

УДК 621.791.02

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИМИТИРУЮЩИХ НАДЕЖНОСТЬ (УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ) РЕБРИСТЫХ ТИТАНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ

*Бахматов П.В., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Машиностроение
и металлургия» (mim@knastu.ru)*

Муравьев В.И., д.т.н., профессор кафедры «Машиностроение и металлургия» (mim@knastu.ru)

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет
(681013, Россия, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27)

Аннотация. Как известно, титановые сплавы по ряду особенностей (высокая удельная прочность, сопротивление усталости, вязкость разрушения и коррозионная стойкость) нашли широкое применение в авиакосмической технике, в том числе и в ребристых панелях. К изделиям такого рода предъявляют повышенные требования качества сварных соединений и размерной точности всей конструкции. Сварка плавлением титановых сплавов приводит к образованию неоднородностей зоны соединения и к снижению технологических и эксплуатационных характеристик изделия, геометрические размеры конструкции искажаются по причине возникновения сварочных напряжений, появляются поры и микротрещины в металле шва, снижаются механические характеристики и другие показатели. Все вышесказанное требует комплексного анализа технологического процесса изготовления титановых ребристых панелей: от изготовления полуфабрикатов до окончательной операции термической обработки готового изделия с позиции выявления наиболее весомых в отношении дефектности операций. Операции изготовления заготовок, в том числе подготовка их под сварку, режимы сварки и последующей термической обработки влияют на статическую и цикловую прочность сварных ребристых титановых панелей в зависимости от количества и суммарной площади дефектов сварного шва. В работе приведены исследования, результаты которых позволяют прогнозировать свойства и надежность сварных конструкций и добиваться идентичности свойств основного металла и металла шва с гарантией отсутствия как внутренних, так и наружных дефектов в зависимости от выбора комплекса технологических мероприятий. Показано, что сварка с определенной скоростью охлаждения в интервале температур фазового превращения, чистовое фрезерование, обкатка и очистка (обезжиривание и обезвоживание) поверхности стыкуемых кромок, низкий отжиг после сварки в воздушной атмосфере и последующее опескоструивание, газолазерный раскрой (ГЛР) в среде вспомогательного газа азота или аргона или комбинированных заготовок ГЛР и раскрой фрезерованием являются определяющими соответствием свойств и надежности сварных соединений основному металлу ребристых панелей из сплава ВТ20.

Ключевые слова: титановые сплавы, подготовка под сварку, сварка плавлением, качество соединений.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-2-99-108

Титановые сплавы являются перспективными материалами для применения в авиакосмической технике благодаря их высоким удельной прочности, сопротивлению усталости, вязкости разрушения и коррозионной стойкости. Однако титановые сплавы менее технологичны по сравнению со сталями и алюминиевыми сплавами из-за целого ряда специфических технологических свойств (рис. 1). Наиболее важными из них являются: низкая теплопроводность, высокая химическая активность, ограниченная возможность холодной деформации, низкая обрабатываемость резанием, порообразование при сварке.

Сварка плавлением титана и титановых сплавов сопровождается образованием химической и физической неоднородностей зоны соединения, что, как правило, ведет к снижению технологических и эксплуатационных характеристик. При этом искажаются геометрические размеры конструкции из-за возникновения сварочных напряжений, появляются поры и микротрещины в металле шва, снижаются механические характеристики и другие показатели.

Именно поэтому актуально исследование влияния всего технологического цикла (используемый материал – раскрой – заготовка – термическая обработка (ТО) – сварка и т.д.) на изменение содержания легирующих элементов и примесей и их влияния на механические свойства и надежность титановых конструкций.

Анализ [1] результатов испытаний сварных соединений ребристых панелей показал, что их механические свойства укладываются в допустимые пределы значений для основного металла, но при этом прочность сварного соединения на 8 – 12 % меньше прочности основного металла. В работах [1 – 5] показано, что причиной ухудшения механических свойств сварных соединений являются как режимы термического цикла сварки (ТЦС), так и образование пористости в металле сварного шва.

По данным работы [5] предел выносливости соединений псевдо- α -титановых сплавов при оптимальной технологии сварки достигает 80 % предела выносливости основного металла. Дефекты швов (непровары, подрезы, поры), а также нарушения газовой защиты

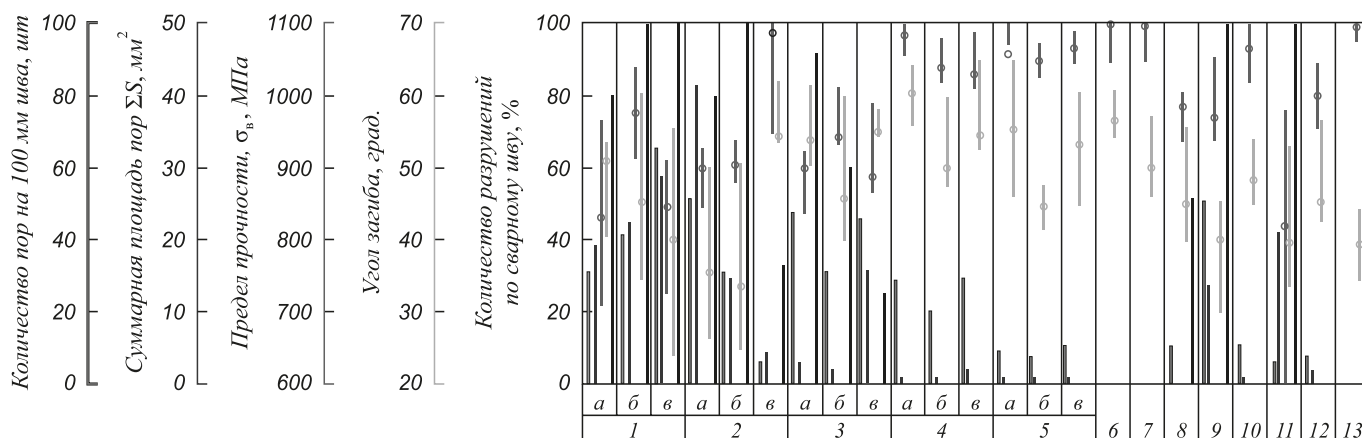


Рис. 1. Влияние технологических операций раскроя и последующей обработки перед сваркой на свойства сварных соединений титановых сплавов:

