

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

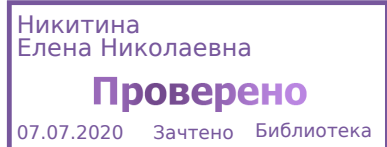
На правах рукописи

Барсукова Нина Валерьевна

**Сварка трением с перемешиванием ребристых  
алюминиевых панелей**

Направление подготовки  
15.04.01 «Машиностроение»

**АВТОРЕФЕРАТ  
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**



2020

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» на кафедре «Технология сварочного и металлургического производства»

Научный руководитель: заведующий кафедрой «Технология сварочного и металлургического производства» ФГБОУ ВО «Комсомольского-на-Амуре государственного университета», кандидат технических наук, доцент  
**Бахматов Павел Вячеславович**

Рецензент: Старший научный сотрудник ИМиМ ДВО РАН, кандидат технических наук, доцент  
**Жилин Сергей Геннадьевич**

Защита диссертации состоится «02» июля 2020 г. в 09:30 часов на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 15.04.01 «Машиностроение» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 221/2.

Автореферат разослан 22 июня 2020 г.

Секретарь ГЭК

А. В. Свиридов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

Конструкции цельносварных ребристых панелей из высокопрочных алюминиевых сплавов летательных аппаратов различного назначения имеют значительные преимущества по сравнению с традиционными фрезерованными: более низкие трудоемкость и цикл изготовления, коэффициент использования металла, статическую и циклическую прочность, ресурс.

Фрезерование - единственный технологический процесс создания ребристых панелей летательных аппаратов, выполненных из высокопрочных алюминиевых сплавов. Переход к сварке панелей позволил бы не только значительно уменьшить материалоемкость производства, но и снизить энерго- и трудозатраты при их изготовлении, но сварка плавлением высокопрочного алюминиевого сплава В95 за частую связана с образованием горячих трещин, поэтому не применима для ответственной конструкции.

Наиболее перспективным методом для решения указанной проблемы является способ сварки трением с перемешиванием (СТП). В базовом процессе СТП, известном в России с 1967 г и реализованном за рубежом в 90-х годах, вращающийся инструмент, содержащий корпус, рабочий стержень с различным рельефом поверхности и опорный бурт, медленно погружают в стык деталей на глубину, примерно равную толщине соединяемых кромок; при этом опорный бурт (заплечник) опирается на поверхность кромок. Материал кромок за счет теплоты, выделяющейся при трении, нагревается до пластичного состояния, вследствие чего уменьшается усилие, действующее на инструмент. При поступательном перемещении вращающегося инструмента по стыку пластическое течение выносит материал в зону, освобождающуюся позади движущегося инструмента. При этом образуется шов.

Способ СТП позволяет значительно экономить металл при изготовлении ребристых панелей. Если при традиционной технологии требуется фрезерование отлитой плиты, при которой коэффициент использования материала составляет 0,07—0,2, то при сварке сплава В95 этот показатель можно повысить до 0,89-0,92.

По данным работ отечественных, таких как Штрикман М.М., Кайбышевым О.Р., Половцева В.А. и зарубежных Mishra R.S., Sutton M.A., Reynolds A.P. исследователей применение сварки трением с перемешиванием для изготовления тавровых сварных соединений из листовых заготовок преимущественно алюминиевых сплавов, в том числе высокопрочных и трудносвариваемых, позволит повысить рабочий ресурс соединения и снизить и/или исключить:

- специальные способы подготовки поверхности перед сваркой (химическое фрезерование, механическая зачистка и т.д.);

- затраты на дополнительные сварочные материалы (присадочная проволока, защитный газ и т.д.);
- ремонтные операции по удалению дефектов в сварных соединениях;
- операции правки конструкции после сварки ввиду отсутствия температур плавления в термическом цикле при сварке и, соответственно, существенных сварочных напряжений, вызывающих деформацию и коробление.

#### **Целью данной работы**

Определение возможности получения неразъемных стыковых и тавровых сварных соединений являющиеся конструктивными узлами ребристых панелей из высокопрочного алюминиевого сплава В95 при СТП.

