

УДК 621.791.722

doi: 10.18698/0536-1044-2020-3-23-34

Исследование влияния дефектов электронно-лучевой сварки на процессы разрушения титановых сплавов

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

Комсомольский-на-Амуре государственный университет

A Study of the Influence of Electron Beam Welding Defects on Fracture Processes in Titanium Alloys

V.V. Grigoriev, V.I. Muravyev, P.V. Bakhmatov

Komsomolsk-na-Amure State University

Изучению возникновения пор при сварке титана посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных ученых, но о причинах и условиях порообразования до настоящего времени не было единого мнения. Обзор достижений в области исследований порообразования показал, что проблему появления макропор, достигающих 0,1 мм, исследовали А.А. Ерохин, В.В. Фролов, Г.Д. Никифоров, С.М. Гуревич, В.Н. Замков, В.И. Муравьев, Б.И. Долотов, П.В. Бахматов и др. Однако современные рентгеновские аппараты при технологическом контроле неразъемных соединений, созданных электронно-лучевой сваркой, фиксируют специфический дефект (так называемые темные полосы), затрудняющий оценку качества неразъемных соединений ввиду его отсутствия в нормативно-технической документации. Выявление причин возникновения специфических дефектов и их влияние на свойства конструкций, выполняемых электронно-лучевой сваркой титановых сплавов, является актуальной задачей. Приведены результаты исследований влияния специфических дефектов электронно-лучевой сварки титановых сплавов ВТ20 и ВТ23 на характер разрушения (при статических и динамических нагружениях) и изменение механических свойств сварных соединений. Установлено, что специфические дефекты, образующиеся при электронно-лучевой сварке, существенно влияют на прочностные свойства сварных соединений и стадийность их разрушения. Определено, что наличие дефектов сварки непроваров, остаточных напряжений и пор в зоне сплавления, выплесков без образования соединения и др. способствуют появлению субмикротрещин, которые приводят к хрупкому разрушению сварных соединений. Наличие специфических дефектов в неразъемных соединениях, выполненных электронно-лучевой сваркой, ведет к пониженным прочностным свойствам и практически к полному отсутствию таких характеристик, как удлинение и сужение. Обнаружено, что термическая обработка улучшает качество сварных соединений.

Ключевые слова: титановые сплавы, электронно-лучевая сварка, специфические дефекты, структура и свойства

The appearance of pores when welding titanium has been extensively studied by domestic and foreign researchers, but there has been no consensus on the causes and conditions of pore formation to date. An overview of advances in the studies of pore formation showed that the problem of formation of the macropores, reaching 0.1 mm was investigated by

A.A. Erokhin, V.V. Frolov, G.D. Nikiforov, S.M. Gurevich, V.N. Locks, V.I. Muravyev, B.I. Dolotov, P.V. Bakhmatov et al. The advent of modern x-ray machines in the technological control of permanent joints made by electron beam welding has enabled researchers to detect a specific defect — the so-called dark bands, which make it difficult to assess the quality of permanent connections due to the absence of this defect in the normative and technical documentation. Determining the causes of specific defects and their effect on the properties of titanium alloy structures made by electron beam welding is an important task. This paper presents the results of studies investigating the effect of specific defects of electron beam welding of titanium alloys VT20, VT23 on the nature of destruction under static and dynamic loads and changes in the mechanical properties of the welded joints. It is established that specific defects occurred during electron beam welding have a significant impact on the strength properties of welded joints, as well as on the stages of their destruction. It is determined that the presence of such welding defects as lack of penetration, residual stresses and pores in the fusion zone, expulsion without bonding, etc. contribute to the formation of sub-micropores that lead to brittle destruction of welded joints. The presence of specific defects in permanent joints made by electron beam welding leads to decreased strength properties and to nearly complete absence of such characteristics as elongation and contraction. It is established that heat treatment improves the quality of welded joints.

Keywords: titanium alloys, electron beam welding, specific defects, structure and properties

Известно [1–3], что разница скорости теплоотвода и диффузионных процессов при сварке плавлением металлов приводит к зональной и диффузионной ликвации в металле шва, к структурным изменениям околошовной зоны, а также к появлению пористости, значительных сварочных напряжений, трещин и других дефектов.

При электронно-лучевой сварке (ЭЛС) металлов наряду с указанными дефектами возникают корневые пустоты [4–6], неравномерное проплавление корня шва, глубокие кратеры и крупные раковины [7–10]. В работе [11] обнаружены дефекты при рентгеноскопии на рентгенотелевизионном комплексе «Филин» — так называемые темные полосы, переходящие в субмикropоры, а также несплавления при ЭЛС титановых сплавов VT20 и VT23.

Эволюция изменения напряжений в процессе полного цикла сварки и охлаждения показаны в трудах [12, 13], максимум которой связан с фазовыми превращениями при охлаждении. Пористость сварных швов титановых сплавов — один из основных дефектов [14]. Возможными причинами их образования могут быть не только готовые зародыши — замкнутые полости, заполненные загрязнениями, перед фронтом расплавленной ванны [2], и закатанные объемы в процессе механической обработки, зачистки металлическими щетками, опескоструивании [15], но и недостаточная температура основного металла, которая при-

водит к частичному плавлению по границам зерен вследствие различия диффузионных процессов на поверхности границ и внутри зерна, вызванных непроваром [16].

Цель работы — выявить влияние специфических дефектов ЭЛС на процессы разрушения неразъемных соединений титановых сплавов при статических и динамических испытаниях.

Методика проведения исследований. Электронно-лучевую сварку заготовок из сплавов VT20 и VT23 проводили на электронно-лучевых установках (ЭЛУ) КЛ-144 и 30Е3000 при режимах, приведенных в табл. 1, где I_f — ток фокусировки; I_w — ток сварки; F — расстояние от торца пушки до детали; $v_{св}$ — скорость сварки. Выбор режимов ЭЛС указанных заготовок основан на результатах аналитической оценки появления дефектов в процессе серийного производства сварных конструкций [11].

