

Стробыкин Н. А., Бахматов П. В.
N. A. Stroykin, P. V. Bakhmatov

УСЛОВИЯ СОЗДАНИЯ БЕЗДЕФЕКТНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТОНКОСТЕННЫХ ТИТАНОВЫХ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

CONDITIONS FOR CREATION OF DEFECT-FREE WELDED JOINTS OF THIN-WALLED TITANIUM AIRCRAFT STRUCTURES

Стробыкин Никита Алексеевич – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Nikita A. Stroykin – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Бахматов Павел Вячеславович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технологии сварочного и металлургического производства им. В. И. Муравьева» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

Pavel V. Bakhmatov – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department «Technologies of Welding and Metallurgical Production named after V. I. Muravyev», Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

Аннотация. В работе представлены основные проблемы решения вопроса порообразования в сварных соединениях тонкостенных титановых панелей, образуемых GTAW. Показаны способы решения проблемы порообразования, требующие концептуального пересмотра нормативно-технологической документации, регламентирующей разработку технологических процессов, в частности по вопросам операций подготовки кромок под сварку. Например, газолазерный раскрой в среде азота или аргона как операция непосредственной подготовки кромок исключает вероятность появления пористости в сварных швах. Такой эффект позволяет управлять режимами термического цикла сварки для решения следующей проблемы – коробления сварных конструкций, а следовательно, достижения их размерной точности. Установка УСП-5000, имеющаяся на вооружении авиационного завода, является роботизированным сварочным комплексом и при предложенной доработке способна осуществлять сварку в импульсном режиме как по энергетическим параметрам, так и по траектории движения горелки и сварочной проволоки, что позволит оптимизировать управление энергетическими параметрами сварки в любой точке формируемого шва.

Summary. The paper presents the main problems of solving the issue of pore formation in welded joints of thin-walled titanium panels formed by GTAW. The ways of solving the problem of pore formation that require a conceptual revision of the regulatory and technological documentation regulating the development of technological processes, in particular on the issues of edge preparation operations for welding, are shown. For example, gas-laser cutting in a nitrogen or argon medium, as an operation of direct edge preparation, eliminates the likelihood of porosity in welds. This effect allows controlling modes of the thermal welding cycle to solve the following problem – warping of welded structures, and consequently, to achieve their dimensional accuracy. The USP-5000 installation, which is in service with the aviation plant, is a robotic welding complex and, when modified, is capable of welding in pulse mode, both in terms of energy parameters and along the trajectory of the burner and welding wire, which will optimize the control of the energy parameters of welding at any point of the seam being formed.

Ключевые слова: титановые сплавы, сварные соединения, пористость, размерная точность, коробление, роботизированная установка, импульсный режим.

Key words: titanium alloys, welded joints, porosity, dimensional accuracy, warping, robotic installation, pulse mode.

Научно-исследовательские работы выполнены за счёт средств ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (НИР № ВН001/2023 «Разработка алгоритма и исследование процесса программируемого управления формированием сварочного/наплавочного валика (в том числе и в применении аддитивных технологий) на установке автоматической сварки в защитных газах»).

Введение. Титановые сплавы благодаря своим основным свойствам (высокая удельная прочность, коррозионная стойкость, удовлетворительная свариваемость, жаропрочность и др.) нашли применение во всех областях народного хозяйства: медицине, пищевой и лёгкой промышленности, авиационной и ракетной технике и т. д. [1–5]. Титановые сплавы позволяют использовать технологию сварки плавлением тонколистовых заготовок со сложной пространственной формой для хвостовой части фюзеляжа (боковых панелей, балок крепления, окантовок, лючков и др.), несущей части топливного бака (панель центроплана), воздухозаборника (защитное устройство) и др. [6–7].

В практике серийного производства титановых панелей каждый сварной шов подвергается исправлению дефектов в виде пор, что подтверждает несовершенство подхода к решению вопроса порообразования и нормативной документации. С проблемой механизма порообразования в неразъёмных соединениях из титановых сплавов, выполненных сваркой плавлением, сталкиваются авторы многих исследований [8–12]. Выделим гипотезу Г. Д. Никифорова, В. В. Редчица, В. А. Фролова [13–15], согласно которой в расплаве химически активных тугоплавких металлов гидрогрупп титана и ванадия отсутствуют газовые флуктуации критического размера, что снижает вероятность возникновения пузырьков, выделяющихся из раствора водорода в объёме ванны, т. е. необходимы готовые зародыши газовой фазы. Такими зародышами являются заваренные дефекты торцов кромок перед сварочной ванной, попадающие в расплавленную ванну и формирующие поры в металле шва. При этом исследования влияния качества поверхности стыкуемых кромок заготовок из титановых сплавов при различных видах их обработки для образования неразъёмных соединений ограничивались традиционными методами измерения шероховатости без оценки изменения приповерхностного слоя, образования в нём микродефектов. Известные в настоящее время методы снижения пористости [16–18] не гарантируют исключения пор, а методы увеличения времени существования расплавленной ванны при полном исключении пористости не гарантируют требуемых механических свойств и, кроме того, не позволяют управлять режимами термического цикла сварки (ТЦС), обеспечивающими требуемые условия фазовых превращений, позволяющими улучшить структуру и свойства титановых панелей [19–20], что обуславливает коробление деталей после сварки, образование холодных трещин. Коробление тонкостенных конструкций после сварки не позволяет достичь их размерной точности, требует дополнительных операций по исправлению геометрии деталей (термофиксация, отжиг в вакууме).

