

С.З. Лончаков, В.И. Муравьев, Б.И. Долотов, П.В. Бахматов

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ РАСПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА В СВАРОЧНОЙ ВАННЕ НА ГАЗОНАСЫЩЕНИЕ И СВОЙСТВА ТИТАНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация. Представлен обзор проведенных специалистами Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета исследований по решению проблем получения качественных и надежных сварочных швов при производстве изделий и конструкций летательных аппаратов. Рассмотрены: газонасыщение металла шва кислородом, водородом и азотом в зависимости от методов разделки свариваемых поверхностей; возможности использования сварки погруженным вольфрамовым электродом титановых образцов из сплава BT20, полученных кислородно-керосиновой резкой по необработанным кромкам; взаимодействие и управление процессами перемешивания металла в сварочной ванне, которые оказывают основополагающее влияние на газонасыщение и свойства металла шва. Приведены качественная и количественная оценки этого влияния.

Ключевые слова: сварка титановых конструкций, газонасыщение, вольфрамовый электрод, сварочная ванна.

INFLUENCE OF INTENSIFICATION OF PROCESS OF HASHING OF MELTED METAL IN WELDING BATHTUB ON GAS-SATURATION AND PROPERTIES OF TITANIC STRUCTURES

Abstract. Presented is review of research led by specialists of Komsomolsk-on-Amur state technical university devoted to the problem of receiving high quality and secure welded seams in production of parts and constructions of aircrafts. Analyzed are: gas-saturation of metal of seam by oxygen, hydrogen and nitrogen depending on methods of cutting of welded surfaces; possibilities to use welding by shipped tungsten electrode (WSTE) of titanic samples from BT20 alloy, received by oxygen-kerosene cutting on raw edges; interaction and management of processes of metal hashing in welding bathtub which have fundamental impact on gas-saturation and properties of metal of seam. Qualitative and quantitative estimates of this influence are given in this work.

Keywords: welding of titanic designs, gaz-saturation, tungsten electrode, welding bathtub.

Титан и его сплавы при нагревах под ковку, штамповку, сварку, термическую обработку активно взаимодействуют с входящими в состав атмосферы кислородом, водородом, азотом, влагой, окисью углерода, углекислым газом. При этом происходит не только окисление, но и газонасыщение поверхности заготовки, что приводит к резкому снижению пластичности, повышает прочность и твердость, увеличивает склонность к хрупкому разрушению. Исходя из вышесказанного, одна из первых операций – раскрой заготовок под сварку при изготовлении силовых штамповых титановых конструкций – безусловно оказывает влияние на газонасыщение и свойства металла шва. В настоящей работе приведены качественная и количественная оценки этого влияния.

Основным недостатком процесса термической резки титановых сплавов с помощью устройств для плазменной или газо-кислородной резки является образование на поверхности реза альфированного слоя, который характеризуется повышенным содержанием кислорода и высокой твердостью. Известно [1], что сварные соединения, полученные по необработанным кромкам после плазменно-дуговой резки, обладают высоким качеством.

В настоящей работе исследовали возможность использования сварки погруженным вольфрамовым электродом (СПВЭ) титановых образцов из сплава BT20, полученных кислородно-керосиновой резкой по необработанным кромкам.

Визуально-оптическими и металлографическими исследованиями области, полученной кислородно-керосиновой резкой, установлено, что в металле можно выделить три зоны, отличающиеся по степени загрязнения вредными примесями: пористый шлак желто-бурого цвета; хрупкий слой, имеющий цвета побежалости, с мелкокристаллическим изломом; газонасыщенный металл.

Пористый шлак желто-бурого цвета легко удаляется пескоструйной обработкой корундовым песком. Прилегающий к нему слой неравномерен по толщине, имеет многочисленные трещины и обладает максимальной микротвердостью. Толщина газонасыщенного слоя составляет не менее 2 мм.

