

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

---

УДК 621.791.722

DOI: 10.34759/vst-2019-4-17-27

## ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ СПЕЦИФИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ ПРИ СБОРКЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТИТАНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Муравьев В.И.\* , Бахматов П.В.\*\* , Григорьев В.В.\*\*\*

*Комсомольский-на-Амуре государственный университет,  
КНАГУ, ул. Ленина, 27, Комсомольск-на-Амуре, 681013, Россия*

*\* e-mail: vmuravyev@mail.ru*

*\*\* e-mail: mim@knastu.ru*

*\*\*\* e-mail: grigorev.vlv@gmail.com*

Статья поступила в редакцию 27.08.2019

---

Настоящая работа посвящена исследованию образования специфических дефектов при сборке силовых конструкций летательных аппаратов (ЛА) методом создания неразъемных соединений титановых сплавов ВТ20 и ВТ23 высококонцентрированным источником энергии (электронным лучом). Установлено, что доминирующее влияние на образование субмикропор оказывает наличие капиллярно-конденсированной влаги в дефектах поверхности кромок. Выявлены условия образования неразъемных соединений сваркой, которые могут привести к появлению в них специфических дефектов: неудовлетворительная сборка и подготовка стыкуемых кромок подборок, силового элемента летательного аппарата, режимы технологического процесса узловой сборки сваркой, образование твердофазного соединения перед фронтом расплавленной ванны, колебательные процессы электронного луча (~ 0,5 мм), которые могут привести к неравномерному плавлению (из-за недостаточной температуры общего плавления кромок) по границам зерен с образованием субмикропор (менее 0,00025 мм), не выявляемых современными рентгеновскими аппаратами, гидродинамический коллапс кратера, приводящий к образованию корневого дефекта в виде пикообразований. Радиографическим контролем и посредством растровой электронной микроскопии установлено, что дефекты в виде темных полос представляют собой цепочки субмикропор, спроецированных друг на друга. Установлено, что специфические дефекты в неразъемных соединениях могут оказывать существенное влияние на прочностные свойства силовых конструкций летательного аппарата, а также на стадийность их разрушения. Из проведенных исследований следует вывод о необходимости контроля в технологическом процессе образования неразъемных соединений электронно-лучевой сваркой таких основных факторов, как качество поверхности стыкуемых кромок силового элемента конструкции под узловую сборку, условия фокусировки электронного луча, его мощность и колебательные процессы, уровень гидродинамической нестабильности в канале проплавления.

*Ключевые слова:* титановые сплавы, неразъемные соединения, узловая сборка, силовые элементы летательных аппаратов, специфические дефекты, порообразование, прочность, ударная вязкость, капиллярно-конденсированная влага, фрактограммы изломов, дефекты поверхности стыкуемых кромок, распределение водорода, радиографический контроль.

---

## Введение

Требованиям высокой надежности и весовой эффективности (высокие удельные характеристики) для летательных аппаратов в полной мере отвечают титановые сплавы [1–5], особенно высокопрочные сплавы: ВТ20, ВТ23 и др. [6, 7]. При этом свариваемость титановых сплавов позволяет достичь наибольшей весовой эффективности по сравнению с механическими соединениями [5, 8]. С конца 1990-х годов в рамках проекта «ПАК ФА» ОКБ им. П.О. Сухого осуществляло разработки по созданию многофункционального истребителя пятого поколения Су-57, силовые сборные конструкции которого в настоящее время изготавливают из титановых сплавов ВТ20, ВТ23 с применением автоматической электронно-лучевой сварки (ЭЛС), которая является одним из наиболее востребованных методов, позволяющих соединять детали толщиной до 120 мм и более [9, 10].

ЭЛС неразъемных соединений, как и плазменная, имеет целый ряд преимуществ по сравнению с другими методами сварки: более надежная защита зоны сварки, малая ширина шва и зоны термического влияния (ЗТВ), возможность однопроходной сварки деталей большой толщины и др. [11, 12]. Существенным недостатком сварки плавлением титановых сплавов является порообразование [13, 14].

Наряду с дефектами, свойственными всем способам образования неразъемных соединений плавлением [13], ЭЛС присущи такие специфические дефекты, как неравномерное проплавление корня шва, корневые дефекты, глубокие кратеры и крупные раковины [13–15].

Для деталей ответственного назначения, особенно в авиакосмической технике, поры и специфические дефекты в неразъемных соединениях титановых конструкций являются недопустимыми. Поэтому исключение вышеперечисленных дефектов в узловой сборке силовых конструкций ЛА представляет собой важнейшую актуальную задачу.

В настоящее время не существует единого мнения по вопросу порообразования и специфических дефектов при образовании неразъемного соединения титановых сплавов электронным лучом. Если для аргонодуговой сварки (АрДЭС) титановых сплавов из всего многообразия гипотез наиболее четко определены механизмы порообразования [13, 14, 19], то для ЭЛС единого мнения нет: колебательные движения расплава в кратере [20], испарительная гипотеза [21–23], термокапиллярный эффект [24], которые в большей степени касаются лазерной сварки конструкционных материалов.

В настоящей работе выявлены закономерности образования дефектов в неразъемных соединениях крупногабаритных силовых конструкций ЛА, выполненных методом ЭЛС титановых сплавов:

- попадание в расплав замкнутых областей, заполненных капиллярно-конденсированной влагой (готовых зародышей пор) из твердофазного соединения перед фронтом расплавленной ванны;
- избирательное выплавление из-за повышенной диффузионной подвижности легкоплавкой составляющей по границам зерен: а) при неточном позиционировании электронного луча либо недостаточной температуре для общего плавления стыкуемых кромок заготовок; б) при пикообразовании преимущественно в корневой части сварного шва из-за гидродинамической нестабильности канала проплавления с чередующимися коллапсами кратера.

Также установлено, что дефекты, не выявляемые радиографическим контролем, оказывают влияние на прочностные свойства неразъемных соединений ЛА и могут приводить к усталостному разрушению силового элемента планера.