После ЭЛС из темплетов вырезали образцы, используя лентопильный автоматический станок фирмы Danobat с охлаждающей эмульсией. Образцы глубиной 2...14 мм, вырезанные в начале, середине и конце сварки, подвергали радиографическому контролю на установке ЭКСТРАВОЛЬТ-225. Выявляемость дефектов составляла 0,1 мм.

Статические испытания выполняли на разрывной машине Shimadzu AG-X, динамические испытания — на маятниковом копре JBW-300. Характер разрушения, распределение хими-

Таблица 1

Режимы ЭЛС темплетов из сплавов ВТ20 и ВТ23

Тип ЭЛУ	Марка сплава	Протяженность шва, мм	Толщина заготовки, мм	Режимы сварки			
				I_w , МА	I_f , МА	F , мм	$v_{св}$, мм/с
30Е3000	ВТ23	130	50 ^{*1}	415	600	200	7
КЛ-144	ВТ23	93	70 ²	470			10
	ВТ20	60	60 ²	470			10
	ВТ20	123	20 ²	230			15
	ВТ20	130	30 ³	320			16
	ВТ23	130	60 ³	420			10

Примечания:
 * С использованием подкладной пластины из ВТ23 толщиной 10 мм.
¹ Без подготовки стыкуемых кромок под сварку.
² Обезжиривание ацетоном, обезвоживание спиртом.
³ Форсированная механическая обработка стыкуемых кромок.

ческих элементов и исследования макро- и микроструктуры проводили на растровом электронном микроскопе Hitachi S3400N. Термическую обработку сварных темплетов из сплава ВТ23 осуществляли в вакуумной печи УВН-1500 при следующем режиме: отжиг — 750 °С, выдержка — 30 мин; старение — 500 °С, выдержка — 10 ч.

Результаты исследований и их обсуждение. Визуально-оптическими исследованиями выявлены утяжины и углубления, характерные для ЭЛС титановых сплавов.

Как известно [17–19], при ЭЛС плавка металла лучом происходит по передней стенке углубления — кратера, которая сопровождается интенсивным испарением материала с образо-

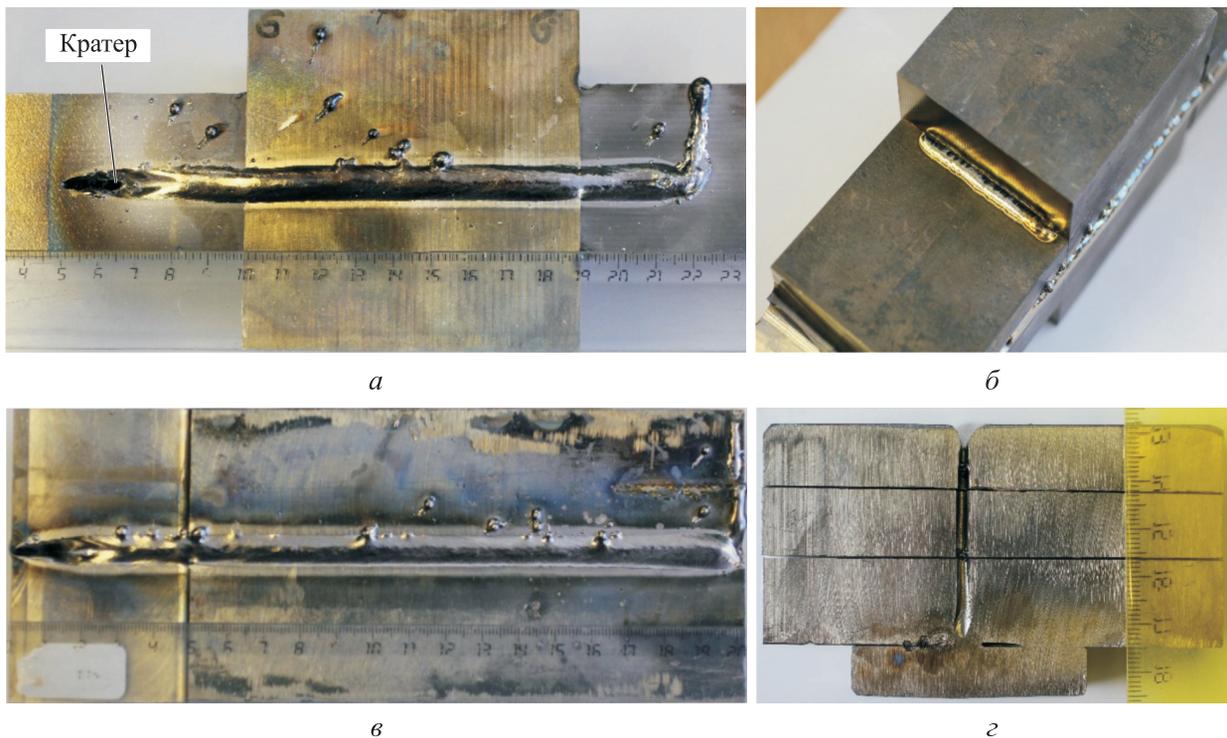


Рис. 1. Внешний вид темплетов, выполненных ЭЛС:

а — темплет из сплава ВТ23 толщиной $h = 70$ мм; б — прихватка аргодуговой электросваркой выводной планки; в — темплет из сплава ВТ20 ($\delta = 60$ мм) без выводных планок; з — темплет из сплава ВТ23 ($\delta = 50$ мм) с подкладной пластиной, раскрытый кратер на выходе электронного луча

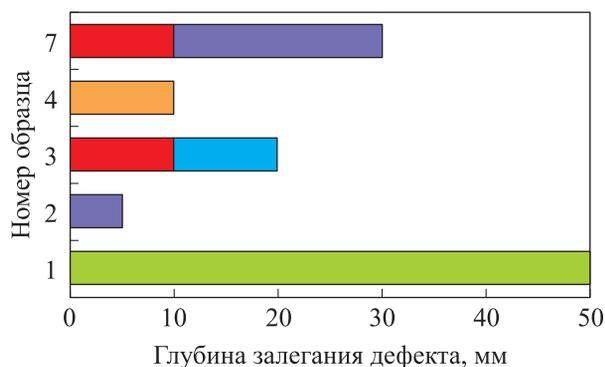


Рис. 2. Гистограмма залегания дефектов по толщине сварного шва ($h = 50$ мм) образцов, полученная с помощью радиографического контроля:
 ■ — темные полосы; ■ — цепочки пор;
 ■ — несплавление; ■ — кратер;
 ■ — скопление пор

ванием парогазовой плазмы. Возникновению сварочной ванны под действием давления парогазовой плазмы сопутствует прогибание ее поверхности: расплавленный металл сдвигается по боковым стенкам к задней стенке, и в расплаве формируется глубокий и узкий канал проплавления — кратер, жидкие стенки которого удерживаются давлением паров. На сварных заготовках обнаружен такой канал в зоне завершения процесса сварки (рис. 1).