#### **Объект исследования**

Сварные стыковые и тавровые соединения, полученные из высокопрочного алюминиевого сплава В95 при СТП.

#### **Предмет исследования**

Формы рабочих инструментов, режимы сварки, структурные изменения и дефекты сварных швов.

#### **Научная новизна:**

Предложен метод физического моделирования, основанный на замене основного металла на пластилин, при котором рабочий инструмент может быть получен на 3D принтере.

#### **Практическая значимость**

Применение разработанной технологии позволяет повысить ресурс деталей улучшить прочностные характеристики шва, выполненные СТП.

#### **Личный вклад автора**

Заключается в совместной с научным руководителем постановке задач исследований, формулировке положений и выводов, выносимых на защиту, и написании статей по теме исследования.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- литературный обзор в отношении подбора инструмента, режимов и оборудования для сварки стыковых и тавровых соединений СТП и их изготовление;
- результаты исследования структуры и свойств стыковых и тавровых соединений;
- методика физического моделирования процессов формирования шва.

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

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов и списка литературы. Диссертация содержит 103 страницы; 104 рисунка; 11 таблиц; список литературы, состоящий 34 наименования.

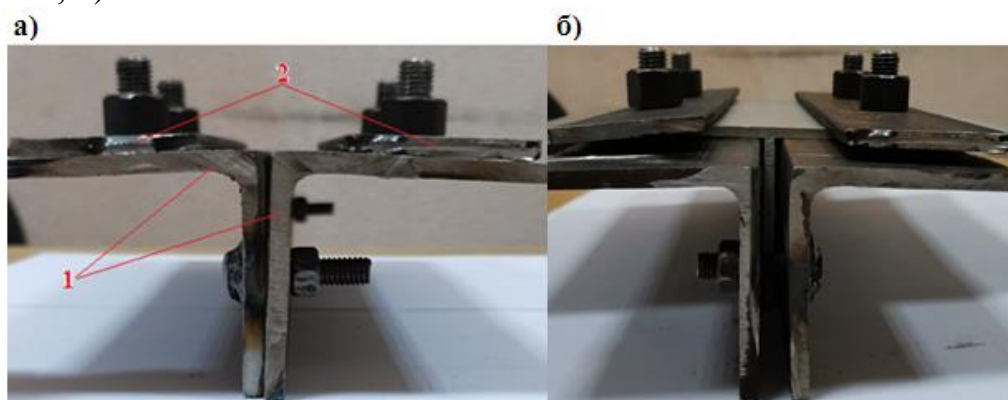
## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приведена актуальность, научная новизна, практическая значимость работы, определены цели и задачи исследования.

**В первой главе** проведён анализ литературы по проблеме СТП. Главными параметрами режима СТП является: конструкция рабочего инструмента, частота вращения инструмента; скорость сварки; угол наклона инструмента; заглубление запящника рабочего инструмента.

Проведён обзор различных способов СТП, оборудования для СТП, методов неразрушающего контроля для поиска дефектов сварных швов.

**Во второй главе** приведена методика экспериментального исследования. Описана разработанная оснастка для выполнения стыковых и тавровых соединений СТП и принцип закрепления деталей в оснастке (рисунок 1, 2).



1 – боковые зажимы; 2 – верхние зажимы

Рисунок 1 - Оснастка для выполнения тавровых соединений СТП (а), закрепление образцов в оснастке (б)