a – сварка непосредственно после раскроя; *б* – сварка после обезжиривания и обезвоживания; *в* – сварка после прогрева до 200 °С в течение 2 ч; 1 – сварка после резки на гильотинных ножницах; 2 – сварка после фрезерования и опескоструивания; 3 – сварка после фрезерования и зачистки металлической щеткой; 4 – сварка после фрезерования; 5 – сварка после фрезерования и шабрения; б – сварка после газолазерного раскроя; 7 – сварка комбинации: газолазерный раскрой и резка на гильотинных ножницах; 8 – сварка после фрезерования с последующим вакуумным отжигом при 630 °С в течение 2 ч; 9 – сварка после фрезерования с последующим отжигом при 630 °С в течение 2 ч в атмосфере воздуха; 10 – сварка после фрезерования и шабрения с последующим вакуумным отжигом при 630 °С в течение 2 ч; 11 – сварка после фрезерования с последующим отжигом при 700 °С в атмосфере воздуха в течение 2 ч; 12 – сварка после фрезерования и шабрения с последующим отжигом при 700 °С в атмосфере воздуха в течение 2 ч; 13 – основной металл; точкой обозначено среднее значение параметра; ■ – количество пор на 100 мм шва, шт.; ■ – суммарная площадь пор, мм²; ■ – σ_b , МПа; ■ – угол загиба, градус; ■ – количество разрушений по сварному шву, %

Fig. 1. Effect of technological operations of cutting and further processing before welding on the properties of welded joints of titanium alloys: *a* – welding directly after cutting; *б* – welding after degreasing and dehydration; *в* – welding after heating to 200 °C for 2 hours; 1 – welding after cutting by guillotine shears; 2 – welding after milling and sand cleaning; 3 – welding after cutting and stripping by wire brush; 4 – welding after milling; 5 – welding after milling and scraping; б – welding after gas-laser cutting; 7 – welding combinations: gas-laser cutting and cutting on guillotine shears; 8 – welding after milling followed by vacuum annealing at 630 °C for 2 hours; 9 – welding after milling, followed by annealing at 630 °C for 2 hours in air; 10 – after the welding and milling scraping followed by vacuum annealing at 630 °C for 2 hours; 11 – welding after milling, followed by annealing at 700 °C in air for 2 hours; 12 – welding after milling and scraping, followed by annealing at 700 °C in air for 2 hours; 13 – base metal; dot denotes the average value of the parameter; ■ – the number of pores for 100 mm of a weld, pcs.; ■ – total pore area, mm²; ■ – σ_b , MPa; ■ – bend angle, degree; ■ – the amount of destruction along the weld, %

могут снизить предел выносливости сварного соединения на 40 – 60 % [3]. Для повышения стабильности структуры и свойств сварных соединений, предназначенных для эксплуатации при повышенных температурах, в работах [6, 7] предлагаются специальные режимы ТО. В работах [8, 9] для повышения выносливости при малоцикловых нагрузках сварные соединения из титановых сплавов обеспечивают при симметричном конструктивном усилении не более 20 % толщины металла с плавными радиусами переходов, обработанных с высокой чистотой поверхности.

На циклическую прочность сварных соединений существенное влияние оказывает наличие пор в металле шва. Предел выносливости бездефектного шва составляет 90 % от такого же показателя основного металла, а имеющие мелкие поры – 60 % [10, 11]. Предполагаемые для предотвращения образования пор в сварных швах титановых сплавов методы (увеличение длительности существования сварочной ванны, использование при сварке флюсов, обработка кромок перед сваркой механическим или тепловым способом) [8] не обеспечивают идентичности свойств сварного соединения и основного металла. При вакуумном отжиге (особенно

тонкостенных сварных конструкций) существенное влияние на газонасыщение поверхности оказывает скорость натекания, что приводит к снижению циклической выносливости [11, 12].

На структуру и свойства сварных соединений титановых сплавов влияют процессы термического цикла сварки [13 – 15]. Критерием выбора режима ТЦС является оптимальный интервал скоростей охлаждения, в котором степень понижения уровня пластических свойств и ударной вязкости околошовной зоны и шва в сравнении с основным металлом оказывается наименьшей.

Использование не только термической обработки [16] сварных титановых соединений, а также пластической деформации (прокатки роликом, проковки) металла шва и околошовной зоны [5, 17 – 19] приводит к снижению остаточных растягивающих напряжений и к улучшению свойств сварных соединений в пределах допустимых отклонений свойств от показателей основного металла.

Аналитическая оценка проведенных исследований показывает, что практически отсутствуют комплексные исследования влияния всего цикла процесса сварки титановых сплавов от запуска в производство до сдачи в

эксплуатацию на свойства сварных изделий. Исследования проводили для отдельных операций без учета сопутствующих. Улучшение свойств сварных соединений оценивали в пределах, близких к свойствам основного материала.

Цель настоящего исследования – определение лимитирующих свойства и надежность (усталостную прочность) технологических операций из всего комплекса операций изготовления сварных титановых конструкций.

Исследования проводили на заготовках из среднепрочного титанового сплава ВТ20. Заготовки раскраивали различными методами. Автоматическую аргонодуговую сварку листовых заготовок размерами 600×100×2 мм выполняли на спецстапеле (УСПО-2,6) автоматом АДСВ-6 с применением в качестве защиты аргона высшей очистки.

Качество поверхности образцов исследовали путем замера шероховатости на профилометре. Изменения макро- и микроструктуры изучали на оптическом микроскопе NEOFOT-21 (Германия) и растровом электронном микроскопе «JEOL»JSM-5600 (Япония). Микротвердость определяли на ПМТ-3М. Для изучения химического состава применяли мобильный оптико-эмиссионный анализатор «ARK-met» фирмы «PPM-System» (Финляндия). Содержание примесей газов (кислорода, азота) измеряли на газоанализаторе ONH-200 (фирма ELTRA), водорода – спектральным методом с применением низковольтного и импульсного разряда с использованием трех эталонов на спектрографе ИСП-51 в соответствии с ГОСТ 90034 – 81. Для определения механических свойств использовали универсальную машину ZD 10/10 «FRITZ» в соответствии с ГОСТ 1497 – 84. После сварки заготовки подвергали рентгенографии на аппарате РАП-150/300. Размеры пор оценивали с точностью до 0,05 мм.

