

Бахматов П. В.

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТЫКУЕМЫХ КРОМОК НА МЕХАНИЗМ ПОРООБРАЗОВАНИЯ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВА ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Бахматов П. В.

P. V. Bakhmatov

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТЫКУЕМЫХ КРОМОК НА МЕХАНИЗМ ПОРООБРАЗОВАНИЯ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВА ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

THE IMPACT OF THE NATURE OF SURFACE BUILDING OF DOCKED EDGES ON THE MECHANISM OF PORE FORMATION OF THE EDGES AN ON THE PROPERTIES OF THE WELD METAL IN FUSION WELDING OF TITANIUM ALLOYS



Бахматов Павел Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология сварочного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: bp_1@mail.ru.

Mr. Pavel V. Bakhmatov – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Welding Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: bp_1@mail.ru

Аннотация. Наиболее вероятный дефект сварных соединений титановых сплавов – поры. Установлено, что на порообразование оказывает существенное влияние природа формирования структуры поверхностного слоя соединяемых кромок. Глубина разрыхленного поверхностного слоя влияет на интенсивность и экстенсивность адсорбционной способности загрязнений и соответственно на термически активируемый процесс твердофазного взаимодействия перед фронтом расплавленной ванны и уровень дефектности (пористости) в сварном шве. Следовательно, параметр шероховатости (Ra, Rz), используемый в производстве, не в полной мере характеризует качество сформированной поверхности раздела. Изменения дефектности поверхностного слоя заготовок от вида технологических операций раскроя и обработки и соответственно уровня дефектности (пористости) позволяют выбрать приемлемый метод для раскроя и обработки заготовок под сварку.

Summary. The most probable defect in welded joints of titanium alloys are pores in them. It is established that the nature of the formation of surface structure of connected edges has a significant impact on pore formation. The depth of a loosened surface layer affects the intensity and extent of adsorption capacity of contamination, and consequently on the process of thermally activated solid-phase interaction at the edge of the molten bath, and on the level of defects (porosity) in the weld. Consequently, the roughness parameter (Ra, Rz) used in production, does not fully characterize the quality of the formed interface. Changes in the surface layer's defect level in blanks depending on the type of cutting and machining and thus on the level of defects (porosity) allow us to select an acceptable method for cutting and machining of blanks to be welded.

Ключевые слова: сварка плавлением, шероховатость, порообразование, титановые сплавы, механические свойства, газосодержание, дефектный слой, разделительные операции.

Key words: Fusion welding, surface roughness, pore formation, titanium alloys, mechanical properties, gas content, defective layer, separation operations.

УДК 621.791.947.2

В многочисленных публикациях отечественных и зарубежных авторов приведен анализ отдельных технологических операций, влияющих на процессы порообразования. В настоящей работе делается попытка систематизации технологических операций по степени влияния их на механизм порообразования, формирования макро- и микроструктуры и свойства металла шва при сварке плавлением титановых сплавов.

Методика проведения исследований

Исследования проводились на заготовках из среднепрочного титанового сплава ВТ20. Заготовки раскраивались различными методами. Автоматическую аргодуговую сварку листовых заготовок размерами 600×100×2 мм выполняли автоматом АДСВ-6 с применением стенда УСПО-2,6. Для защиты использовали аргон высшей очистки. Электронно-лучевую сварку (ЭЛС) и сварку погруженным вольфрамовым электродом (СПВЭ) проводили на образцах имитаторах размером 200×300 мм различной толщины на установках соответственно КЛ-138 и ГСПД-1М. Исследование качества поверхности образцов, изменение макро- и микроструктуры, химического состава и механических свойств проводили по методике, приведенной в работе [2]. После сварки заготовки подвергали рентгеноскопии на аппарате РАП-150/300. Размеры пор оценивались с точностью до 0,05 мм.