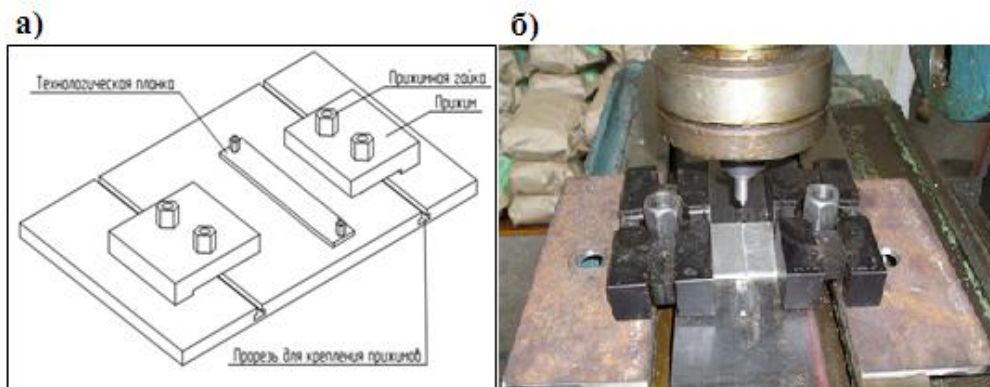


Рисунок 2 - Оснастка для выполнения стыковых соединений СТП (а), закрепление образцов в оснастке (б)

В экспериментальном исследовании использовался универсальный вертикально-фрезерный станок 6К81Ш.

Для определения оптимальной конфигурации рабочего инструмента для СТП тавровых соединений использовали расчеты, взятые из патента RU2418664C1. Разработан и изготовлен рабочий инструмент марки стали P5M6 ГОСТ 19256. Рабочий инструмент представляет собой цилиндр,

диаметром 12 мм и длиной 60 мм, на одном из торцов которого находится усеченный конус длиной 8 мм с резьбовой нарезкой.

В ходе эксперимента СТП стыковых соединений были задействованы 4 конфигурации инструмента, однако наиболее работоспособными оказались только 2 инструмента, остальные инструменты сразу же вышли из строя (сломались сердечники).

Рабочий инструмент №1 представляет собой цилиндр, на одном из торцов которого находится усеченный конус с резьбовой нарезкой. Сердечник рабочего инструмента №2 состоит из набора цилиндров диаметрами 1,2,3,4 мм, высота первых трёх цилиндров, считая от заплечника – 1 мм, четвертого цилиндра – 0.8 мм. Длина сердечника рабочих инструментов 3,8 мм, диаметр заплечника, а соответственно и цилиндра 12 мм, длина рабочего инструмента – 70 мм. Материал рабочего инструмента – конструкционная подшипниковая сталь ШХ 15, с твердостью 750 НВ.



Рисунок 3 – Инструменты для СТП:

а – тавровых соединений; б – стыковых соединений №1; в – стыковых соединений №2

Режимы сварки, использованные в экспериментальном исследовании, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Режимы СТП стыковых и тавровых соединений

Тип соединения	Частота вращения инструмента, $\omega$ , об/мин	Скорость сварки, $V_{св}$ , мм/мин	Угол наклона инструмента, $\alpha$ , град	Заглубление заплечника рабочего инструмента, $h$ , мм
Тавровые	1000	36	0	0,1 – 0,3 мм
Стыковые	2000	12,5	0	0,2

**В третьей главе** приведены результаты исследования процесса выполнения стыковых соединений СТП.

Из-за сложности математического описания процесса распределения температуры при СТП расчет тепловой мощности  $q$  был произведен исходя из полученной опытным путем максимальной температуры по схеме неподвижного линейного источника в пластине (рисунок 4, а), которая составила  $q = 188,8$  кал/сек.

По значению тепловой мощности был произведен расчет распределения температуры в пластине при действии подвижного источника тепла.

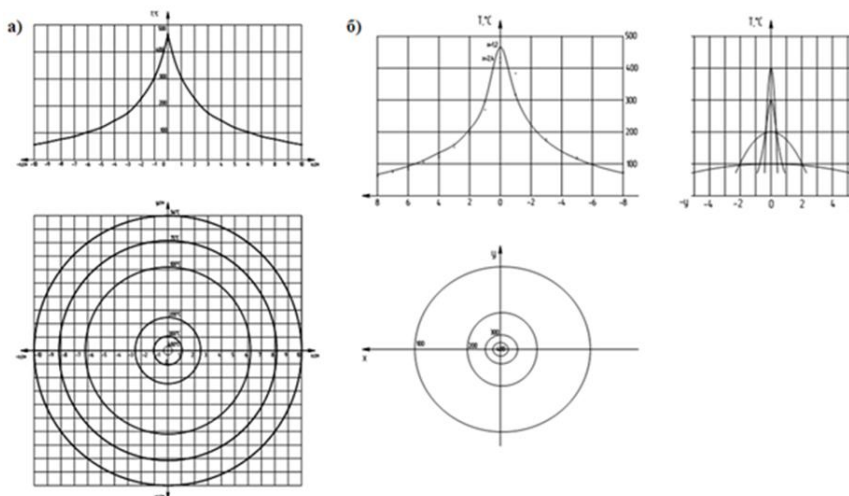


Рисунок 4 – Распределение тепловых полей в пластине В95 при СТП:  
а - 1 этап ( $V=0$ ); б - 2 этап ( $V=const$ )

Максимальная температура составила порядка  $466^{\circ}\text{C}$ , что свидетельствует о пребывании алюминиевого сплава В95 в пластичном состоянии (область предпревращений, так как температура солидус сплава В95 составляет  $500-620^{\circ}\text{C}$ ).

Рентгенограмма образца: Сварной шов (140 мм), выполнен РИ №2. Режимы 1400 об/мин, 35 мм/мин, 3 градуса, вращение по часовой стрелке (рисунок 5).



Рисунок 5 - Рентгенограмма образца

Выход на образце выполнен рваным (без остановки). В начале сварного соединения, практически сразу от места ввода рабочего инструмента на протяжении 36 мм наблюдается полость (несплошность), вероятная причина – большой зазор по причине расхождения кромок в результате заглубления рабочего инструмента и отсутствие параллельности кромок, величина зазора-  $0,5-0,6\text{мм}$ .

В средней части сварного шва на протяжении 40 мм наблюдается темная зона, распространяющаяся вдоль оси шва, шириной 1,2- 1,3 мм,

Причина этого явления – утолщение металла шва на фрезерованной рабочим инструментом поверхности подкладной пластины. Этот эффект, вероятно, не будет влиять на механические свойства сварного соединения и

может быть устранен путем механической обработки поверхности обратной стороны шва.

Замер твердости производился на приборе ТШ-2М с нагрузкой 187.5 кг, путем измерения диаметра отпечатка от вдавливания шарика диаметром 2,5 мм.

Твердость измеряли по схеме: вначале (40 мм от начала «образец 1») и в конце (85 мм от конца) шва с лицевой и обратной стороны шва. Всего исследовано пять сечений. Результаты приведены на рисунке 6.

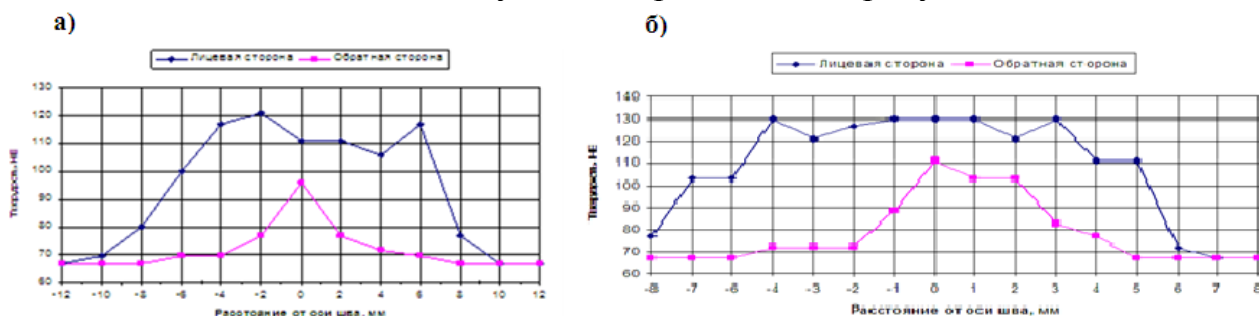


Рисунок 6 - Распределение твёрдости с лицевой и обратной стороны шва:  
а - образца №1; б - образца №2

Механические испытания проводили на разрывной машине Р10. Образцы вырезали по схеме, указанной на рентгенограммах (рисунок 7).

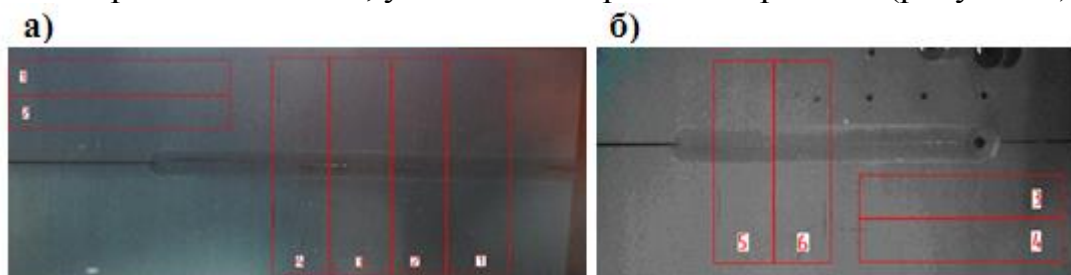


Рисунок 7 - Схема вырезки образцов для механических испытаний:  
а) пластина №1; б) пластина №2

Образец №1 при вырезке разрушился. Результаты механических испытаний образцов №2 - №6 приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты механических испытаний образцов №2 - №6

Номер образца	Предел прочности, Н/м <sup>2</sup>	Примечание
2	274.4	излом по шву
3	284.2	излом по шву
4	196	излом по шву
5	245	излом по шву
6	245.8	излом по шву

У образца №3 (рисунок 8, а) видно, что металл в шве перемешался. Слева видны чёткие очертания зоны перемешивания, напоминающие очертания рабочего инструмента. Справа контуры менее чёткие и более ровные. На микрофотографии виден плакированный слой. Основной металл



имеет вытянутые зёрна (рисунок 8, б), это говорит о том, что пластина получена прокаткой. Зёрна ориентированы вдоль. Видно, что идёт процесс рекристаллизации (рисунок 8, в), о чём свидетельствуют сильно текстурированные, вытянутые зёрна. Также видно, что в переходной зоне идёт измельчение структуры. В металле шва имеются поры, однако большая его часть имеет измельчённую, мелкозернистую структуру, за счёт пластической деформации. Зёрна имеют равноосную, однородную структуру (рисунок 8, г).

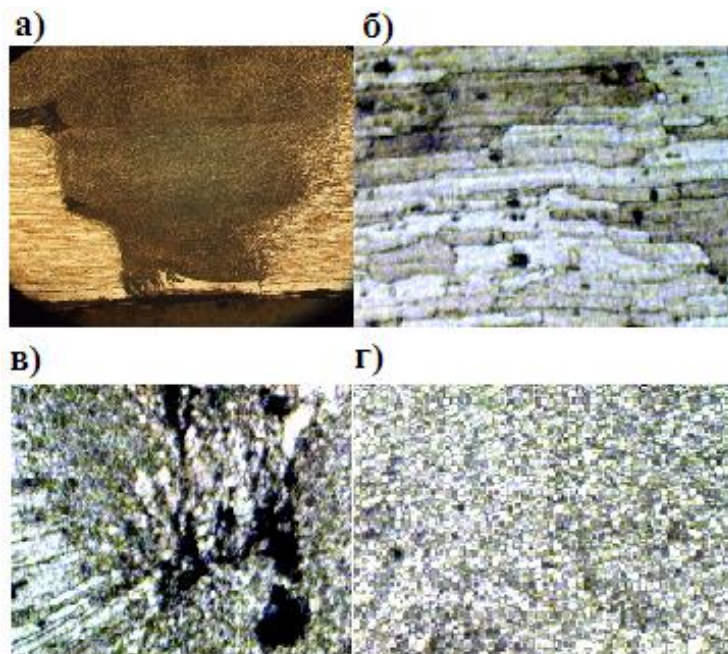


Рисунок 8 – Макро- и микроструктура сварного шва:  
 а – макроструктура сварного шва (x50); б - микроструктура основного металла (x400); в - микроструктура переходной зоны (x400); г - микроструктура металла шва (x 400)

**В четвертой главе** приведены результаты исследования процесса выполнения тавровых соединений СТП. В ходе выполнения эксперимента получено сварное соединение (рисунок 9).

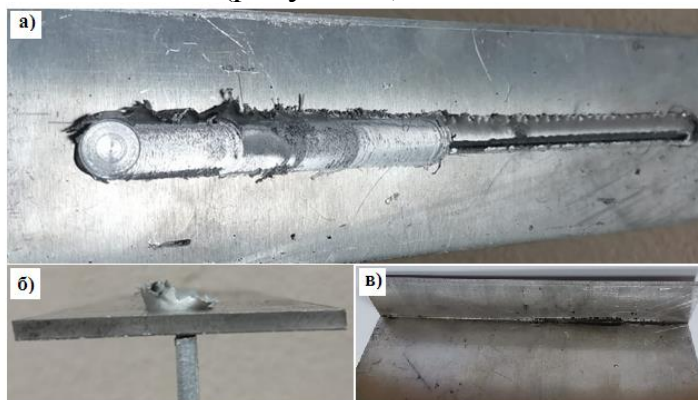


Рисунок 9 - Тавровое соединение, полученных СТП:  
 а – вид сверху; б – вид спереди; в – вид сбоку

При не достаточном касании заплечника с горизонтальной поверхностью (полки) пластины образовался подрез (дефект в виде канавки) (рисунок 10). Механизм образования этого дефекта можно объяснить следующим: пластифицированный рабочим инструментом металл перемещался по резьбе сердечника вверх до заплечника. Отсутствие плотного прижатия заплечника к поверхности полки создавало полость, в которой пластичный металл переносился на кромку противоположную резу.



Рисунок 10 - Подрез (дефект в виде канавки)

Данный дефект устранён погружением рабочего инструмента и более плотным его касанием заплечником. При это наблюдается характерная чешуйчатость поверхности шва и равномерная бороздка слева и справа от шва.

На рисунке 11 показана микроструктура поперечного сечения таврового соединения.

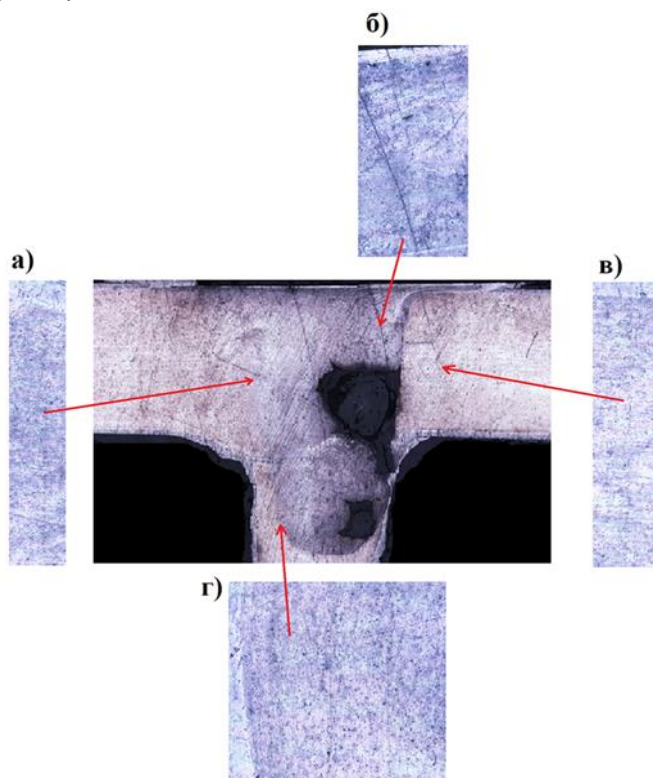


Рисунок 11 – Микроструктура поперечного сечения образца

В целом структурное строение металла шва характерно для СТП: со стороны реза наблюдается четкая граница перехода от основного металла к металлу шва, и размытая граница между металлом шва и кромкой, на которую перемещается пластифицированный металл. Со стороны действия заплечника наблюдается перемешивание плакирующего слоя поверхности

стенки с металлом шва. Также наблюдается смещение рабочего инструмента 0,5 мм относительно оси соединения в сторону срезаемой кромки, что можно объяснить усилиями реза и перемещаемым объёмом пластифицированного металл к противоположной кромке. Такое смещение необходимо учитывать в технологическом процессе СТП.

Образованная при сварке таврового соединения галтель перехода от стенки к полке сохраняет целостность плакированного слоя соединяемых образцов.

**В пятой главе** описан метод физического моделирования. Для определения оптимальной конфигурации рабочего инструмента и режимов сварки проводилось моделирование СТП на пластилине (ОСТ 6-15-394-81), который используется при моделировании процесса прокатки сортовых профилей.

Заготовки были выполнены в виде комбинированных брикетов, состоящих из четырех пластинок разных по цвету (рисунок 12, а). Высота, ширина и длина модели соответственно 20x50x100 мм. Так как процесс перемешивания происходит только в центральной части брикета, его поместили в швеллер, который закрепили на столе фрезерного станка 6К81Ш (рисунок 12, б).



Рисунок 12 – Процесс подготовки образцов:

а – брикет из четырех пластинок разных по цвету; б – укладка брикета в швеллер

Для моделирования были изготовлены деревянные рабочие инструменты: с цилиндрическим штырём (рисунок 13, а), с цилиндрическим скруглённым штырём (рисунок 13, б), с серией цилиндров (рисунок 13, в), с винтовой нарезкой (рисунок 13, г) (которую имитировала алюминиевая проволока, намотанная на цилиндрический штырь), инструмент со спиральной пластиной (рисунок 13, д). Диаметр заплечника всех рабочих инструментов 40 мм, номинальный диаметр стержня 12 мм, а его длина составляет 15 мм.



Рисунок 13 - Рабочий инструмент для физического моделирования:

а - с цилиндрическим штырём; б – с цилиндрическим скруглённым штырём; в - с серией цилиндров; г - с винтовой нарезкой; д - со спиральной пластиной

В результате моделирования пластического течения материала, всеми инструментами, кроме последнего, можно было наблюдать, что происходило вытеснение поверхностного слоя пластилина. Вероятная причина – не было горизонтальной плоскостности, то есть толщина пластилина превышала высоту буртов рабочих инструментов, позади которых происходило его перемешивание. Вследствие чего чётко просматривалась фрезерованная поверхность. В отверстии выхода рабочего инструмента было видно, что одна его половинка заполнена одними, а вторая – другим цветами. В основании, можно было наблюдать не сквозное отверстие. Во всех образцах, и в продольном, и в поперечном разрезах, по направлению движения инструмента можно было наблюдать, что перемешивания, практически не происходило, так как видны были чёткие границы между цветами и наблюдалась полость. Материал около неё имел чешуйчатообразную и рваную поверхность.

Видно, что материал перед инструментом перемещался в направлении его вращения, а также из корневых зон в верхние. Участки имеют форму, вытянутую в направлении вращения инструмента и соответственно, в направлении пластического течения материала.

### **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ**

1. Большое количество публикаций, как зарубежных, так и отечественных, характеризует огромный интерес к процессу СТП как наиболее актуальный при разработке технологических процессов создания изделий из конструкционных материалов, ограниченно свариваемых или не свариваемых сваркой плавлением.

2. Установлена возможность СТП тавровых соединений путем сквозного перемешивания металла полки и некоторого объема металла торца стенки.

3. Физическое моделирование на пластилиновых моделях позволяет наблюдать процесс перемешивания материала и даёт возможность убедиться, как конфигурация рабочего инструмента влияет на процесс пластического течения и массопереноса материала.

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

1. Барсукова Н.В., Бахматов П.В. Сварка трением с перемешиванием // МОЛОДЁЖЬ И НАУКА: АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ материалы II Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых – 2019. – С. 30-32.

2. Барсукова Н.В., Бахматов П.В. Метод физического моделирования процесса сварки трением с перемешиванием // МОЛОДЁЖЬ И НАУКА: АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ материалы II Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых – 2019. – С. 32-35.