Уровень дефектности оценивали по формуле

$$q_{\text{деф}} = \frac{L_{\text{деф}}}{L_{\text{общ}}} 100 \%,$$

где $L_{\text{деф}}$ – сумма диаметров пор на длине металла шва 100 мм; $L_{\text{общ}}$ – длина металла шва (100 мм).

Образцы для исследования малоциклового усталости изготавливали в соответствии с ГОСТ 25502 – 79 тип III. Испытания проводили на универсальной разрывной машине фирмы «LOSENCHAUSEN».

Три группы одинаковых образцов подвергали малоцикловым испытаниям с различными амплитудами напряжений и с одинаковым для всех трех групп средним напряжением цикла:

– минимальная амплитуда:

$$\sigma_{\alpha}^{\text{cp}} = \frac{\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}}}{2} = 48 \text{ МПа}; \quad \sigma_{\text{max}} = 0,64\sigma_{\text{вр}} = 702 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\text{min}} = 0,55\sigma_{\text{вр}} = 606 \text{ МПа}; \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{\text{max}} + \sigma_{\text{min}}}{2} = 654 \text{ МПа};$$

– средняя амплитуда:

$$\sigma_{\alpha}^{\text{cp}} = \frac{\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}}}{2} = 118 \text{ МПа}; \quad \sigma_{\text{max}} = 0,7\sigma_{\text{вр}} = 772 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\text{min}} = 0,49\sigma_{\text{вр}} = 536 \text{ МПа}; \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{\text{max}} + \sigma_{\text{min}}}{2} = 654 \text{ МПа};$$

– максимальная амплитуда:

$$\sigma_{\alpha}^{\text{cp}} = \frac{\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}}}{2} = 218 \text{ МПа}; \quad \sigma_{\text{max}} = 0,8\sigma_{\text{вр}} = 872 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\text{min}} = 0,4\sigma_{\text{вр}} = 436 \text{ МПа}; \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{\text{max}} + \sigma_{\text{min}}}{2} = 654 \text{ МПа},$$

где $\sigma_{\alpha}^{\text{cp}}$ – амплитуда напряжений цикла; σ_{max} и σ_{min} – максимальное и минимальное напряжение цикла; $\sigma_{\text{вр}}$ – предел прочности (временное сопротивление) при статическом нагружении; σ_m – среднее напряжение цикла.

Исследования влияния технологических факторов формирования поверхности раздела спецобразцов из сплава ВТ20 проводили на установке, разработанной на кафедре «Материаловедение и технологии новых материалов» КНАГТУ.

Образцы для испытаний представляют собой пластины толщиной 2 мм и длиной рабочей части 70 мм. В наиболее широкой части ширина образцов составляет 8 мм. Такая форма образцов обусловлена тем, что напряжения по всей поверхности образца одинаковы. Это является необходимым условием для испытания образцов на усталость.

Рабочий режим испытаний: симметричный изгиб с амплитудой 12 мм, частота 24 Гц; максимальное напряжение на поверхности ±600 МПа.

Основной критерий при усталостных испытаниях – число циклов N до полного разрушения образца.

Заданную амплитуду колебаний выбирали исходя из расчетного максимального напряжения в образце. Испытания всех образцов проводили при одних и тех же режимах.

Исследование влияния традиционных режимов сварки ребристых панелей из сплава ВТ20 на порообразование и свойства сварных соединений проводили исходя из условий требований к сварным швам деталей ответственного назначения. Изготавливали образцы из листовых заготовок ВТ20, лист 2,5 мм размером 150×450 мм сваркой встык и в тавр сквозным проплавлением на автоматической установке АДСВ-6 с поддувом аргона при режимах сварки стыковых и тавровых соединений панели имитатора по существующей технологии. Образцы подвергали рентгеновскому контролю и отжигу в вакууме в печи типа УВН-1500 при температуре 650 °С в заневоленном состоянии (под заневоливанием здесь понимается расклинивание детали в термообработочной оснастке для придания после ТО заданной чертежом геометрии).

После отжига изготавливали образцы, подвергали их пескоструйной обработке корундовым песком,

рентгенографическому контролю с целью определения расположения и характера допустимых дефектов, а также проводили статические и повторно-статические испытания. Повторно-статические испытания до разрушения проводили на испытательной машине «LOSENCHAUSEN» (ФРГ) при нагрузках из расчета $\sigma_{\max} = 600$ МПа; $\sigma_{\min} = 200$ МПа; частота нагружений 520 циклов/мин.

Основное влияние на свойства сварных соединений титановых сплавов оказывают технологические операции раскроя и последующей обработки перед сваркой, связанные с образованием пор в металле шва (рис. 1).

Наибольшее количество пор и величина их общей площади на 100 мм сварного шва (независимо от просушки, обезжиривания и обезвоживания) наблюдаются при раскрое на гильотинных ножницах, при фрезеровании с последующим опескоструиванием кварцевым песком либо при зачистке металлическими щетками. Как было ранее установлено в работах [10, 20], причиной образования пор при сварке титановых сплавов является захлопывание заполненных загрязнениями несплошностей [10] (а именно, капиллярно конденсированной влагой [20]) перед фронтом расплавленной ванны и попадание их в расплав с образованием пор. В рассматриваемом случае эта теория подтверждается сложным процессом изменения количества пор и величины их общей площади на 100 мм шва, например, при опескоструивании. Процесс опескоструивания приводит к резкому увеличению количества капиллярно-конденсированной влаги частицами кварцевого песка, оставшимися на поверхности заготовки. Последующие операции обезжиривания и обезвоживания приводят к удалению с поверхности частиц, уменьшают количество капиллярно-конденсированной влаги и вместе с этим почти в три раза уменьшают суммарную площадь пор на 100 мм шва, а сушка при 200 °С в течение 2 ч уменьшает ее почти в шесть раз по сравнению с исходным состоянием. И тем не менее количество пор и величина их общей площади на 100 мм сварного шва остаются высокими и приводят к снижению показателей прочности и угла загиба (γ), расширению диапазона разброса значений (σ_b – от 730 до 1010 МПа, γ – от 23 до 62°; количество разрушений образцов по сварному шву колеблется в пределах от 25 до 100 %).

Более чем на порядок уменьшается дефектность металла шва при раскрое фрезерованием и на два порядка при применении шабрения фрезерованной поверхности кромок под сварку по сравнению с вышеуказанными операциями фрезерования и зачисткой металлическими щетками. Дополнительные операции обезжиривания, обезвоживания и прогрева практически мало влияют.