Результат анализа рентгенограмм темплета из сплава ВТ23 толщиной $h = 50$ мм, выполненного на установке 30Е3000 без подготовки стыкуемых кромок (рис. 2), показал, что дефекты наблюдаются практически по всей протяженности сварного соединения. В зоне завершения процесса ЭЛС фиксируется дефект в виде кратера (образец № 1), далее к началу сварки — скопление пор (образец № 2), темные полосы, переходящие в цепочки пор (образец № 3), несплавление (образец № 4), темные полосы и скопления пор (образец № 7).

При этом обнаружено появление темных полос на рентгенограммах образцов с грубой механически обработанной поверхностью, шероховатость Ra которой составляла более 12,5 мкм.

По результатам радиографического контроля сварных швов с форсированной механической обработкой стыкуемых кромок темплетов толщиной $h = 30$ и 60 мм из сплавов ВТ20 и ВТ23 обнаружена единичная пора диаметром 0,3 мм. В остальных рентгенограммах сварных соединений наличие темных полос и иных специфических дефектов не выявлено.

При статических испытаниях на соответствующее растяжение и при динамических испытаниях на ударный изгиб разрушение сварных образцов из титановых сплавов происходит преимущественно в околошовной зоне — зоне сплавления (рис. 3). По характеру разрушения отвечают основным концепциям физической мезамеханически пластической деформации и разрушения твердых тел. Фрагментация материала на мезоуровне в виде полос скольжения (линий Чернова — Людерса) из-за возможного перемещения структурных элементов разного масштаба (субзерен, зерен, их конгломератов, протяженных блоков материала), особенно четко проявлена в зоне локализованной шейки у разрывных образцов и локализованном утонении ударных образцов (см. рис. 3).

Как известно [20], диаграммы деформации материалов при статических испытаниях на растяжение характеризуются различными стадиями: упругой деформацией от начала координат до предела текучести $\sigma_{0,2}$, равномерной деформацией от предела текучести до предела прочности σ_b и сосредоточенной деформацией от предела прочности до разрушения.

Как видно из рис. 4, диаграммы деформации сварных образцов № 1–12 из титановых сплавов ВТ20 и ВТ23 зависят от толщины темплетов, а именно от режимов сварки, и различаются не только по значению деформации Δ (от 0,01 до 30 %), но и по характеру изменения кривых напряжений при растяжении σ (от 781 до 972 МПа для сплава ВТ20 и от 883 до 1051 МПа для сплава ВТ23). На рис. 4 номера кривых соответствуют номерам образцов.

Характер деформации и разрушения сварных образцов определяется видом стадийности процесса деформации и разрушения. На стадии упругой деформации разрушился образец № 12 (первая группа), на стадии равномерной деформации, близкой к упругой, — образцы № 6–9, 17, 20 (вторая группа), на стадии равномерной деформации, близкой к сосредоточенной, — образцы № 13–15, 19 (третья группа). Все стадии при разрушении выдержали образцы № 1–5, 10, 11, 16, 18, 21 (четвертая группа).

Механические свойства сварных образцов из титановых сплавов при различных режимах ЭЛС и термической обработки приведены в табл. 2, где δ и ψ — относительные удлинение и сужение; KC , KCU — ударные вязкости; α — угол загиба.