## Методика проведения исследований

Произведена электронно-лучевая сварка темплетов из сплавов ВТ23 и ВТ20. Образование неразъемного соединения темплета из сплава ВТ23 толщиной 50 мм производилось на электронно-лучевой установке (ЭЛУ) 30Е3000 без подготовки стыкуемых кромок под сварку, на корневой части темплета зафиксирована технологическая подкладка из того же сплава толщиной 10 мм, темплеты из сплава ВТ20 с толщинами 60, 30 и 20 мм выполнялись на ЭЛУ КЛ-144, как и темплет из сплава ВТ23 толщиной 70 мм (подготовка поверхности под сварку производилась по традиционному технологическому процессу). Выбор режимов ЭЛС указанных заготовок обоснован аналитической оценкой появления дефектов в процессе серийного производства неразъемных соединений титановых крупногабаритных силовых конструкций ЛА [25].

Дополнительно стыкуемые кромки темплетов из сплавов ВТ20 и ВТ23 с толщинами 60 и 30 мм подверглись высокоскоростной механической обработке, с целью выявления влияния повышенных режимов механической обработки на качество удаления капиллярно-конденсированных загрязнений для минимизации дефектности сварных соединений, выполненных ЭЛС.

Механическая обработка кромок производилась на установках Стерлитамак S 500 (для ВТ23) и DMU 80P duoBLOCK (для ВТ20). При фрезеровании использовалась фреза диаметром 16 мм

Таблица 1

Технологические режимы сварки темплетов из сплавов ВТ20, ВТ23 с указанием толщин заготовок, протяженности шва и ЭЛУ

ЭЛУ	Марка сплава	Протяженность шва, мм	Толщина заготовки, мм	Режимы сварки			
				$I_w$ , МА	$I_f$ , МА	$F$ , мм	$V_{св}$ , мм/с
30E3000	ВТ23	130	50	415	600	200	7
КЛ-144	ВТ23	93	70	470			10
КЛ-144	ВТ20	60	60	470			10
КЛ-144	ВТ20	123	20	230			15
КЛ-144	ВТ20	130	30	320			16
КЛ-144	ВТ23	130	60	420			10

Примечание.  $I_f$  — ток фокусировки;  $I_w$  — ток сварки;  $F$  — расстояние от торца пушки до детали;  $V_{св}$  — скорость сварки.

Таблица 2

Технологические режимы механической обработки стыкуемых кромок

Марка материала	Толщина темплета, мм	Подача, мм/мин	Частота вращения, об/мин
ВТ23	60	200	500
		400	1000
		1000	2500
ВТ20	30	200	500
		400	1000
		1000	2500

под шифром МТ190-VBE-016Z16R0-38-H070-L150-R0-T.

Технологические режимы образования неразъемного соединения сваркой, механической обработки и толщины свариваемых элементов представлены в табл. 1 и 2.

Раскрой неразъемных соединений темплетов производили на автоматическом лентопильном станке фирмы Danobat с применением охлаждающей эмульсии. Радиографический контроль осуществляли на установке ЭКСТРАВОЛЬТ-225 с максимальной величиной выявляемых дефектов 0,1 мм. Испытания механических свойств на статическое растяжение производили на универсальных испытательных машинах Instron 3382 и Shimadzu AG-X Plus, на ударный изгиб — на маятниковом

Таблица 3

Количество и величина дефектов, выявленных неразрушающим (радиографическим) контролем на установке ЭКСТРАВОЛЬТ-225

Установка ЭЛС	Толщина темплета, мм	Марка сплава	Вид дефекта, размер, мм
КЛ-144	20	ВТ20	Не обнаружено
	30		Единичная пора 3 мм
	60		Не обнаружено
КЛ-144	60	ВТ23	Не обнаружено
	70		Не обнаружено
30E3000	50	ВТ23	Темные полосы в начале шва (8 мм); цепочки пор (8 мм); несплавление у конца шва (10 мм); темные полосы у конца шва (10 мм); цепочки пор у конца шва (10 мм); скопления пор в усилении шва (3 мм) в конце соединения
	Подкладная пластина 10 мм		Не обнаружено

копре JBW-300. Макро-, микроструктура сварных соединений и химический состав исследовались на оптическом микроскопе Nikon Eclipse MA 200 и растровом электронном микроскопе Hitachi S3400-N.

**Результаты исследований и их обсуждение**

Из данных табл. 3 видно, что максимальные количество и величина дефектов выявлены на темпете из сплава BT23 толщиной 50 мм, выполненном на установке 30E3000 без подготовки стыкуемых кромок под технологический процесс сварки. Обнаружено наличие таких дефектов, как скопления пор, цепочки пор, переходящие в темные полосы по глубине сварного соединения, и темные полосы вдоль линий сплавления. На остальных темпетах таковых дефектов практически выявлено не было, но при этом механические свойства, особенно в корневой части, были значительно ниже требуемых (отсутствовало удлинение, сужение, пониженные значения ударной вязкости). Практически для всех образцов разрушение как при испытании на растяжение, так и при испытании на ударный изгиб происходило в основном по

линии сплавления у зоны термического влияния (ЗТВ) (рис. 1).

ЭЛС в значительной степени отличается от АрДЭС, поскольку плотность электронного луча достигает  $5 \cdot 10^3$  кВт/мм<sup>2</sup>, что в несколько тысяч раз превышает плотность энергии при дуговой сварке [8], меньше в 25 раз площадь проплавления и образуется очень узкий глубокий шов в виде клина (кинжальный проплав) с довольно узкой зоной термического влияния с формированием значительных внутренних напряжений.

Поэтому неизбежно в процессе образования неразъемного соединения методом ЭЛС перед фронтом плавления парогазовой плазмы появится зона твёрдофазного соединения, как в случае с АрДЭС [13, 14], с замкнутыми полостями, заполненными капиллярно-конденсированной влагой (ККВ), т.е. готовыми зародышами пор, которые непосредственно попадут в расплав на кромках образующейся сварочной ванны.