Операции газолазерного раскроя (ГЛР) в среде азота, а также комбинированные заготовки ГЛР в азоте и раскрой на гильотинных ножницах полностью исключают образование пор в сварном шве титановых сплавов. Если в случае раскроя фрезерованием или шабрением

происходит некоторое незначительное снижение прочностных свойств по сравнению со свойствами основного металла, то при ГЛР свойства сварного соединения идентичны свойствам основного металла.

Термическая обработка фрезерованных заготовок в воздушной среде приводит к существенному увеличению пористости металла шва и вместе с этим к уменьшению прочности (как и в первых трех случаях). Шабрение заготовок после ТО в воздушной атмосфере приводит к удалению с поверхности насыщенной влагой оксидной пленки, резкому уменьшению пористости почти на два порядка и улучшению свойств (как в случае фрезерования и шабрения). Отжиг в вакууме активизирует процессы капиллярной конденсации влаги (особенно по границам зерен) и способствует некоторому увеличению пористости в металле шва и незначительному снижению прочности.

Исследования влияния традиционных режимов сварки ребристых панелей из сплава ВТ20 на порообразование и свойства сварных соединений показали (табл. 1), что исходя из требований к сварным швам деталей ответственного назначения для листового материала толщиной 2,5 мм выявлено, что дефекты (поры) по количеству, размерам и установленные свойства являются допустимыми. Суммарная площадь пор на 100 мм шва не превышает допустимого значения площади 2,5 мм²; предел прочности сварных швов без дефектов отличается от нижнего предела допуска всего на 2,3 %, а дефектных – на 3,2 %; малоцикловая усталость бездефектных сварных образцов отличается от малоцикловой усталости основного металла на 6 %.

Четко проявилась закономерность изменения прочности в зависимости от суммарной площади пор в металле шва, а именно, прочность снижается пропорционально увеличению суммарной площади пор (табл. 1). Малоцикловая усталость сварных образцов в значительной степени зависит не только от величины суммарной площади пор в металле шва, а и от их расположения (табл. 1, рис. 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 допустимое для сварных конструкций, но более чем на 18 % ниже прочности основного металла. Основной причиной такого снижения, как было показано ранее [21], являются условия проведения термического цикла сварки, а именно, недостаточная скорость охлаждения в интервале температур фазового превращения.

Как видно из данных табл. 2 и рис. 3, малоцикловая усталость сварных образцов таврового сечения, как и стыковых соединений, выполненных проплавлением по традиционным режимам для ребристых панелей, существенно зависит от режимов отжига, независимо от формы и методов испытания специальных образцов.

**Механические свойства сварных образцов сплава ВТ20 из имитатора ребристой панели
в зависимости от наличия пор в металле шва**

*Table 1. Changes in the mechanical properties of welded samples of VT20 alloy from the simulator
of ribbed panel depending on the presence of pores in the weld metal*

Материал	Образец	Количество пор, шт	Суммарная площадь пор, мм ²	Место расположения пор	$\sigma_{в}$, МПа	δ , %	γ , градус	$N_{ц}$, шт, при $\sigma_{\alpha}^{сп} = \frac{600-200}{2}$ 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

Исследования изменения малоциклового усталости основного металла в зависимости от вида раскроя и последующей обработки позволили установить следующие закономерности: чистовое фрезерование кромок образцов по сравнению с ГЛР в азоте и в аргоне повышает малоцикловую усталость более чем на 70 и 60 % соответственно из-за высоких остаточных (вызванных газолазерным раскроем) напряжений в образцах. Последующий вакуумный отжиг повышает малоцикловую усталость, особенно у образцов после ГЛР в азоте и в аргоне на 67 и 54 % соответственно. Отжиг в воздушной атмосфере повышает малоцикловую усталость при всех видах раскроя по сравнению с отжигом в вакууме для ГЛР в азоте – на 20 %, ГЛР в аргоне – на 45 %. Опескоструивание поверхности образцов при всех видах раскроя после отжига в воздушной атмосфере позволяет существенно повысить малоцикловую усталость.

Малоцикловая усталость сварных образцов после всех видов раскроя в значительной степени уменьшается по сравнению с образцами основного металла, поскольку к имеющимся остаточным напряжениям, вызванным операциями раскроя, добавляются остаточные сварочные напряжения.

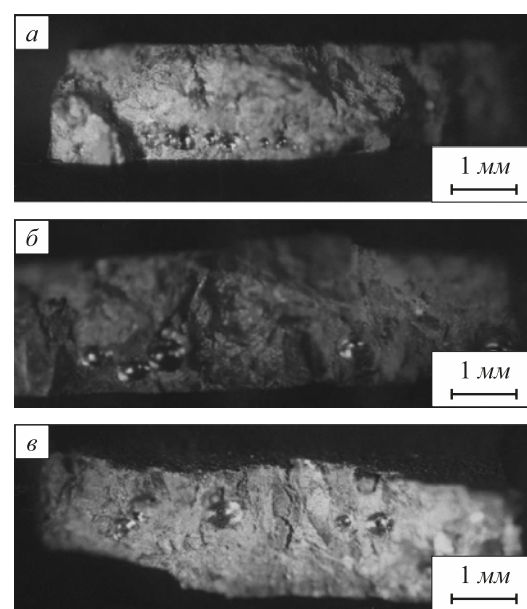
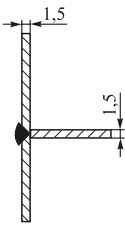
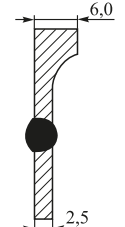
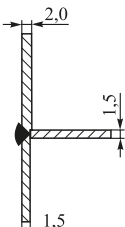


Рис. 2. Вид излома сварных образцов с характерным расположением пор ближе к поверхности (а), смешанные с поверхности и ближе к центру (б) и в центре (в)

Fig. 2. Fracture type of welded specimens with characteristic pore location closer to the surface (a), mixed with the surface and closer to the center (b) and the center (v)

Механические свойства тавровых сварных образцов, выполненных сквозным проплавлением из ребристой панели имитатора из сплава VT20

Table 2. Mechanical properties of welded T-specimens made by keyhole burning from ribbed panel of simulator of VT20 alloy

Вид соединения	Режим термообработки	Статические испытания	Повторно-статические испытания		
		σ_b , МПа	σ_{α}^{cp} , МПа	$N_{ц}$, шт	Примечание
	Без обработки	1033	104,4	21 000	Разрушение в околошовной зоне
	Без обработки	1040	52,1	157 000	То же
	Без обработки	1058	31,3	250 000	Не разрушился
	Полный вакуумный отжиг	1083	104,0	11 000	Разрушение в околошовной зоне
	Полный вакуумный отжиг	1000	61,8	115 000	Разрушение в околошовной зоне
	Полный вакуумный отжиг	1025	31,1	186 000	Разрушение в околошовной зоне
	Отжиг в воздушной печи 650 ± 10 °С	1100	110,0	105 400	Разрушение по радиусу перехода
	Отжиг в воздушной печи 650 ± 10 °С	1090	165,0	23 700	То же
	То же	1130	165,0	131 000	Без разрушения
	То же	1080	220,0	27 800	Разрушение по сварному шву
	То же	1080	220,0	33 000	То же
	То же	1100	220,0	28 000	То же

Малоцикловая усталость образцов, отожженных в вакууме, ниже (более чем на 25 – 48 %) усталости образцов, отожженных в воздушной атмосфере.

Снижение малоцикловой усталости связано с тем [16], что при вакуумном отжиге развивается релаксация полезных сжимающих напряжений, имеющих в исходном полуфабрикате или изделии. Вакуумный отжиг – операция длительная из-за малых скоростей нагрева и охлаждения. Кроме того, по данным работы [24] необходимо учитывать температуру и время выдержки из-за испарения легирующих элементов из поверхностного слоя и вакуумного растравливания поверхности конструкции.

Несмотря на увеличение малоцикловой усталости образцов после неполного отжига в воздушной атмосфере процесс разрушения начинается с плотной оксидной пленки (рис. 4, а, б). На поверхности появляются микротрещины, которые в дальнейшем служат концентраторами напряжений и способствуют дальнейшему разрушению.

Использование процесса удаления поверхностного растравленного слоя после отжига в вакууме, как и удаление оксидной пленки после отжига в воздушной среде, позволяют более чем на порядок увеличить малоцикловую усталость сварных образцов из сплава VT20 (табл. 3).

Прокатка металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ) до толщины основного металла позволяют не только исключить операции механизированной обработки усиления и проплава сварного шва, а и значительно улучшить свойства, сопоставимые со свойствами основного металла (табл. 3). Кроме того, прокатка металла шва и ЗТВ позволяют получать заготовки необходимых размеров (при отсутствии подходящих готовых полуфабрикатов), из которых возможно изготовление сложных деталей пространственной формы горячим деформированием с электроконтактного нагрева, особенно, в температурно-временном интервале фазового превращения [22 – 25].

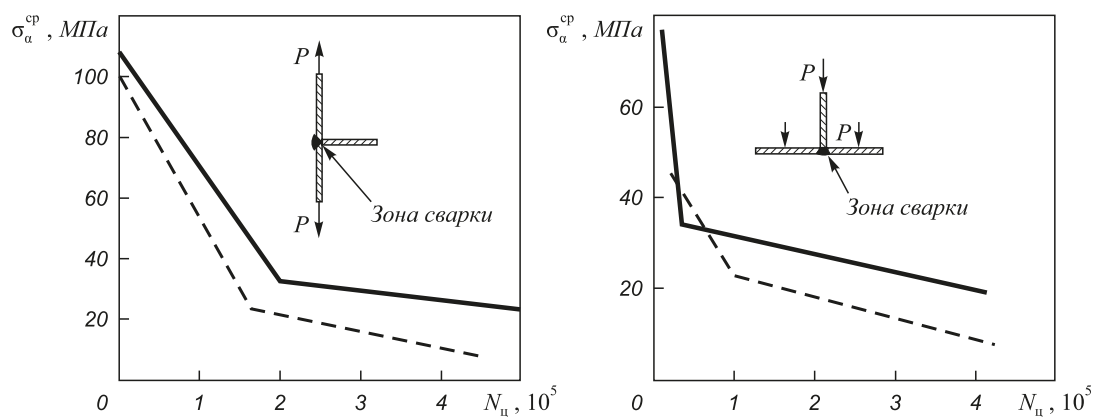


Рис. 3. Распределение механических характеристик сварных соединений из сплава VT20 при циклических испытаниях

Fig. 3. Distribution of mechanical properties of the welded joints from VT20 alloy during the cyclic tests

