

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

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА НЕРАЗЪЕМНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ ТИТАНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ,
ВЫПОЛНЕННЫХ СВАРКОЙ ПЛАВЛЕНИЕМ**



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

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ТИТАНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ,
ВЫПОЛНЕННЫХ СВАРКОЙ ПЛАВЛЕНИЕМ**

Монография

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2022

УДК 621.791.7
ББК 34.641
М91

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор кафедры инжиниринга технологического оборудования Института экотехнологий и инжиниринга Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»

Алюшин Юрий Алексеевич;

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения, литейного и сварочного производства ФГБОУ ВО «СибГИУ», заслуженный изобретатель РФ, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, почетный работник сферы образования Российской Федерации

Козырев Николай Анатольевич

Муравьев, В. И.

М91 Обеспечение качества неразъемных соединений титановых конструкций летательных аппаратов, выполненных сваркой плавлением : монография / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, В. В. Григорьев. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 296 с. : ил., табл.

ISBN 978-5-9729-0943-8

Изложены теоретические основы образования дефектов неразъемных соединений при сборке титановых конструкций сваркой плавлением. Представлены сведения о свойствах титановых сплавов, входящих в состав конструкционных материалов современных летательных аппаратов. Приведено описание технологических процессов, специального и специализированного оборудования для сборки летательных аппаратов, включая технологию и средства образования неразъемных соединений в процессе сборки летательных аппаратов сваркой. Определены основные факторы образования поверхности раздела, вызывающие капиллярную конденсацию загрязнений, обосновано их влияние на дефектность металла шва неразъемного соединения при сборке титановых конструкций.

Для специалистов НИИ, КБ, предприятий авиационно-космического комплекса, а также для студентов и аспирантов технических специальностей.

УДК 621.791.7
ББК 34.641

ISBN 978-5-9729-0943-8

© Муравьев В. И., Бахматов П. В., Григорьев В. В., 2022

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2022

© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ТИТАН И ЕГО СПЛАВЫ КАК КОНСТРУКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.....	7
1.1. Основные физико-химические свойства титана и его сплавов	7
1.2. Сравнительная оценка свойств сталей, титановых и алюминиевых сплавов, применяемых в самолетостроении	11
1.3. Преимущества использования сварки плавлением для образования неразъемных соединений в процессе сборки летательных аппаратов	14
1.4. Конструкции летательных аппаратов с неразъемными соединениями, образованными сваркой плавлением	17
Библиографический список к главе 1	28
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ СБОРКЕ ТИТАНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ СВАРКОЙ ПЛАВЛЕНИЕМ.....	29
2.1. Взаимодействие титана и его сплавов с газами. Процессы конденсации загрязнений на поверхности заготовок. Методы защиты от газонасыщения	29
2.2. Порообразование в сварных швах титановых конструкций.....	40
2.3. Специфические дефекты в сварных швах, выполненных электронно-лучевой сваркой.....	55
2.4. Эффективность использования методов оценки качества подготовки торцевых поверхностей стыкуемых заготовок	59
2.4.1. Традиционные методы оценки качества поверхности.....	59
2.4.2. Количественная оценка вида конденсации загрязнений на торцевой поверхности заготовок	61
Библиографический список к главе 2	70
3. СПЕЦИАЛЬНОЕ И СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ СБОРКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ СВАРКОЙ.....	73
3.1. Сборка титановых конструкций из листовых элементов (стрингеры, ребра жесткости, нервюры и др.)	73
3.2. Специфические сварочные установки для сборки титановых конструкций из элементов больших толщин (шпангоуты, лонжероны и др.) из штамповок, поковок, плит	80
3.3. Электронно-лучевые установки для образования неразъемных соединений при сборке конструкций сваркой плавлением	89
3.3.1. Сущность электронно-лучевого воздействия и особенности формирования сварного шва при электронно-лучевой сварке	93
3.3.2. Преимущества и недостатки электронно-лучевой сварки.....	97
Библиографический список к главе 3	99
4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ СБОРКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ СВАРКОЙ.....	104
4.1. Основные технологические операции изготовления, определяющие качество сложных силовых конструкций	104
4.2. Негативные факторы, сопутствующие образованию неразъемных соединений при изготовлении ребристых титановых панелей сваркой.....	114