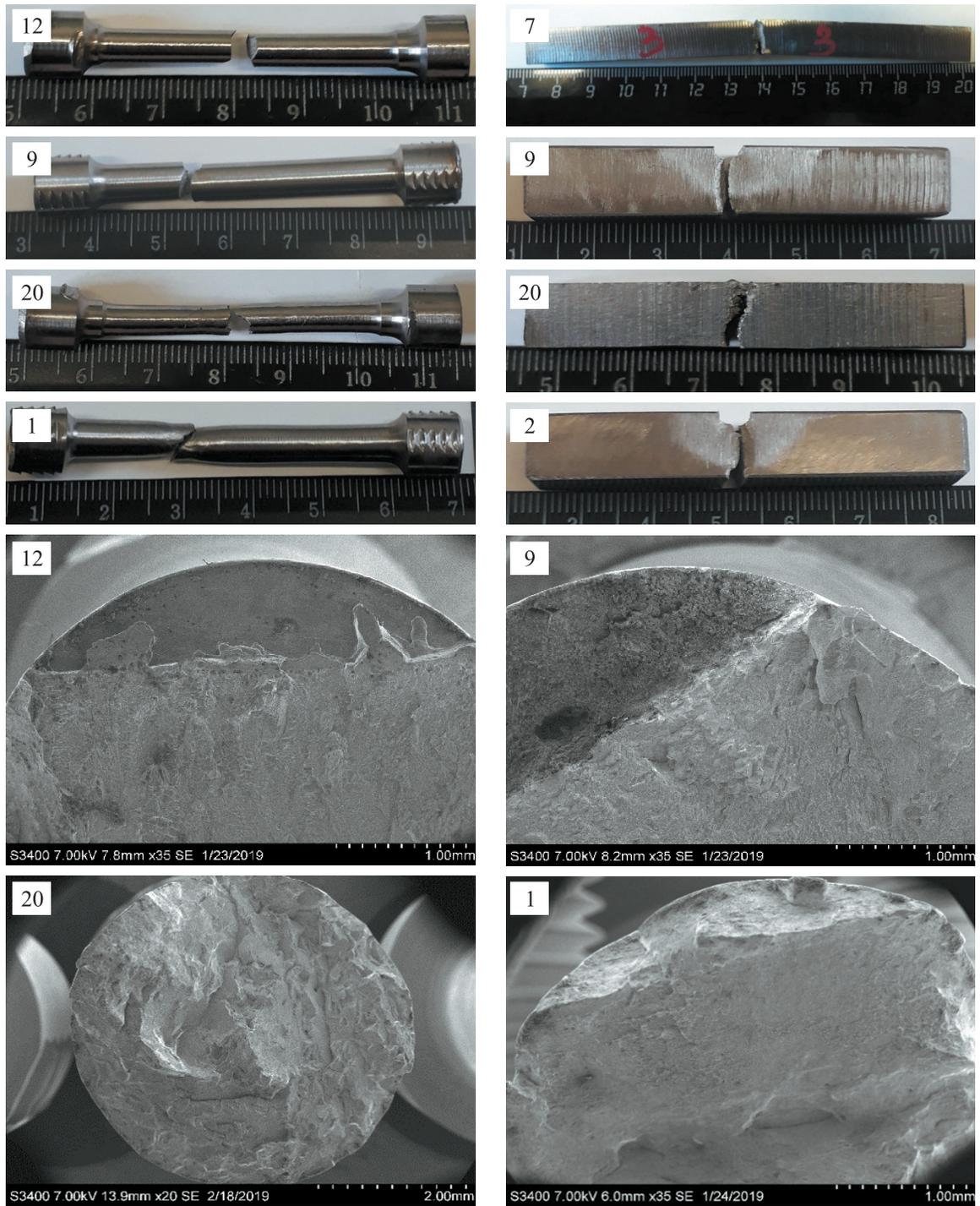


Рис. 3. Вид характерных разрушений образцов № 12, 7, 9, 1, 2 из сплава ВТ20 и № 20 из сплава ВТ23

В работе [21] наряду с дислокационной теорией пластической деформации скольжением и двойникованием обоснован релаксационный характер этого параметра с перераспределением напряжений и снижением их общего уровня вследствие сдвиговых процессов, которые активируют смежные объемы с зарождением новых очагов, определяя в общем автокаталити-

ческий характер, когда конечный результат возвращает систему в исходное состояние с последующим повторением аналогичных циклов.

Исходя из этого можно предположить, что для образцов, разрушившихся на стадии упругой деформации и близкой к ней (образцы первых трех групп), не произошло в достаточной степени релаксации напряжений и

возврата объема накопленной энергии в исходное состояние.

Наличие дефектов сварки непроваров, остаточных напряжений и пор в зоне сплавления, выплесков без образования соединения и др. способствовало возникновению субмикротрещин, создало условия для разрушения под действием сил Пайерлса — Набарро $K = 2\sqrt{l/r}$ (l — длина трещины, мм; r — радиус вершины трещины, мм), превысивших силы межатомных связей.

Сдвиговые процессы привели к катастрофическому хрупкому разрушению, о чем свидетельствует отсутствие дополнительной деформации образцов с изменением размеров (см. рис. 3).

Диссипация энергии при образовании поверхности разрушения в процессе испытания образцов на статическое растяжение приводит к существенному различию строения излома в зависимости от режимов технологических процессов сварки.

