

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

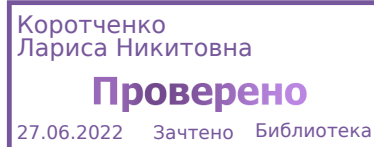
Солнцева Анастасия Вячеславовна

**ИССЛЕДОВАНИЕ УПОРЯДОЧЕНИЯ СТРУКТУРНОЙ  
НЕОДНОРОДНОСТИ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ  
КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ  
СВАРКОЙ**

Направление подготовки  
15.04.01 – «Машиностроение»

**АВТОРЕФЕРАТ  
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

2022



Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольском-на-Амуре государственном университете» и в филиале ПАО «ОАК» - «КНААЗ» им. Ю.А. Гагарина».

Научный руководитель: Муравьев Василий Илларионович,  
доктор технических наук, главный научный сотрудник УНИД, профессор кафедры «Машиностроение и металлургия» ФГБОУ ВО «Комсомольского-на-Амуре государственного университета»

Рецензент: Жилин Сергей Геннадьевич,  
кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий ИМиМ ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре

Защита состоится «23» июня 2022 г. в 9:30 ч. на заседании государственной аттестационной комиссии по направлению подготовки 15.04.01 «Машиностроение» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, д. 27, учебный корпус 2, аудитория 221.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте [www.knastu.ru](http://www.knastu.ru) и на кафедре «Технология сварочного и металлургического производства» ФГБОУ ВО «КНАГУ».

Автореферат разослан «20» июня 2022г.

Секретарь ГЭК  
К.Т.Н.

О.Н. Клешина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Титановые сплавы широко используются в авиакосмической промышленности благодаря их уникальным свойствам. Относительно небольшая плотность (значительно легче железа), высокие показатели прочности, жаропрочности (вдвое прочнее железа) и антикоррозионных свойства, при этом позволяют уменьшить массу силовых конструкций от 14 до 48 % по сравнению со сталями и алюминиевыми сплавами.

Но титановые сплавы менее технологичны по сравнению со сталями и алюминиевыми сплавами из-за целого ряда специфических технологических свойств. Наиболее важными из них являются – низкая теплопроводность, высокая химическая активность, ограничение возможности холодной деформации, низкая обрабатываемость резанием, порообразование при сварке.

Скорости резания, применяемые при обработке деталей из титановых сплавов без окисленного газонасыщенного слоя («корки», альфированный слой), в зависимости от их предела прочности в 1,5 ... 4,0 раза ниже скоростей резания, применяемых при обработке деталей из стали 45. При работе по «корке» скорости снижаются соответственно в 2 раза.

### **Актуальность темы:**

Закладочные детали и основные силовые конструкции в авиационном строении выполнены из титановых сплавов. При удовлетворительной свариваемости велика вероятность возникновения специфического дефекта – образование пористости, структурной неоднородности.

Определенные успехи достигнуты в работах В.Н. Замкова, С.М. Гуревича, Б.И. Долотова, В.И. Муравьева, П.В. Бахматова и др.

### **В работах:**

- теоретически и практически обоснован процесс порообразования в сварных швах.

- выявлена некорректность оценки качества поверхности стыкуемых кромок параметрами (Ra) шероховатости.

- предложен новый критерий оценки качества подготовки поверхности насыщенностью капиллярной конденсации в поверхностном слое.

- предложен целый ряд технологических приемов позволяющих свести к минимуму или полному исключению порообразования в сварных швах.

Но при этом применение этих технологий связано с высокой трудоемкостью, сложностью процессов и требует изыскания новых более простых или менее трудоемких технологических процессов получения беспористых сварных соединений из титановых сплавов. Определенную перспективность представляют процессы высокоскоростной механической обработки стыкуемых поверхностей под сварку и последующей ускоренной термической обработки для снятия остаточных напряжений.

### **Цель диссертационной работы:**

Провести исследования влияния высокоскоростной механической обработки, последующей электронно-лучевой сварки и термообработки на исключение пористости и улучшение свойств неразъемных соединений из титанового сплава ВТ20.

**Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:**

1) Провести аналитическую оценку выявляемых дефектов в сварных швах в серийном производстве;

2) Установить влияние различных режимов механообработки заготовок из сплава ВТ20 на качество поверхности:

- шероховатость;
- насыщенность капиллярно-конденсированной влагой поверхности;
- микроструктуру;
- микротвердость;
- изменение химического состава.

3) Выявить влияние режимов механообработки на качество сварных соединений из сплава ВТ20 (пористость) и изменение механических свойств после различных режимов термообработки;

4) Исследовать влияние ускоренной термической обработки на свойства титанового сплава ВТ20;

5) Разработать рекомендации по обеспечению качества особо ответственных конструкций выполненных ЭЛС.

### **Апробация**

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены на: V-ой Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодёжь и наука» секция «Машиностроение и металлургия» (г. Комсомольск-на-Амуре, КнАГУ, 11-15 апреля 2021г.).

### **Положения, выносимые на защиту:**

- аналитическая оценка выявленных дефектов в сварных швах в серийном производстве, выполненных ЭЛС титанового сплава ВТ20;

- влияние режимов высокоскоростной механической обработки заготовок из сплава ВТ20 на качество поверхности (параметры шероховатости, насыщенности капиллярно-конденсированной влагой, микроструктура, микротвердость, химический анализ);

- влияние режимов механообработки на качество сварных соединений из сплава ВТ20 (пористость) и изменение механических свойств после различных режимов термообработки;

- влияние ускоренной термической обработки на свойства сварных соединений из титанового сплава ВТ20;

- рекомендации по обеспечению качества особо ответственных конструкций, выполненных ЭЛС.

### **Научная новизна работы:**

- 1) Установлено, что высокоскоростная механическая обработка титанового сплава VT20 позволяет исключить на поверхности капиллярно-конденсированную влагу вплоть до обезводороживания поверхности под сварку;
- 2) Выявлен наиболее рациональный способ ускоренной термической обработки, обеспечивающий получение качественных сварных соединений;
- 3) Отработаны режимы ускоренной термической обработки для обеспечения качественных сварных соединений.

### **Практическая значимость работы:**

Обусловлена возможностью использования технологических решений, позволяющих обеспечить качество ответственных титановых конструкций летательных аппаратов.

### **Личный вклад автора:**

Заключается в совместной с научным руководителем постановке задач исследований, формулировке положений и выводов, выносимых на защиту. Все основные результаты, вошедшие в содержание диссертации, получены автором лично. Автор самостоятельно писал программы на механическую обработку образцов, совместно с заведующим лабораториями проводили экспериментальные исследования с последующим анализом и обработкой полученных данных. В диссертации отсутствуют результаты других исследований, а когда по логике изложения такие сведения необходимы, то они отмечены ссылками на литературные источники.

### **Публикации:**

По материалам диссертационной работы опубликовано 2 печатные работы.

### **Объем и структура диссертации:**

Диссертация состоит из введения, трех глав, основных выводов и рекомендаций, списка литературы, пяти приложений. Диссертация содержит 117 страниц; 64 рисунок; 31 таблицу; список литературы, состоящий 34 наименований, 5 приложений.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы, применяемая к производству силовых титановых конструкций летательных аппаратов (ЛА), выполняемых электронно-лучевой сваркой и приведена общая характеристика работы. Обоснована цель работы и задачи.

**Первая глава** диссертации посвящена проведению анализа достижений в области использования ЭЛС. Определены основные преимущества, недостатки и достижения в области исследования порообразования при сварке плавлением титановых сплавов.

Для проведения испытаний использован псевдо- $\alpha$  сплав VT20. Химический состав и механические свойства представлены в таблицах 1-2.

Таблица 1 – Химический состав материала ВТ20

										В процентах
Fe	C	Si	Mo	V	N	Ti	Al	Zr	O	H
До 0.3	до 0.1	до 0.15	0.5-2	0.8 - 2.5	до 0.05	84.938 - 91.7	5.5 - 7	1.5 - 2.5	до 0.15	до 0.012

Таблица 2 – Механические свойства сплава ВТ20 (ГОСТ 23755-79)

$\sigma_B$ (МПа) – временное сопротивление разрыву	$\Sigma_{0,2}$ (МПа) - предел текучести для остаточной деформации	$\delta_5$ (%) - относительное удлинение после разрыва	$\psi$ % - относительное сужение	КСУ (кДж / м <sup>2</sup> ) - ударная вязкость
930-1130	840	6	12	300

**Во второй главе** проведен анализ дефектов силовых конструкций, выполняемых ЭЛС титановых сплавов и статистической обработки по вопросу образования специфических дефектов, а также описана методика проведения исследований.

В эксперименте были использованы 6 режимов фрезерования титана (таблица 3). При этом режимы резания с 1 по 3 соответствуют режимам традиционной обработки титановых сплавов, а начиная с 4 и далее соответствовали высокоскоростной механической обработке по данным каталога СКИФ-М.

Таблица 3 – Режимы резания образцов из сплава ВТ20

Режим	Номер прохода					
	1	2	3	4	5	6
Обороты, об/мин	400	500	600	700	800	900
Подача, мм/мин	60	70	80	90	100	110
Скорость резания, $V_{рез}$ , м/мин	20	25	30	35	40	45

Режимы, используемые при сварке образцов, при использовании электронно-лучевой сварки стыковых соединений из сплавов ВТ20 толщиной 30 мм представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Режимы ЭЛС, используемые при сварке образцов на КЛ-144.

Толщина материала (мм)	Ток сварки (мА)	Ток фокусировки (мА)	Ускоряющее напряжение (кВ)	Скорость сварки (мм/с)	Рабочее давление (мм. рт.ст)	Расстояние от торца пушки до детали (мм)
30	350	580-620	60±1	15	1· 10 <sup>-4</sup> – 1· 10 <sup>-8</sup>	200±5

**В третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований влияния режимов механической обработки на образование специфического дефекта. Оценено влияние ускоренной термообработки на изменение механических свойств.

Обработку резанием плоскости образцов из титанового сплава ВТ-20 производили, как цилиндрическим, так и торцевым фрезерованием (рисунок 1) концевой фрезой МТ190VB-016Z16R05-32-L100-Т (СКИФ-М, Россия).

В эксперименте были использованы два образца из сплава ВТ20 с габаритными размерами 10x20x220. Первый образец обработан с использованием фрезы со сколами на радиусах и режущей части, которая была сдана на списание (изношенный инструмент). Второй образец обработан новой фрезой, без видимых сколов и повреждений (новый инструмент). Режимы резания представлены в таблице 2. Общий вид обработанных по разным режимам ВСМ изображен на рисунке 2.

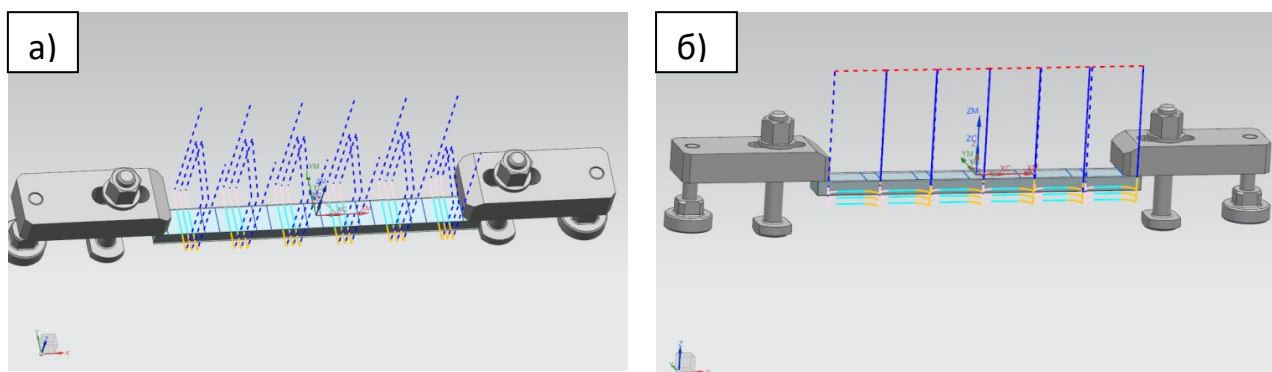


Рисунок 1 – Обработка резанием плоскости образцов из титанового сплава ВТ-20: а – торцевое фрезерование; б – цилиндрическое фрезерование

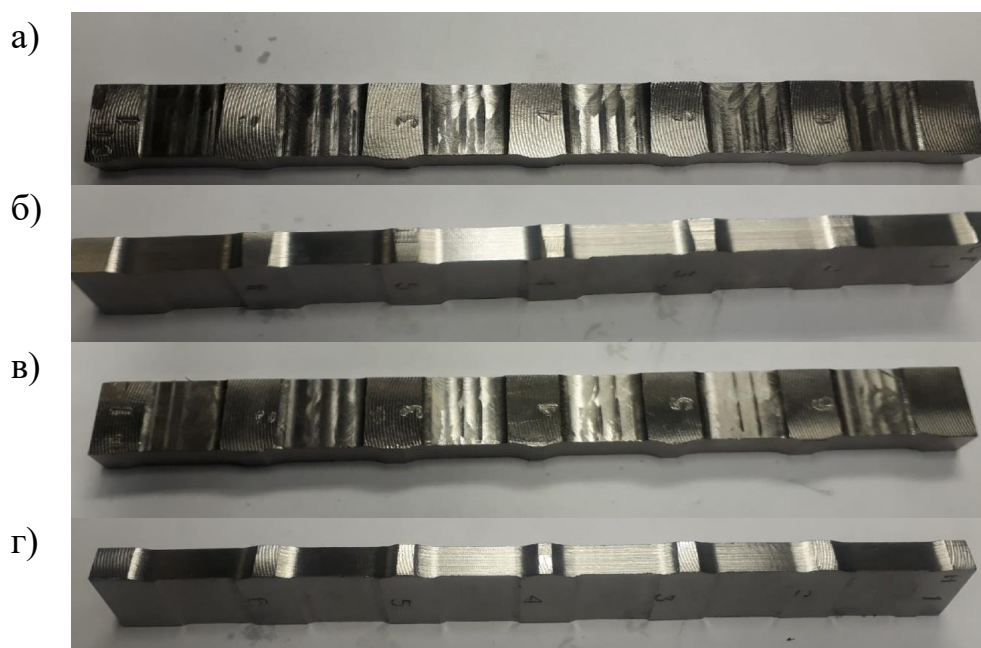


Рисунок 2 – Вид образцов из сплава ВТ20 после механической обработки фрезерованием: а – торцевым; б – цилиндрическим фрезерованием изношенной фрезой; в – торцевым; г – цилиндрическим фрезерованием новой фрезой

Измерение твердости производилось по методу Виккерса на микротвердомере Shimadzu HNV-2 по поверхности косого среза. Повышенная микротвердость (рисунок 3) приповерхностного слоя при торцевом фрезеровании по сравнению с цилиндрическим объясняется некоторым упрочнением поверхностного слоя торцевой фрезой после отрыва стружки.

Измерение шероховатости производили в лаборатории метрологии, спектральный анализ легирующих элементов и водорода проводился в ЦЗЛ филиала АО «Компания «Сухой» «КНААЗ» им. Ю.А. Гагарина».

Как видно из данных рисунка 4 при традиционных режимах резания сплава ВТ20 наблюдается неравномерное распределение значений шероховатости поверхности (скорости резания  $V = 20 - 30$  м/мин). При переходе к высокоскоростной обработке сплава ВТ20 (скорости резания  $V = 35 - 45$  м/мин) устанавливается практически равномерное распределение параметров шероховатости. При этом необходимо отметить, что при торцевом фрезеровании плоскости сплава ВТ20 показатели шероховатости (ШП) практически на порядок меньше показателей (ШП) при цилиндрическом фрезеровании плоскости образцов.

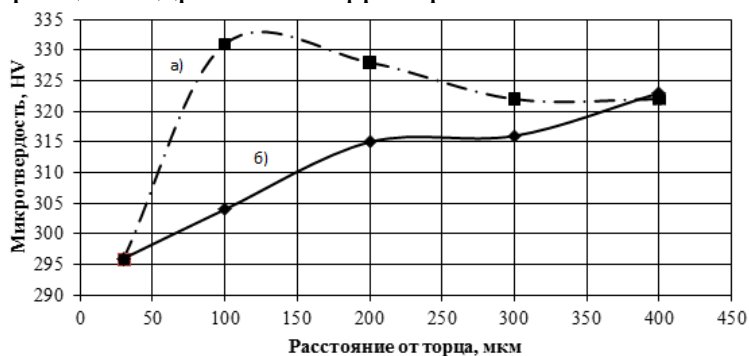


Рисунок 3 – Микротвердость поверхностного слоя после фрезерования сплава ВТ20: а – торцевое фрезерование; б – боковое фрезерование

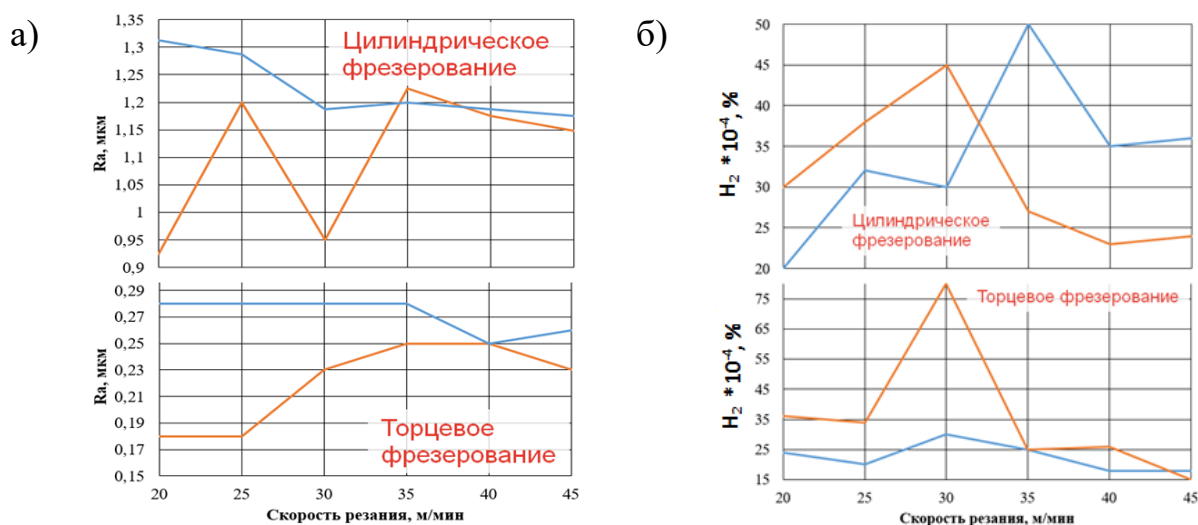


Рисунок 4 – Влияние режимов механической обработки на шероховатость поверхности (а) и изменение содержания водорода (б) образцов из сплава ВТ20.

Синим цветом – изношенная фреза; оранжевым – новая фреза



Исследованиями спектральным анализом установлено, что высокоскоростная механическая обработка позволяет практически полностью исключить насыщение поверхностного слоя водородом, особенно это касается торцевого фрезерования сплава ВТ20 (рисунок 4, б). Содержание водорода в основном металле образцов из сплава ВТ20 составляет  $H_2 = 0,0013\%$ , а в поверхностном слое  $H_2 = 0,0015 - 0,0017\%$ .