4.3. Дефекты неразъемных соединений титановых конструкций в серийном производстве летательных аппаратов	119
Библиографический список к главе 4	131
5. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ ОБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА, ВЫЗЫВАЮЩИЕ КАПИЛЛЯРНУЮ КОНДЕНСАЦИЮ ЗАГРЯЗНЕНИЙ И ДЕФЕКТНОСТЬ МЕТАЛЛА ШВА НЕРАЗЪЕМНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СБОРКЕ ТИТАНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	133
5.1. Влияние разделительных операций на дефектность поверхности заготовок и выбора наиболее приемлемого метода для образования неразъемного соединения при сборке титановых конструкций сваркой плавлением	134
5.1.1. Образование торцевой поверхности заготовок «разрушением»	134
5.1.2. Образование торцевой поверхности заготовок «травлением»	138
5.1.3. Образование торцевой поверхности заготовок «плавлением»	140
5.1.4. Особенности процесса образования пор и пористости в неразъемных соединениях при наличии дефектов на поверхности присадочной проволоки	153
Библиографический список к главе 5	159
6. УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ЗАДАННЫМИ СВОЙСТВАМИ ПРИ СБОРКЕ ТИТАНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ СВАРКОЙ ПЛАВЛЕНИЕМ	160
6.1. Особенности металлургических процессов получения неразъемных соединений сваркой плавлением при сборке титановых конструкций	160
6.2. Свойства неразъемных соединений при сборке титановых конструкций из листовых элементов сваркой плавлением по традиционным режимам	162
6.3. Закономерности изменения химического состава структуры и свойств неразъемных соединений при сборке титановых ребристых панелей сваркой плавлением	165
6.4. Влияние интенсификации процессов перемешивания металла сварочной ванны на свойства неразъемных соединений при сборке сваркой плавлением титановых конструкций	171
6.5. Влияние тепловых процессов термического цикла сварки неразъемных соединений при сборке сваркой плавлением на деформацию титановых конструкций из листовых элементов	179
6.5.1. Коробление при сборке титановых конструкций воздействием термодформационного цикла образования неразъемного соединения сваркой плавлением	179
6.5.2. Процесс деформации при сборке конструкций в реальном времени и термический цикл сварки при образовании неразъемного соединения	187
6.5.3. Некоторые эффективные технологические процессы снятия остаточных сварочных напряжений в титановых конструкциях полученных неразъемными соединениями сборкой из элементов сваркой плавлением	192
6.6. Оценка технологических операций сборки титановых конструкций образованием неразъемных соединений сваркой плавлением, минимизирующих надежность (усталостную прочность) ребристых титановых панелей	199
6.6.1. Методы оценки усталостной прочности неразъемных соединений, выполненных сваркой плавлением	199
6.6.2. Пористость, прочность и надежность титановых конструкций из листовых заготовок в зависимости от особенностей подготовки заготовок и режимов образования неразъемных соединений	204

6.6.3. Сравнительная оценка влияния традиционных и перспективных технологических процессов образования неразъемных соединений при сборке на усталостную прочность и надежность листовых титановых конструкций	210
6.6.4. Влияние вибрационных нагрузок на разрушение элементов неразъемных соединений при сборке листовых конструкций	213
Библиографический список к главе 6	218
7. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ВЫПОЛНЯЕМЫХ СВАРКОЙ ПЛАВЛЕНИЕМ ПРИ СБОРКЕ ТИТАНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ	222
7.1. Обеспечение качества неразъемных соединений, выполненных электронно-лучевой сваркой при сборке титановых конструкций.....	222
7.1.1. Особенности образования специфических дефектов при сборке крупногабаритных титановых конструкций летательных аппаратов	222
7.1.2. Влияние распределения водорода в металле шва неразъемного соединения при сборке титановых конструкций электронно-лучевой сваркой.....	228
7.1.3. Влияние технологических процессов изготовления на свойства неразъемных соединений, выполненных электронно-лучевой сваркой при сборке крупногабаритных силовых титановых конструкций летательных аппаратов.....	237
7.2. Влияние режимов высокоскоростной механической обработки стыкуемых кромок на качество неразъемных соединений, выполненных сваркой плавлением при сборке титановых конструкций летательных аппаратов.....	246
7.2.1. Факторы, обуславливающие выбор проведения исследований.....	246
7.2.2. Влияние режимов высокоскоростной механической обработки на качество поверхности заготовки под сварку.....	249
7.2.3. Сравнительная оценка влияния режимов традиционной и высокоскоростной обработки на уровень дефектности неразъемных соединений, выполненных сваркой плавлением при сборке конструкций летательных аппаратов.....	256
7.3. Улучшение качества собранных сваркой плавлением титановых конструкций обеспечивающих свойства неразъемных соединений, одинаковыми со свойствами основного металла.....	261
7.3.1. Достоинства и недостатки традиционных методов уменьшения пористости металла шва неразъемных соединений при сборке титановых конструкций сваркой плавлением	261
7.3.2. Влияние режимов сварки	264
7.3.3. Влияние дополнительных источников тепла.....	266
7.3.4. Влияние интенсификации перемешивания жидкометаллической ванны.....	268
7.4. Автоматизация процессов образования неразъемных соединений сваркой плавлением при сборке титановых конструкций.....	269
7.4.1. Исключение человеческого фактора при образовании неразъемных соединений сваркой плавлением листовых заготовок в процессе сборки титановых конструкций (панели центроплана, панели хвостовой части фюзеляжа, защитного устройства и др.).....	269
7.4.2. Негативные процессы при образовании неразъемных соединений электронно-лучевой сваркой при сборке титановых конструкций.....	280
Библиографический список к главе 7	283