При этом в первоначальный момент из-за малых сжимающих напряжений возможно попадание ККВ непосредственно с поверхности соединяемых кромок в расплав (рис. 2, № 8, 9), как в случае с

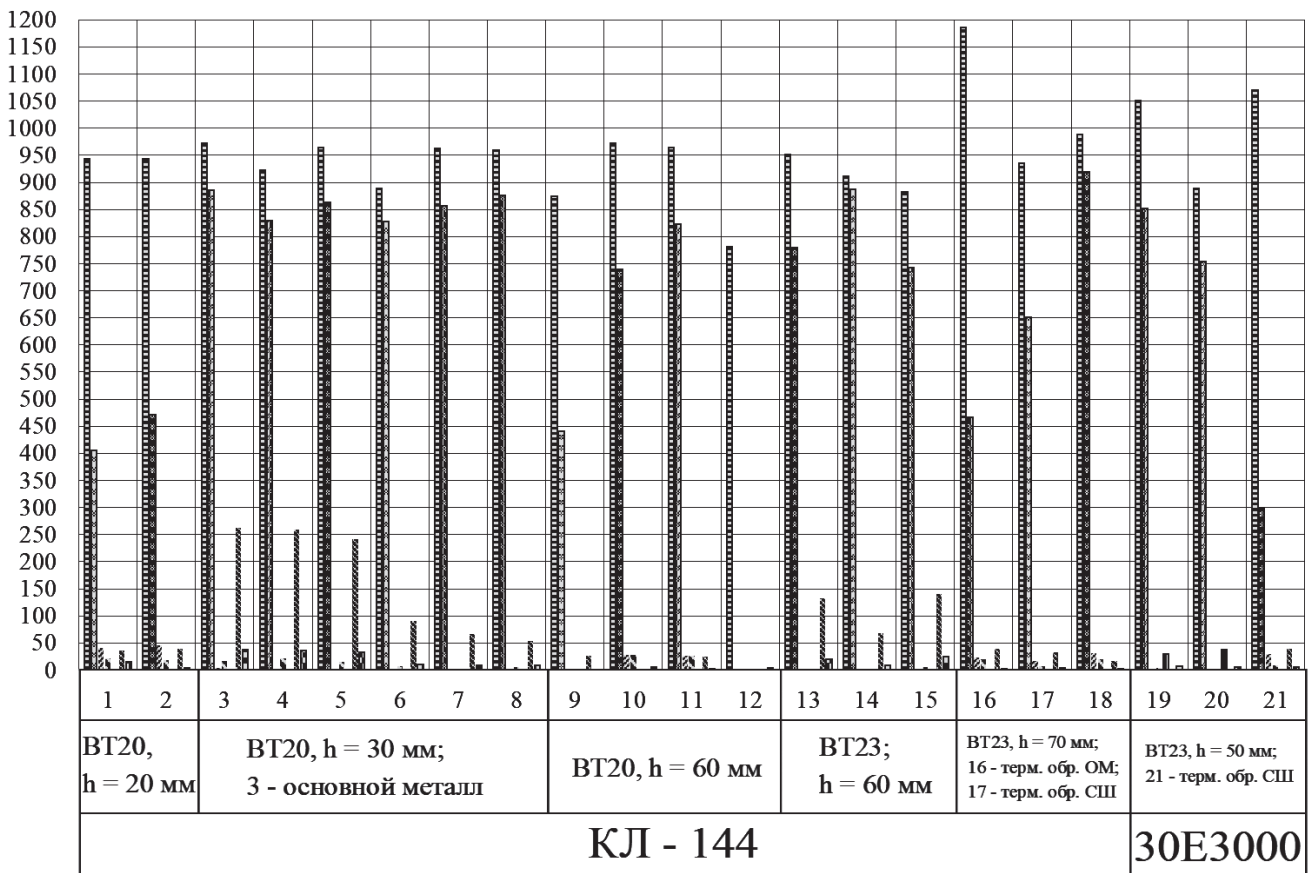
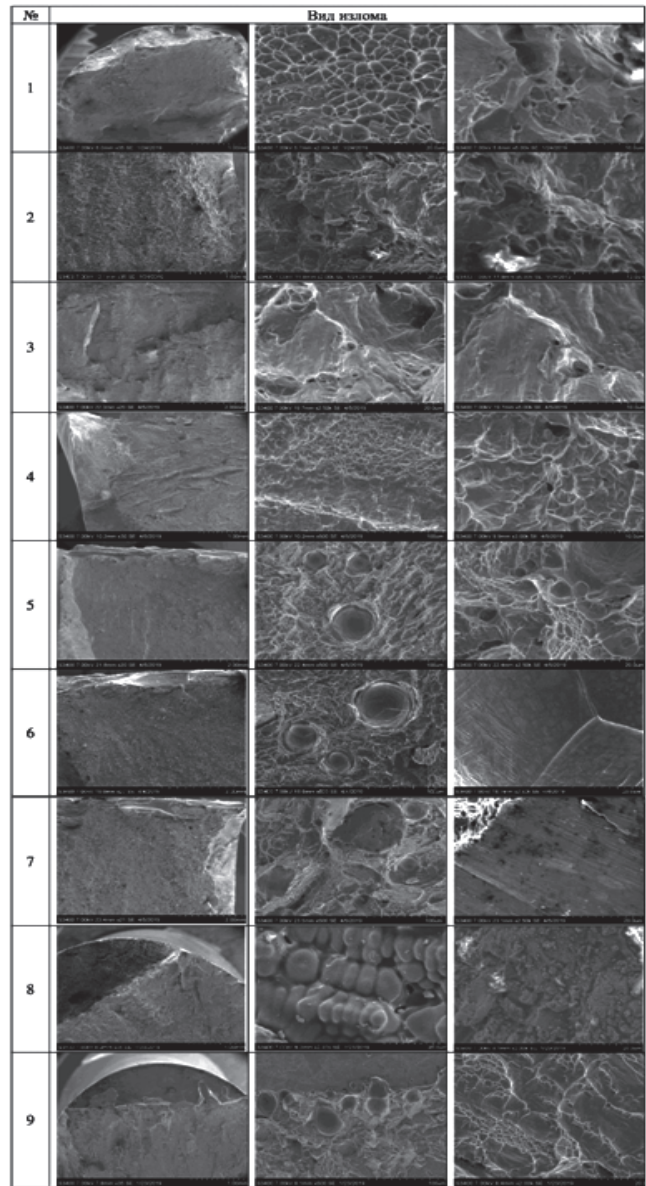