Результаты исследований и их обсуждение

Как видно из данных статистического анализа дефектов сварных титановых конструкций (см. рис. 1), выявленных при рентгеноскопии 57242 мест сварных соединений, выполненных ААрдЭС (толщины 0,5...6,0 мм), 3880 мест сварных соединений – СПВЭ (толщины 24...64 мм), 2188 мест сварных соединений ЭЛС (толщины 18...64 мм), основным дефектом в металле шва являются поры, за исключением СПВЭ, где основным дефектом являются вольфрамовые включения.

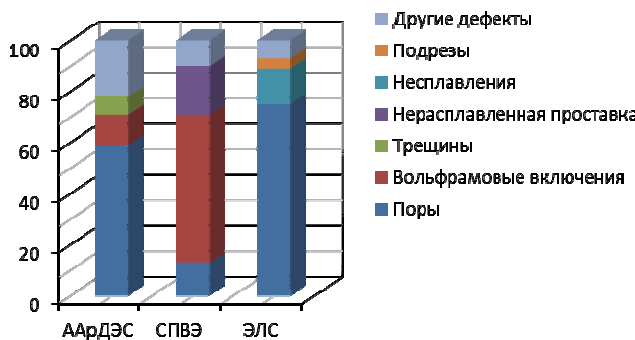


Рис. 1. Гистограмма количественного распределения основных внутренних дефектов в % от общего числа дефектов. Общий процент брака для каждого вида сварки составлял не более 1 % от общего количества проверенных мест

Существует множество версий о вероятном источнике пор и механизме их образования [1], но наиболее достоверной гипотезой, теоретически и практически неоднократно подтверждаемой, является теория В.В. Редчица и Г.Д. Никифорова.

Известно [1, 2], что по природе формирования кромок раздела виды раскроя можно подразделить на формирование рельефа кромки: I – разрушением, II – травлением; III – плавлением.

Сравнительные исследования химического состава и газонасыщения поверхности и сердцевины заготовки показали, что все виды раскроя приводят к изменению химического состава и газонасыщения поверхности по сравнению с основным металлом. Минимальные изменения наблюдаются при ГЛР заготовок в среде азота и аргона (допустимые требованиям ТУ).

Формирование поверхностного слоя образцов определяется операциями технологического цикла их изготовления. При этом формируется определенный, свойственный каждому методу обработки, макро-, микро-, субмикрорельеф обработанной поверхности, характеризующийся стандартными параметрами поверхности. Основными являются высотные характеристики и среди них наиболее предпочтителен параметр Ra, т.к. для его определения используется большое число точек реального профиля. Кроме того, параметр шероховатости (Ra, Rz) не в полной мере характеризует качество сформированной поверхности раздела, необходимо учитывать глубину разрыхленного слоя с образованием в нем макро-, микро- и субмикротрещин и глубину растравливания, особенно по границам зерен. Помимо адсорбционного процесса веществ, во множестве капиллярных углублений и полостей шероховатой поверхности может протекать процесс капиллярной конденсации влаги. Вероятность капиллярной

Бахматов П. В.

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТЫКУЕМЫХ КРОМОК НА МЕХАНИЗМ ПОРООБРАЗОВАНИЯ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВА ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

конденсации влаги увеличивается с уменьшением температуры конденсации, и она особенно велика при переносе охлажденных деталей в теплую среду.

Дефектность поверхностного слоя образцов оказывает существенное влияние на конденсацию влаги, определяемую анализом содержания водорода в поверхностном слое в сравнении с содержанием водорода в металле. Максимальное содержание водорода, более 0,05 % в поверхностном слое, причем независимо от дефектности после внесения холодных образцов в тепло.

Выдержка образцов в атмосферных условиях приводит к испарению конденсированной влаги с поверхности, причем, чем дефектнее поверхность образца, тем медленнее испарение конденсированной влаги с поверхности, тем большее содержание водорода в поверхностном слое.

Обезвоживание поверхности образцов спиртом позволяет полностью удалить поверхностно конденсированную влагу только для бездефектных образцов, у которых содержание водорода с поверхности при этом становится одинаково с содержанием водорода в металле. Разница в содержании водорода с поверхности и в сердцевине увеличивается с увеличением дефектности поверхностного слоя.

Учитывая факт [3], что удаление капиллярно-конденсированной влаги с дефектной поверхности представляет определенные сложности, с достаточной степенью точности можно утверждать, что разница в значениях содержания водорода в основном металле и в поверхностном слое объясняется наличием капиллярно-конденсированной влаги в дефектном слое, причем, чем дефектнее слой выше, тем больше в нем содержание водорода.

Максимальной активационной способностью к капиллярной конденсированной влаги обладает поверхность образцов, образованная разрушением – рубкой на гильотинных ножницах; травлением – электроэрозионной обработкой; плавлением – газопламенной резкой.

Процесс твердофазного взаимодействия соединяемых кромок перед фронтом расплавленной ванны представляет сложный многоступенчатый характер. Высокосконцентрированный источник электродугового разряда или электронного луча в доли секунды приводит к разогреву кромок до температуры, намного превышающей плавление металла. При этом происходит мгновенное тепловое расширение газов и металла, вызывающее поперечные сжимающие напряжения, превышающие предел текучести металла, перед фронтом расплавленной ванны.

Анализ сварочных деформаций по расчетной модели температурных полей при сварке тонких пластин встык из стали марки Ст3 позволяет выявить направление действия внутренних напряжений и оценить изменение геометрии деталей [4].

Расчетные данные остаточных деформаций удовлетворительно согласуются с данными экспериментальных исследований.

Как видно из данных рис. 2, в процессе сварки и особенно в процессе охлаждения наблюдается интенсивный процесс перемещения фиксированных точек, свидетельствующих о возникновении и распространении деформации пластин. Верхняя кривая отражает характер деформирования пластины от действия сжимающих напряжений в момент окончания сварки. При охлаждении наблюдается деформация пластины в результате перехода сжимающих напряжений в растягивающие. Максимальные значения пластических деформаций наблюдаются в центре пластины.

Происходит термически активируемый процесс микропластической деформации металла, интенсифицирующий образование физического контакта и выброс из зоны взаимодействия расширяющихся газов и в том числе поверхностно конденсированной влаги (зона автономной очистки), т.е. наблюдается процесс самоочищения стыкуемых поверхностей (см. рис. 3).