В этих условиях повышение эффективности сварки тонкостенных титановых конструкций путём исключения пористости в металле шва с обеспечением размерной точности и равнопрочности конструкции является актуальной научной и важнейшей задачей в авиастроении.

Методология экспериментального исследования. GTAW сварка стыковых и тавровых соединений титановых тонкостенных ребристых панелей из сплава BT20 проводилась на стапеле УСПО-2.6, снабжённом автоматом АДСВ-6 со сварочной головкой АСГВ-4 с применением сварочной проволоки BT1-00св диаметром 1,6 мм. В качестве источника тока использовался выпрямитель ВСВУ-400.

Рентгенографический контроль полученных неразъёмных соединений проводился рентгеновским аппаратом РАП 150/300 по ГОСТ ISO 17636-1-2017.

Количество капиллярно-конденсированной влаги на торцевой поверхности свариваемых кромок определялось по содержанию водорода спектральным анализом на спектрографе ИСП-51 низковольтным импульсным разрядом с последующей регистрацией интенсивности спектральной линии водорода фотоэлектрическим способом, а градуировочный график строился методом «трёх эталонов» по ОСТ 1 90034-81. В отличие от стандартной методики определения содержания водорода на торцевых поверхностях соединяемых кромок после различных операций раскрытия, подготовки кромок под сварку образцы не подвергались дополнительной зачистке исследуемой поверхности.

Шероховатость поверхности определялась профилометром TR-200. При проведении микроструктурного анализа применялись оптический микроскоп Nikon MA200 и растровый электронный микроскоп Hitachi SEM S-3400N. Химический анализ титановых сплавов проводился на оптико-эмиссионном спектроанализаторе Q4 TASMAN 170 Bruker, анализ газов (кислорода, азота) – с помощью анализатора ONH 2000 ELTRA по стандартным методикам.

Испытания сварных образцов на статическое растяжение выполняли на универсальной машине INSTRON 3382 на образцах типа XIII по ГОСТ 6996-66. Для испытаний на ударный изгиб применялся маятниковый копер JB-W300 и образцы типа VIII и X.

Исследования влияния технологических факторов формирования поверхности раздела образцов из сплава BT20 на усталостную прочность проводили на установке, разработанной в Комсомольском-на-Амуре государственном университете. Основным критерием усталостных свойств образцов является полное разрушение образца. В ходе эксперимента было подсчитано количество циклов N до полного разрушения. Образцы для испытаний представляют собой пластины толщиной 2 мм и длиной рабочей части 70 мм. В наиболее широкой части ширина образцов равна 8 мм.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение. Несоввершенство подхода к проблеме порообразования в сварных соединениях титановых конструкций отражается в отраслевой нормативной документации (ПИ 1.4.1898-2003), не исключающей образование дефектов. Согласно нормативной технологической документации, существует 4 причины порообразования:

1. загрязнение поверхности свариваемых кромок и присадочной проволоки (но основной металл и проволока перед сваркой обезжириваются и обезвоживаются спиртом);
2. чистота обработки свариваемых кромок ниже требуемой (но параметр шероховатости нормируется и контролируется);
3. содержание водорода в основном и присадочном материале превышает норму (но эта проблема уже давно решена на металлургическом производстве полуфабрикатов);
4. неправильный режим или несоблюдение техники сварки.

Поэтому решение проблемы порообразования требует новой концепции и доработки нормативной документации.

Статистический анализ механических свойств сварных титановых тонкостенных конструкций, выявленных в производственных условиях КнААЗ, показал, что прочность соединений снижена и составляет 8...12 % от прочности основного металла. Анализ выявляемых дефектов при рентгенографии было подвергнуто $n = 589$ сварных швов, из которых дефектных $n_d = 137$, что составляет 23,3 % от общего количества дефектов (см. рис. 1). Из внутренних дефектов наибольшее количество составляют цепочки пор – 59 (43 % от общего количества дефектов); одиночная пора – 15 (11 % от общего количества дефектов); скопление пор – 16 (12 % от общего количества дефектов); трещины – 19 (14 % от общего количества дефектов); галтель (дефект, характерный только для тавровых соединений стингера) – 28 (20 % от общего количества дефектов) (см. рис. 2). Диаметр одиночных пор 0,1...2,0 мм. Трещины, как правило, располагаются в концах сварных швов. Если в конструкции одно место дефектное, то необходима доработка детали. Нередко дефектные места подвергаются неоднократному исправлению.

Как показывает анализ существующих технологических процессов, порообразование в неразъемных соединениях связано с неэффективностью оценки качества поверхности кромок заготовок и присадочной проволоки по стандартным параметрам шероховатости (R_a , R_z), которые не в полной мере характеризуют качество сформированной поверхности раздела, т. к. не учитывают глубину разрыхленного слоя с образованием в нём макро-, микро- и субмикротрещин и глубину растравливания, особенно по границам зёрен [21; 22].