Рис. 1. Изменение механических свойств сварных образцов из титановых сплавов в зависимости от режимов электронно-лучевой сварки и термической обработки: —  $\sigma$ , МПа; —  $\sigma_{0,2}$ , МПа; —  $\delta$ , %; —  $\psi$ , %; — КС, Дж/см<sup>2</sup>; — КСУ, Дж/см<sup>2</sup>; — угол загиба,  $\alpha^\circ$

Рис. 2. Электронные фрактограммы изломов образцов из сплава ВТ20, вырезанных из сварных темплетов, выполненных на установке КЛ-144, толщиной: 1, 2 – 20 мм; 3, 4, 5, 6, 7 – 30 мм; 8, 9 – 60 мм; испытанных на статическое растяжение (1, 3, 8, 9) и ударный изгиб (2, 4, 5, 6)



АрДЭС с поверхности дефектной присадочной проволоки [19]. Предварительный прогрев расфокусированным лучом соединяемых кромок особенно больших толщин не обеспечивает удаление ККВ. Этим объясняется преимущественное образование пор в начальной зоне неразъемного соединения при ЭЛС заготовок без подготовки поверхностей стыкуемых кромок, как это было отмечено в работе [18], что обуславливает необходимость контроля насыщенности водородом поверхности стыкуемых кромок, а не только параметра шероховатости.

В работе [18] корневые дефекты в виде крупных несплошностей и пикообразования объясняют гидродинамическим возмущением в канале проплавления, но при этом не совсем корректно назвали его основной причиной образования пор при ЭЛС. Исследования образования пор проводили при лазерной сварке и обосновали наличием защитных газов в порах, чего не может быть при ЭЛС.

Скорее всего, указанный факт подтверждает образование пор по вышеприведенному механизму попадания готовых зародышей пор в расплав ванны из-за образования замкнутых полостей с ККВ в твердофазном соединении перед фронтом расплавленной ванны (рис. 3, № 1, 2, 3). Об этом свидетельствуют химический анализ поверхности поры и неравномерное распределение водорода по сечению сварного шва (СШ), повышенное его содержание в зоне сплавления (табл. 4, рис. 4). Появление пор по такому механизму выявлено в образцах после образования неразъемного соединения методом ЭЛС без подготовки поверхности кромок под сварку на установке 30E3000 (рис. 5).

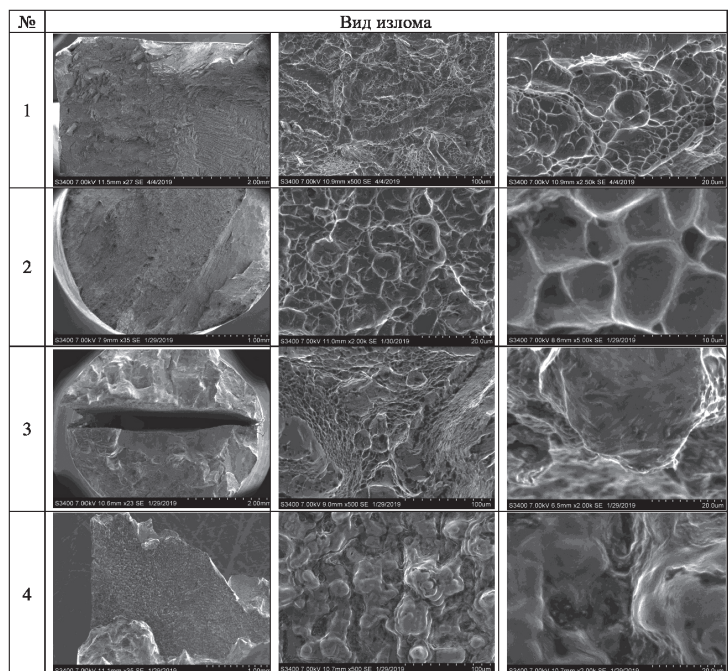


Рис. 3. Электронные фрактограммы изломов образцов из сплава ВТ23, вырезанных из сварных темплетов, выполненных на установке КЛ-144, толщиной: 1, 2 – 60 мм; 3, 4 – 70 мм; испытанных на ударный изгиб (1) и статическое растяжение (2, 3, 4)

Таблица 4

**Изменение химического состава на поверхности сварных соединений сплава из ВТ23  
без подготовки стыкуемых кромок под сварку**

Легирующий элемент	Содержание, в процентах					
	№ 1*		№ 2*		№ 3*	
	Пора	Линия сплавления	Пора	Линия сплавления	Пора	Линия сплавления
Al	7,53	5,29	4,23	4,81	6,15	5,93
				4,84	6,89	
				4,03		
N	0,00	0,00	2,47	0,00	0,00	0,00
				0,00	0,00	
				0,00		
O	0,00	9,25	0,00	0,00	0,00	0,00
				0,00	0,00	
				0,00		
Ti	76,97	75,09	82,40	85,74	82,03	84,83
				86,88	84,63	
				88,98		
Si	0,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
				0,01	0,23	
				0,00		
V	5,24	3,33	7,43	5,21	7,57	1,62
				3,43	4,89	
				4,72		
Cr	1,59	0,00	0,54	0,98	0,00	2,98
				0,77	1,27	
				0,69		
Fe	0,59	2,25	1,08	1,07	0,69	0,90
				1,21	0,16	
				0,28		
Zr	3,01	1,25	0,12	0,16	0,18	1,60
				0,63	0,00	
				0,00		
Mo	4,62	3,54	1,72	2,03	3,39	2,14
				2,24	1,93	
				1,29		

Примечание. \* — номера образцов на рис. 5.