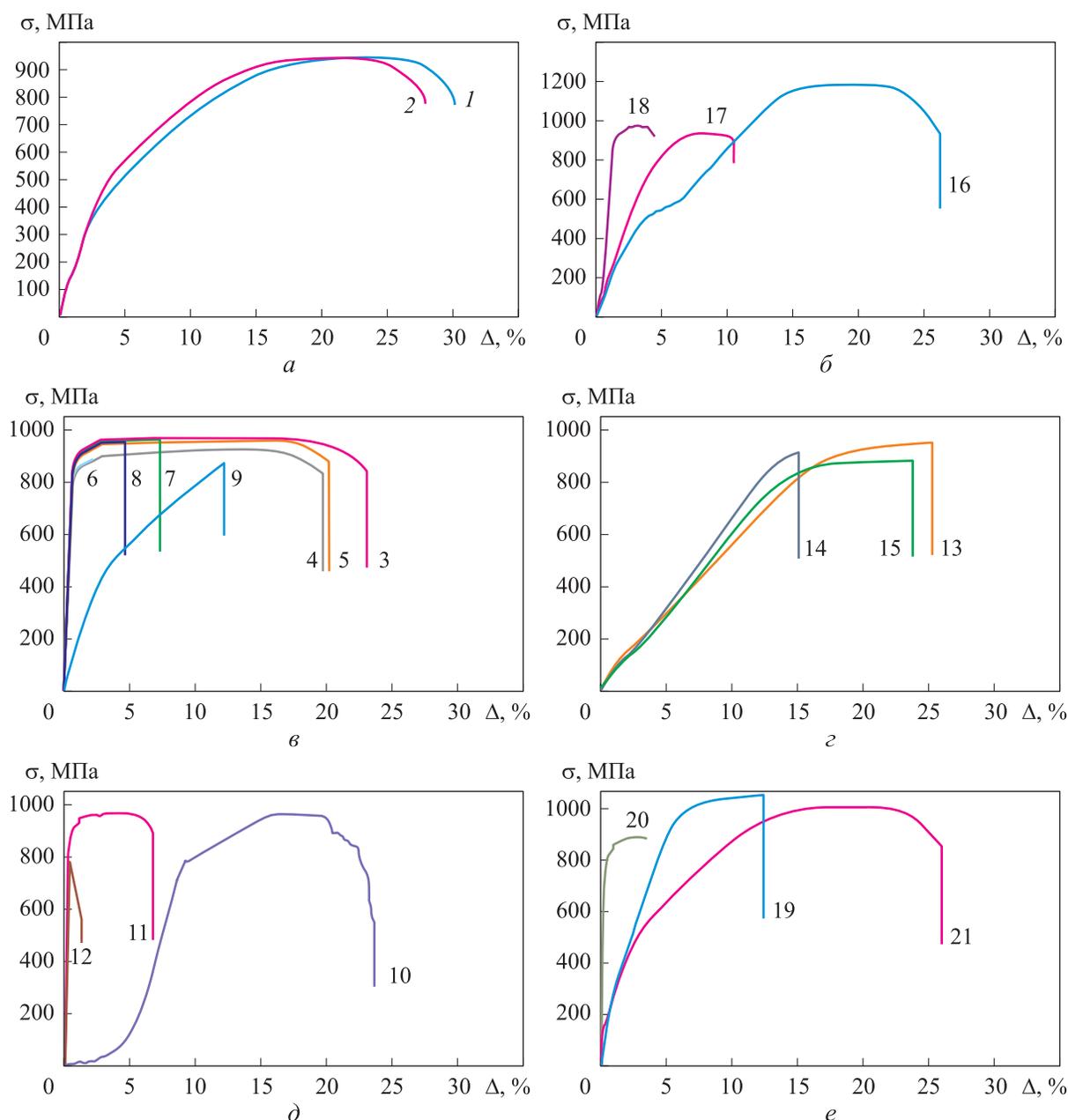


Рис. 4. Диаграммы деформации сварных образцов № 1–21 из титановых сплавов ВТ20 (слева) и ВТ23 (справа), выполненных ЭЛС на ЭЛУ КЛ-144 (а–д) и 30Е3000 (е) при различной толщине темплетов: а — $h = 20$ мм; б — $h = 70$ мм; в — $h = 30$ мм; г, д — $h = 60$ мм; е — $h = 50$ мм

Таблица 2

Механические свойства сварных образцов из титановых сплавов при различных режимах ЭЛС и термической обработки

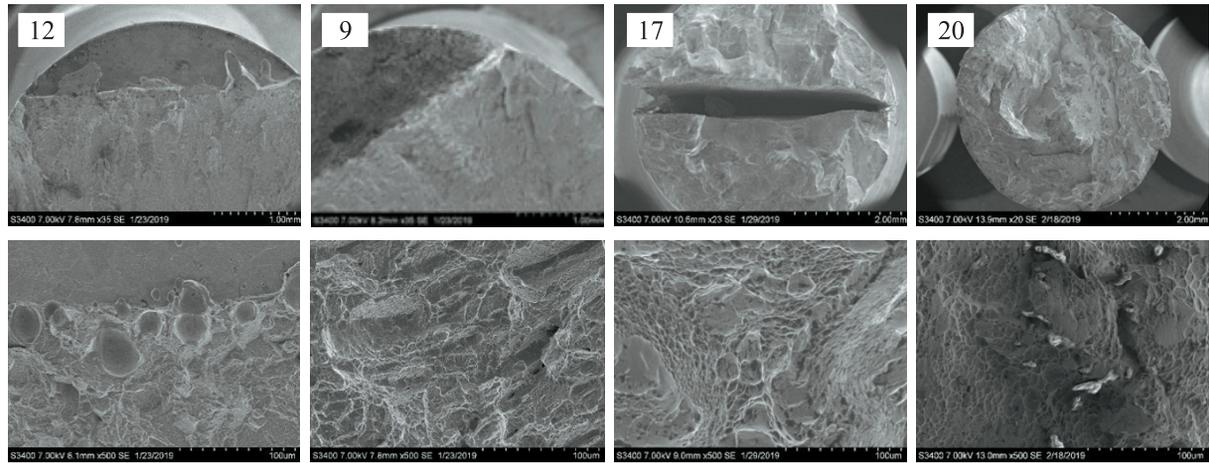
Тип ЭЛУ	Номер образца	Свойства образца после испытаний							Марка сплава, данные о темплете	
		на статическое растяжение				на ударный изгиб				
		σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	КС, Дж/см ²	КСУ, Дж/см ²	α , град		
КЛ-144	1	944	405	41,00	22,00	–	36	15	BT20, темплет, $h = 20$ мм	
	2	943	472	46,00	18,00	–	40	4		
	3 ¹	972	885	3,80	16,80	–	262	38	BT20, темплет, $h = 30$ мм	
	4	923	830	2,80	21,10	–	259	36		
	5	965	863	2,70	15,30	–	242	32		
	6	888	827	1,90	7,40	–	91	11		
	7	963	856	0,60	2,10	–	66	8		
	8	959	876	1,60	6,00	–	53	8		
	9	875	440	–	–	–	26	–	BT20, темплет, $h = 60$ мм	
	10	972	740	28,4	28,5	–	–	5		
	11	965	823	26,2	26,5	–	24	3		
	12	781	–	0,60	0,39	–	–	4	BT23 темплет, $h = 60$ мм	
	13 ¹	951	779	0,31	2,70	–	132	20		
	14	912	887	0,10	2,60	–	68	9		
	15	883	743	0,60	4,80	–	140	25	BT23, темплет, $h = 70$ мм	
	16 ²	1186	466	22,90	20,40	–	40	3		
	17 ³	935	651	16,30	6,60	–	32	4		
	18	989	919	31,0	19,40	–	17	3		
30E3000	19	1051	852	2,0	4,10	30	–	7	BT23, темплет, $h = 50$ мм	
	20	888	754	0,30	2,80	37	–	6		
	21 ³	1071	300	29,20	8,50	–	39	5		
	22 ³	В зоне окончания сварки			Усиление	27	–	–		
	23 ³				Корень	58	–	–		
	24	–	–	–	–	–	–	4		BT23, подкладная пластина в корне шва, $h = 10$
	25	–	–	–	–	–	–	3		
	26	–	–	–	–	–	–	8		

Примечания:
¹ Основной металл.
² Термически обработанный основной металл.
³ Термически обработанный сварной образец.