Важнейшую роль зарождения пузырьков при порообразовании в процессе сварки играет влага, находящаяся в объёме дефектов торцевой поверхности, а её количество возможно определить по содержанию водорода спектральным анализом [23], который может стать основой метода контроля качества подготовки поверхности под сварку и даст возможность определить вид адсорбированной влаги (поверхностно- или капиллярно-конденсированная влага (ККВ)) [24]. Оцени-

вать порообразование в металле шва титановых сплавов предлагается параметром «насыщенность поверхности стыкуемых кромок и присадочной проволоки капиллярно-конденсированной влагой» по условной величине N отношения содержания водорода в поверхностном слое после обезжиривания и обезвоживания $H_{2\text{пов}}$ к содержанию водорода в основном металле, соответствующему требованиям стандарта на данный вид полуфабриката: $H_{2\text{м}}/N = H_{2\text{пов}}/H_{2\text{м}}$, а уровень дефектности – по формуле $q_{\text{деф}} = (L_{\text{деф}}/L_{\text{общ}}) \times 100\%$, где $L_{\text{деф}}$ – сумма диаметров пор на длине металла шва 100 мм; $L_{\text{общ}}$ – длина металла шва 100 мм.

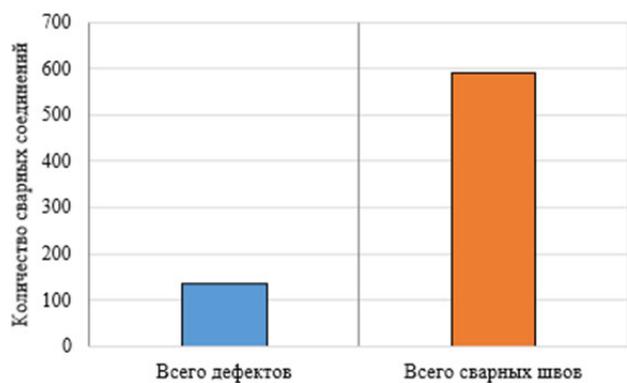


Рис. 1. Соотношение дефектных мест от общего количества сварных соединений

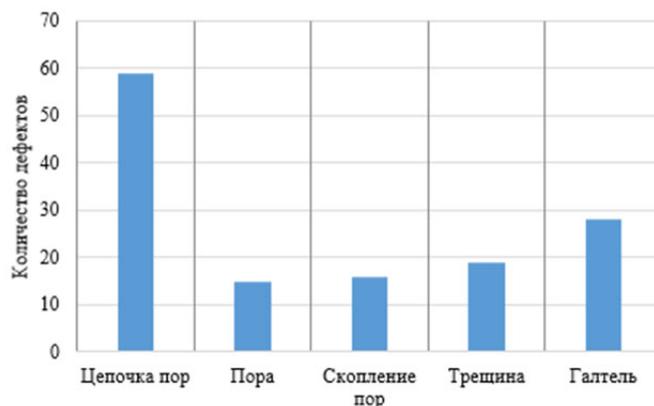


Рис. 2. Количество дефектов в сварных соединениях

Существующие виды разделительных операций (более 40) авторами распределены по механизму образования поверхности на три вида: разрушение (все виды механической обработки); травление (избирательное, диффузионное растравливание); плавление.

Разрушение сопровождается нарушением целостности волокон металла, разрыхлением поверхностного слоя, созданием хаотичной, неоднородной микрогеометрии без изменения химического состава и газонасыщения. Максимум глубины дефектного слоя обнаруживается при раскрое на гильотинных ножницах, минимум – при пластической деформации. Максимальный уровень дефектности металла шва (см. рис. 3) вызывают процессы опескоструивания, резки на гильотинных ножницах и зачистки металлической щёткой. Порообразование в металле шва после подготовки поверхности заготовок полированием или пластическим деформированием отсутствует.

Травление. Избирательность процессов травления и испарения является особенностью формирования рельефа поверхности заготовок химической, электрохимической, электроэрозионной обработкой (см. рис. 3). Химический состав (см. табл. 1 и рис. 3) поверхности образцов после травления мало изменяется, но при этом наблюдается максимальное газонасыщение (H_2), шероховатость в пределах $Ra = 0,1 \dots 0,2$ мкм для проволоки, глубина рисок $h = 0,07$ мм. Параметр шероховатости при максимальной производительности ЭЭР: $Ra \approx 2,5$ мкм (в воде), $Ra \approx 1,25$ мкм (в масле); минимальная величина дефектного слоя: $3 \dots 10$ мкм (в воде), $1 \dots 2$ мкм (в масле). При этом наблюдается максимум насыщенности поверхности ККВ (см. табл. 1).

Плавление. Формирование поверхности свариваемых кромок газокислородной резкой вызывает максимальную глубину изменённого поверхностного слоя ($3 \dots 5$ мм, особенно на выходе факела) не только по шероховатости, но и по химическому составу и структуре. Минимальные изменения наблюдаются при газолазерном раскрое (ГЛР) заготовок в среде азота и аргона (допустимые требованиями технических условий) и гидроабразивной резке (не допустимые требованиям технических условий по содержанию кислорода и азота в поверхностном слое). Минимум уровня дефектности наблюдается в металле шва после гидроабразивной резки (см. рис. 3). Повышенный уровень дефектности у сварных соединений после плазменной резки заготовок – из-за насыщенности поверхности ККВ.