Химический анализ показал, что в процессе высокоскоростной механической обработке меняется не только микроструктура, микротвердость, содержание водорода на поверхности, но и происходит изменение легирующих элементов, который имеет сложный характер. Распределение легирующих элементов представлено на рисунке 5.

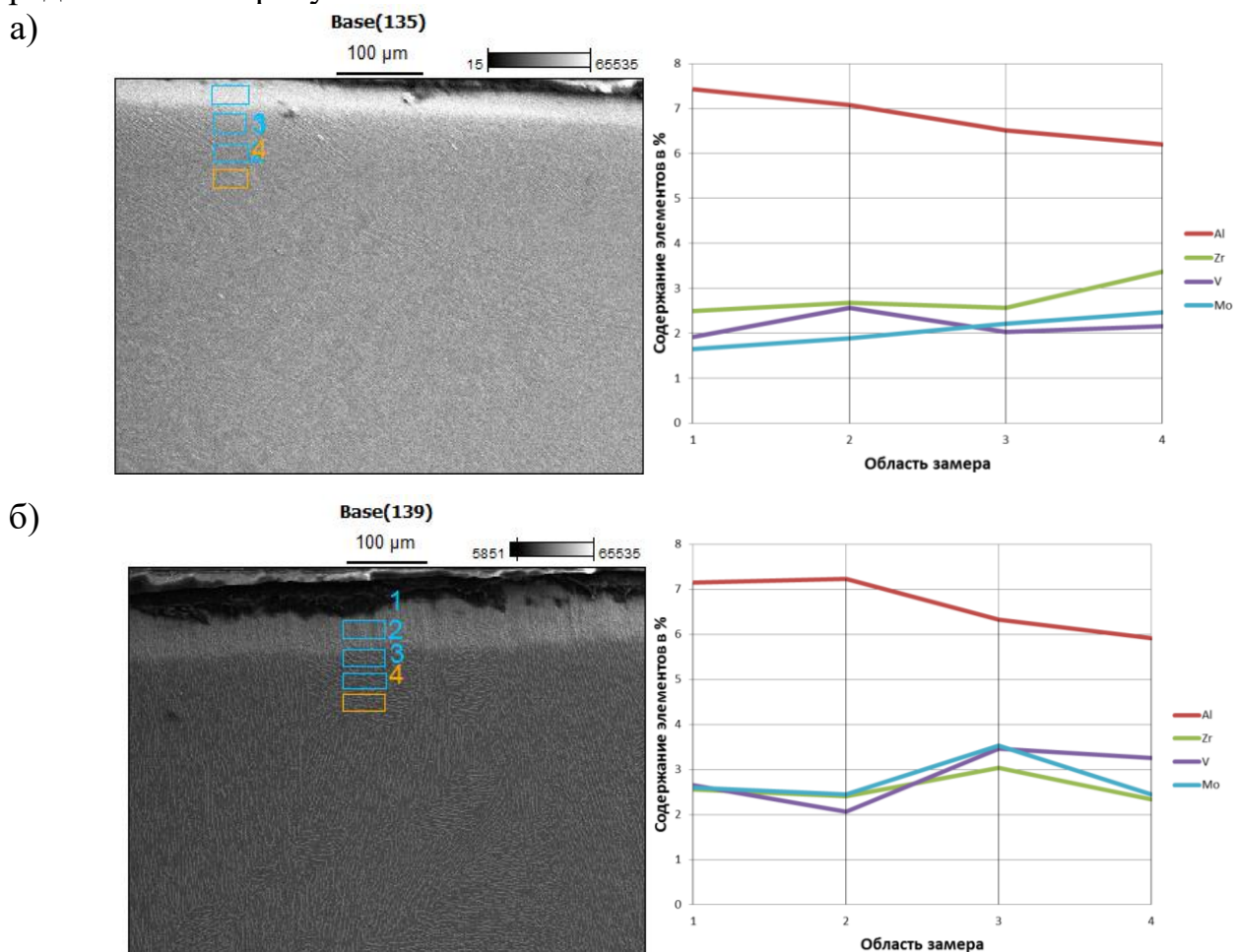


Рисунок 5 – Химический анализ, распределение легирующих элементов по областям: а – торцевое фрезерование; б – боковое фрезерование

При торцевом и цилиндрическом фрезеровании можно увидеть резкое падение алюминия с 7% до 6%. За счет того, что у обрабатываемой кромки высокое содержание алюминия, то микротвердость увеличивается. Увеличение молибдена говорит о том, что вязкость такого слоя будет больше.

Испытания механических свойств на статическое растяжение полученных образцов производились на испытательной машине Instron 3382. Динамические испытания производились на маятниковом копре JBW-300.

Из рисунка 6 (а) видно, что деформации сварных образцов из титановых сплавов зависят от методики изготовления свариваемых темплетов, а именно от режимов механической обработки и термообработки, и различаются не только по величине деформации, а и по характеру изменения кривых величины напряжений от 723,8 МПа до 760,5 МПа – для сварных образцов и от 774,1 МПа до 974,7 МПа для сварных образцов после ускоренной термообработки при разной выдержке. Предел прочности сварных соединений после термообработки, особенно по режиму выдержки в 90 секунд достигает практически 975 МПа, что несколько превышает допустимые пределы основного металла, у которого (таблица 2) 950 МПа.

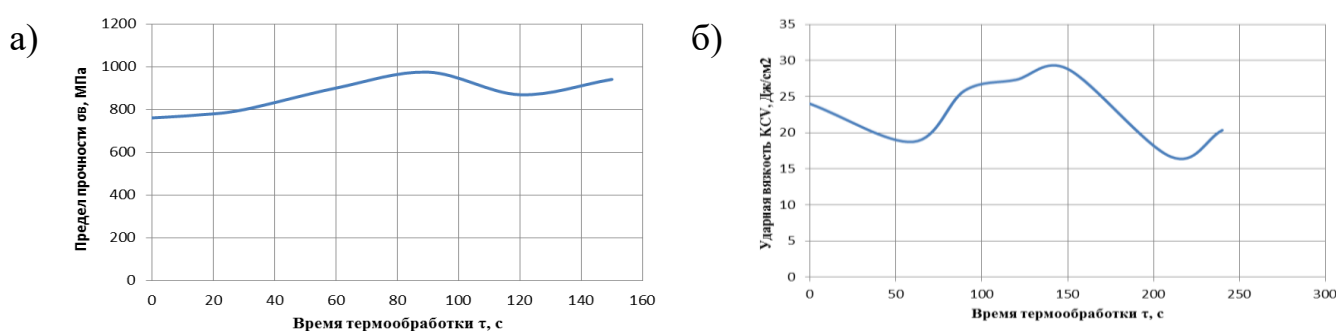


Рисунок 5 – Влияние ускоренной термической обработки на изменение:  
а – предела прочности; б – ударной вязкости

Существенное увеличение ударной вязкости с концентратором напряжения (КСВ) при торцевом и цилиндрическом фрезеровании наблюдается при выдержке в печи в интервале 90-140 секунд (рисунок 6, б).

**В заключении** сформулированы основные итоги работы и даны рекомендации по обеспечению качества особо ответственных конструкций, выполняемые ЭЛС.

В результате испытаний образцов со сварным соединением после традиционной термообработки дает среднее значение предела прочности ( $\sigma_B$ ) в корне шва 936 МПа, а на образцах с усилением 956 МПа, для сравнения, полученные значения прочности при ускоренной термообработке выше и достигают 975 МПа.