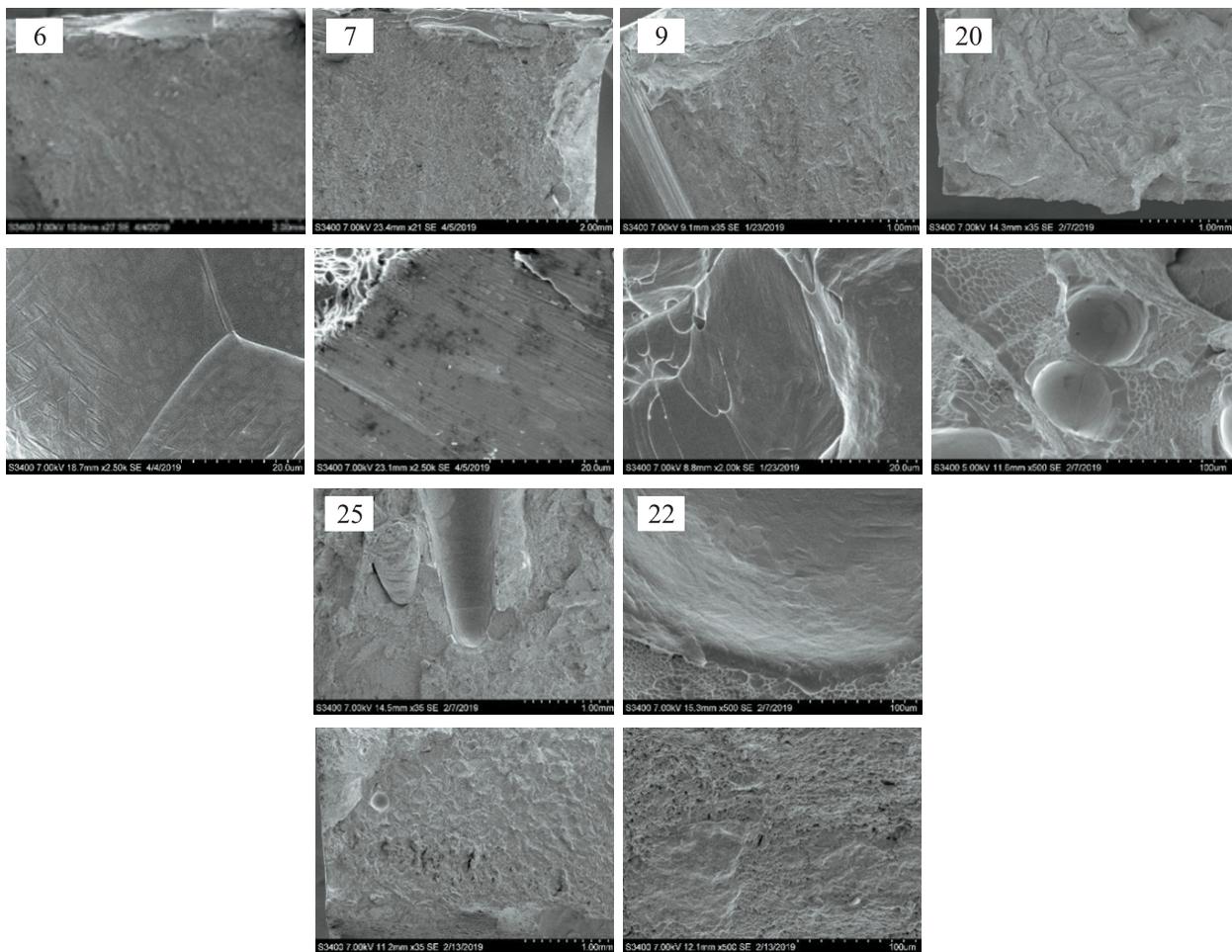
На стадии упругой деформации и близкой к ней разрушение начиналось от концентратора напряжений несплавления — микротрещины (у образцов № 6–9, 12, 17, 20), цепочек пор и слипания в зоне плавления (у образцов № 13–15, 19). У образцов не наблюдалось деформации в

зоне начала разрушения, и плоскость разрушения перпендикулярна прилагаемой нагрузке (см. рис. 3 и 5).

В изломе фиксировались зоны непровара, переходящие в непрерывную цепочку пор (у образца № 12) и микропор (у образца № 9),



a



б

Рис. 5. Фрактография изломов образцов после статического растяжения (а) и ударного изгиба (б)

слипание выплесков (у образца № 20), участки расплавленной исходной поверхности (у образца № 7) и внутренних полостей (у образца № 17). Наряду с указанными дефектами в изломах об-

разовались ямки, напоминающие пчелиные соты, что характерно для вязкого разрушения.

Особенностью разрушения образцов на стадиях равномерной и сосредоточенной дефор-

маций является то, что вначале оно происходило под углом 45 и 25° (у образцов третьей и четвертой групп (см. табл. 2, рис. 3 и 5)) к прилегающей нагрузке, и окончательная плоскость разрушения перпендикулярна этой нагрузке. При этом пластическая деформация у образцов третьей и четвертой групп значительно выше, чем у образцов первой и второй групп.

Элементы макрорельефа изломов практически у всех образцов наряду с дефектами (такими как зоны непроваров, поры, выплески без образования соединения, слипание, нерасплавленная исходная поверхность и др.) характеризуют смешанное строение плоскости скольжения (со сколами), присущее хрупкому разрушению, и ямочное, соответствующее вязкому разрушению (см. рис. 5).

Выводы

1. У образца № 12 первой группы наблюдались цепочки микропористости, переходящей у зоны непровара в выплеск металла.

2. У образцов второй и третьей групп преимущественно фиксировались несплавления, цепочки пор и микротрещины, а также плавление по границам зерен с образованием субмикропор (особенно у образца № 9).

3. У образцов четвертой группы замечены нанопоры диаметром 50 нм и менее.

4. Образцы третьей и четвертой групп имели удовлетворительные механические свойства. В этой группе необходимо отметить образцы № 16, 19, 21, прошедшие термическую обработку. Результаты испытаний механических свойств показали удовлетворительную сходимость механических свойств сварных образцов (№ 19 и 21) и образца основного металла (№ 16).

5. Наличие дефектов в образцах, выполненных ЭЛС, первой группы (№ 12) приводит к снижению прочности и практически к полному отсутствию таких характеристик, как удлинение и сужение. У всех образцов второй группы выявлено значительное снижение удлинения и сужения, а у некоторых (№ 6, 9, 20) — уменьшение прочности.