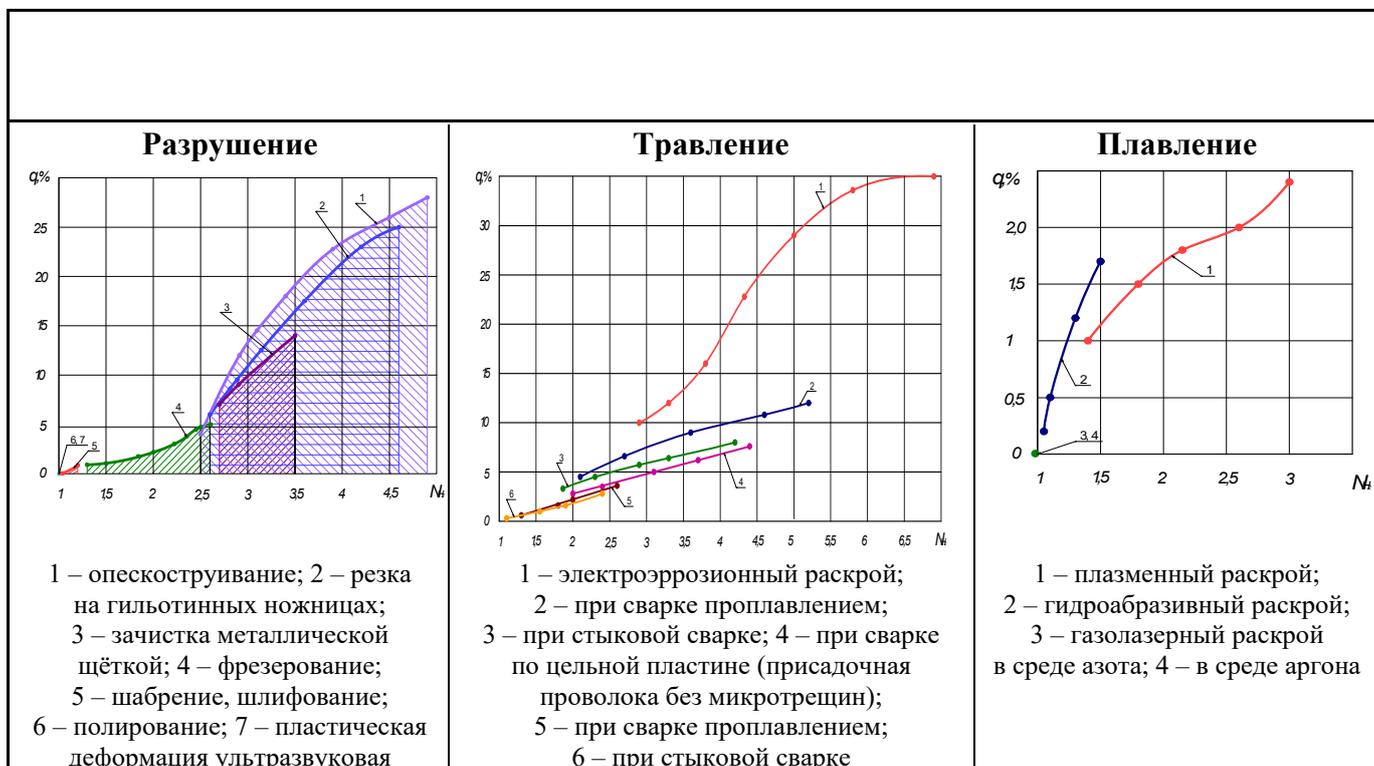


Рис. 3. Изменение уровня дефектности металла шва сплава VT20 в зависимости от величины насыщенности капиллярно-конденсированными загрязнениями поверхности свариваемых заготовок и присадочной проволоки

Таблица 1
Насыщенность поверхности загрязнениями, шероховатость и глубина разрыхлённого слоя поверхности образцов после различных видов обработки ($H_{2\text{пов}}/H_{2\text{м}} = N$)

Группы видов обработки	Вид обработки	Глубина разрыхлённого слоя H_M , мкм	Шероховатость R_a , мкм	Глубина дефектного слоя h , мм	$H_{2\text{пов}}/H_{2\text{м}}$	
					*	**
Разрушение	1. Полирование	0,15	0,1	0,01	2,2	1,0
	2. Чистовое шлифование	1,0	0,8	0,03	2,3	1,03
	3. Шабрение	3,0	1,25	0,3	3,0	1,2
	4. Чистовое фрезерование	6,0	3,2	0,5	4,6	1,8
	5. Грубое фрезерование	8,0	6,3	0,8	5,7	2,6
	6. Рубка на ножницах гильотинного типа	15	320 (Rz)	1...3	7,1	3,2
	7. Ультразвуковая пластическая деформация	0	<0,05	0	1,9	1,0
Травление	8. Травление	0,03	0,4	0	6,1	1,5
	9. Электроэрозионная обработка	0,025	0,1	0,01...0,06	8,0	5,4
Плавление	10. Электронно-лучевое оплавление	0	1,25	0	1,7	1,0
	11. Газолазерная резка в азоте	0	3,2	0,5	1,5	1,0
	12. Газолазерная резка в аргоне	0	2,5	0,3	1,9	1,0
	13. Гидроабразивная резка	0	3,8	0,1	3,3	1,7
	14. Плазменная резка в азоте	0	6,3	0,5	6,5	3,0
	15. Газопламенная резка	0	>320 (Rz)	3-5	11,8	5,1

Максимальной активационной способностью к ККВ обладает поверхность образцов, образованная разрушением – рубкой на гильотинных ножницах (см. табл. 1, п. 6); травлением – электроэрозионной обработкой (см. табл. 1, п. 9); плавлением – газопламенной резкой (см. табл. 1, п. 15).