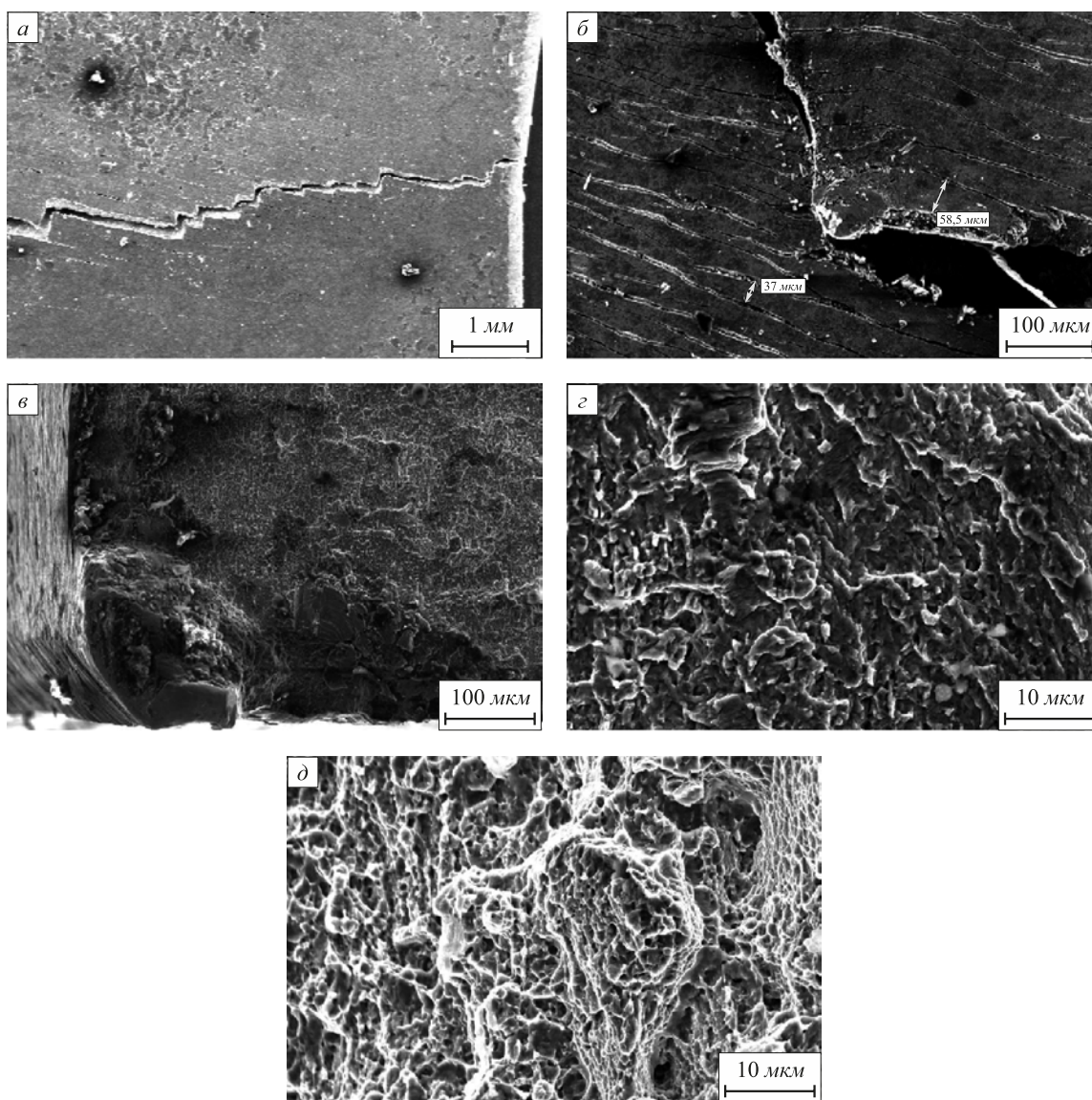


Рис. 4. Электронные фрактограммы изломов образцов сплава VT20 после испытания на циклическую прочность в присутствии оксидной пленки на поверхности:

a – поверхность разрушенной пленки; *б* – вид излома; *в* – общий вид; *г* – вид в зоне усталостных трещин; *д* – вид в конечной зоне разрыва

Fig. 4. Electronic fracture patterns of fracture specimens from VT20 alloy after the endurance test in the presence of the oxide film on the surface:
a – fracture surface of the film; *б* – type of fracture; *в* – general view; *г* – in the zone of fatigue fractures; *д* – in the final break zone

Изменение усталостной прочности (малоциклового усталости) образцов основного металла (ОМ) и сварного шва (СВ)* из сплава ВТ20 в зависимости от вида раскроя, подготовки под сварку и после сварки

Table 3. Change of the fatigue (low cycle fatigue) of the base metal and weld samples from VT20 alloy depending on the type of cutting, welding preparation and after welding*

Вид раскроя и обработки кромок под сварку	N_c , до разрушения**			
	После раскроя	Отжиг в вакууме при 650 °С, 1 ч	Отжиг в воздушной среде при 650 °С, 1ч	Опескоструивание
ОМ-фрезерование	190 000	202 000	243 000	>500 000
СШ-фрезерование + сварка	26 600	187 000	236 000	943 034
СШ-фрезерование + обкатка + сварка	125 000	198 000	234 000	1 021 067
СШ-фрезерование + сварка + прокатка шва + горячая штамповка с ЭЖН	167 000	207 000	252 000	1 105 647
ОМ-ГЛР в азоте	60 073	178	219 000	>500 000
СШ-ГЛР в азоте + сварка	41 000	210 442	372 000	1 136 022
ОМ – ГЛР в аргоне	75 849	164 202	298 550	>500 000
СШ-ГЛР в аргоне + сварка	55 414	194 941	383 000	>500 000

П р и м е ч а н и е. * Сварку образцов производили по режимам ТЦС, обеспечивающим оптимальную скорость охлаждения в температурном интервале фазового превращения.

** Рабочий режим испытания: амплитуда 14,8 мм; частота 24 Гц; расчетные напряжения по поверхности образца составляют 710 МПа.

Использование газолазерного раскроя как в среде азота, так и в среде аргона и особенно в комбинации с другими видами раскроя открывают возможности автоматизации процесса ТЦС, поскольку в процессе сварки плавлением исключается порообразование в металле шва. При варьировании режимов ТЦС можно прогнозировать свойства сварных конструкций.

Выводы. Установлено влияние технологических операций раскроя заготовок под сварку, режимов сварки и последующей термической обработки на статическую и циклическую прочность сварных ребристых панелей из сплава ВТ20 в зависимости от количества и суммарной площади дефектов (пор) на 100 мм сварного шва, позволяющее прогнозировать свойства и надежность сварных конструкций в зависимости от выбора того или иного комплекса операций ее изготовления. Показано, что определяющими соответствием свойств и надежности сварных соединений основному металлу ребристых панелей из сплава ВТ20 являются операции при сварке с требуемой скоростью охлаждения в интервале температур фазового превращения: чистовое фрезерование, обкатка и очистка (обезжиривание и обезвоживание) поверхности стыкуемых кромок; низкий отжиг после сварки в воздушной атмосфере и последующее опескоструивание; ГЛР в среде вспомогательного газа азота или аргона или комбинированных заготовок ГЛР и раскрой фрезерованием. Выявлено, что традиционная операция чистового и последующего шабрения приводят к заметному (на 10 – 15 %) сниже-

нию характеристик и надежности сварных соединений по сравнению с основным металлом в пределах допуска на сварные ребристые панели из сплава ВТ20. При этом необходимо учитывать установленный факт, что статическая прочность уменьшается прямо пропорционально величине суммарной площади дефектов в сечении детали, циклическая – резко снижается при расположении пор близко к поверхности. Установлено, что пластическая деформация металла шва и зоны термического влияния улучшают свойства и надежность до значений основного металла у титановых ребристых панелей. Причем возможно последующее изготовление сложной пространственной формы заготовки для ребристой панели горячей штамповкой в интервале фазового превращения и последующего отжига в воздушной атмосфере и опескоструивания, которые обеспечивают свойства и надежность, соответствующие основному металлу. Показано, что кромки основного металла после ГЛР в среде азота или аргона (как и чистовое фрезерование) и последующие операции отжига в воздушной среде и опескоструивания улучшают свойства ребристых панелей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Обеспечение надежности конструкций из титановых сплавов / В.И. Муравьев, П.В. Бахматов, Б.И. Долотов и др. / Под ред. В.И. Муравьева. – М.: «ЭКОМ», 2009. – 752 с.
2. Christoph Leyens. Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications. – Manfred Peters Wiley, 2003. – 532 p.

3. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / С.М. Гуревич, В.Н. Замков, В.Е. Блашук и др. / Под ред. В.Н. Замкова. – Киев: Наукова думка, 1986. – 240 с.
4. Froes F.H., Mashl S.J., Hebeisen J.C. etc. The Technologies of titanium powder metallurgy // JOM. 2004. Vol. 56. No. 11. P. 46 – 48.
5. Гуревич С.М. Справочник по сварке цветных металлов. – Киев: Наукова думка, 1990. – 512 с.
6. Howard S. Avery. Hard surfacing by fusion welding: monographs on wear, Literary Licensing. – LLC, 2013. – 110 p.
7. Сварные соединения титановых сплавов / В.Н. Моисеев, Ф.Р. Куликов, Ю.Г. Кириллов и др. – М.: Металлургия, 1979. – 248 с.
8. Сварка высокопрочных титановых сплавов / С.М. Гуревич, Ф.Р. Куликов, В.Н. Замков и др. – М.: Машиностроение, 1975. – 150 с.
9. Welding and joining of aerospace materials / M.C. Chaturvedi ed. – Woodhead Publishing Limited, 2012. – 448 p.
10. Пористость при сварке цветных металлов / В.В. Редчиц, В.А. Фролов, В.А. Казаков, В.И. Лукин. – М.: Технология машиностроения, 2002. – 447 с.
11. Коломенский А.Б., Муравьев И.И., Колачев Б.А. и др. Влияние режимов отжига на циклическую прочность сварных соединений титана ВТ1-0 // Автоматическая сварка. 1988. № 8. С. 8 – 10.
12. Коломенский А.Б., Муравьев И.И., Колачев Б.А. и др. Влияние режимов отжига на циклическую и кратковременную прочность титана и сплава ОТИ // ФХММ. 1994. № 4. С. 120 – 122.
13. Дятлов В.И., Абралов М.А., Шнайдер Б.И. Первичная кристаллизация жидкой ванны при сварке металлов малых толщин // Автоматическая сварка. 1967. № 1. С. 26 – 30.
14. Хрупкие разрушения сварных конструкций / В. Холл, К. Кихара, В. Зут, А. Уэллс / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1974. – 320 с.
15. Ikeda K., Kihara H. Brittle fracture strength of welded joints // Welding research supplement. 1970. No. 3. P. 106 – 114.
16. Грабин В.Ф. Металловедение сварки плавлением. – Киев: Наукова думка. 1982. – 415 с.
17. John C. Lippold, Samuel D. Kiser, John N. DuPont. Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys / ed. John Wiley and Sons, Inc. – Hoboken, New Jersey, 2009. – 440 p.
18. Велицкий А.В. Проблемы использования виброобработки вместо термообработки // Тяжелое машиностроение. 1992. № 8. С. 20 – 22.
19. Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Кныш В.В. и др. Бездеформационная сварка стрингерных панелей из титанового сплава ВТ20 // Автоматическая сварка. 2014. № 9. С. 7 – 18.
20. Муравьев В.И., Бахматов П.В. Доминирующие факторы образования поверхности раздела, вызывающие капиллярную конденсацию загрязнений и дефектность металла шва титановых конструкций // Сварка и диагностика. 2016. № 3. С. 11 – 16.
21. Шоршоров М.Х., Мещеряков В.Н. Фазовые превращения и изменения свойств сплавов титана при сварке. Атлас. – М.: Наука, 1973. – 159 с.
22. Srikumar Banerjee, Pradip Mukhopadhyay. Phase transformations. Examples from titanium and zirconium alloys. – Elsevier, 2007. – 840 p.
23. Froes F.H. Titanium: Physical metallurgy, processing, and applications. – ASM International, 2015. – 404 p.
24. Шевченко В.В., Лабанова Н.Н., Иванищева Г.А. Влияние температуры нагрева в вакууме на рельеф поверхности листов из титановых сплавов // ФХММ. 1985. № 5. С. 12 – 14.
25. Муравьев В.И., Бахматов П.В., Фролов А.В. Перспективные металлургические и технологические процессы производства, повышающие надежность изделий из конструкционных материалов. – Комсомольск-на-Амуре: изд. КНАГТУ, 2016. – 330 с.

Поступила 5 сентября 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. NO. 2, pp. 99–108.

RESEARCH OF THE TECHNOLOGICAL MANUFACTURING OPERATIONS LIMITING THE RELIABILITY (FATIGUE STRENGTH) OF RIBBED TITANIUM PANELS

P.V. Bakhmatov, V.I. Murav'ev

Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomol'sk-on-Amur, Russia

Abstract. As it is known, titanium alloys due to a number of features (high specific strength, fatigue resistance, fracture toughness and corrosion resistance) are widely used in aerospace engineering, including ribbed panels. For products of this kind it is necessary to meet high requirements of quality of welded joints and dimensional accuracy of the construction. Fusion welding of titanium alloys results in the formation of inhomogeneities in the connection zone and in the reduction of technological and operational performance. The geometric dimensions of design are distorted due to occurrence of welding stresses, pores and microcracks appear in the weld metal, mechanical properties and other parameters are reduced. These facts require a comprehensive analysis of the manufacturing process of titanium ribbed panels: from the manufacturing of semi-finished products to the final stage of heat treatment of the finished product from the point of detection of the most significant in relation to defects in operations. The blank manufacturing operations, including their preparation for welding, welding and subsequent heat treatment regimes affect the cyclic and static strength of welded ribbed titanium panels depending on the number and total area of welding defects. The article presents the research that allows to predict the properties and reliability of welded structures and to achieve identity of the properties of basic metal and weld metal with the lack of a guarantee of both internal and external defects, depend-

ing on the choice of the complex technological measures. It is shown that a certain welding cooling rate in the range of phase transformation temperatures, finish milling, running and cleaning (degreasing and dehydration) of the surface of abutting edges, low annealing after welding in the air and subsequent sand cleaning; GLC in the auxiliary gas medium of nitrogen or argon or the combined GLC blanks and cutting by milling determine correspondence of properties and reliability of the welded joints of base metal of ribbed panels from VT20 alloy.

Keywords: titanium alloys, preparation for welding, fusion welding, quality of connections.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-2-99-108

REFERENCES

1. Murav'ev V.I., Bakhmatov P.V., Dolotov B.I. etc. *Obespechenie nadezhnosti konstruktii iz titanovykh spлавov* [Ensuring the reliability of structures from titanium alloys]. Murav'ev V.I. ed. Moscow: "Ekom", 2009, 752 p. (In Russ.).
2. Christoph Leyens. *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. Manfred Peters Wiley, 2003, 532 p.
3. Gurevich S.M., Zamkov V.N., Blashchuk V.E. etc. *Metallurgiya i tekhnologiya svarki titana i ego spлавov* [Metallurgy and technology of welding of titanium and its alloys]. Zamkov V.N. ed. Kiev: Naukova dumka, 1986, 240 p. (In Russ.).
4. Froes F.H., Mashl S.J., Hebeisen J.C., Moxson V.S., Duz V.A. The Technologies of titanium powder metallurgy. *JOM*. 2004, vol. 56, no. 11, pp. 46–48.

5. Gurevich S.M. *Spravochnik po svarke tsvetnykh metallov* [Handbook on welding of non-ferrous metals]. Kiev: Naukova dumka, 1990, 512 p. (In Russ.).
6. Howard S. Avery. *Hard surfacing by fusion welding: monographs on wear*. Literary Licensing, LLC, 2013, 110 p.
7. Moiseev V.N., Kulikov F.R., Kirillov Yu.G., Shokholova L.V., Vas'kin Yu.V. *Svarnye soedineniya titanovykh splavov* [Welded joints of titanium alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1979, 248 p. (In Russ.).
8. Gurevich S.M., Kulikov F.R., Zamkov V.N. etc. *Svarka vysokoprochnykh titanovykh splavov* [Welding of high-strength titanium alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 1975, 150 p. (In Russ.).
9. *Welding and joining of aerospace materials*. Chaturvedi M.C. ed. Woodhead Publishing Limited, 2012, 448 p.
10. Redchits V.V., Frolov V.A., Kazakov V.A., Lukin V.I. *Poristost' pri svarke tsvetnykh metallov* [Porosity at welding of non-ferrous metals]. Moscow: Tekhnologiya mashinostroeniya, 2002, 447 p. (In Russ.).
11. Kolomenskii A.B., Murav'ev I.I., Kolachev B.A. etc. Influence of annealing conditions on cyclic strength of welded joints of commercial VT1-0 titanium. *Avtomaticheskaya svarka*. 1988, no. 8, pp. 8–10. (In Russ.).
12. Kolomenskii A.B., Murav'ev I.I., Kolachev B.A. etc. Influence of annealing conditions on cyclical and short-term strength of titanium and OTI alloy. *FKhMM*. 1994, no. 4, pp. 120–122. (In Russ.).
13. Dyatlov V.I., Abralov M.A., Shnaider B.I. Primary crystallization of molten bath at welding of metals with small thicknesses. *Avtomaticheskaya svarka*. 1967, no. 1, pp. 26–30. (In Russ.).
14. Hall W.J., Kihara H., Soete W., Wells A.A. *Brittle Fracture of Welded Plate*. Prentice-Hall, 1967. (Russ.ed.: Hall W., Kihara H., Soete W., Wells A. *Khrupkie razrusheniya svarnykh konstrukttsii*. Moscow: Metallurgiya, 1974, 320 p.).
15. Ikeda K., Kihara H. Brittle fracture strength of welded joints. *Welding research supplement*. 1970, no. 3, pp. 106–114.
16. Grabin V.F. *Metallovedenie svarki plavleniem* [Metal technology by fusion welding]. Kiev: Naukova dumka, 1982, 415 p. (In Russ.).
17. John C. Lippold, Samuel D. Kiser, John N. DuPont. *Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys*. John Wiley and Sons eds., Inc. Hoboken, New Jersey, 2009, 440 p.
18. Velitskii A.V. Problems of use of vibration treatment instead of heat treatment. *Tyazheloe mashinostroenie*. 1992, no. 8, pp. 20–22. (In Russ.).
19. Paton B.E., Lobanov L.M., Knysh V.V., Pavlovskii V.I., Prilutskii V.P., Timoshenko A.N., Goncharov P.V., Guan' Tsyao. Deformation-free welding of stringer panels made from VT20 titanium alloy. *Avtomaticheskaya svarka*. 2014, no. 9, pp. 7–18. (In Russ.).
20. Murav'ev V.I., Bakhmatov P.V. Dominant factors of formation of the interface, causing capillary condensation of impurities and defects of weld metal of titanium constructions. *Svarka i diagnostika*. 2016, no. 3, pp. 11–16. (In Russ.).
21. Shorshorov M.Kh., Meshcheryakov V.N. *Fazovye prevrashcheniya i izmeneniya svoistv splavov titana pri svarke. Atlas* [Phase transformations and changes in the properties of titanium alloys at welding. Atlas]. Moscow: Nauka, 1973, 159 p. (In Russ.).
22. Srikumar Banerjee, Pradip Mukhopadhyay. *Phase transformations. Examples from titanium and zirconium alloys*. Elsevier, 2007, 840 p.
23. Froes F.H. *Titanium: physical metallurgy, processing, and applications*. ASM International, 2015, 404 p.
24. Shevchenko V.V., Labanova N.N., Ivanishcheva G.A. Influence of the heating temperature in a vacuum on the surface topography of titanium alloy sheets. *FKhMM*. 1985, no. 5, pp. 12–14. (In Russ.).
25. Murav'ev V.I., Bakhmatov P.V., Frolov A.V. *Perspektivnye metallurgicheskie i tekhnologicheskie protsessy proizvodstva, povyshayushchie nadezhnost' izdelii iz konstruktivnykh materialov* [Advanced metallurgical and technological production processes, increasing reliability of products from structural materials]. Komsomol'sk-on-Amur: izd. KnAGTU, 2016, 330 p. (In Russ.).

Information about the authors:

P.V. Bakhmatov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor; Head of the Chair "Mechanical Engineering and Metallurgy" (mim@knastu.ru)
V.I. Murav'ev, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Mechanical Engineering and Metallurgy" (mim@knastu.ru)

Received September 5, 2016