Литература

- [1] Редчиц В.В., Фролов В.А., Казаков В.А., Лукин В.И. *Пористость при сварке цветных металлов*. Москва, Технология машиностроения, 2002. 488 с.
- [2] Муравьев В.И. Проблемы порообразования в сварных швах титановых сплавов. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2005, № 7, с. 31–37.
- [3] Муравьев В.И., Бахматов П.В. *Обеспечение надежности конструкций из титановых сплавов*. Москва, Технология машиностроения, 2002. 448 с.
- [4] Васильев А.А., Ерофеев В.А., Судник В.А. Теория формирования корневых пустот при электронно-лучевой сварке. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2015, вып. 6, ч. 2, с. 43–51.
- [5] Папуша А.Г., Андреев А.Н. Анализ дефектов в сварных соединениях, выполненных электронно-лучевой сваркой. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Матер. XIII Междунар. науч.-практ. конф.*, Красноярск, 10–14 апреля 2017, Красноярск, СибГУ им. М.Ф. Решетнёва, 2017, т. 1, с. 424–426.
- [6] Успенский Н.В., Богданов В.В. Предупреждение появления корневых дефектов при электронно-лучевой сварке. *Современные проблемы машиностроения. Сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф.*, Томск, 11–13 ноября 2013, Томск, ТПУ, 2013, с. 219–221.
- [7] Башенко В.В., Вихман В.Б. Состояние и перспективы развития электронно-лучевой сварки. *Технологии и оборудование электронно-лучевой сварки. Матер. I Санкт-Петербургской Междунар. науч.-техн. конф.*, 19–22 мая 2008, Санкт-Петербург, ВиТ-Принт, 2008, с. 5–21.
- [8] Вихман В.Б., Козлов А.Н., Маслов М.А. Преимущества и недостатки электронного луча при сварке по сравнению с лазером и электрической дугой. *Докл. III Санкт-Петербургской Междунар. науч.-техн. конф.*, 24–26 июня 2014, Санкт-Петербург, Изд-во Политехн. ун-та, 2014, с. 4–19.
- [9] Masny H. Multi-beam technology in electron beam welding. *ISFF — Welding and Joining Institute*, 2006, vol. 34, pp. 1–4.

- [10] Zenker R. Modern thermal electron beam process — research results and industrial application. *Metallurgia Italiana*, 2009, iss. 4, pp. 1–8.
- [11] 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.
- [12] Горынин И.В., Чечулин Б.Б. *Титан в машиностроении*. Москва, Машиностроение, 1990. 400 с.
- [13] Долотов Б.И., Муравьев В.И., Марьин Б.Н., Иванов Ю.Л., Макаров К.А. Перемешивание металла в ванне при сварке погруженным вольфрамовым электродом. *Сварочное производство*, 1998, № 2, с. 15–16.
- [14] Муравьев В.И., Бахматов П.В., Плетнев Н.О., Дебеляк А.А. Влияние напряженного состояния на структуру и свойства при сварке конструкций из сталей и сплавов. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*, 2016, т. 59, № 4, с. 251–255.
- [15] 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.
- [16] Долотов Б.И. *Сварка погруженным вольфрамовым электродом*. Москва, Машиностроение, 2004. 208 с.
- [17] Назаренко О.К., Истомина Е.И., Локшин В.Е. *Электронно-лучевая сварка*. Харьков, Машиностроение, 1985. 127 с.
- [18] Трушников Б.Н., Саломатова Е.С., Беленький В.Я., Колева Е.Г., Младенов Г.М. О температуре в канале проплавления при электронно-лучевой сварке. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2013, т. 15, № 6(2), с. 505–511.
- [19] Варушкин Д.Н., Трушников Д.Н., Беленький В.Я., Пермяков Г.Л., Сивков А.А., Метелев А.В. Модель формирования сигнала для контроля сквозного проплавления при электронно-лучевой сварке. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2015, вып. 6, ч. 2, с. 244–251.
- [20] Муравьев В.И., Бахматов П.В., Лончаков С.З., Фролов А.В. Особенности деформации и разрушения упрочненных высокоуглеродистых сталей после обработки в температурных условиях фазового превращения и превращения. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*, 2019, т. 62, № 1, с. 62–72.
- [21] Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А. *Физика макролокализации пластического течения*. Новосибирск, Наука, 2008. 328 с.

References

- [1] Redchits V.V., Frolov V.A., Kazakov V.A., Lukin V.I. *Poristost' pri svarke tsvetnykh metallov* [Porosity when welding non-ferrous metals]. Moscow, Tekhnologiya mashinostroyeniya publ., 2002. 488 p.
- [2] Murav'yev V.I. Problems of pore formation in welds of titanium alloys. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*, 2005, no. 7, pp. 31–37 (in Russ.).
- [3] Murav'yev V.I., Bakhmatov P.V. *Obespecheniye nadezhnosti konstruktsey iz titanovykh splavov* [Ensuring the reliability of titanium alloy structures]. Moscow, Tekhnologiya mashinostroyeniya publ., 2002. 448 p.
- [4] Vasil'yev A.A., Erofeev V.A., Sudnik V.A. Theory formation of the root cavities at electron beam welding. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki*, 2015, iss. 6, pt. 2, pp. 43–51 (in Russ.).
- [5] Papusha A.G., Andreyev A.N. Analysis of defects in weld connections implemented by electron-beam welding. *Aktual'nyye problemy aviatsii i kosmonavtiki. Mater. XIII Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf.* [Actual problems of aviation and astronautics. Materials of the XIII International Scientific and Practical Conference]. 2017, Krasnoyarsk, vol. 1, pp. 424–426.
- [6] Uspenskiy N.V., Bogdanov V.V. Prevention of root defects during electron beam welding. *Sovremennyye problemy mashinostroyeniya. Sb. nauch. tr. VII Mezhdunar. nauch.-tekhn.*