Исследованиями установлено, что уровень дефектности металла шва определяется не величиной шероховатости, а насыщенностью поверхности свариваемых заготовок ККВ. Из данных табл. 1 и рис. 3 следует, что параметр шероховатости не может характеризовать уровень дефектности металла шва при сварке титановых сплавов. Например, при равной шероховатости получаемой поверхности $Ra = 0,1$ мкм после полирования и электроэрозионной обработки заготовок насыщенность загрязненными составляет соответственно $N = 1$ и $N = 2,8 \dots 6,9$, а уровень дефектности и $q_n = 0$ и $q_n = 10 \dots 40$ %. Фрезерование и ГЛР в азоте заготовок обеспечивают $Ra = 3,2$ мкм при этом $N = 1,2 \dots 2,6$ и $N = 1$, а уровень дефектности в первом случае составляет $q_f = 0,9 \dots 5$ %, во втором случае – $q_{г\text{лр}} = 0$ %.

Достижение нулевого уровня дефектности по порообразованию делает возможным обеспечение идентичности механических свойств сварных соединений титановых конструкций основному металлу управлением ТЦС.

Снижение прочности пропорционально увеличению суммарной площади пор. Малоцикловая усталость сварных образцов в значительной степени зависит не только от величины суммарной площади пор в металле шва, но и от их расположения (см. табл. 2). Самыми опасными оказались поры, располагающиеся близко к поверхности. Усталостная прочность таких образцов уменьшилась на 44 % по сравнению с бездефектными образцами. Среднее значение прочности сварных соединений хоть и допустимо для сварных конструкций, но более чем на 18 % ниже прочности основного металла. Основной причиной такого снижения являются условия проведения термического цикла сварки, а именно недостаточная скорость охлаждения в интервале температур фазового превращения.

Таблица 2

Изменение механических свойств сварных образцов из имитатора ребристой панели в зависимости от наличия пор в металле шва

Состояние материала	Номер образца	Наличие пор в сечении образца			Механические свойства			
		Количество, шт.	Суммарная площадь, мм ²	Место расположения	σ_b , МПа	δ , %	Угол загиба, град.	Число циклов до разрушения $N_{ц}$ при $\sigma_{\alpha}^{cp} = \frac{600-200}{2}$, МПа
Основной металл	1	-	-	-	1140	10	37	115 000
	2	-	-	-	1140	10	40	121 000
	3	-	-	-	1150	10	35	148 000
	4	-	-	-	1150	11	35	136 000
	Среднее арифметическое				1145	10,3	36	130 000
Сварные образцы	1	-	-	Без дефектов	975	-	45	118 000
	2	-	-		945	-	45	144 300
	3	-	-		950	-	32	119 000
	4	8	1,63	Ближе к поверхности	925	-	30	65 700
	5	9	1,43		910	-	37	48 100
	6	10	1,24		935	-	33	52 400
	7	7	1,16	Ближе к центру	928	-	31	70 000
	8	9	0,70		950	-	40	94 000
	9	6	0,85		940	-	33	81 000
	10	5	0,37		945	-	35	94 000
	Общее среднее арифметическое				940	-	36	88 620
	Среднеарифметическое для дефектных образцов				933		34	72 172

ГЛР в азоте с раскроем на гильотинных ножницах полностью исключает образование пор в сварном шве титановых сплавов, при этом свойства сварного соединения идентичны свойствам основного металла.

Величина погонной энергии, вводимой в сварочную ванну электрической дугой, и время существования сварочной ванны (скорость сварки) во многом определяют скорость охлаждения расплавленного металла, его структуру и свойства. Чем больше значение погонной энергии и меньше – времени импульса, тем выше скорость охлаждения в интервале фазовых превращений, а соответственно, выше значение временного сопротивления разрыву и угла загиба, меньше величина изменения содержания легирующих элементов. Такой термический цикл характерен для импульсной сварки или сварки пульсирующей дугой.

Мягкий режим термического цикла сварки приводит к формированию микроструктуры металла более грубой игольчатой структуры α -фазы и наиболее широких образований α' -пластин внутри зерна по сравнению с формированием микроструктуры по жёсткому режиму термического цикла сварки (см. рис. 4).