Условия фокусировки луча могут привести к появлению дефектов при ЭЛС, поскольку: величина зазора между свариваемыми подборками сило-

вого элемента планера должна быть в пределах  $h = 0^{+0,2}$  мм, корректировка электронного луча должна производиться по контрольным рискам на

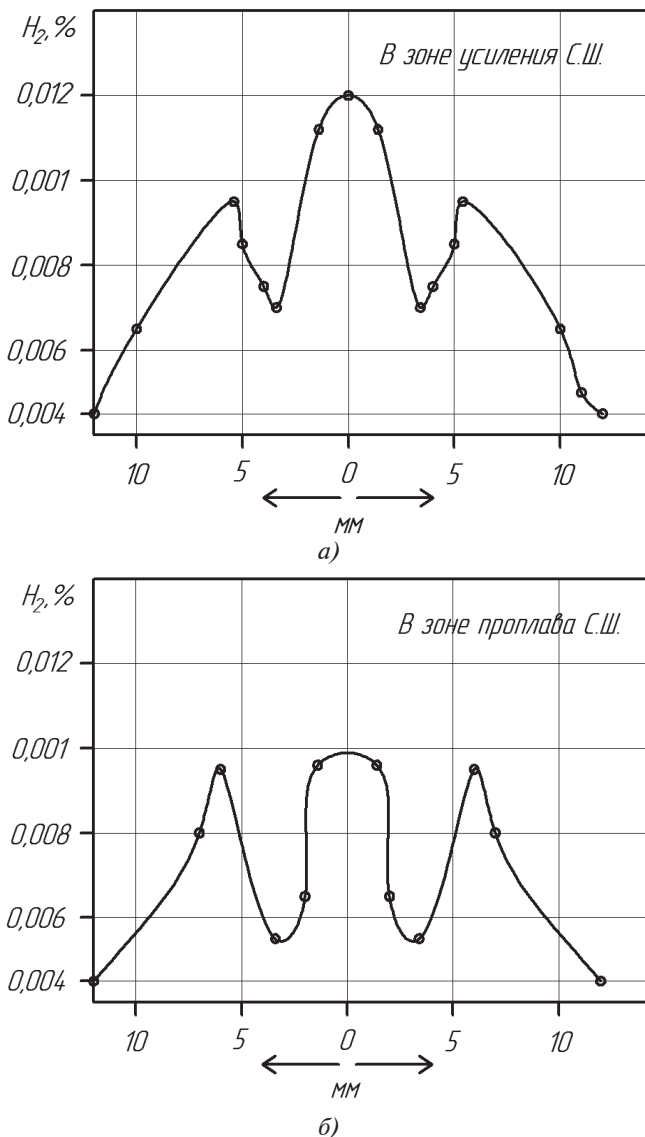


Рис. 4. Графики распределения содержания водорода по сварному шву, зоне термического влияния и в основном металле: а – зона усиления; б – корневая зона

подборках, шероховатость поверхности подборок Ra не более 0,0032 мм. К этим условиям добавляется изменение глубины и ширины проплавления из-за колебательных процессов в канале проплавления под действием мощного концентрированного пучка электронов [26].

Совокупность вышеуказанных факторов может привести, во-первых, к попаданию ККВ в дефектах поверхности подборок силового элемента непосредственно в расплав и образованию мелких пор менее 0,00025 мм (рис. 2, № 3), во-вторых, к созданию температурных условий, не обеспечивающих возможность равномерного плавления стыкуемых кромок подборок (рис. 2, № 8, 9; рис. 3, № 3, 4). Процесс плавления начинается по границам зерен, особенно в зонах схождения трёх-четырёх зерен из-за повышенной скорости диффузион-

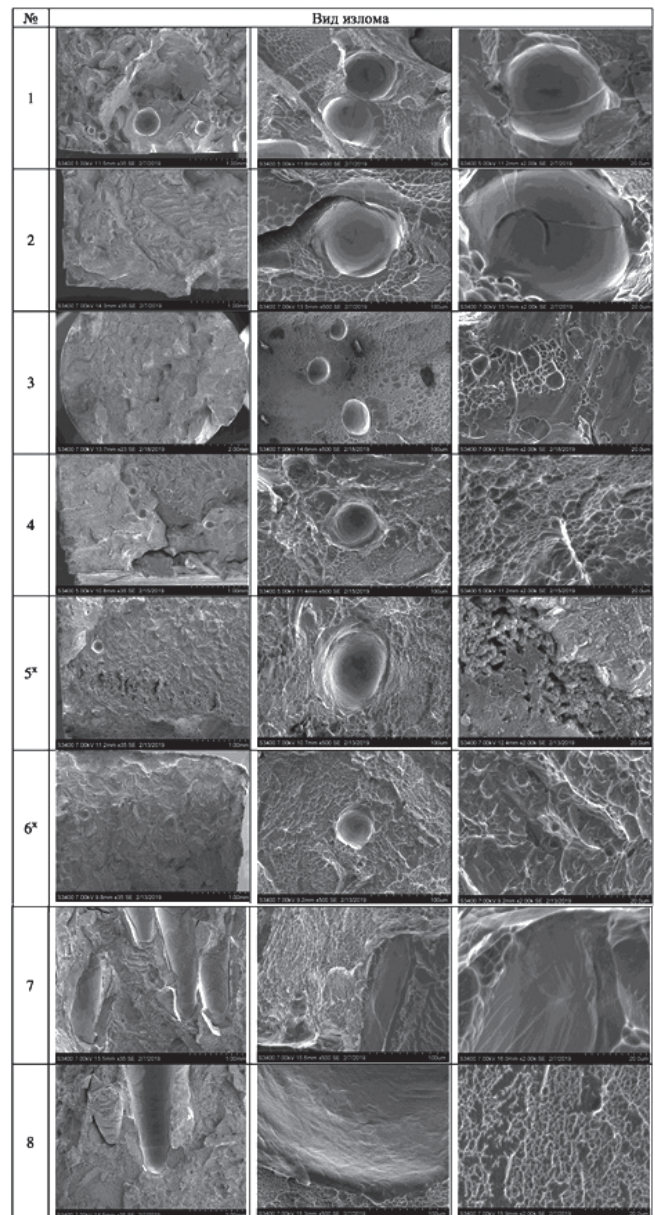


Рис. 5. Электронные фрактограммы изломов образцов из сплава ВТ23, вырезанных из сварных темплетов, выполненных без подготовки поверхности стыкуемых кромок на установке 30Е3000, толщиной 50 мм (1–6) и подкладной пластины толщиной 10 мм (7, 8), испытанных на статическое растяжение (1, 3) и ударный изгиб (2, 4–8); \* – образцы 5, 6, вырезанные из зоны кратера по окончании ЭЛС

ных процессов, и жидкая фаза переходит в расплав, образуя субмикropоры (рис. 5, № 5, 6).