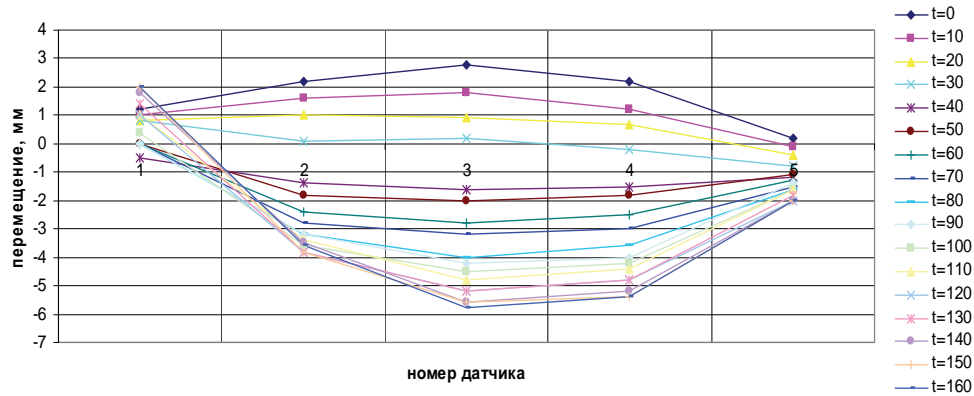


Рис. 2. Диаграмма кинетики деформаций при стыковой сварке

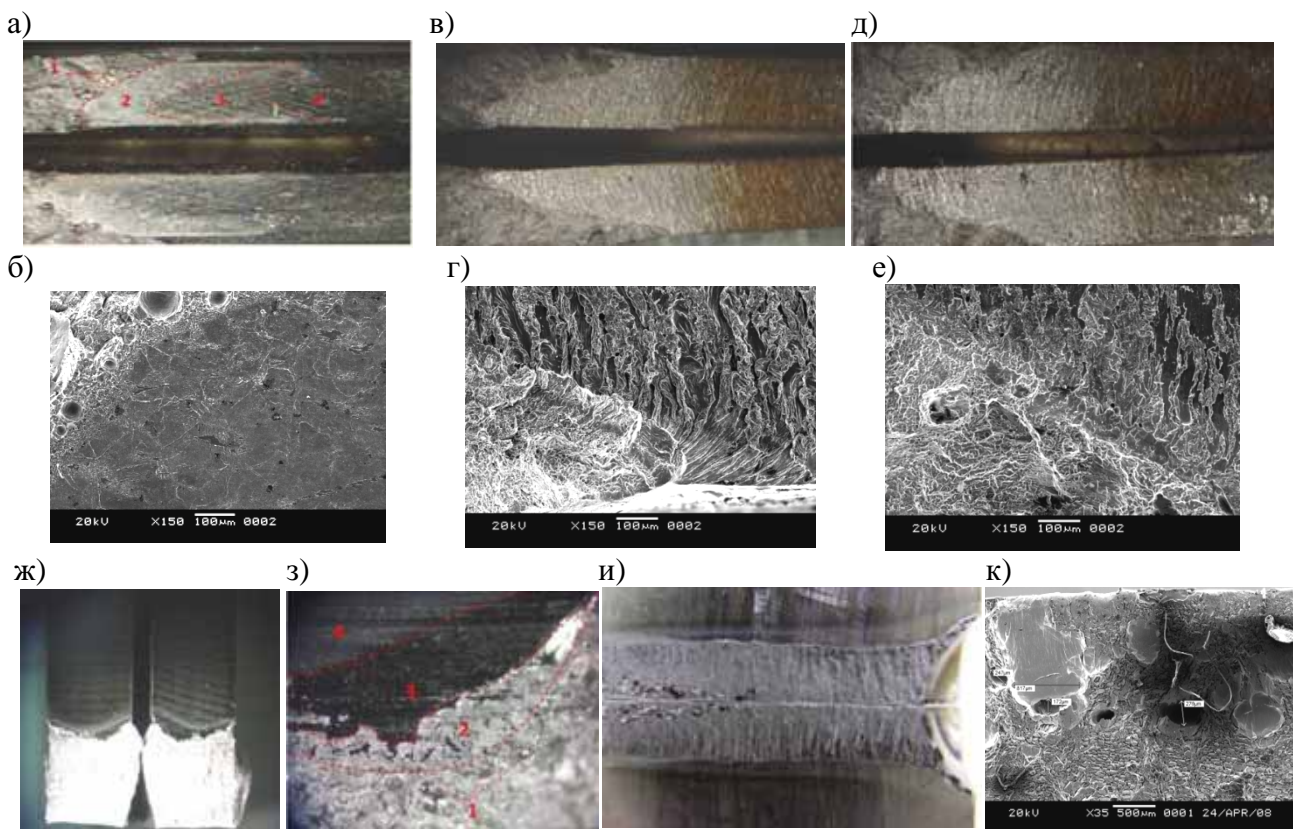


Рис. 3. Фрактограммы поверхности вскрытого излома перед фронтом расплавленной ванны сварных образцов из сплава ВТ20 после раскроя, обработки и сварки: фрезерование, обезвоживание спиртом, ААрДЭС – (а, б); ГЛР в азоте, ААрДЭС – (в, г); ГЛР в азоте + резка на гильотинных ножницах, ААрДЭС – (д, е); фрезерование, обезвоживание спиртом, ЭЛС – образцы толщиной 8 мм – (ж, з), образцы толщиной 30 мм – (и, к)

В зоне, приближающейся к расплавленной ванне, происходит активация контактных поверхностей, образование активных центров: происходит валентное межатомное взаимодействие, при котором между атомами соединяемых поверхностей образуются химические связи, т.е. наблюдается процесс схватывания. В дальнейшем наступает объемное взаимодействие, т.е. развитие взаимодействия происходит как в плоскости контакта (образование прочных химических связей), так и в объеме зоны контакта. Несомненно, рельеф поверхности, особенно высота выступов, будут влиять на формирование твердофазного соединения, т.е. на наличие возможного числа активных центров или их площади, и, в конечном счете, на формирование замкнутых полостей, заполненных капиллярно-конденсированной влагой.

Бахматов П. В.

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТЫКУЕМЫХ КРОМОК НА МЕХАНИЗМ ПОРООБРАЗОВАНИЯ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВА ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Замкнутые полости попадают в расплавленный металл, где происходит мгновенное испарение влаги и расширение газов, что вызывает формирование газовых пузырьков и, в конечном итоге, пор (см. рис. 3 а, з, (1)), удаление [4] которых зависит от их количества, размеров, времени всплытия и удаления из расплава, т.е. времени существования расплавленной ванны или пузырьковой дегазации ванны.

Перед фронтом расплавленной ванны (см. рис. 3) образуется не только зона диффузионной сварки (см. рис. 3 а, з, (2)), но и зона контактирования (см. рис. 3 а, з, (3)) (зона автономной очистки), ограниченная верхней и нижней кромками соединяемых деталей, имеющей выход в направлении сварки к обработанной поверхности (см. рис. 3 а, з, (4)), по которому происходит устранение продуктов диссоциации оксидно-нитридных пленок и загрязнений, за счет избыточного давления расширяющихся при нагреве продуктов, испарения поверхностно-конденсированной влаги. Удаление капиллярно-конденсированных загрязнений в этой зоне не происходит.

Технологические операции, образующие поверхность кромки разрушением в широком диапазоне, изменяют уровень дефектности: максимального количества пор раскрой на гильотинных ножницах – 14-25 %, минимальный уровень обкатка роликами – 0,01-0 %. Фрезерование на порядок уменьшает пористость в сварном шве заготовок, на два порядка пластическое деформирование фрезерованной поверхности обкаткой.

Технологические операции, образующие поверхность кромок травлением, характеризуются высоким уровнем дефектности, особенно электроэрозионное разделение (10-16 %).

Технологические операции, образующие поверхность кромок плавлением, несмотря на то, что параметры шероховатости Ra, Rz поверхности имеют высокие значения, приводят практически к нулевому значению уровня дефектности (см. рис. 4).

Высокая твердость и жаропрочность регулярно чередующихся кромок каналов заготовки после ГЛР по сравнению с ответной заготовкой, раскроенной на ножницах гильотинного типа, способствует их повторению на поверхности второй заготовки под действием сжимающих напряжений перед фронтом расплавленной ванны, что обеспечивает отсутствие порообразования.

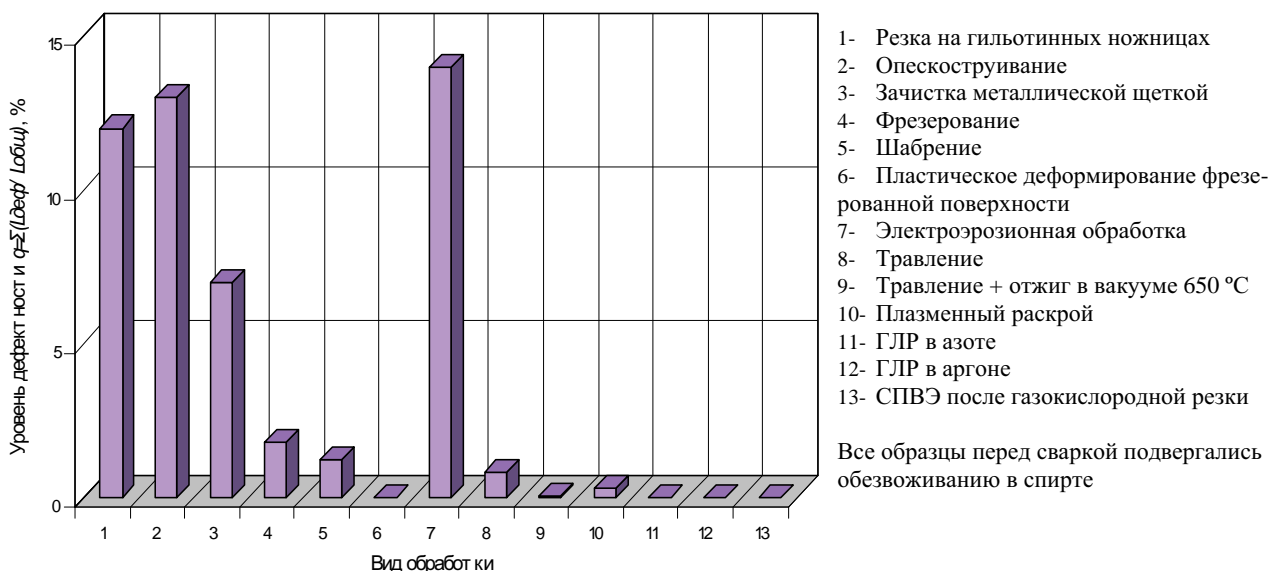


Рис. 4. Влияние операций раскроя заготовок и вида обработки после раскроя на распределение уровня дефектности

Наличие на поверхности присадочной проволоки дефектного слоя в виде макро-, микро- и субмикротрещин и задиров (надрывов), независимо от тщательности подготовки поверхности стыкуемых заготовок под сварку, в любом случае приведет к образованию пор.

Наибольшее газонасыщение наблюдается в сварном шве заготовок с грубой микрогеометрией и наибольшей деградацией поверхностного слоя.

В зоне сплавления сварного шва наблюдается наибольшее количество газовых примесей (O_2, H_2, N_2), наименьшее – в центре металла шва, что отвечает условиям порообразования, их содержание находится в допустимых пределах для данного сплава. Характер распределения примесей водорода для ЭЛС в металле шва ниже содержания водорода в основном металле, как в случае ААрДЭС.

Существенное влияние на порообразование оказывает процесс пузырьковой дегазации ванны. Существует некоторое пороговое значение толщины свариваемых заготовок, при котором происходит резкое снижение количества пор, что связано с временем существования расплавленной ванны, соизмеримым с временем пузырьковой дегазации. Однако чем дольше существует сварочная ванна, тем интенсивнее растет размер зерна металла шва, что приводит к снижению механических свойств.

Интенсификация процесса перемешивания расплавленного металла в сварочной ванне при сварке погруженным вольфрамовым электродом с тороидальной заточкой [5] позволяет получать беспористые швы на титановых заготовках, раскромоченных различными методами и даже газокислородной резкой.

Исследованиями механических свойств, химического состава и газонасыщения металла шва установлено, что химический состав, механические свойства для всех видов раскромки соответствуют требованиям нормативной документации, предъявляемым к деталям ответственного назначения.

Результаты исследований удовлетворительно согласуются с данными, полученными другими исследователями, и объясняются высокоэффективным саморафинированием металла шва в процессе сварки [6]. Таким образом, установлена принципиальная возможность получения качественного металла шва в соединении при СПВЭ по необработанным кромкам, подготовленным различными методами резки, особенно, после плазменной и гидроабразивной, а газокислородная резка может быть использована для СПВЭ деталей оснастки.

Выводы:

1. Все виды раскромки заготовок приводят не только к изменению химического состава и газонасыщению поверхности раздела, а и к формированию определенного, свойственного каждому методу обработки макро-, микро-, субмикрорельефу обработанной поверхности, характеризуемой стандартным параметром шероховатости, который не в полной мере пригоден для оценки качества сформированной поверхности раздела, поскольку не учитывает глубину разрыхленного слоя с образованием в нем макро-, микро-, субмикротрещин и глубину растравления по границам зерен.

2. Сформированная поверхность макро-, микрорельефа и глубина подповерхностного микро-, субмикрорельефа слоя при изготовлении заготовок по разному влияют на адсорбционную способность загрязнений. Спектральный анализ содержания водорода в поверхностном слое позволяет с высокой степенью точности оценить, как поверхностную конденсацию, так и капиллярно-конденсированную влагу, при этом обнаруживается, что тем дефектнее поверхность заготовки, тем большее количество конденсированной влаги, тем большее содержание водорода. Обезвоживание поверхности заготовок спиртом позволяет удалять только поверхностно-конденсированную влагу, что особенно заметно для бездефектной поверхности заготовок. Максимальной активационной способностью к капиллярной конденсации влаги обладает поверхность заготовок образованная разрушением – рубкой на гильотинных ножницах; травлением – электроэрозионной обработкой; плавлением – газопламенной резкой.

3. Процесс твердофазного взаимодействия соединяемых кромок перед фронтом расплавленной ванны, термически активируемый концентрированными источниками энергии (ААрДЭС, СПВЭ, ЭЛС), идет в несколько стадий:

Бахматов П. В.

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТЫКУЕМЫХ КРОМОК НА МЕХАНИЗМ ПОРООБРАЗОВАНИЯ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВА ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

- мгновенный разогрев приводит к тепловому расширению газов и металла, вызывающий поперечные сжимающие напряжения, превышающие предел текучести металла и выброс из зоны взаимодействия расширяющих газов;

- термически активируемый процесс микропластической деформации и автономная очистка металла интенсифицируют образование физического контакта, наблюдается процесс схватывания;

- развитие твердофазного взаимодействия происходит как в плоскости контакта, так и в объеме зоны контакта, что приводит к формированию замкнутых полостей, заполненных капиллярно-конденсированной влагой, которые переходят в расплав и образуют поры.

4. Природа формирования структуры поверхностного слоя соединяемых кромок оказывает влияние на глубину разрыхленного поверхностного слоя, на интенсивность и экстенсивность адсорбционной способности загрязнений, и соответственно на термически активируемый процесс твердофазного взаимодействия перед фронтом расплавленной ванны и уровень дефектности (пористости) в сварном шве, который составляет от 0 до 25 % для поверхности, образованной разрушением (все виды механической обработки, максимальные значения для резки на гильотинных ножницах и минимальные пластическим деформированием фрезерованной поверхности) и поверхности, образованной травлением (максимальные значения для электроэрозионной обработки); нулевой уровень дефектности для поверхности образованной плавлением (исключение газопламенный раскрой).

5. Интенсификация процесса перемешивания расплавленного металла в сварочной ванне при СПВЭ с тороидальной формой позволяет получить беспористые швы со свойствами, идентичными свойствам основного металла на заготовках из титановых сплавов, раскрытых различными методами и даже газокислородной резкой.

6. Изменения дефектности поверхностного слоя заготовок от вида технологических операций раскроя и обработки и соответственно уровня дефектности (пористости) позволяют выбирать приемлемый метод для раскроя и обработки заготовок под сварку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пористость при сварке цветных металлов / В. В. Редчиц, В. А. Фролов, В. А. Казаков, В. И. Лукин. – М.: Издательский центр «Технология машиностроения», 2002. – 448 с.
2. Муравьев, В. И. Проблемы порообразования в сварных швах титановых сплавов / В. И. Муравьев // МиТОМ. – 2005. – № 7. – С. 30-37.
3. Матвеевко, Д. В. Исследование зависимости уровня дефектности шва и свойств сварных титановых конструкций от вида раскроя заготовок под сварку / Д. В. Матвеевко, В. И. Муравьев // Сварка и Диагностика. – 2011. – №1. – С. 26-30.
4. Муравьев, В. И. Расчет остаточных деформация по тепловым полям при сварке тонких пластин встык / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, А. А. Дебеляк // Сварочное производство. – 2012. – № 2. – С. 21-25.
5. Процессы упорядочения структурной неоднородности конструкционных материалов при изготовлении изделий / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, Б. И. Долотов, Р. А. Физулаков, А. В. Фролов // Ученые записки КнАГТУ. – 2011. – № I-1(5). – С. 43-54.
6. Долотов, Б. И. Поведение вольфрамовых электродов при сварке на форсированных режимах / Б. И. Долотов, П. В. Бахматов, А. А. Дебеляк // Прикладные задачи механики деформируемого твердого тела и прогрессивные технологии в машиностроении: сб. ст. – Вып. 3. – Ч. 2. – Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ ДВО РАН, 2009. – С. 102-106.