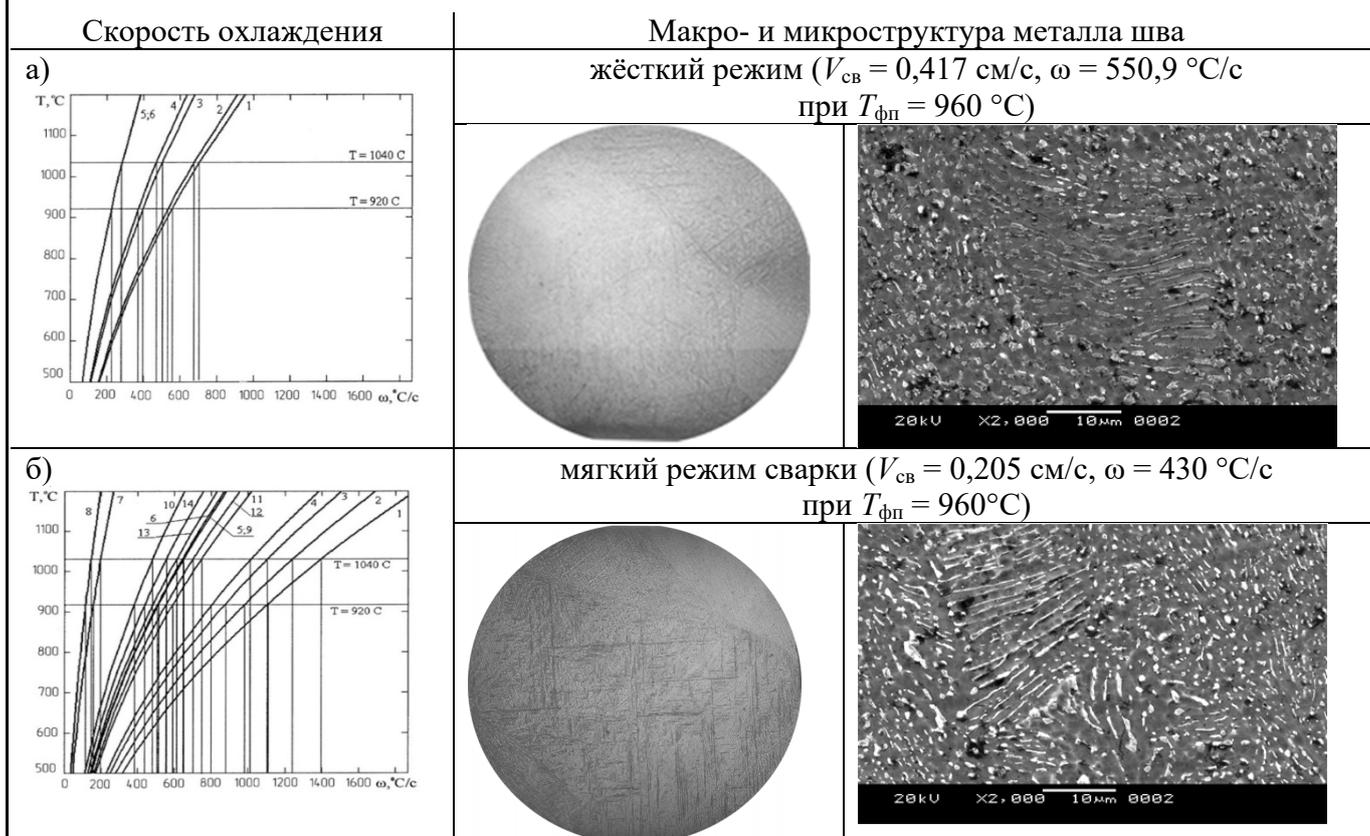


Рис. 4. Изменение скорости охлаждения в зависимости от режимов сварки при температуре полиморфного превращения ($\alpha \rightarrow \beta$) в околошовной зоне сплава ВТ20 (расчётные данные): а – сварка пульсирующей дугой; б – сварка непрерывной дугой; 1, 2, 11, 12 – 1,2 мм; 3, 4, 13, 14 – 1,5 мм; 5, 6 – 2,0 мм; 7, 8 – 2,5 мм; 9, 10 – 3,0 мм; 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 – сварка на жёстких режимах; 2; 4; 6; 8; 10; 12; 14 – сварка на мягких режимах

Аналитической оценкой свойств неразъёмных соединений (НС), полученных сваркой по традиционным режимам по сравнению с основным металлом, установлено, что различие в свойствах существенно связано с режимами сварки и практически не зависит от химического состава исходного металла. Для сварных соединений из листов толщиной 1,2 и 2,0 мм наблюдается сходимость свойств с основным металлом, а для образцов из листов толщиной 2,5 мм предел прочности снижается по сравнению с основным металлом, причём со значениями, близкими к нижней границе допуска (см. рис. 5).

Исходя из условия, что при сварке плавлением псевдо- α -титановых сплавов с увеличением скорости охлаждения в интервале фазового $\beta \rightarrow \alpha$ превращения происходит непрерывное увеличе-

ние прочности, построены зависимости изменения угла загиба и временного сопротивления разрыву от мгновенной скорости охлаждения, позволяющие оценить закономерности между скоростью охлаждения и механическими свойствами традиционных режимов термического цикла сварки и оптимизировать режимы ТЦС, получать сварные конструкции из титановых сплавов с механическими свойствами, не отличающимися от свойств основного металла (см. рис. 5).