Подтверждением вышеуказанных закономерностей образования пор служит анализ дефектов, выявленных при технологическом неразрушающем контроле неразъемных соединений, выполненных сваркой из титановых сплавов ВТ20 и ВТ23. Была обнаружена четкая зависимость образования пор и специфических дефектов в виде темных полос от технологических режимов и скорости сварки (тем-

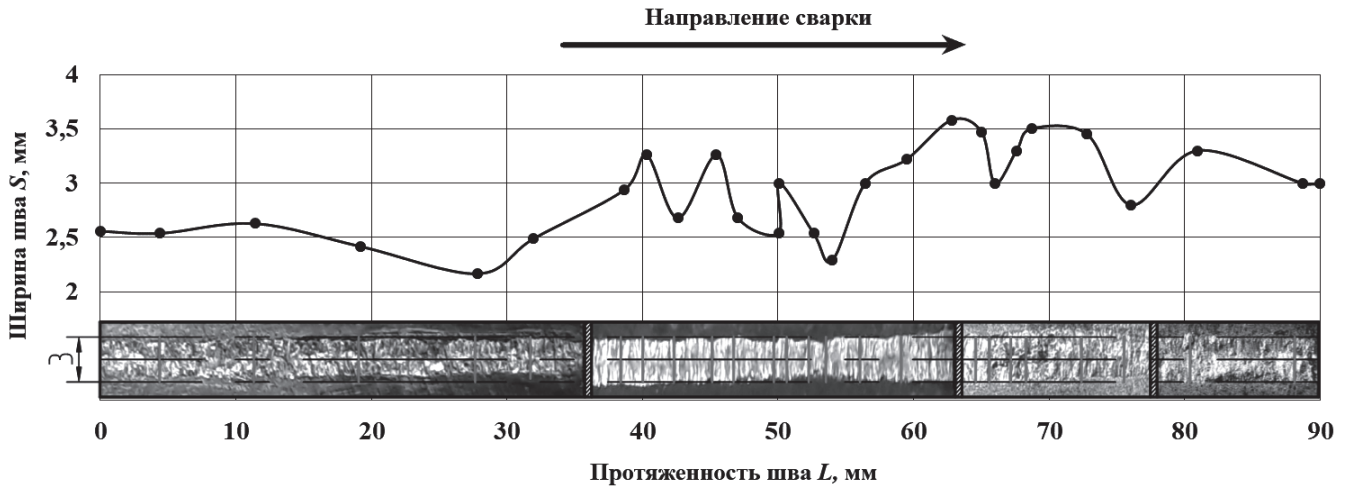


Рис. 6. Результат измерения ширины проплавления технологической пластины, зафиксированной в корневой части неразъемного соединения

пературных условий кромок) [25]. Неразрушающий радиографический контроль темплетов, выполненных ЭЛС из сплава ВТ23, показал, что темные полосы на рентгенограммах переходят в цепочку пор. Более высокочувствительная рентгеноскопия позволила выявить в зоне темных полос цепочку субмикропор [27].

Известно [26], что при образовании неразъемного соединения электронно-лучевой сваркой металлов наблюдаются колебательные процессы под действием мощного концентрированного пучка электронов в канале проплавления, приводящие к изменению как глубины проплавления (пилообразное проплавление в корне шва), так и ширины.

В изломе, образованном срезом технологической пластины в корне шва из сплава ВТ23 после ЭЛС на установке 30Е3000, позволило выявить характер изменения ширины проплавления вдоль неразъемного соединения (рис. 6), что подтверждает наличие колебательных процессов в канале проплавления.

Наряду с этим при испытании образцов технологической пластины на ударный изгиб в изломе выявились специфические корневые дефекты в виде пикообразования (рис. 5, № 7, 8). Электронная фрактография пикообразований позволила установить их характер: первоначально возникает полость под воздействием парогазовой плазмы на дне канала из-за потери мощности электронного излучения, которая в последующем заполняется расплавом, что подтверждается химическим составом пикообразования (табл. 5, выплеск).

**Выводы**

Капиллярно-конденсированная влага на поверхности стыкуемых кромок при образовании неразъемных соединений, выполненных сваркой титано-

вых сплавов, приводит к попаданию готовых зародышей пор как из замкнутых областей, заполненных ККВ, перед фронтом расплавленной ванны, так и непосредственно с дефектной поверхности стыкуемых кромок.

Избирательное плавление по границам зерен из-за недостаточной температуры объемного плавления кромок, обусловленной недостаточной мощностью ЭЛУ и неточной фокусировкой электронного луча, приводит к образованию цепочек суб-

Таблица 5

Изменение химического состава на поверхности излома технологической подложки в корне шва

Легированный элемент	Содержание, %			
	Выплеск		Линия сплавления	Сварное соединение
	На кромке	В центре		
Al	6,40	6,21	4,44	5,86
Ti	84,84	82,50	86,68	83,80
Si	0,39	0,00	0,30	0,28
V	5,54	5,84	5,58	3,80
Cr	1,51	1,33	0,71	4,36
Fe	0,00	1,37	0,93	1,37
Zr	0,00	0,00	0,00	0,39
Mo	1,32	2,76	1,36	2,17
N	0,00	0,00	0,00	0,00
C	0,00	0,00	0,00	0,00
O	0,00	0,00	0,00	0,00



микропор на границе сплавления, выявляемых в виде темных полос.

Гидродинамическая нестабильность парогазовой плазмы в канале проплавления, по причине неэффективности технологических режимов ЭЛС (скорость сварки, мощность ЭЛУ), приводит к образованию специфических корневых дефектов (клиновидных пикообразований) в виде слипания расплава в первоначально образованной пустоте.

Для обеспечения качества силовых крупногабаритных титановых конструкций летательных аппаратов после их узловой сборки, авторы рекомендуют использовать кроме радиографического контроля ультразвуковой.