В шпангоутах после сварки, сварные соединения подвергаются механической обработке и тогда этот шпангоут не весь можно термообработать, а только зону сварки, которая механически обработана. Для этой цели необходимо провести дальнейшую работу по выбору метода нагрева: может быть лазерный или индукционный методы. Представленные результаты получены с помощью обычной индукционной печи.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Титановые сплавы являются перспективным материалом для многих областей применения в авиакосмической технике благодаря их высокой удельной прочности, сопротивлению усталости, вязкости разрушения и коррозионной стойкости.

Из практики механической обработки титановых сплавов известно, что для стойкости режущего инструмента операторы занижают режимы механообработки и придерживаются рабочих режимов 600 об/мин и подачи 80 мм/мин. При наблюдении процесса резания на повышенных режимах отмечается улучшение качества поверхности обрабатываемых кромок (шероховатость и насыщенность водородом поверхности кромок).

Режимы высокоскоростного резания титановых сплавов оказывают существенное и сложное влияние на качество образующейся при этом стыкуемой поверхности неразъемных соединений.

Увеличение числа оборотов шпинделя и скорости резания для бокового фрезерования практически уже на третьем режиме приводит к уменьшению параметра шероховатости и устанавливается практически равномерное распределение. Для торцевого фрезерования шероховатость уменьшается линейно и стабилизируется на 3-5 режимах. При этом шероховатость уменьшается более чем в 4 раза по сравнению с шероховатостью при боковом фрезеровании. При этом параметры шероховатости не выходят за пределы допуска по ГОСТ 2789-73.

Высокоскоростное фрезерование при малых оборотах шпинделя и скорости резания по четвертому, пятому и шестому режимам приводят для торцевого, а для бокового по первому, второму, четвертому, пятому и шестому – к обезводоразживанию поверхностного слоя по сравнению с содержанием водорода в основном металле. Накопление капиллярно-конденсированной влаги наблюдается при торцевом фрезеровании по режиму 3, при боковом фрезеровании по режимам 1-3.

Использование изношенного инструмента в подготовке поверхностей под сварку приводит к ухудшению качества поверхности кромок. Все показатели в 2 раза больше, чем если использовать хороший инструмент. Конечно же все зависит от характера повреждения фрезы. Если сколы на радиусах, то боковым фрезерованием она покажет такие же хорошие результаты, что и хороший инструмент.

Обработка металла резанием сопровождается не только изменением тепловых процессов в детали, а и процессами деформации и разрушения и удаления с поверхности части металла. Это приводит к существенному изменению свойств приповерхностного слоя, которое сопровождается уменьшением плотности у поверхности излома за счет концентрации напряжений от скопления дислокаций около препятствий (например, границы зерен и др.) и образования субмикропор и субмикротрещин.

Таким образом, любой параметр шероховатости и в том числе Ra, не позволяют оценить в тонком приповерхностном слое очаги разрушения в виде субмикротрещин.

Полученные результаты исследований ВСМО позволяют рекомендовать принятия завышенных режимов к использованию на предприятии при чистовой обработке стыкуемых под ЭЛС кромок из титанового сплава BT20. Система подачи СОЖ через шпиндель станка позволяет обильно и под высоким давлением охлаждать режущий инструмент и эффективно вымывать стружку из закрытых и полузакрытых мест, что предотвращает сильный нагрев детали.

Такое решение позволяет снизить трудоемкость и ускорить процесс изготовления деталей.

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

#### **Статьи и материалы конференций по материалам диссертационной работы:**

1. Солнцева А.В., Муравьев В.И., Григорьев В.В. Изменения качества поверхности конструкций из титанового сплава BT20 при высокоскоростной механической обработке // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. Материалы V Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2022. 3 с.

2. Муравьев В.И., Бахматов П.В., Григорьев В.В., Солнцева А.В. Процессы структурообразования при высокоскоростной механической обработке поверхности элементов из титанового сплава BT20, обеспечивающие надёжность летательных аппаратов // Сборник докладов 6-й Дальневосточной конференции с международным участием «Фундаментальные и прикладные задачи механики деформируемого твердого тела и прогрессивные технологии в металлургии и машиностроении». 2022. 10 с.