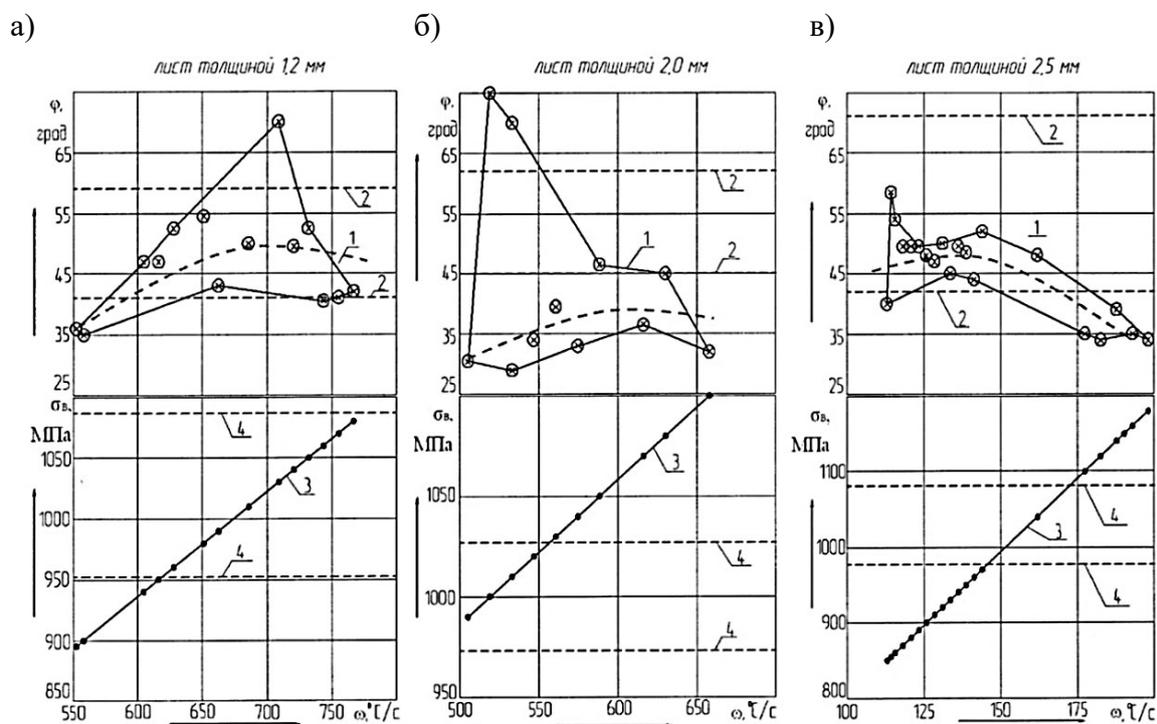


Рис. 5. Изменение угла загиба и предела прочности сварного шва (данные технологического контроля за трёхлетний период) сплава ВТ20 в зависимости от скорости охлаждения: 1 и 3 – для металла шва; 2 и 4 – для основного металла; а – для листов толщиной 1,2 мм; б – для листов толщиной 2,0 мм; в – для листов толщиной 2,5 мм

Определены конкретные условия термического цикла сварки для получения удовлетворительных свойств сварных соединений из сплава ВТ20, идентичных свойствам основного металла. Для заготовок толщиной 1,2, 2,0, 2,5 мм скорости охлаждения в области превращения соответственно должны лежать в пределах 650...750, 550...600, 150...175 °C/c.

На КнААЗ для выполнения GTAW сварки имеется установка УСП-5000. Программное обеспечение установки приближено к стапелю УСП-2.6, который требует в процессе сварки участия сварщика для постоянного визуального контроля за размерами сварочной ванны и ручной корректировки как параметров режима сварки, так и положения горелки относительно вертикальной оси шва, что делает термический цикл сварки нестабильным.

В свою очередь управление установкой УСП-5000 выполняется по программируемой траектории относительно координат X, Y, Z с погрешностью $\pm 0,005$ мм. Для регулировки постоянного расстояния между электродом и свариваемыми деталями предусмотрен автоматический регулятор напряжения дуги (АРНД). Диапазон скорости сварки варьируется от 10 до 60 м/ч с точностью обработки ± 5 %. Скорость подачи присадочной проволоки от 5 до 30 мм/с. Пределы регулировки силы сварочного тока от 20 до 800 А. Все параметры вносятся в систему оператором исключительно перед сваркой. Установка оснащена двумя источниками питания TETRIX 400 Synergic, способными выполнять TIG сварку на переменном и постоянном токе, а также режимом импульсной сварки.

Управление установкой осуществляется при помощи пульта управления, оснащённого бортовым компьютером, функциональными клавишами, тумблерами, кнопкой аварийного выключения, переключателями и светодиодными индикаторами.

Для того чтобы установка соответствовала роботизированному комплексу с обеспечением импульсного режима сварки, она должна быть перенастроена и доработана:

- системой задания режимов импульсного перемещения сварочной горелки, импульсной подачи присадочной проволоки, параметров пульсирующей дуги с взаимной синхронизацией осцилляций;

- системой разбивки траектории перемещения горелки на участки с заданием разных параметров сварки для каждого участка.

Выводы:

1. Решение проблемы порообразования в сварных соединениях титановых тонкостенных конструкций требует концептуального пересмотра нормативно-технологической документации, регламентирующей разработку технологических процессов, в частности по вопросам операций подготовки кромок под сварку.

2. Анализом насыщенности поверхности кромок, подготовленных под сварку, капиллярно-конденсированными загрязнениями и уровня дефектности металла шва определены разделительно-подготовительные технологические операции: пластическая деформация обкаткой фрезерованной поверхности, газолазерный раскрой в среде азота и аргона, комбинации газолазерного раскроя с любым видом раскроя, обеспечивающие $q_{\text{деф}} = 0$ при $N \approx 1$.