- konf.* [Modern problems of mechanical engineering. Collection of scientific papers VII International Scientific and Technical Conference]. 2013, pp. 219–221.
- [7] Bashenko V.V., Vikhman V.B. Status and development prospects of electron beam welding. *Tekhnologii i oborudovaniye elektronno-luchevoy svarki. Mater. I Sankt-Peterburgskoy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Technologies and equipment for electron beam welding. Materials of the 1st St. Petersburg International Scientific and Technical Conference]. Sankt-Petersburg, 2008, pp. 5–21.
- [8] Vikhman V.B., Kozlov A.N., Maslov M.A. Advantages and disadvantages of the electron beam during welding compared to a laser and an electric arc. *Doklady III Sankt-Peterburgskoy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Reports of the III St. Petersburg International Scientific and Technical Conference]. Sankt-Petersburg, 2014, pp. 4–19.
- [9] Masny H. Multi-beam technology in electron beam welding. *ISFF — Welding and Joining Institute*, 2006, vol. 34, pp. 1–4.
- [10] Zenker R. Modern thermal electron beam process — research results and industrial application. *Metallurgia Italiana*, 2009, iss. 4, pp. 1–8.
- [11] Grigor'yev V.V., Murav'yev V.I., Bakhmatov P.V. The study of the specific defects occurrence at electron-beam welding (EBW) of titanium alloys. *Svarochnoye proizvodstvo*, 2019, no. 4, pp. 36–42 (in Russ.).
- [12] Gorynin I.V., Chechulin B.B. *Titan v mashinostroyenii* [Titanium in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1990. 400 p.
- [13] Dolotov B.I., Murav'yev V.I., Mar'in B.N., Ivanov Yu.L., Makarov K.A. Mixing metal in a bath when welding with a dipped tungsten electrode. *Svarochnoye proizvodstvo*, 1998, no. 2, pp. 15–16 (in Russ.).
- [14] Murav'yev V.I., Bakhmatov P.V., Pletnev N.O., Debelyak A.A. Effect of stress state on the structure and properties of constructions of steels and alloys at welding. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2016, vol. 59, no. 4, pp. 251–255 (in Russ.).
- [15] Murav'yev V.I., Bakhmatov P.V. Dominant factors of the formation of the interface, causing capillary condensation of contaminants and defective metal of the weld metal of titanium structures. *Svarka i diagnostika*, 2016, no. 3, pp. 11–16 (in Russ.).
- [16] Dolotov B.I. *Svarka pogrzhennym vol'framovym elektrodom* [Submerged Tungsten Welding]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 2004. 208 p.
- [17] Nazarenko O.K., Istomin E.I., Lokshin V.E. *Elektronno-luchevaya svarka* [Electron beam welding]. Kharkov, Mashinostroyeniye publ., 1985. 127 p.
- [18] Trushnikov B.N., Salomatova E.S., Belen'kiy V.Ya., Koleva E.G., Mladenov G.M. About the temperature in foundering channel at electron beam welding. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2013, vol. 15, no. 6(2), pp. 505–511 (in Russ.).
- [19] Varushkin D.N., Trushnikov D.N., Belen'kiy V.Ya., Permyakov G.L., Sivkov A.A., Metel'ev A.V. Numerical model of signal formation for full penetration mode control at electron beam welding. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki*, 2015, iss. 6, pt. 2, pp. 244–251 (in Russ.).
- [20] Murav'yev V.I., Bakhmatov P.V., Lonchakov S.Z., Frolov A.V. Deformation and fracture of strengthened high-carbon steel after treatment in temperature conditions of phase pre-transformation and transformation. *Steel in Translation*, 2019, vol. 62, no. 1, pp. 62–72 (in Russ.).
- [21] Zuyev L.B., Danilov V.I., Barannikova S.A. *Fizika makrolokalizatsii plasticheskogo techeniya* [Physics of Macrolocalization of Plastic Flow]. Novosibirsk, Nauka publ., 2008. 328 p.

Статья поступила в редакцию 06.11.2019

Информация об авторах

ГРИГОРЬЕВ Владимир Владимирович — заведующий лабораториями факультета машиностроительных и химических технологий. Комсомольский-на-Амуре государственный университет (681013, Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 27, e-mail: grigorev.vlv@gmail.com).

МУРАВЬЁВ Василий Илларионович — доктор технических наук, профессор-консультант кафедры «Технология сварочного и металлургического производства». Комсомольский-на-Амуре государственный университет (681013, Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация, ул. Ленина д. 27, e-mail: vmuravyev@mail.ru).

БАХМАТОВ Павел Вячеславович — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология сварочного и металлургического производства». Комсомольский-на-Амуре государственный университет (681013, Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 27, e-mail: mim@knastu.ru).

Information about the authors

GRIGORIEV Vladimir Vladimirovich — Head of laboratories at the faculty of mechanical engineering and chemical technologies. Komsomolsk-na-Amure State University (681013, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 27, e-mail: grigorev.vlv@gmail.com).

MURAVYEV Vasily Illarionovich — Doctor of Science (Eng.), Consulting Professor, Department of welding and metallurgical production technology. Komsomolsk-na-Amure State University (681013, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 27, e-mail: vmuravyev@mail.ru).

BAKHMATOV Pavel Vyacheslavovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Head of Department of Welding and metallurgical production technology. Komsomolsk-na-Amure State University (681013, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 27, e-mail: mim@knastu.ru).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Григорьев В.В., Муравьев В.И., Бахматов П.В. Исследование влияния дефектов электронно-лучевой сварки на процессы разрушения титановых сплавов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 3, с. 23–34, doi: 10.18698/0536-1044-2020-3-23-34

Please cite this article in English as:

Grigoriev V.V., Muravyev V.I., Bakhmatov P.V. A Study of the Influence of Electron Beam Welding Defects on Fracture Processes in Titanium Alloys. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 3, pp. 23–34, doi: 10.18698/0536-1044-2020-3-23-34



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышла в свет монография Г.С. Уткина «Словарная технология»

Предложено использовать динамический словарь как средство расширения стандартных структур данных языка C++. Словарь реализуется как сложная структура данных, представленная в виде класса. Использование в структуре данных статистики слов, которые разбиваются на узлы, позволяет существенно расширить спектр решаемых задач. Подход, при котором данные представляются в виде словаря и для работы с которыми используются функции словарного класса, назван автором «Словарная технология».

Дается описание словарных функций и приводятся примеры решаемых на основе словарной технологии задач. Возможности словарной технологии по хранению и доступу к данным использованы для построения модели постреляционной системы управления базами данных. Дается описание постреляционной базы данных и особенностей представления информации. Предлагается язык управления данными, в основе которого лежит словарное представление.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru