

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 621.9; 621.791.722; 629.7.023.4

doi: 10.18698/0536-1044-2021-6-67-79

Влияние режимов механической обработки стыкуемых кромок на качество неразъемных соединений, выполненных сваркой плавлением, при сборке титановых конструкций летательных аппаратов

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

Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Effect of the Regimes of Machining Butting Edges on the Quality of Permanent Joints Made by Fusion Welding when Assembling Aircraft Titanium Structures

V.I. Muravyev, P.V. Bakhmatov, V.V. Grigoryev

Komsomolsk-na-Amure State University

Приведены результаты исследования влияния механической обработки на качество неразъемных соединений, полученных сваркой плавлением. Установлена зависимость уровня дефектности неразъемных соединений, выполненных автоматической аргонодуговой и электронно-лучевой сваркой, от вида механической обработки (высокоскоростного фрезерования, рубки на гильотинных ножницах, шлифования). Выявлено, что параметром шероховатости некорректно оценивать качество механической обработки стыкуемых кромок под сварку. Наиболее приемлемым оценивающим параметром служит насыщенность капиллярно-конденсированной влагой. Показано, что тепловые процессы, возникающие при высокоскоростном фрезеровании в приповерхностном и поверхностном слоях, независимо от шероховатости приводят не только к минимальному параметру насыщенности капиллярно-конденсированной влагой (1,12...2,18), но и к обезводоразживанию в поверхностном слое стыкуемых кромок будущих неразъемных соединений. Результаты исследований могут быть применены в технологических процессах производства крупногабаритных силовых элементов летательных аппаратов, выполняемых сваркой.

Ключевые слова: титановые сплавы, механическая обработка, неразъемные соединения, контроль качества, сварка плавлением, капиллярно-конденсированная влага

The article presents the results of the study of the effect of machining on the quality of permanent joints made by fusion welding. The effects of various types of machining (high-speed milling, cutting with guillotine shears, grinding) on the level of defectiveness of permanent joints made by automatic argon-arc and electron-beam welding have been deter-

mined. It was found that it is incorrect to assess the quality of machining butting edges for welding by the roughness parameter. The most acceptable parameter is the saturation by capillary-condensed moisture. It is shown that the thermal processes occurring during high-speed milling in the near-surface and surface layers, regardless of the roughness, lead not only to the minimum saturation parameter of capillary-condensed moisture (from 1.12 to 2.18), but also to dehydrogenization in the surface layer of the butting edges of future permanent joints. The obtained results of the research can be applied in technological processes of production of aircraft large load-bearing elements performed by welding.

Keywords: titanium alloys, machining, permanent joints, quality control, fusion welding, capillary-condensed moisture

Титан и сплавы на его основе относятся к перспективным конструкционным материалам для летательных аппаратов [1] благодаря более высокой удельной статической и усталостной прочности, жаростойкости, коррозионной стойкости и удовлетворительной свариваемости по сравнению с аналогичными параметрами высокопрочных алюминиевых сплавов и сталей.

Наиболее критичным и часто встречающимся дефектом неразъемных соединений (НС) при сборке конструкций из титановых сплавов сваркой плавлением является пористость в металле шва. Результаты статистического анализа показывают, что доля пористости составляет 48...54 % всех дефектов металла шва НС [2, 3].

Однако у исследователей образования пор НС титановых конструкций [4–7] пока нет единого мнения по вопросу причин их возникновения. Одни авторы считают основной причиной их появления загрязнения на поверхности свариваемых кромок и присадочной проволоки, другие — некачественную защитную атмосферу. При этом первые не могут ответить, почему хотя и в меньшем количестве поры наблюдаются в швах, выполненных сквозным проплавлением без присадочной проволоки, а вторые — не могут объяснить появление пор в швах, выполненных электронно-лучевой сваркой (ЭЛС) в вакууме [5].

Благодаря многочисленным исследованиям авторам работы [4] удалось наиболее полно и научно обоснованно сформировать основные закономерности образования пор при сварке плавлением титана и его сплавов. Доказано, что маловероятно возникновение пузырьков (отсутствуют газовые флуктуации критического размера), выделяющихся из раствора водорода в объеме ванны, так как необходимы готовые зародыши газовой фазы.

Готовыми зародышами газовой фазы при расплавлении могут быть дефекты торцевой

поверхности свариваемых кромок с наличием в объеме адсорбированных газов, паров воды, загрязнений, способных разлагаться с образованием газов. Развитая торцевая поверхность свариваемых кромок способна адсорбировать большое количество влаги. Суммарный объем газов, образующихся при испарении и разложении адсорбированной влаги, с учетом их расширения в процессе нагрева достигает $5,83 \text{ см}^3/\text{см}^2$, что почти в 17 раз больше, чем объем формируемого в металле шва.

Экспериментально установлено [5], что под действием температурных деформаций стык закрывается. При повышении температуры взаимное давление кромок приводит к пластическому течению металла в стыке перед сварочной ванной, создаются необходимые условия для сварки в твердом состоянии, что приводит к завариванию дефектов торцов кромок и образованию газосодержащих замкнутых полостей, попадающих в расплавленную ванну, из которых формируются поры в металле шва [4, 8, 9].

В работе [2] показано, что скорость адсорбции, как и десорбции паров влаги открытой поверхностью титана очень велика, поэтому практически полное насыщение наступает в течение первых минут. Аналогично происходит десорбция при нагреве.

Там же отмечено, что наряду с поверхностной конденсацией протекают процессы капиллярной конденсации во множестве капиллярных углублений и полостей шероховатой поверхности, но удаление жидкости из полостей дефектов со сформированной поверхности довольно сложная процедура.

Расчеты и последующие эксперименты [10] показали, что для выброса жидкости из капилляров в течение часа необходима следующая температура, °С: для воды — 100...370, для глицерина — 100...320, для этилового спирта — 100...260, для ацетона — 100...240.

В работе [11] приведены расчетные и экспериментальные распределения температур в прищадочной проволоке в момент ее подачи в сварочную ванну. Оказалось, что самая удаленная часть проволоки от торца прогревается до 350 °С за 0,3 с. Однако это не обеспечивает удаления с поверхности проволоки капиллярно-конденсированных загрязнений, попадающих в расплавленную ванну и образующих поры.

Таким образом, важнейшей задачей подготовки свариваемых кромок НС при сборке титановых конструкций является исключение капилляров (капиллярно-конденсированных загрязнений) на этих кромках.

В работе [12] показано, что механическая обработка поверхности свариваемых заготовок приводит к образованию капиллярных, микро- и субмикроскопических нарушений поверхности, которые заполняются капиллярно-конденсированными загрязнениями, а также к порообразованию в процессе сварки.

Там же отмечено, что процессы полирования поверхности, либо пластическая деформация исключают порообразование. Однако эти процессы трудоемки и нереализуемы (особенно для крупногабаритных титановых конструкций), вследствие чего требуется изыскание наиболее доступных и эффективных методов механической обработки для исключения на поверхности капилляров и субмикрокапилляров.

Заслуживают внимания процессы формирования поверхности заготовок, образованной методом высокоскоростной механической обработки.

Цель работы — выявить влияние режимов высокоскоростной механической обработки на качество НС, выполненных сваркой плавлением.

Методика проведения исследований. В качестве исследуемого материала выбран лист толщиной 12 мм, выполненный из сплава ОТ4-1, химический состав которого приведен в табл. 1.

Механическую обработку резанием пластины из титанового сплава ОТ4-1 проводили на механообработывающем комплексе DMU 50 ecoline (Германия), как боковой, так и торцевой поверхностью концевой фрезы MT190VB-016Z16R04-32-L100-T (СКИФ-М, Россия). Использовали охлаждающую жидкость Blasocut 2000 Universal компании Blaser (Швейцария).

Торцевой поверхностью концевой фрезы (рис. 1, а) создавали канавки (рис. 2, а) на по-

Таблица 1

Химический состав сплава ОТ4-1

Элемент	Содержание, %	
	по среднему значению 53 измерений	по ГОСТ 19867-91
Ti	95,5300	Основа
Al	2,0800	1,50...2,50
Zr	0,1920	До 0,30
Mn	1,4500	0,80...2,00
Si	0,0700	До 0,12
Fe	0,1160	До 0,30
O	0,1300	До 0,15
H*	0,0028	До 0,012
N	0,0430	До 0,05
C	0,0360	До 0,10

* Среднее значение, полученное замерами в разных точках листа.

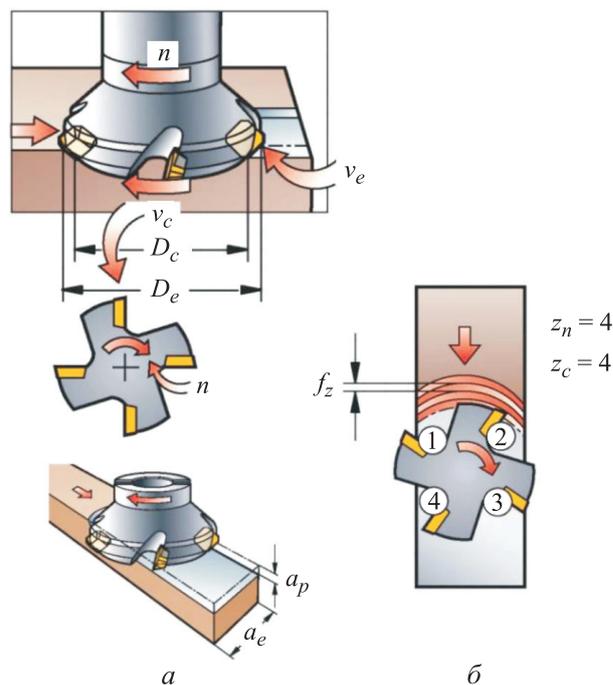


Рис. 1. Схемы обработки пластины торцевой (а) и боковой (б) поверхностями концевой фрезы: n — частота вращения шпинделя, мин^{-1} , $n = 1000v_c / (\pi D_{ca_p})$; v_c и v_e — скорость резания и ее эффективное значение, м/мин; D_{ca_p} — эффективный диаметр фрезы на глубине резания a_p ; D_c — диаметр фрезы, мм; D_e — эффективный диаметр фрезы, $D_e = D_{ca_p}$, мм; a_e — ширина резания; f_z — подача на зуб, мм/зуб; z_n — число режущих кромок, шт.; z_c — эффективное число зубьев, шт.; v_f — подача стола, $v_f = f_z z_c n$, мм/мин; 1, 2, 3, 4 — режущие кромки

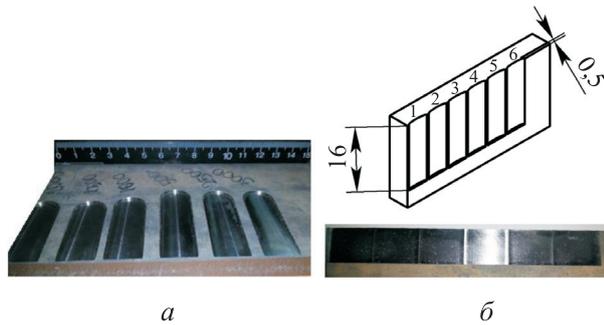


Рис. 2. Внешний вид канавок (а) и прямолинейных участков 1–6 (б)

верхности плоского образца при единичном проходе. Толщина обрабатываемой полосы из сплава ОТ4-1 составляла 12 мм, глубина ввода фрезы — 1,35 мм, ширина реза — 15,7 мм, количество участков — 6. Участки фрезеровали при разных режимах (табл. 2), в которых варьировали частоту вращения шпинделя в диапазоне 500...3000 мин⁻¹ с шагом 500 мин⁻¹.

Боковой поверхностью концевой фрезы (рис. 1, б) обрабатывали прямолинейный участок пластины (рис. 2, б). Пластины устанавливали вертикально и фрезеровали за один проход. Глубина резания составляла 0,5 мм, глубина реза — 16 мм, ширина каждого прямолинейного участка — 20 мм, количество участков 6. Участки обрабатывали при разных режимах, в которых варьировали частоту вращения шпинделя, как и в предыдущем случае. Подача на зуб оставалась постоянной величиной: $f_z = 0,1$ мм.

Остальные режимы изменялись по соответствующей закономерности, предусмотренной в программном обеспечении комплекса.

Качество фрезерованной поверхности оценивали замерами параметра шероховатости Ra , насыщенностью капиллярно-конденсированной влагой (ККВ) по содержанию водорода, изменению микротвердости, макроструктуры,

а также микроструктуры электронной фрактографией.

Шероховатость определяли профилометром TR-200 (КНР). При этом отсечку шага приняли равной 2,5 мм, длину трассы — 12,5 мм. Рассчитывали среднее арифметическое по десяти замерам, проведенным перпендикулярно сформированным бороздкам.

Насыщенность поверхности ККВ по содержанию водорода оценивали с помощью методики, приведенной в работе [11], которая четко разграничивала поверхностно-конденсированную влагу от ККВ обезвоживанием спиртом. Насыщенность определяли по содержанию водорода, выявляемому спектральным методом в плазме электроискрового разряда на пламенно-фотометрической установке ИСП-51 по ОСТ 190013–81. Это основной метод оценки содержания водорода в титановых полуфабрикатах, выпускаемых металлургической промышленностью.

Исследования макро- и микроструктуры проводили на растровом сканирующем электронном микроскопе Hitachi S3400N (Япония). Химический состав и примеси газов изучали с помощью стандартного оптико-эмиссионного спектрометра Q4 Tasman фирмы Bruker (Германия).

Изменения структуры и свойств приповерхностного слоя обработанной пластины оценивали по микроструктуре и микротвердости косого среза. Для обеспечения косого среза 5° использовали буртик образца, образованного при фрезеровании, проведя распиловку вдоль второго буртика, удалив его. При заливке образец устанавливали на опорную поверхность буртиком от фрезерования и на поверхность, полученную резанием, обеспечивая нужный угол.

После заливки образец шлифовали и полировали с сохранением части буртика и участка

Таблица 2

Режимы фрезерования образцов

Вид фрезерования	Режим резания	Номер прохода					
		1	2	3	4	5	6
Торцевое	Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹	500	1000	1500	2000	2500	3000
Боковое							
Торцевое	Скорость резания, м/мин	25,12	50,24	75,36	100,48	125,60	150,72
Боковое		25,00	50,00	75,00	100,00	125,00	150,00
Боковое	Минутная подача, мм/мин	200	400	600	800	1000	1200

обработанной поверхности. Микротвердость измеряли от точки перехода фрезерованной поверхности в сторону полированной на микротвердомере DuraScanG5 компании EmcoTest с нагрузкой 1 кг и шагом измерения 1 мм.

Сравнительную оценку влияния режимов механической обработки на уровень дефектности НС проводили по данным статистической подборки результатов контроля качества НС при сборке титановых конструкций, выполненных сваркой плавлением стыкуемых кромок элементов, после фрезерования на станках DMU 80P duoBLOCK и Стерлитамак S 500 при режимах, выявленных по результатам исследований в условиях серийного производства летательных аппаратов.

Автоматическую аргонодуговую сварку (ААрДЭС) образцов-спутников из сплава ВТ20 (размером 200×3×700 мм) выполняли в среде защитного газа аргона (высший сорт по ГОСТ 1057–79) с присадочной проволокой ВТ1-00 диаметром 1,6 мм на установке УСП-5000. Электронно-лучевую сварку образцов-спутников из сплавов ВТ20 (размером 130×30×40 мм) и ОТ4-1 (150×30×40 мм) проводили на установке КЛ-144.

Режимы сварки образцов-спутников из сплавов ВТ20 и ОТ4-1 приведены в табл. 3.

Раскрой темплетов после ЭЛС проводили на автоматическом лентопильном станке фирмы Danobat с охлаждающей эмульсией. Радиографический контроль выполняли с помощью аппарата ЭКСТРАВОЛЬТ-225.

Таблица 3

Режимы сварки образцов-спутников из сплавов ВТ20 и ОТ4-1

Параметр	Значение для вида сварки	
	ААрДЭС	ЭЛС
Ток сварки, А	280	$350 \cdot 10^{-3}$
Скорость сварки, мм/с	2,2	16,0
Напряжение на дуге, В	16,5	–
Скорость подачи проволоки, мм/с	7	–
Расход аргона на горелку/козырек/поддув, л/мин	7/6/5	–
Ток фокусировки, мА	–	600
Расстояние от торца пушки до образца, мм	–	200

Результаты исследований и их обсуждение. Анализ результатов профилометрии показал, что изменение режимов высокоскоростного резания оказывает сложное влияние на параметр шероховатости поверхности Ra образцов из титанового сплава ОТ4-1, возникшей при боковом (БФ) и торцевом (ТФ) фрезеровании (рис. 3). Здесь и далее режимы резания соответствуют таковым, указанным в табл. 2.

При обработке в первом режиме ТФ и БФ приводят к образованию повышенной шероховатости, сразу снижающейся при фрезеровании во втором режиме. Причем параметр шероховатости поверхности Ra для ТФ несколько выше, чем для БФ

При обработке с повышением частоты вращения шпинделя и скорости резания БФ уже на третьем режиме сопровождается увеличением параметра шероховатости Ra , а на последующих режимах — его стабилизацией на одном уровне. Для ТФ вплоть до четвертого и пятого режимов параметр шероховатости уменьшается линейно и практически стабилизируется в режимах 4–6. При ТФ параметр Ra снижается более чем в 2 раза по сравнению с таковым при БФ.

В среднем все значения параметра шероховатости попадают в диапазон седьмого класса чистоты поверхности: $Ra = 1,26 \dots 0,63$ (ГОСТ 2789–73), а некоторые значения шероховатости для ТФ в режимах 4–6 даже несколько ниже (см. рис. 3).

Результаты исследования влияния режима резания на насыщенность ККВ по содержанию водорода в поверхностном слое образцов из сплава ОТ4-1 приведены на рис. 4. Там же показано исходное содержание водорода в образцах (▲).

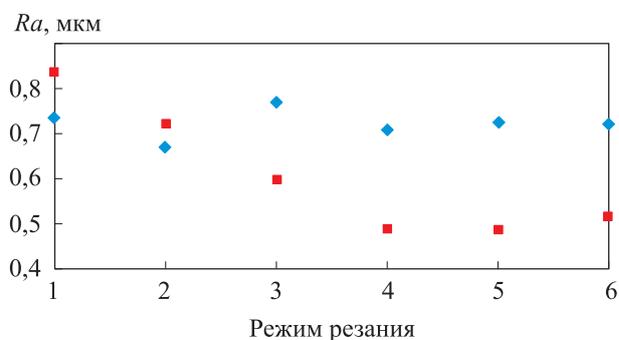


Рис. 3. Зависимость параметра шероховатости поверхности Ra образцов из титанового сплава ОТ4-1 от режима резания при БФ (◆) и ТФ (■)

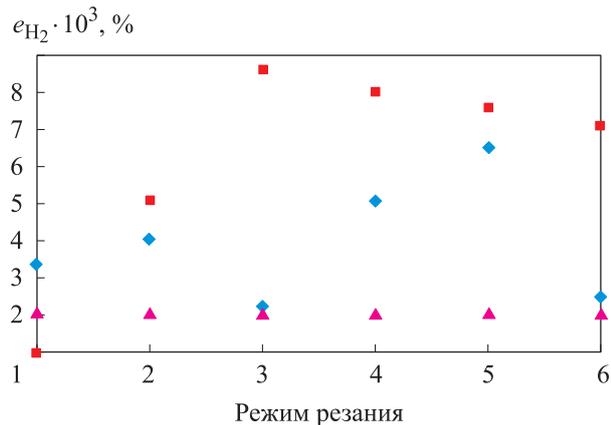


Рис. 4. Зависимость содержания водорода e_{H_2} в поверхностном слое образцов из сплава ОТ4-1 при БФ (♦) и ТФ (■) от режима резания

Изменения содержания водорода в поверхностном слое фрезерованной поверхности как при ТФ, так и при БФ имеют практически одинаковую зависимость. При малых значениях частоты вращения шпинделя и скорости резания наблюдается минимальное содержание водорода в поверхностном слое фрезерованной поверхности, соизмеримое с таковым в металле образцов.

Для ТФ по первому режиму, а для БФ по третьему и шестому режимам содержание водорода даже ниже, чем в основном металле образцов. При повышении частоты вращения шпинделя и скорости резания для ТФ наблюдается резкое увеличение содержания водорода уже в режимах 2–4 и уменьшение в режимах 5 и 6. Для БФ увеличение содержания водорода в поверхностном слое фрезерованной поверхности наблюдается при режимах 4 и 5, а уменьшение в режиме 6.

Таким образом, фрезерование (ТФ в режиме 1 и БФ в режимах 3 и 6) при малой скорости

резания приводит к снижению содержания водорода в поверхностном слое по сравнению с таковым в основном металле.

Накопление ККВ наблюдается при обработке образцов в режимах 2–6 для ТФ и в режимах 4, 5 для БФ. Сопоставление результатов параметров шероховатости и насыщенности поверхности ККВ показывает, что по первому параметру шероховатости невозможно оценить второй.

Результаты дюрометрии приповерхностного слоя образцов при разных режимах ТФ приведены в табл. 4 и на рис. 5, где номера кривых 1–6 соответствуют режимам резания.

Первоначально для всех режимов ТФ наблюдается значительное изменение микротвердости до $HV \approx 240$ ГПа практически на глубину 0,03 мкм. Далее процесс изменения микротвердости замедляется, причем при повышении частоты вращения шпинделя и скорости резания глубина этого участка увеличивается с 0,12 до 0,17 мкм. Максимальное снижение микротвердости до $HV \approx 210 \dots 170$ ГПа достигается на разной глубине ($h \approx 0,17 \dots 0,35$ мкм) по мере повышения частоты вращения шпинделя и скорости резания.

Процесс перехода микротвердости от минимальных значений к исходным для основного металла заканчивается также на разной глубине ($h \approx 0,35 \dots 0,55$ мкм), что соответствует глубине изменения свойств приповерхностного слоя в зависимости от режима высокоскоростного фрезерования.

Результаты исследования характерных участков приповерхностного слоя образцов из сплава ОТ4-1 на сканирующем растровом микроскопе приведены на рис. 6. Здесь номера кривых 1–6 соответствуют режимам резания. Микроструктура образцов из сплава ОТ4-1 в исход-

Таблица 4

Результаты дюрометрии приповерхностного слоя образцов при разных режимах ТФ

Режим резания	Микротвердость HV, ГПа, при глубине h , мкм										
	Основной металл	0,03	0,12	0,17	0,25	0,30	0,35	0,42	0,48	0,52	0,58
1	280	250	228	210	240	264	278	–	–	–	–
2	280	248	245	223	200	230	250	275	–	–	–
3	280	242	235	228	212	255	259	260	290	–	–
4	280	245	247	233	225	215	220	252	270	–	–
5	280	246	233	222	218	210	212	252	258	265	270
6	280	238	230	228	212	200	173	220	232	242	268

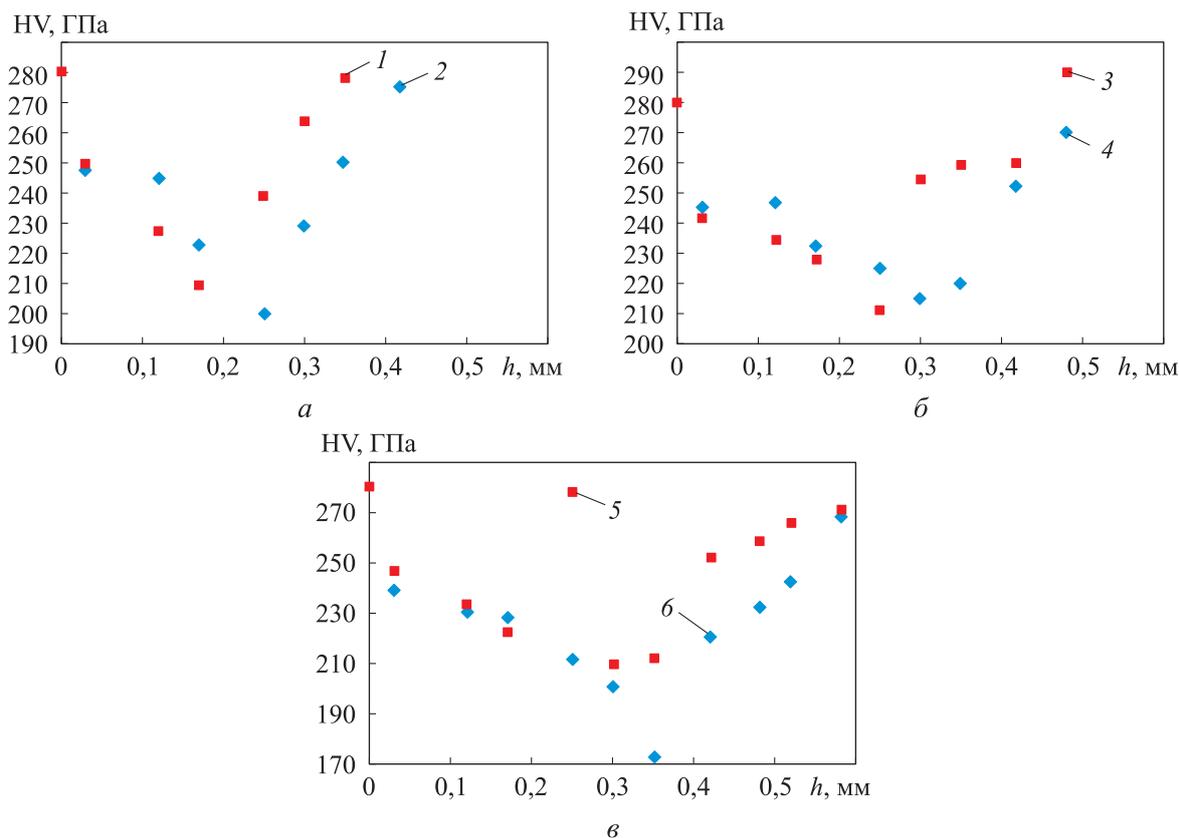


Рис. 5. Зависимости микротвердости HV от глубины h приповерхностного слоя образцов из сплава ОТ4-1 при высокоскоростном ТФ в режимах 1, 2 (а), 3, 4 (б) 5, 6 (в)

ном состоянии (рис. 6, а) характерна для псевдо- α -сплавов: равноосная и мелкозернистая. Микроструктуры характерных участков приповерхностного слоя образцов после высокоскоростного ТФ (рис. 6, б–ж) более крупнозернистые, что связано с температурным воздействием, возникающим в процессе обработки.

Электронные фрактограммы макрорельефа поверхности образцов из сплава ОТ4-1 после различных видов механической обработки в режимах высокоскоростного фрезерования приведены на рис. 7. Макрорельефы поверхностей, образованных высокоскоростным фрезерованием (рис. 7, а–з), в значительной степени отличаются от таковых, созданных традиционным грубым фрезерованием (рис. 7, и, к), рубкой на гильотинных ножницах (рис. 7, л, м) и шлифованием (рис. 7, н, о). Характером отрыва стружки являются определенные условия образования микро- и субмикрокапилляров в этой зоне.

Как известно [13–16], при механической обработке срезание тонких слоев материала с заготовки осуществляется пластической деформацией и разрушением определенного слоя.

В результате новая, только что изготовленная деталь в тонком приповерхностном слое, уже имеет очаги разрушения в виде субмикротрещин.

При шлифовании (полировании) тонких кромок, где вследствие низкой теплопроводности материала могут возникать высокие местные температуры, появляются прижоги и мелкие микротрещины на поверхности.

Характер такого образования дефектного поверхностного слоя наблюдается на образцах, подвергнутых грубому фрезерованию и рубке на гильотинных ножницах (см. рис. 6, и–м).

В результате исследований, выполненных в работе [14], установлено, что главным фактором, определяющим процесс резания, является повышение температуры обрабатываемой поверхности и ее распределение в различных участках изделия, стружке и на резце.

Главное влияние на процентное распределение температуры между стружкой, деталью и инструментом [15] оказывают механические и теплофизические свойства материала, а также скорость резания. Температура изделия из жаропрочных сталей и титановых сплавов

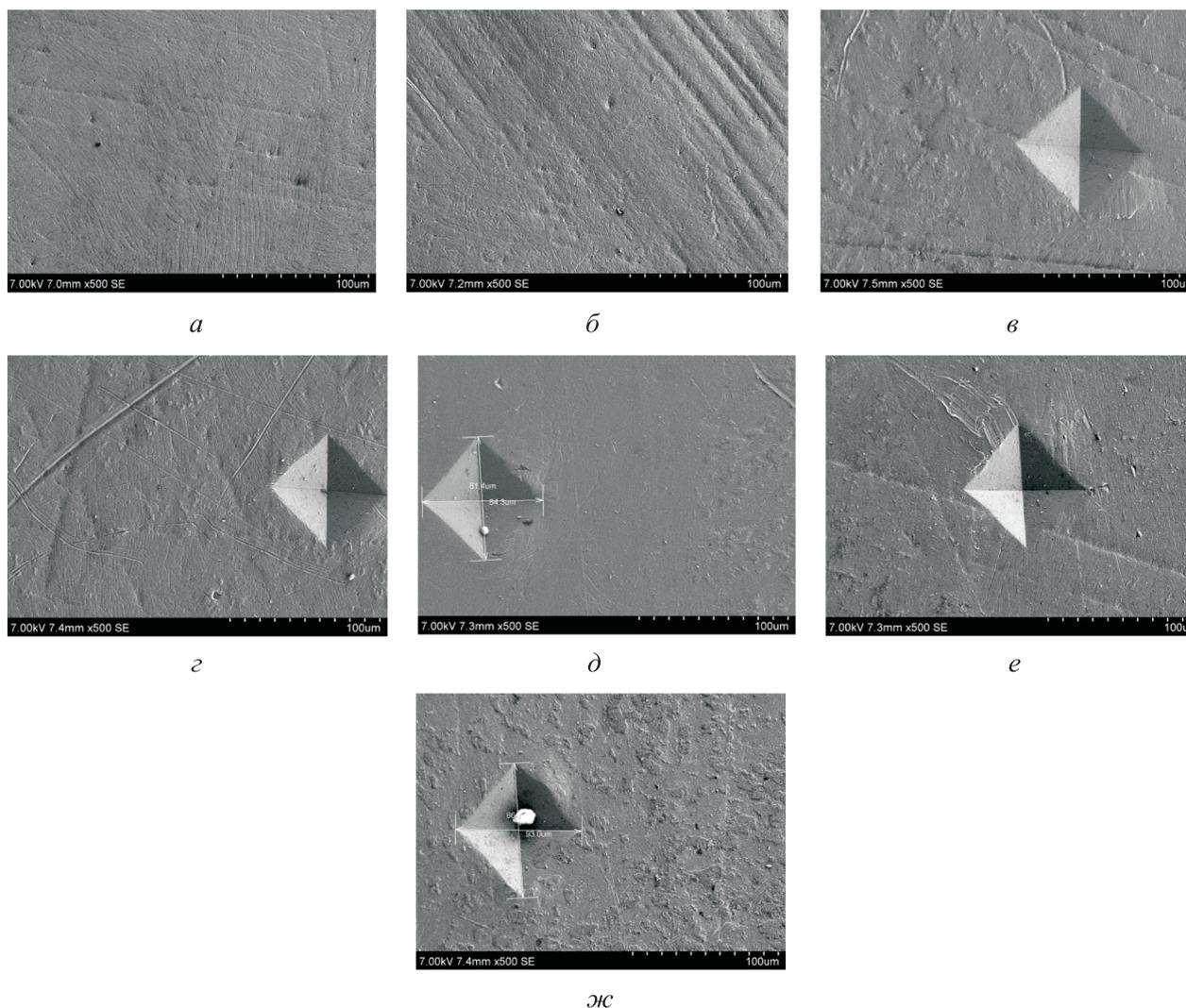


Рис. 6. Микроструктуры приповерхностного слоя образцов из сплава ОТ4-1 в исходном состоянии (а) и после высокоскоростного ТФ при первом (б-г) и третьем (д-ж) режимах резания и разной глубине: б, д — $h = 0,03$ мкм; в, е — $h = 0,17$ мкм; г — $h = 0,35$ мкм; ж — $h = 0,42$ мкм

резко возрастает и при малой скорости резания может достигать 35...45 % всей температуры резания.

Увеличение скорости резания коренным образом меняет распределение температуры между стружкой, деталью и инструментом: тепло, уходящее в стружку, повышается, а поглощаемое деталью и стружкой уменьшается. Особенно это наблюдается при высокоскоростной обработке. В стружку уходит до 75,0 % тепла, в деталь и инструмент — 22,0 и 1,5 % соответственно.

Как показывают исследования изменения микротвердости, микроструктуры удовлетворительно согласуются с указанными закономерностями распределения температуры (см. рис. 6, 7). При этом необходимо учиты-

вать рекристаллизацию [16, 17] в условиях быстропротекающих процессов при нагреве напряженно-деформированного материала, резкое уменьшение содержания водорода в поверхностном слое фрезерованной поверхности образцов сплава ОТ4-1 (см. рис. 4) как для ТФ, так и для высокоскоростного БФ (в режимах 1, 3, 6).

Содержание водорода в приповерхностном фрезерованном слое несколько меньше, чем в основном металле образцов, что наблюдается в процессе обезводороживания поверхностного слоя в зависимости от режима высокоскоростного фрезерования титанового сплава ОТ4-1 (табл. 5, высокоскоростное фрезерование в режимах 1 и 3). Эта диффузионная активность для сталей отмечена в работе [18].

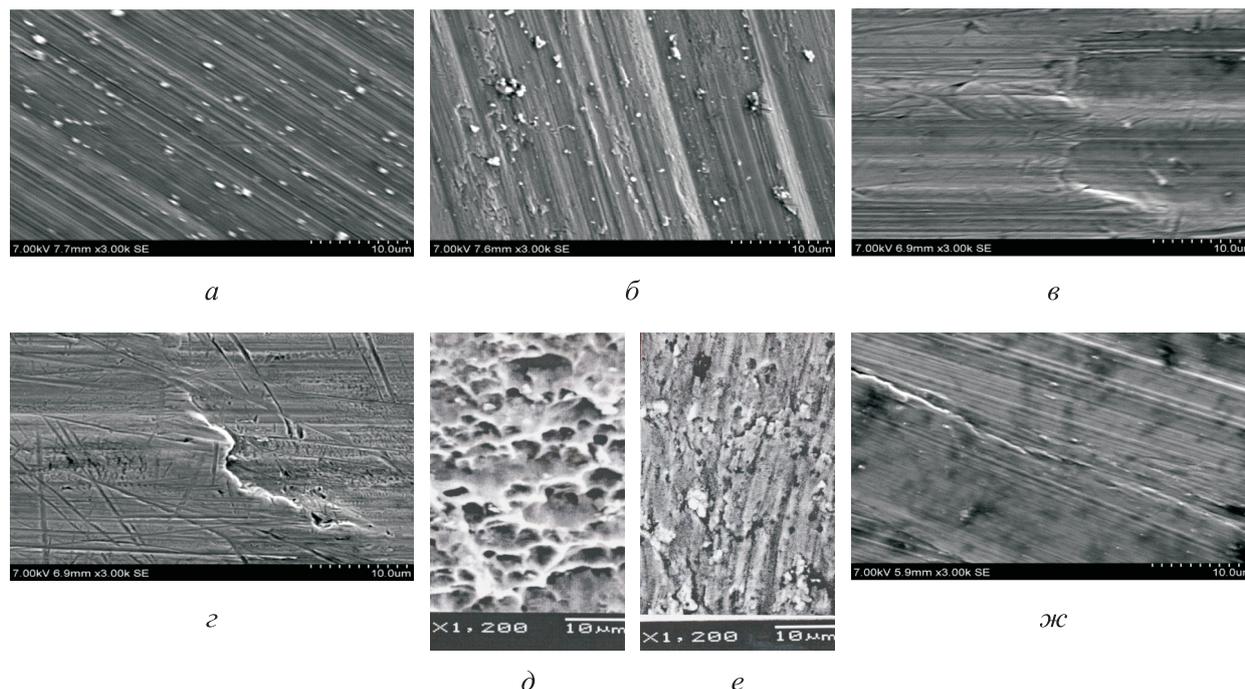


Рис. 7. Электронные фрактограммы макрорельефов образцов после различных видов и режимов механической обработки:
 а и б — высокоскоростного ТФ в режиме 1 и 3 соответственно;
 в, г — высокоскоростного БФ в режиме 3 и 5 соответственно; д — грубого фрезерования;
 е — рубки на гильотинных ножницах; ж — шлифования

Таблица 5

Влияние вида механической обработки на качество стыкуемых кромок под сварку при сборке элементов титановых конструкций и на уровень дефектности металла шва НС

Вид механической обработки	Материал	Качество стыкуемых кромок элементов			Вид сварки заготовок толщиной <i>h</i> , мм	Уровень дефектности, %	
		<i>Ra</i> , мкм	ϵ_{H_2} , %	Насыщенность ККВ		по порам	по темным полосам
Высокоскоростное ТФ в режиме 1	ОТ4-1	0,85	0,0010	<u>0,0019</u> 0,0028	ЭЛС, 60	0,000	0,000
	BT20	0,99	0,0018	<u>0,0018</u> 0,0033	ААрДЭС, 3	0,000	0,000
Высокоскоростное БФ в режиме 3	ОТ4-1	0,78	0,0022	<u>0,0022</u> 0,0033	ЭЛС, 30	0,000	0,000
	BT20	0,56	0,0037	1,1200	ААрДЭС, 3	0,020	0,000
Высокоскоростное БФ в режиме 5	ОТ4-1	0,73	0,0065	2,3000	ЭЛС, 30	0,018	0,012
	BT20	0,88	0,0071	2,1800	ЭЛС, 30	0,037	0,170
Рубка на гильотинных ножницах	ОТ4-1	6,30	0,0120	4,2800	ЭЛС, 30	13,000	–
	BT20	8,20	0,018	5,3000	ААрДЭС, 3	25,000	–
Шлифование	ОТ4-1	0,83	0,0066	2,4000	ЭЛС, 30	0,020	0,014
	BT20	0,82	0,0080	2,5300	ЭЛС, 30	0,023	0,015

Примечание. В числителе дроби указаны значения содержания водорода в приповерхностном слое, в знаменателе — в основном металле.

Результаты влияния вида механической обработки на качество стыкуемых кромок под сварку при сборке элементов титановых конструкций и на уровень дефектности металла шва НС в условиях серийного производства приведены в табл. 5. Анализ полученных результатов показал существенное различие в показателях качества стыкуемых поверхностей и уровне дефектности НС из сплавов ОТ4-1 и ВТ20.

Оценивать качество механической обработки стыкуемых кромок только параметром шероховатости Ra некорректно. Наиболее приемлемым параметром служит насыщенность ККВ, позволяющая определять во сколько раз содержание водорода в поверхностном слое обработанной поверхности $e_{H_2}^H$ больше, чем в основном металле $e_{H_2}^M$:

$$N = \frac{e_{H_2}^H}{e_{H_2}^M}.$$

Если кромка образована рубкой на гильотинных ножницах, то параметр шероховатости высок, и можно ошибочно считать, что причиной высокого уровня дефектности металла шва (поры) является значение Ra . Исходя из теории порообразования (попадания в сварочную ванну готовых зародышей пор), показатель насыщенности стыкуемой поверхности ККВ наиболее точно отображает ее качество.

Для сплава ОТ4-1 указанный показатель составляет 4,28, для сплава ВТ20 — 5,3, т. е. содержание водорода в капиллярах превышает таковое в основном металле более чем в 4 и 5 раз соответственно. Готовые зародыши в большом количестве приводят к высокому уровню дефектности по порам, который для ЭЛС сплава ОТ4-1 составляет 13 %, а для ААрДЭС сплава ВТ20 — 25 %.

Выводы

1. Режимы высокоскоростного резания титановых сплавов оказывают существенное и сложное влияние на качество стыкуемых поверхностей НС.

2. Повышение частоты вращения шпинделя и скорости резания для БФ уже при 1500 мин⁻¹ приводит к увеличению параметра шероховатости и стабилизации. Для ТФ шероховатость уменьшается линейно и стабилизируется на частоте вращения шпинделя 2000 мин⁻¹ и выше.

Причем параметр шероховатости Ra уменьшается более чем в 2 раза по сравнению с таковым при БФ. В среднем все значения параметра шероховатости не выходят за пределы допуска по ГОСТ 2789–73.

3. Торцевое фрезерование при малой скорости резания (25 м/мин) и высокоскоростное БФ (75 и 150 м/мин) приводят к обезводороживанию поверхностного слоя по сравнению с содержанием водорода в основном металле.

4. Для ТФ накопление ККВ происходит при скоростях резания 50,24 и 150,72 м/мин, а для БФ — 100...125 м/мин. Существенные изменения параметров шероховатости и насыщенности поверхности ККВ свидетельствуют о некорректности использования параметра шероховатости для оценки качества стыкуемой поверхности будущего НС при сборке титановых конструкций сваркой плавлением.

5. Анализ результатов дюротрии позволил выявить закономерность влияния режимов ТФ на глубину приповерхностного слоя в диапазоне 0,35...0,55 мм. Это в значительной степени влияет на отрыв стружки при резании и образовании капилляров в зоне разрушения, а также на структурное изменение макрорельефа поверхности и микроструктуры приповерхностного слоя.

6. Сравнительные исследования для различных видов механической обработки образцов-спутников в условиях серийного производства позволили обнаружить существенное различие в показателях качества стыкуемых поверхностей и уровне дефектности НС из сплавов ОТ4-1 и ВТ20.

7. Тепловые процессы, возникающие при высокоскоростном фрезеровании в поверхностном и приповерхностном слоях титановых сплавов, приводят независимо от шероховатости не только к минимальному параметру насыщенности ККВ (1,12...2,18), но и к значительному снижению содержания водорода в поверхностном слое (к обезводороживанию) по сравнению с содержанием водорода в основном металле как в сплаве ОТ4-1, так и в сплаве ВТ20. При этом уровень дефектности незначителен и наблюдается у образцов с минимальной насыщенностью ККВ.

8. Обнаружен такой дефект, как темные полосы на рентгенограммах. Для выявления причин их появления необходимо провести дальнейшие исследования.

Литература

- [1] Братухин А.Г., Муравьев В.И., Долотов Б.И. Эффективность применения титана и его сплавов в авиастроении. *Авиационная промышленность*, 1997, № 3–4, с. 3–9.
- [2] Редчиц В.В., Фролов В.А., Казаков В.А., Лукин В.И. *Пористость при сварке цветных металлов*. Москва, Технология машиностроения, 2002. 448 с.
- [3] Муравьев В.И. Проблемы порообразования в сварных швах титановых сплавов. *МиТОМ*, 2005, № 7, с. 30–37.
- [4] Редчиц В.В., Никифоров Г.Д., Фролов В.В., Колачев Б.А. Основные закономерности образования пор при сварке плавлением титана и его сплавов. *Сварочное производство*, 1987, № 5, с. 28–30.
- [5] Лозеев Г.Е., Черницын А.И., Фролов В.В. Процессы, протекающие в стыке сварного соединения, и их влияние на пористость металла шва. *Автоматическая сварка*, 1977, № 2, с. 25–30.
- [6] Гуревич С.М., Замков В.Н., Блащук В.Е., Кушниренко Н.А., Харченко Г.К., Новиков Ю.К., Прилуцкий В.П., Сабокаръ В.К., Волков В.Б. *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов*. Киев, Наукова Думка, 1986. 240 с.
- [7] Братухин А.Г., Иванов Ю.Л., ред. *Современные технологии авиастроения*. Москва, Машиностроение, 1999. 832 с.
- [8] Муравьев В.И., Бахматов П.В., Долотов Б.И. *Обеспечение надежности конструкций из титановых сплавов*. Москва, Эком, 2009. 752 с.
- [9] Kar J., Chakrababarti D., Roy S.K., et al. Beam oscillation, porosity formation and fatigue properties of electron beam welded Ti-6Al-4V alloy. *J. Mater. Process. Tech.*, 2019, vol. 266, pp. 165–172, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.10.040>
- [10] Ханьжин П.С., Яблоник Л.М. Влияние технологии контроля на выявление дефектов капиллярным методом. *Дефектоскопия*, 1980, № 6, с. 64–71.
- [11] 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.
- [12] Муравьев В.И., Бахматов П.В., Лончаков С.З., Логвинов О.П. Влияние разделительных операций на дефектность поверхности кромок заготовок из титановых сплавов под сварку. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2012, № 3, с. 7–16.
- [13] Резников А.Н. *Теплофизика процессов механической обработки материалов*. Москва, Машиностроение, 1981. 279 с.
- [14] Кабалдин Ю.Г. Резание металлов в условиях адиабатического сдвига элемента стружки. *Вестник машиностроения*, 1995, № 7, с. 19–25.
- [15] Schweizer M., Form W. New concepts of the recrystallizations phenomenon. *J. Inst. Metals*. 1973, vol. 101, no. 1, pp. 24–32.
- [16] Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М. *Рекристаллизация металлов и сплавов*. Москва, Изд-во МИСиС, 2005. 432 с.
- [17] Сазонов Б.Г. Экстремальная диффузионная активность в стали в состоянии предпревращения. *МиТОМ*, 1990, № 7, с. 13–15.
- [18] Терентьев В.Ф. Сопrotивление усталости сплавов титана и железа с субмикроструктурной и наноструктурой. Обзор. *МиТОМ*, 2007, № 10, с. 21–28.

References

- [1] Bratukhin A.G., Murav'yev V.I., Dolotov B.I. Application efficiency of titanium and its alloys in aircraft construction. *Aviatsionnaya promyshlennost'*, 1997, no. 3-4, pp. 3–9 (in Russ.).
- [2] Redchits V.V., Frolov V.A., Kazakov V.A., Lukin V.I. *Poristost' pri svarke tsvetnykh metallov* [Porosity at welding of nonferrous metals]. Moscow, Tekhnologiya mashinostroeniya Publ., 2002. 448 p.
- [3] Murav'yev V.I. Problems of pore formation in welded joints of titanium alloys. *МиТОМ*, 2005, no. 7, pp. 30–37 (in Russ.). (Eng. version: *Met. Sci. Heat Treat.*, 2005, vol. 47, no. 7-8, pp. 282–288, doi: <https://doi.org/10.1007/s11041-005-0068-5>)

- [4] Redchits V.V., Nikiforov G.D., Frolov V.V., Kolachev B.A. Main regularities of pores formation at fuse welding of titanium and its alloys. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1987, no. 5, pp. 28–30 (in Russ.).
- [5] Lozeev G.E., Chernitsyn A.I., Frolov V.V. Processes in welded steam and their effect on porosity of steam metal. *Avtomaticheskaya svarka*, 1977, no. 2, pp. 25–30 (in Russ.).
- [6] Gurevich S.M., Zamkov V.N., Blashchuk V.E., Kushnirenko N.A., Harchenko G.K., Novikov Yu.K., Priluckij V.P., Sabokar' V.K., Volkov V.B. *Metallurgiya i tekhnologiya svar-ki titana i ego splavov* [Welding metallurgy and technology of titanium and its alloys]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1986. 240 p.
- [7] Bratukhin A.G., Ivanov Yu.L., eds. *Sovremennye tekhnologii aviastroeniya* [Modern technologies of aircraft manufacturing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1999. 832 p.
- [8] Murav'yev V.I., Bakhmatov P.V., Dolotov B.I. *Obespechenie nadezhnosti konstruktsiy iz titanovykh splavov* [Ensuring the reliability of structures made of titanium alloys]. Moscow, Ekom Publ., 2009. 752 p.
- [9] Kar J., Chakrabarti D., Roy S.K., et al. Beam oscillation, porosity formation and fatigue properties of electron beam welded Ti-6Al-4V alloy. *J. Mater. Process. Tech.*, 2019, vol. 266, pp. 165–172, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.10.040>
- [10] Khan'zhin P.S., Yablonik L.M. Effect of control technology on flaw location using capillary technique. *Defektoskopiya*, 1980, no. 6, pp. 64–71 (in Russ.).
- [11] Murav'yev V.I., Bakhmatov P.V. Dominating factors of boundary surface formation leading to capillary condensation of interalloying and steam metal defectiveness of titanium constructions. *Svarka i diagnostika* [Welding and diagnostics], 2016, no. 3, pp. 11–16 (in Russ.).
- [12] Murav'yev V.I., Bakhmatov P.V., Lonchakov S.Z., Logvinov O.P. Influence of separating operations on presence of defects of edges surface of titanium alloy workpieces for welding. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii* [Blanking Productions in Mechanical Engineering], 2012, no. 3, pp. 7–16 (in Russ.).
- [13] Reznikov A.N. *Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki materialov* [Thermal physics of materials mechanical processing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 279 p.
- [14] Kabaldin Yu.G. Cutting of metals under conditions of adiabatic shear element chips. *Vestnik mashinostroyeniya*, 1995, no. 7, pp. 19–25 (in Russ.).
- [15] Schweizer M., Form W. New concepts of the recrystallizations phenomenon. *J. Inst. Metals*, 1973, vol. 101, no. 1, pp. 24–32.
- [16] Gorelik S.S., Dobatkin S.V., Kaputkina L.M. *Rekristallizatsiya metallov i splavov* [Recrystallization of metals and alloys]. Moscow, Izd-vo MISiS Publ., 2005. 432 p.
- [17] Sazonov B.G. Extreme diffusional activity in steel in a state of transformation. *MiTOM*, 1990, no. 7, pp. 13–15 (in Russ.). (Eng. version: *Met. Sci. Heat Treat.*, 1990, vol. 32, no. 7, pp. 483–485, doi: <https://doi.org/10.1007/BF00700314>)
- [18] Terent'yev V.F. Fatigue resistance of titanium and iron alloys with submicrocrystalline and nanocrystalline structure. A review. *MiTOM*, 2007, no. 10, pp. 21–28 (in Russ.). (Eng. version: *Met. Sci. Heat Treat.*, 2007, vol. 49, no. 9-10, pp. 476–483, doi: <https://doi.org/10.1007/s11041-007-0089-3>)

Статья поступила в редакцию 02.02.2021

Информация об авторах

МУРАВЬЁВ Василий Илларионович — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Управление научно-исследовательской деятельностью. 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).

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

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Муравьёв В.И., Бахматов П.В., Григорьев В.В. Влияние режимов механической обработки стыкуемых кромок на качество неразъемных соединений, выполненных сваркой плавлением, при сборке титановых конструкций летательных аппаратов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 6, с. 67–79, doi: 10.18698/0536-1044-2021-6-67-79

Please cite this article in English as:

Muravyev V.I., Bakhmatov P.V., Grigoryev V.V. Effect of the Regimes of Machining Butting Edges on the Quality of Permanent Joints Made by Fusion Welding when Assembling Aircraft Titanium Structures. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 6, pp. 67–79, doi: 10.18698/0536-1044-2021-6-67-79

Information about the authors

MURAVYEV Vasily Illarionovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Chief Researcher, Office for Research Management. 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 the Department of Technology of Welding and Metallurgical Production. Komsomolsk-na-Amure State University (681013, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 27, e-mail: mim@knastu.ru).

GRIGORYEV Vladimir Vladimirovich — Head of Laboratories of the Faculty of Mechanical Engineering and Chemical Technologies, Postgraduate student, Department of Aircraft Engineering. Komsomolsk-na-Amure State University (681013, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 27, e-mail: grigorev.vlv@gmail.com).