### Библиографический список

1. *Каблов Е.Н.* Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 7-17.
2. *Антипов В.В.* Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 157-167.
3. *Тарасов Ю.М., Антипов В.В.* Новые материалы ВИАМ – для перспективной авиационной техники производства ОАО «ОАК» // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 2(23). С. 5-6.
4. *Ночовная Н.А.* Перспективы и проблемы применения титановых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2007. № 1. С. 4-8.
5. *Муравьев В.И., Бахматов П.В., Фролов А.В.* Перспективные металлургические и технологические производства, повышающие надежность изделий из конструкционных материалов. — Комсомольск-на-Амуре: КНАГТУ, 2016. — 330 с.
6. *Петухов А.Н.* Актуальные вопросы конструкционной прочности титановых сплавов и деталей из них // *Авиационные материалы и технологии*. 2007. № 1. С. 8-13.
7. *Хорев А.И.* Теория и практика создания современных комплексно-легированных титановых сплавов для авиакосмической и ракетной техники // *Сборник трудов международной конференции «Титан-2009 в СНГ» (17-20 мая 2009, Одесса, Украина)*. Киев: РИО ИМФ им. Г.В. Курдюмова НАН Украины. С. 288-301.
8. *Фролов В.А., Петренко В.Р., Пешков В.В.* и др. *Технология сварки плавлением и термической резки металлов: Учебное пособие*. — М.: Альфа М, ИНФРА-М, 2011. — 447 с.
9. *Хорев А.И.* Фундаментальные и прикладные работы по конструкционным титановым сплавам и перспективные направления их развития // *Труды ВИАМ*. 2013. № 2. URL: [http://www.viam-works.ru/ru/articles?art\\_id=12](http://www.viam-works.ru/ru/articles?art_id=12)
10. *Ильин А.А., Колачёв Б.А., Польшкин И.С.* Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: Справочник. — М.: ВИЛС–МАТИ, 2009. — 520 с.
11. *Грушин И.А., Мамонтова Н.А., Курьшев Е.А.* Термическая обработка сварных соединений крупногабаритных полуфабрикатов титанового сплава ВТ23, полученных электронно-лучевой сваркой // XXXVIII Гагаринские чтения: Сборник трудов Международной молодежной научной конференции в 8 томах (Москва, 10-14 апреля 2012). М.: МАТИ, 2012. Т.1. С. 28-29.
12. *Пигалова Е.А., Абрамова А.А., Курников Н.А.* Применение плазменной сварки в производстве самолетов марки «МиГ» как один из приёмов снижения сварочных деформаций // *Вестник Московского авиационного института*. 2018. Т. 25. № 2. С. 172-183.
13. *Редниц В.В., Фролов В.А., Казаков В.А., Лукин В.И.* Пористость при сварке цветных металлов: Учебник. — М.: Технология машиностроения, 2002. — 448 с.
14. *Муравьев В.И.* Проблемы порообразования в сварных швах титановых сплавов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2005. № 7. С. 30-37.
15. Электронно-лучевая сварка, 2013. URL: <https://stc-pton.com/rus/equipment/ebw04>
16. *Браверман В.Я., Белозерцев В.С., Литвинов В.П., Розанов О.В.* Вопросы управления формированием сварного шва при электронно-лучевой сварке // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева*. 2008. № 2(19). С. 148-151.
17. *Успенский Н.В., Богданов В.В.* Предупреждение появления корневых дефектов при электронно-лучевой сварке // *Современные проблемы машиностроения: Сборник научных трудов VII Международной научно-технической конференции 11-13 ноября 2013.* / Под ред. А.Ю. Арляпова, А.Б. Кима. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2013. С. 219-221.
18. *Сейдгазов Р.Д.* Экспресс-проектирование технологии лучевой сварки с минимизацией порообразования // *Международная конференция «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии»*. Национальный исследовательский университет «МЭИ», 17-20 ноября 2015: Сборник трудов. М.: Изд-во МЭИ, 2015. С. 554-565.
19. *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.
20. *Tong H., Giedt W.H.* A Dynamic Interpretation of Electron Beam Welding // *Welding Journal*. 1970. Vol. 49. No. 6, pp. 259-266.
21. *Батанов В.А., Федоров В.Б.* Вымывание жидкой фазы – новый механизм формирования кратера при плоском развитии испарении металлической мишени лазерным лучом // *Письма в ЖЭТФ*. 1973. Т. 17. № 7. С. 348-351.

22. Andrews J.G., Atthey D.R. Hydrodynamic limit to penetration of a material by a high-power beam // Journal of Physics D: Applied Physics. 1976. Vol. 9. No. 15, pp. 2181-2194. DOI: 10.1088/0022-3727/9/15/009
23. Klemens P.G. J. Heat balance and flow conditions for electron beam and laser welding // Journal of Applied Physics. 1976. Vol. 47, p. 2165. DOI: 10.1063/1.322866
24. Сайдгазов Р.Д., Сенаторов Ю.М. Термокапиллярный механизм глубокого проплавления материалов лазерным излучением // Квантовая электроника. 1988. Т. 15. № 3. С. 622-624.
25. Григорьев В.В., Муравьев В.И., Бахматов П.В. Исследование возникновения специфических дефектов электронно-лучевой сварки (ЭЛС) титановых сплавов // Сварочное производство. 2019. № 4. С. 36-42.
26. Младенов Г.М., Трушников Д.Н., Бельский В.Я., Колева Е.Г. Электронно-лучевая сварка. — Пермь: Изд-во Перм. нац.-исслед. политехн. ун-та, 2014. — 374 с.
27. Григорьев В.В., Муравьев В.И., Бахматов П.В. Изменение структуры и микротвердости неразъемных соединений силовых титановых конструкций из сплава ВТ23, выполненных электронно-лучевой сваркой // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2019. № 1(706). С. 20-28.

## SPECIFIC DEFECTS FORMING FEATURES WHILE AIRCRAFT BULKY TITANIUM STRUCTURES ASSEMBLING

Murav'ev V.I.\* , Bakhmatov P.V.\*\* , Grigor'ev V.V.\*\*\*

*Komsomolsk-on-Amur state university,  
KnASU, 27, Lenin str., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia*

\* e-mail: vmuravyev@mail.ru

\*\* e-mail: mim@knastu.ru

\*\*\* e-mail: grigorev.vlv@gmail.com

### Abstract

This article presents the results of the study of specific defects forming while VT20 and VT23 titanium alloys electron-beam welding. It was established that the presence of capillary-condensed moisture, resided in the defects of the edges' surface, impacts dominantly on the submicropores formation. Other conditions electron-beam welding conditions, which may lead to specific defects forming, were revealed. These conditions may include:

- Improper assembling and preparation of the abutting edges for welding;
- Electron-beam welding modes;
- A solid-phase joint formation prior to the front of the molten bath;
- Oscillatory processes of the electron beam (~0.5 mm), which may lead to uneven melting (due to insufficient temperature of the edges' overall melting) over the grains boundaries with submicropores forming (less than 0.00025 mm), which cannot be detected by modern X-ray machines;
- Hydrodynamic collapse of the crater leading to the root defect generation as peak-shaped formations.

It was revealed by radiographic control and scanning microscopy that defects in the form of dark stripes represented the chains of submicropores projected onto each other. It was established also that specific defects formed while electron-beam welding impacts significantly on the strength properties of

welded joints, as well as on their destruction stadiality. The performed studies allowed make a conclusion on the necessity of monitoring such basic factors as the surface quality of the abutting edges for welding; electron beam focusing conditions, its power and oscillatory processes; and hydrodynamic instability in the weld penetration channel.

**Keywords:** titanium alloys, permanent joints, component assembly, electron beam welding, load-bearing elements of flying vehicles, specific defects, pore formation, strength, impact strength, capillary-condensed moisture, fracture fractogram, surface defects of abutting edges, hydrogen distribution, hydrogen distribution, radiographic control.

### References

1. Kablov E.N. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2012, no. S, pp. 7-17.
2. Antipov V.V. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2012, no. S, pp. 157-167.
3. Tarasov Yu.M., Antipov V.V. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2012, no. 2(23), pp. 5-6.
4. Nochovnaya N.A. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2007, no. 1, pp. 4-8.
5. Murav'ev V.I., Bakhmatov P.V., Frolov A.V. *Perspektivnye metallurgicheskie i tekhnologicheskie proizvodstva, povyshayushchie nadezhnost' izdelii iz konstruktivnykh materialov* (Promising metallurgical and technological production, enhancing reliability of

- the products made of structural materials), Komsomol'sk-na-Amure, KnAGTU, 2016, 330 p.
6. Petukhov A.N. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2007, no. 1, pp. 8-13.
  7. Khorev A.I. *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii "Titan-2009 in the SNG" (17-20 May 2009, Odessa, Ukraine)*. Kiev, RIO IMF im. G.V. Kurdyumova NAN of Ukraine, pp. 288-301.
  8. Frolov V.A., Petrenko V.R., Peshkov V.V. et al. *Tekhnologiya svarki plavleniem i termicheskoi rezki metallov* (Technology of fusion welding and thermal cutting of metals), Moscow, Al'fa M, INFRA-M, 2011, 447 p.
  9. Khorev A.I. *Trudy VIAM*, 2013, no. 2. URL: [http://www.viam-works.ru/ru/articles?art\\_id=12](http://www.viam-works.ru/ru/articles?art_id=12)
  10. Il'in A.A., Kolachev B.A., Pol'kin I.S. *Titanovye splavy. Sostav, struktura, svoistva* (Titanium alloys. Composition, structure, properties), Moscow, VILS-MATI, 2009, 520 p.
  11. Grushin I.A., Mamontova N.A., Kuryshev E.A. *Materialy Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii "XXXVIII Gagarinskii chteniya" (Moscow, 10-14 April 2012)*, Moscow, MATI, 2012, vol. 1, pp. 28-29.
  12. Pigalova E.A., Abramova A.A., Kurnikov N.A. Plasma welding application prospects while airplanes of mig brand production as one of the methods to reduce welding deformations. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 172-183.
  13. Redchits V.V., Frolov V.A., Kazakov V.A., Lukin V.I. *Poristost' pri svarke tsvetnykh metallov* (Porosity in non-ferrous metals welding), Moscow, Tekhnologiya mashinostroeniya, 2002, 448 p.
  14. Murav'ev V.I. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2005, no. 7, pp. 30-37.
  15. *Elektronno-luchevaya svarka*, 2013. URL: <https://stcpaton.com/rus/equipment/ebw04>
  16. Braverman V.Ya., Belozertsev V.S., Litvinov V.P., Rozanov O.V. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva*, 2008, no. 2(19), pp. 148-151.
  17. Uspenskii N.V., Bogdanov V.V. *Materialy VII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (11-13 November 2013) "Sovremennye problemy mashinostroeniya"*, Tomsk, Natsional'nyi issledovatel'skii Tomskii politekhnicheskii universitet, 2013, pp. 219-221.
  18. Seidgazov R.D. *Mezhdunarodnaya konferentsiya "Elektronno-luchevaya svarka i smezhnye tekhnologii" (17-20 November 2015)*, Moscow, MEI, 2015, pp. 554-565.
  19. Murav'ev V.I., Bakhmatov P.V. *Svarka i diagnostika*, 2016, no. 3, pp. 11-16.
  20. Tong H., Giedt W.H. A Dynamic Interpretation of Electron Beam Welding. *Welding Journal*, 1970, vol. 49, no. 6, pp. 259-266.
  21. Batanov V.A., Fedorov V.B. *Pis'ma v ZhETF*, 1973, vol. 17, no. 7, pp. 348-351.
  22. Andrews J.G., Atthey D.R. Hydrodynamic limit to penetration of a material by a high-power beam. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1976, vol. 9, no. 15, pp. 2181-2194. DOI: 10.1088/0022-3727/9/15/009
  23. Klemens P.G. J. Heat balance and flow conditions for electron beam and laser welding. *Journal of Applied Physics*, 1976, vol. 47, p. 2165. DOI: 10.1063/1.322866
  24. Saidgazov R.D., Senatorov Yu.M. *Kvantovaya elektronika*, 1988, vol. 15, no. 3, pp. 622-624.
  25. Grigor'ev V.V., Murav'ev V.I., Bakhmatov P.V. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2019, no. 4, pp. 36-42.
  26. Mladenov G.M., Trushnikov D.N., Belen'kii V.Ya., Koleva E.G. *Elektronno-luchevaya svarka* (Electron beam welding), Perm, Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2014, 374 p.
  27. Grigor'ev V.V., Murav'ev V.I., Bakhmatov P.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*, 2019, no. 1(706), pp. 20-28.