3. Показано, что при сварке плавлением псевдо- α -титановых сплавов с увеличением скорости охлаждения в интервале фазового $\beta \rightarrow \alpha$ превращения, характерного для импульсного режима сварки, происходит увеличение прочности сварных соединений.

4. Исключение порообразования в металле шва в процессе сварки плавлением титановых конструкций открывает возможность программируемого управления параметрами термического цикла сварки для обеспечения размерной точности и прогнозирования свойств сварных конструкций и реализуется на УСП-5000 путём модернизации установки для работы в импульсном режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Froes F. H. Titanium: Physical Metallurgy, Processing, and Applications. – ASM International, 2015. – 416 p.
2. Welding and Joining of Aerospace Materials Edited by M. C. Chaturvedi Woodhead Publishing, 80 High Street, Sawston, Cambridge, CB22 3HJ, UK. 2012. 430 p.
3. Leyens C., Peters M. (Eds.) Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications // Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2003. – 513 p.
4. C. Leyens and M. Peters, Eds.: Titanium and Titanium Alloys-Fundamentals and Application, Wiley-VCH GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2003.
5. Vagi J. J., Monroe R. E., Evans R. M., Martin D. C. Welding Procedures for Titanium and Titanium Alloys // Huntsville: George C. Marshall Space Flight Center, 1965. – 217 p.
6. Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолётов / А. И. Пекарш, Ю. М. Тарасов, Б. Н. Марьин и др. – М.: Аграф-пресс, 2006. – 304 с.
7. Сварка в самолётостроении / под ред. Б. Е. Патона. – М.: Машиностроение, 2008. – 581 с.
8. Silvinskii, V. A., et al., «Role of hydrides in pore formation in welding titanium». Paton Welding Journal, Vol. 6 (1994), p. 265-269.
9. Okamoto, H., «H-Ti (Hydrogen-Titanium)». Journal of Phase Equilibria, Vol. 13 (1992), p. 443.
10. Wang, W. E., «Thermodynamic evaluation of the titanium-hydrogen system». Journal of Alloy and Compounds, vol. 238, (1996), p. 6-12.
11. Huang, J., et al., «Hydrogen Transport and Rationalisation of Porosity Formation during Welding of Titanium Alloys». Metallurgical and Materials Transaction A, Vol. 42, No. 2, (2012) p. 582-591.
12. Huang, J., et al., «On The Mechanism of Porosity Formation During Welding of Titanium Alloys». Acta Materialia, Vol. 60, (2012), p. 3215-3225.
13. 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.
14. Nikiforov, G. D. and Redchits V. V., «The Mechanism of Pore Formation When Thick Titanium Alloys are Fusion Welded». Avt. Svarka, Vol. 10 (1984). P. 42-45.
15. Redchits, V. V., «Scientific fundamentals and measures used to prevent the formation of pores in fusion welded titanium and its alloys». Welding International, Vol. 11, No. 9 (1997), p. 722-728.

16. Бездеформационная сварка стрингерных панелей из титанового сплава BT20 / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, В. В. Кныш и др. // Автоматическая сварка. – 2014. – № 9. – С. 7-18.
17. Братухин, А. Г. Технология производства титановых самолётных конструкций / А. Г. Братухин, Б. А. Колачев, В. В. Садков. – М.: Машиностроение, 1995. – 443 с.
18. Lukoyanov, A. V. (2014) Formation of pores in the weld metal in automatic argon shielded arc welding of titanium alloys, *Welding international*, 28(4), p. 301-303.
19. Banerjee S., Mukhopadhyay P. Phase transformations: examples from titanium and zirconium alloys / S. Banerjee a. P. Mukhopadhyay. – Oxford; Amsterdam: Elsevier, 2007. – XXII, 813 p.
20. Joshi V. A. Titanium Alloys: An Atlas of Structures and Fracture Features // CRC Press, 2006. – 248 p.
21. Муравьев, В. И. Влияние режимов механической обработки стыкуемых кромок на качество неразъёмных соединений, выполненных сваркой плавлением, при сборке титановых конструкций летательных аппаратов / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, В. В. Григорьев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2021. – № 6. – С. 67-79.
22. Муравьев, В. И. Обеспечение качества неразъёмных соединений титановых конструкций летательных аппаратов, выполненных сваркой плавлением: моногр. / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, В. В. Григорьев. – М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 296 с.
23. О возможности уменьшения глубины поверхностного слоя исследуемого материала при определении водорода в титановых сплавах эмиссионным спектральным методом / Т. В. Барашева, Д. М. Давыдов, А. Ф. Летов, И. Г. Тишин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – Т. 80. – № 2. – С. 18-21.
24. Патент № 2491159 С2 Российская Федерация, МПК В23К 31/12, В23К 103/14. Способ оценки перед сваркой качества сварочной проволоки и заготовок сварной конструкции из титановых сплавов: № 2011149420/02: заявлено 05.12.2011; опубликовано 27.08.2013 / Муравьев В. И., Бахматов П. В., Лончаков С. З. [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «КНАГТУ»). – Бюл. 24.