Сварку образцов осуществляли на установке ГСПД-1 в гелии током прямой полярности. Сварку погруженным вольфрамовым электродом образцов из сплава BT20 толщиной 40 мм осуществляли за один про-

ход при погружении электрода 15 мм, сварочном токе 1600 А, напряжении дуги 14 В и скорости сварки 1,0, 1,5 и 2,0 мм/с. Образцы под сварку стыковали по плоскостям реза. Поскольку кислородно-керосиновую резку образцов под сварку производили вручную, свариваемые кромки получились очень неровными. Наличие значительных пустот в стыке отразилось на геометрических параметрах шва, но никак не повлияло на качество сварки.

Особенностью процесса СПВЭ является наличие уникальных условий плавления металла, главными из которых являются перегрев сварочной ванны [2] до температуры кипения титана и весьма интенсивное ее перемешивание. Кроме того, при СПВЭ титановых сплавов вокруг электрода создается устойчивый поток раскаленного газа (гелия), который выбрасывается из глубины ванны по стекам расплавленного металла; этот процесс можно наблюдать визуально. Жидкометаллическая ванна довольно интенсивно испаряет титан и другие химические элементы, находящиеся в металле в виде легирующих элементов, примесей или обычных поверхностных загрязнений. Пары титана обладают высокой химической активностью, поэтому в парогазовой атмосфере над сварочной ванной активно протекают реакции взаимодействия титана с другими химическими элементами. Сложные рыхлые продукты этих реакций, по внешнему виду напоминающие сажу, конденсируются на сварочном инструменте, в основном на водоохлаждаемом башмаке (защитной насадке). Металл шва, таким образом, как бы самоочищается, подвергается рафинированию в инертной атмосфере. Именно благодаря этому процессу следует ожидать резкого снижения содержания газовых примесей кислорода, азота и водорода в металле шва.

Из известных методов определения содержания водорода в титане и его сплавах был выбран спектральный (фотографический-фотоэлектрический). Методы вакуум-нагрева, вакуум-плавления и спектрально-изотопный, несмотря на высокую (0,0001 %) чувствительность, малопродуктивны (пять – шесть проб в смену), трудоемки (требуют изготовления специальных проб) и не дают возможности точечного анализа содержания водорода для оценки распределения его по сечению сварного шва.

В настоящем исследовании, отработаны режимы локального спектрального фотоэлектрического анализа содержания водорода в титановых сплавах с использованием итрированного вольфрамового электрода вместо медного, что позволило более чем в десять раз увеличить стойкость электродов и вместе с тем повысить точность анализа.

Регистрацию интенсивности спектральной линии водорода $H\beta_{56,2}$ нм осуществляли фотоэлектрической приставкой к спектрографу ИСП-51.

Использовали следующие параметры работы импульсного генератора (локальный режим): емкость

1210 мкФ, индуктивность 50 – 70 мкГн, напряжение 220 В. Величина точки поражения на металле: диам. не более 1,5 мм, глубина 0,05 – 0,07 мм.

Содержание азота в металле шва определяли химическим методом; наиболее распространенным и установившимся в производственной практике является дистилляционно-ацидиметрический (метод Кьелдаля). Сущность этого метода заключается в том, что азот из раствора после растворения стружки дистилляцией из щелочного раствора отделяется в виде аммиака, который затем титруется кислотой в присутствии индикатора.

Содержание кислорода в металле шва определяли методом восстановительного плавления в среде инертных газов (метод импульсного нагрева) с последующим газохроматическим анализом экстрагированных газов на базе хроматографа «Кристалл-2000».

Содержание водорода. Учитывая большую подвижность атомарного водорода, представлялось целесообразным определить его содержание в металле шва непосредственно после сварки и в отожженных образцах. Количественный анализ, проведенный в 82 точках по всему сечению сварного соединения, показал следующие результаты. На неотожженных образцах массовая доля водорода в металле шва составляет (0,0018 – 0,0049)/0,0030 %, в зоне сплавления – (0,0016 – 0,0038)/0,0025 %, в зоне термического влияния (ЗТВ) (т.е. в основном металле) – (0,0019 – 0,0056)/0,0028 % (здесь и далее в скобках приведены минимальное и максимальное значения, через косую – среднее значение). Для отожженных образцов эти величины составляют (0,0011 – 0,0042)/0,0026, (0,0017 – 0,0042)/0,0026 и (0,0017 – 0,0046)/0,0028 % соответственно. Во всех случаях максимальному содержанию водорода в неотожженных образцах соответствовали точки, расположенные непосредственно у поверхности образцов. Полученные данные свидетельствуют о том, что в процессе сварки не происходит насыщения водородом металла шва, поэтому последующий вакуумный отжиг приводит лишь к незначительному снижению концентрации водорода в сварном соединении; в объеме всего металла наблюдается тенденция к перераспределению водорода в сторону выравнивания его концентрации. Повышения массовой доли водорода в отдельных зонах и точках сварного шва выше допустимого (0,08 %) предела не наблюдали.

Содержание кислорода. Изменение содержания кислорода в металле шва представляет существенный интерес: при принятом процессе плазменной резки отсутствовала дополнительная защита инертным газом оплавленных и разогретых до высоких температур кромок реза, поэтому происходило их контактирование с окружающей атмосферой.

Измерения, проведенные в 42 различных точках сварного соединения на отожженных образцах, выявили некоторое повышение концентрации кислорода в

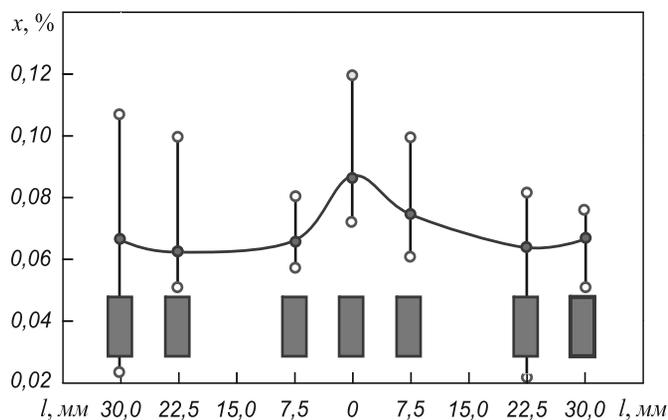


Рис. 1. Распределение массовой доли кислорода (x) по сечению сварного шва (на различном расстоянии l от оси) (серым цветом показаны места отбора проб)

центральной части сварного шва (рис. 1). Доля кислорода в металле шва составляет $(0,058 - 0,120)/0,075$ %, а в ЗТВ — $(0,023 - 0,106)/0,065$ %. Таким образом, среднее содержание кислорода в металле сварного шва примерно на 15 % превышает его содержание в исходном металле. Следовательно, обогащение металла сварного шва кислородом по сравнению с исходным его содержанием в условиях эксперимента могло произойти только за счет образования на поверхности реза некоторого количества оксидов титана и связано с ранее отмеченными особенностями выполнения процесса резки. Однако ни в одной из областей сварного соединения не было зафиксировано предельно допустимой (0,15 %) массовой доли кислорода для сплава ВТ-20.

Содержание азота. Анализ содержания азота проводили на отожженных образцах в различных участках металла шва и ЗТВ. Установлено, что в металле шва массовая доля азота составляет по данным девяти измерений $(0,014 - 0,039)/0,025$ %, а в ЗТВ (11 измерений) — $(0,011 - 0,039)/0,024$ %. Несмотря на то, что тенденция к повышению концентрации азота в сварном шве выражена относительно слабо (всего на 4 % больше по сравнению с концентрацией в основном металле) этим фактом не следует пренебрегать, так как он четко прослеживается практически при каждом измерении.

Необходимо отметить, что поверхность образцов после сварки не зачищали, и ее хотя и незначительное загрязнение соединениями кислорода и азота в исследованиях не учитывали.

Для того, чтобы произвести качественную и количественную оценку процесса рафинирования жидкометаллической титановой ванны, удобно воспользоваться следующим коэффициентом:

$$K_{\phi} = \frac{I_{\text{св}} U}{vH},$$

где $I_{\text{св}}$ — сварочный ток; U — напряжение дуги; v — скорость сварки; H — глубина проплавления.

Коэффициент K_{ϕ} совпадает по размерности с физической величиной, называемой энергетической экспозицией; характеризует энергетическую насыщенность зеркала сварочной ванны (и газового объема над ним) или потенциальную фугитивность всего объема расплавленного металла.

В табл. 1 приведены усредненные содержания водорода, кислорода и азота в металле шва и в основном металле. Прослеживается тенденция к повышению содержания кислорода и азота в металле сварного шва при снижении значения K_{ϕ} , поэтому провели более тщательные измерения содержания водорода в характерных зонах сварного соединения (рис. 2, табл. 2).

Распределение водорода в металле сварного соединения неравномерно и в разных объемах металла отличается более чем на порядок. Четко выражен максимум содержания водорода в зоне сплавления (3) и менее четко в зоне термического влияния (1, 2) при переходе к металлу, не подверженному интенсивному тепловому воздействию. В металле шва (4) содержание водорода несколько ниже, чем в основном металле, менее выражено снижение содержания водорода в зоне термического влияния (3). Существенное влияние оказывают условия процесса рафинирования, прослеживается не только повышение содержания кислорода, азота, но и водорода в металле сварного шва при снижении значения K_{ϕ} (см. рис. 2, кривые I и II).

При изготовлении ответственных конструкций самолетов из титанового сплава ВТ20 предусмотрено исследование образцов-свидетелей для определения качества сварных швов, полученных сваркой погруженным вольфрамовым электродом. Согласно большому количеству данных, собранных за несколько лет, наблюдается отчетливая тенденция снижения содержания азота, кислорода и водорода в металле сварного шва

Таблица 1

Усредненные содержания водорода, кислорода и азота в металле шва и основном металле

$K_{\phi} \cdot 10^4, \text{кДж/м}^2$	Содержание, %, элемента в металле		
	O_2	H_2	N_2
сварной шов			
46,00	0,054	0,0044	0,0260
46,00	0,053	0,0048	0,0250
35,64	0,052	0,0023	0,0253
35,64	0,061	0,0060	0,0269
23,68	0,072	0,0044	0,0272
23,68	0,070	0,0039	0,0265
основной металл			
	0,048	0,0028	0,024
допустимые по ГОСТ 19807 – 91			
	$\leq 0,150$	$\leq 0,0150$	$\leq 0,050$

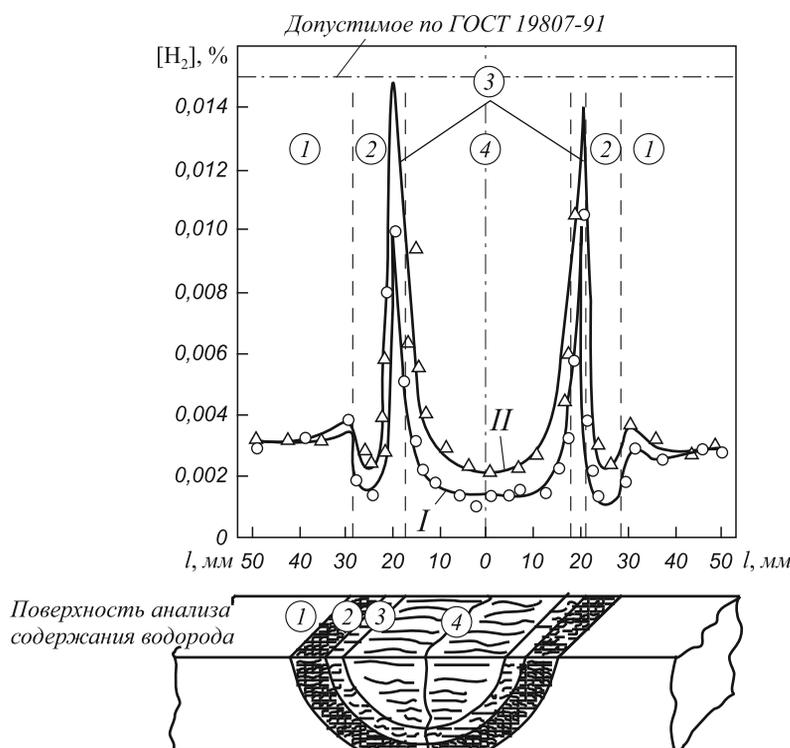


Рис. 2. Кривые распределения содержания водорода по зонам (основной металл (1), зона термического влияния (2), зона сплавления (3), металл шва (4)) металла шва сплава ВТ20 в зависимости от процесса рафинирования жидкометаллической титановой ванны:
 $I - K_{\phi} = 46 \cdot 10^4 \text{ кДж/м}^2$; $II - K_{\phi} = 23,68 \cdot 10^4 \text{ кДж/м}^2$

Таблица 2

Распределение водорода в сварном соединении

$K_{\phi} \cdot 10^4$, кДж/м ²	Содержание, %, водорода			
	в ЗТВ	на линии сплавления	в металле сварного шва	на оси сварного шва
46,00	<u>0,0014 – 0,0098</u> 0,0042	<u>0,0010 – 0,0091</u> 0,0035	<u>0,0013 – 0,0106</u> 0,0051	<u>0,0014 – 0,0033</u> 0,0026
35,64	<u>0,0014 – 0,0071</u> 0,0034	<u>0,0010 – 0,0100</u> 0,0044	<u>0,0010 – 0,0110</u> 0,0032	<u>0,0018 – 0,0031</u> 0,0021
23,68	<u>0,0022 – 0,0080</u> 0,0040	<u>0,0097 – 0,0106</u> 0,0063	<u>0,0014 – 0,0150</u> 0,0054	<u>0,0020 – 0,0044</u> 0,0031

Примечание. В числителе приведены минимальное и максимальные значения, в знаменателе – среднее значение по результатам 7 – 9 измерений.

по сравнению с основным металлом. Видимо, именно этим своеобразным эффектом самоочистки (саморафинирования) металла шва при СПВЭ можно объяснить высокие прочностные характеристики сварных швов, несмотря на их выраженную крупнозернистость [3].

В работе [4] явление саморафинирования швов при СПВЭ титановых сплавов объясняется интенсивным испарением титана: раскаленные пары титана уносят с собой все загрязнения, находящиеся над зеркалом ванны. При этом предполагается наличие эффективного перемешивания сварочной ванны, обеспечивающее интенсивные обменные процессы на границе раздела фаз.

Можно предположить, что при СПВЭ расплавленный металл находится в интенсивном движении, причем ги-

дродинамические условия сварочной ванны существенно влияют не только на дегазацию, но и на проплавление металла, формирование внешней поверхности шва, однородность металла шва, образование в нем дефектов типа полостей и газовых пустот. В связи с этим изучение перемещений жидкого металла сварочной ванны представляет несомненный интерес, но экспериментальное изучение потока расплава осложняется из-за высоких температур дуги и жидкого состояния металла [5].

К настоящему времени сформированы только основные упрощенные модельные представления о механизме гидродинамических явлений в сварочной ванне. Причины, вызывающие появление потоков в расплаве, многообразны. Одна из главных, обусловленная

движением сварочного источника теплоты, – несимметричное распределение давления в кратере. Вторая причина обусловлена протеканием сварочного тока через расплав, что приводит к возникновению объемных электромагнитных сил – сил Лоренца. К другим причинам относят: индуцированное движение в хвостовой части сварочной ванны потоками плазмы; образование волн за движущимся кратером; влияние термокапиллярного эффекта (разности коэффициента поверхностного натяжения в центральной и периферийных частях сварочной ванны вследствие неравномерного распределения температур).

Схема движения потока жидкого металла изучена для аргоно-дуговой сварки титанового сплава погруженным вольфрамовым электродом [6]. Установлено, что расплавляемый основной металл движется в хвостовую часть сварочной ванны вдоль объемно-криволинейной поверхности фронта кристаллизации. Однако по результатам работы [6] трудно судить о равномерности химического состава шва и времени его достижения, особенно в случае СПВЭ на повышенных токах.

