1965.
24. Дерибас А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом // Новосибирск: Наука, 1972. – 188 с.
25. Атрощенко Э. С. И др. О связи кинетической энергии соударения пластин с прочностью сварных соединений между металлами, образующими интерметаллидные фазы // В сб. Технология машиностроения, Волгоград, изд. ВПИ, 1972.



26. Атрощенко Э. С. И др. Сварка взрывом циркония со сталью X18H10T // В сб. Технология сварки взрывом различных металлов и свойства полученных сварных соединений. – М. 1970.
27. Седых В. С., Казак Н. Н. Сварка взрывом и свойства сварных соединений // М.: Машиностроение, 1971. – 71 с.
28. Томиясу Фудзиро «Кинодзюку дзайре» Metals Eugug, 1967. 7. # 3. P. 31–36.
29. Nix Hugh V. Material Prot and Performs. 1972.11 # 12. P. 28–31.
30. Томсинский В. С., Шишкин М. И. Механические свойства биметалла сталь-титан, полученного методом сварки взрывом // В сб. Технология сварочного производства. – № 116, Сборник научных трудов Пермского политехнического института, Пермь, 1972.
31. Кудинов В. М., Коротеев А. Я. Сварка взрывом в металлургии // М.: Машиностроение, 1978. 168 с.
32. Бердыченко А. А., Первухин Л. Б. Теоретические основы технологии сварки взрывом в среде защитных газов / Сварка взрывом и свойства сварных соединений. Межвузовский сборник научных трудов / ВолгГТУ, Волгоград, 2002. С. 134–151.
33. Бердыченко А. А., Первухин Л. Б., Олейников Д. В. Трудности сварки взрывом крупногабаритных листов биметалла с плакирующим слоем из титана и пути их преодоления // В сборнике: Композиты – в народное хозяйство России (Композит-02). Труды международной научно-технической конференции. 2002. С. 92–96.
34. Сильченко Т. Ш., Кузьмин С. В., Лысак В. И. и др. Анализ причин изменения структуры и свойств зоны соединения по длине сваренных взрывом биметаллических заготовок / Известия Волгоградского технического университета: межвуз. сб. науч. ст. № 3 (41) / ВолгГТУ. Волгоград, 2008. С. 31–38.
35. Первухин Л. Б., Сериков С. В., Устинов И. К., Первухина О. Л. Производство биметалла сталь-титан сваркой взрывом и его применение в конструкциях теплообменников атомных энергетических установок // Титан. 2009. № 1 (23). С. 37–40.
36. Бердыченко А. А. Структурные изменения титана при образовании сварного соединения сваркой взрывом // Известия Волгоградского технического университета: межвуз. сб. науч. ст. № 3 (41) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. С. 57–67.

**Бердыченко Александр Анатольевич**,  
к. т. н., доцент, кафедра современных специальных материалов Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова, e-mail: berd50@mail.ru