В настоящей работе для качественной оценки интенсивности перемешивания всего объема металла сварочной ванны выполняли СПВЭ образцов из титанового сплава BT20 толщиной 44 мм в чистом гелии. Применяли ток прямой полярности (около 1750 А) вольфрамовым электродом диам. 10 мм со скоростью 1 мм/с. Поперек образца устанавливали пластину из индикаторного металла толщиной 1 мм, который переплавлялся в процессе сварки. На рис. 3 приведена схема проведения эксперимента. Точность эксперимента обеспечивалась тем, что температуры плавления основного металла (BT20) и индикаторного (армко-железо) очень близки. Равномерность распределения жидкого металла оценивали путем индикации железа на поперечных темплетях, вырезанных из сварных образцов (рис. 3) (поперечные линии соответствуют сечению образца, в которых определяли содержание железа).

Полученные результаты подтверждают, что индикаторный металл сразу после расплавления довольно равномерно распределяется по всему объему сварочной ванны. Железо обнаружено даже в хвостовой части сварочной ванны, где его содержание приблизительно в два раза меньше, чем в областях, расположенных ближе к электроду. Следует учитывать, что такое распределение железа было получено через 1–2 с после его расплавления. Следовательно, интенсивность перемешивания металла в сварочной ванне при СПВЭ очень велика. Естественно предположить, что металл на поверхности сварочной ванны в результате перемешивания постоянно обновляется, доставляя на границу раздела фаз новые порции металла с растворенными в нем примесями. Последние постоянно испаряются с зеркала ванны, температура которого достигает температуры кипения титана, и вместе с парами титана при-

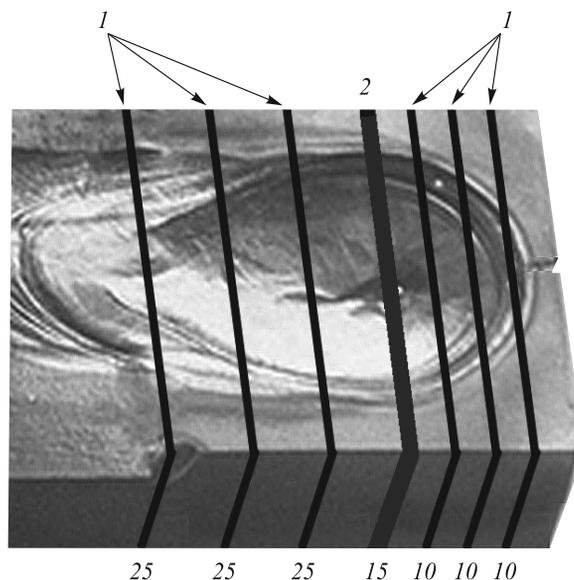


Рис.3. Схема проведения эксперимента (сварной шов и места вырезки темплетей):
1 – темплеты; 2 – пластина армо-железа
(цифры указывают расстояние, мм)

меси уносятся из зоны сварки. Таким образом, может быть реализован процесс очистки жидкометаллической ванны при условии обеспечения качественной защиты инертным газом. Этому способствует также длительное время существования самой сварочной ванны. Так, в приведенном выше эксперименте максимальное время, при котором металл, расположенный в подповерхностном слое по оси сварного шва, находился в расплавленном состоянии, составило не менее 110 с.

Выводы. Сварка погруженным вольфрамовым электродом титановых сплавов при повышенных сварочных токах сопровождается интенсивным перемешиванием металла в сварочной ванне, приводящим к реализации процесса саморафинирования металла сварного шва. При сварке погруженным вольфрамовым электродом образцов, выполненных кислородно-керосиновой резкой, по необработанным кромкам возможно получение качественных сварных соединений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Муравьев В.И., Шапиро И.С., Долотов Б.И. // Сварочное производство. 1988. № 3. С. 2–4.
2. Демянцевич В.П., Матюхин В.И. // Автоматическая сварка. 1972. № 11. С. 5–8.
3. Долотов Б.И., Дашковский А.А., Муравьев В.И. и др. // Авиационная промышленность. 1992. № 8. С. 46, 47.
4. Долотов Б.И., Муравьев В.И., Иванов Б.Л., Марьин Б.Н. // Сварочное производство. 1997. № 7. С. 25–27.
5. Демянцевич В.П., Матюхин В.И. // Автоматическая сварка. 1972. № 11. С. 5–8.
6. Демянцевич В.П., Матюхин В.И. // Сварочное производство. 1972. № 10. С. 1–3.